Freistaat Thüringen
Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft

Abschlussbericht

Eignung und Optimierung von Halmgutpresslingen für kleine und mittlere Feuerungsanlagen

Projekt-Nr.: 99.18

FKZ: 22004207 bzw. 07NR042

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Langtitel:	**Eignung und Optimierung von Halmgutpresslingen für kleine und mittlere Feuerungsanlagen**
Kurztitel:	Halmgutkompaktate
Projektleiter:	Dipl.-Ing. Thomas Hering
Abteilung:	Pflanzenproduktion und Agrarökologie
Abteilungsleiter:	stellv. Dipl.-Ing. agr. Reinhard Götz
Laufzeit:	08/2010 bis 12/2014
Zuwendung durch:	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. als Projektträger des BMEL
Bearbeiter:	Dipl.-Ing. Thomas Hering Dipl.-Ing. (FH) Sonja Kay Dipl.-Ing. Tobias Tratz Thomas Labuhn Klaus Kochanek Manuela Eichhorn Dr. Carolin Thoms

Dezember 2014

Dr. Armin Vetter
(Stellv. Präsident)

Thomas Hering
(Projektleiter)

Copyright:
Diese Veröffentlichung ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die des Nachdrucks von Auszügen und der fotomechanischen Wiedergabe sind dem Herausgeber vorbehalten.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis I
Tabellenverzeichnis VIII
1. Einleitung und Zielstellung 1
2. Stand der Technik in der Halmgutkompaktierung 2
2.1. Methodik 2
2.2 Ergebnisse 3
2.2.1 Angaben zu den Kompaktieranlagen 3
2.2.2 Angaben zur Produktion 3
2.2.3 Angaben zur Verwertung 6
2.3 Zusammenfassung 7
3. Kompaktierungsversuche und Analyse der Produkte 7
3.1 Auswahl der Kompaktieranlagen 7
3.2 Verfahren der Kompaktierung 8
3.2.1 Apoldaer Biomassewerk (ABW) 8
3.2.2 PCM Greenenergy 9
3.2.3 Ecoworxx 10
3.2.4 Pusch AG 10
3.3 Qualitative Analyse der Kompaktate 11
3.3.1 Ergebnisse der physikalisch-mechanischen Analyse 12
3.3.2 Ergebnisse der chemisch-stofflichen Analyse 17
4. Verbrennungsversuche zur Emissionsmessung 21
4.1 Rechtliche Regelungen zu den Emisssionsgrenzwerten 21
4.2 Voruntersuchungen an einem Prototyp 22
4.3 Beschreibung der eingesetzten Feuerungstechnologien 23
4.3.1 Geltungsbereich der 1. BImSchV – TWIN HEAT M20i 23
4.3.2 Geltungsbereich der 4. BImSchV – Schmid UTSW 360 24
4.4 Voruntersuchungen an den Feuerungsanlagen 26
4.5 Methodik der Verbrennungsversuche 28
4.6 Ergebnisse der Messreihen 31
4.6.1 Geltungsbereich der 1. BImSchV – TWIN HEAT M20i: 31
4.6.2 Geltungsbereich der 4. BImSchV – Schmid UTSW 360: 40
4.7 Weitere Feldmessungen 56
4.7.1 Standort Küllstedt 56
4.7.2 Standort Nordhorn 58
4.7.3 Standort Hainchen (Schkölen) 59
4.7.4 Standort Leutewitz 61

4.8 Zusammenfassung und Fazit 62
5. Relevante Ergebnisse von Seiten Dritter - Darstellung der aktuellen Informationsrecherchen nach Nr. 2.1 BNBest-BMBF 98.....63
6. Literatur.....64
Anhang I: Fragebogen zur Halmgut-Kompaktierung.....65
Anhang II: Anbieter von Kompaktierungsdienstleistungen.....67
Anhang III: Hersteller bzw. Anbieter von Pellet- und Brikettpressen 71
Anhang IV: Kontaktadressen der Kompaktierbetriebe in den Praxisversuchen.....73
Anhang V: Bilder der untersuchten Kompaktate 73
Anhang VI: Ergebnisse der chemischen Inhaltsstoffanalyse der Kompaktate.....75
Anhang VII: Ergebnisse der chemischen Inhaltsstoffanalyse der Kompaktate (Brennstoffe).76
Anhang VIII: Ascheschmelztemperaturen der Kompaktate.....77
Anhang IX: Hersteller der im Projekt genutzten Heizanlagen.....78
Anhang X: Übersicht de Messungen im Rahmen der Voruntersuchungen.....79
Anhang XI: Untersuchungen mit dem Kooperationspartner TLUG.....80
Anhang XII: Probenahmeschema UTSW-360 81
Anhang XIII: Probenahmeschema M20i 82
Anhang XIV: Ergebnisübersicht der Emissionsmessungen 83

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Pressentypen bei Kompaktieranlagen 3

Abb. 2: Anteil mobiler und stationärer Modelle bei Kompaktierungsanlagen 3

Abb. 3: Spektrum der eingesetzten Rohstoffe für Pellets, Briketts und sonstigen Kompaktaten 4

Abb. 4: Produktionsmengen in t/a der eingesetzten Rohstoffe 4

Abb. 5: Vergleich der Rohstoffeinkaufs- und Produktverkaufsradien 5

Abb. 6: Inbetriebnahme der Pelletpressen 5

Abb. 7: Leistung der Pelletpressen in t/h bei der Verarbeitung von Stroh 6

Abb. 8: Verwertung der Pellets (links) und der Briketts (rechts) 6

Abb. 9: Mobile Pelletieranlage MPA 1000 der Firma PCM auf Containerchassis 9

Abb. 10: Leistungsstärkste Pelletieranlage PM 75 E (links) und Einsteigermodell PM 3.0 E der Firma Ecoworxx 10

Abb. 11: Schematische Darstellung der Pelletiereinheit innerhalb des von der Firma PUSCH angewendeten Pelletierverfahrens 11

Abb. 12: Vergleich der Schwankungsbreiten der Durchmesser (D) der Pellets in Abhängigkeit der Pelletiertechnologie, der Einstellungen und des eingesetzten spezifischen Halmgutmaterials im Vergleich zu zertifizierten ENplus Holzpellets 14

Abb. 13: Vergleich der Schwankungsbreiten der Länge (L) der Pellets in Abhängigkeit der Pelletiertechnologie, der Einstellungen und des eingesetzten spezifischen Halmgutmaterials im Vergleich zu zertifizierten ENplus Holzpellets 15

Abb. 14: Schwankungsbreiten des Abriebs der verschiedenen Pelletvarianten in Abhängigkeit von der Pelletiertechnologie 16

Abb. 15: Vergleich der Ascheschmelzpunkte (DIN CEN/TS 15370-1) der bei den Verbrennungsversuchen eingesetzten Halmgutbrennstoffe [Temperaturen am Beginn der Schrumpfung (SST), Erweichungstemperatur (DT), Halbkugeltemperatur (HT) und Fließtemperatur (FT) im oxidierten Zustand] 20

Abb. 16: Prototyp einer neuartigen Kleinfeuerungsanlage (< 50 kW) für die Verbrennung von Halmgütern 22

Abb. 17: Twinheat Farmfire 29 kW (links, [1]) und Feldmessungen am TWIN HEAT M 20i am Standort Dornburg (Foto rechts: Th. Hering, TLL) 24

Abb. 18: Schematischer Aufbau einer UTSW- Kesselserie (links, [2]) und Feldmessungen am UTSW 360 in Dornburg (Rechts, Foto: Th. Hering, TLL) 25

Abb. 19: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Winterweizenbruchkörnern (HK BK (1), 05.03.2012); mittlere Nennwärmeleistung 307 kW; Erhebung von Praxisdaten

am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 26

Abb. 20: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (HK WWSP, 07.03.2012); mittlere Nennwärmeleistung 259 kW; Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 27

Abb. 21: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Agrarpappelhackschnitzeln (HK AHPaHS, 08.03.2012); mittlere Nennwärmeleistung 280 kW; Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen.....27

Abb. 22: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Industrieholzpellets bzw. Waldrestholzhackschnitzeln (HK IHP ABW / HS SF-J, 09.03.2012); mittlere Nennwärmeleistung 328 kW; Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen.....28

Abb. 23: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_X) und Schwefeldioxid (SO_2) bei der Verbrennung von Industrieholzpellets (HK IHP, 18.04.2012); mittlere Nennwärmeleistung 23 kW; Erhebung von Praxisdaten am M 20i, Fa. TwinHeat; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 32

Abb. 24: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Industrieholzpellets (HK IHP, 18.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am M 20i, Fa. TwinHeat; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen. 32

Abb. 25: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_X) und Schwefeldioxid (SO_2) bei der Verbrennung von Landschaftspflegeheupellets (HK LPHP, 13.04.2012); mittlere Nennwärmeleistung 25 kW; Erhebung von Praxisdaten am M 20i, Fa. TwinHeat; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen.....33

Abb. 26: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Landschaftspflegeheupellets (HK LPHP, 13.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am M 20i, Fa. TwinHeat; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen.....34

Abb. 27: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_X) und Schwefeldioxid (SO_2) bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (WWSP PTG 05, 17.04.2012); mittlere Nennwärmeleistung 24 kW; Erhebung von Praxisdaten am M 20i, Fa. TwinHeat; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 34

Abb. 28: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (WWSP PTG 05, 17.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am M 20i, Fa. TwinHeat; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 35

Abb. 29: Abhängigkeit der Stickoxidkonzentration vom Stickstoffgehalt im Brennstoff (HK IHP, 18.04.2012; HK LPHP, 13.04.2012 und WWSP PTG 05, 17.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am M 20i, Fa. TwinHeat; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 36

Abb. 30: Abhängigkeit der Schwefeldioxidkonzentration vom Schwefelgehalt im Brennstoff (HK IHP, 18.04.2012; HK LPHP, 13.04.2012 und WWSP PTG 05, 17.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am M 20i, Fa. TwinHeat; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 37

Abb. 31: Abhängigkeit der Chlorwasserstoffkonzentration vom Chlorgehalt im Brennstoff (HK IHP, 18.04.2012; HK LPHP, 13.04.2012 und WWSP PTG 05, 17.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am M 20i, Fa. TwinHeat; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 37

Abb. 32: Abhängigkeit der Rohgasstaubkonzentration vom Rohaschegehalt im Brennstoff (HK IHP, 18.04.2012; HK LPHP, 13.04.2012 und WWSP PTG 05, 17.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am M 20i, Fa. TwinHeat; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen. 38

Abb. 33: Abhängigkeit der Rohgasstaubkonzentration vom Gehalt aerosolbildender Elemente im Brennstoff (HK IHP, 18.04.2012; HK LPHP, 13.04.2012 und WWSP PTG 05, 17.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am M 20i, Fa. TwinHeat; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 38

Abb. 34: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_X) und Schwefeldioxid (SO_2) bei der Verbrennung von Industrieholzpellets (HK IHP, 14.03.2012); mittlere Nennwärmeleistung 314 kW; Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 41

Abb. 35: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Industrieholzpellets (HK IHP, 14.03.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 41

Abb. 36: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_X) und Schwefeldioxid (SO_2) bei der Verbrennung von Winterweizenbruchkörnern (HK BK(2), 28.03.2012); mittlere Nennwärmeleistung 316 kW; Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 42

Abb. 37: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Winterweizenbruchkörnern (HK BK(2), 28.03.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 42

Abb. 38: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_X) und Schwefeldioxid (SO_2) bei der Verbrennung von Winterweizenbruchkörnern (HK BK(2), 24.04.2012); mittlere Nennwärmeleistung 318 kW; Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen.....43

Abb. 39: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Winterweizenbruchkörnern (HK BK(2), 24.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 43

Abb. 40: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_X) und Schwefeldioxid (SO_2) bei der Verbrennung von Winterweizenbruchkörnern (HK BK(2), 25.04.2012); mittlere Nennwärmeleistung 324 kW; Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen.....44

Abb. 41: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Winterweizenbruchkörnern (HK BK(2), 25.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 44

Abb. 42: Zusammenfassung der Konzentrationen von Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid und Stickoxiden bei der Verbrennung von Winterweizenbruchkörnern (HK BK(2), 28.03.2012; HK BK(2), 24.04.2012; HK BK(2), 25.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen.....45

Abb. 43: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_X) und Schwefeldioxid (SO_2) bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (HK WWSP(PCM), 03.04.2012); mittlere Nennwärmeleistung 277 kW; Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen.....45

Abb. 44: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (HK WWSP(PCM), 03.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 46

Abb. 45: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_X) und Schwefeldioxid (SO_2) bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (HK WWSP(PCM), 04.04.2012); mittlere Nennwärmeleistung 285 kW; Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa.

Schmid AG; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen.....46

Abb. 46: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (HK WWSP(PCM), 04.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 47

Abb. 47: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_X) und Schwefeldioxid (SO_2) bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (WWSP PTG 05, 26.04.2012); mittlere Nennwärmeleistung 334 kW; Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen.....47

Abb. 48: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (WWSP PTG 05, 26.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 48

Abb. 49: Zusammenfassung der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (HK WWSP(PCM), 03.04.2012; HK WWSP(PCM), 04.04.2012; WWSP PTG 05, 26.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 48

Abb. 50: Vergleich der Staubkonzentration im Roh- und Reingas der Brennstoffe (HK BK(2), 28.03., 24.04. und, 25.04.2012; HK WWSP(PCM), 03.04. und 04.04.2012; WWSP PTG 05, 26.04.2012; HK IHP, 14.03.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Messwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 50

Abb. 51: Vergleich der HCl-Konzentration im Roh- und Reingas der Brennstoffe (HK BK(2), 28.03., 24.04. und, 25.04.2012; HK WWSP(PCM), 03.04. und 04.04.2012; WWSP PTG 05, 26.04.2012) Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Messwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen.....51

Abb. 52: Gegenüberstellung der diskontinuierlich gemessenen Dioxin-/ Furangehalte mit der kontinuierlich gemessenen Konzentration an Kohlenmonoxid für den Brennstoff Winterweizenbruchkörner (HK BK(2), 28.03., 24.04. und 25.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Fünfstunden-/Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 52

Abb. 53: Gegenüberstellung der diskontinuierlich gemessenen Dioxin-/Furangehalte mit der kontinuierlich gemessenen Konzentration an Kohlenmonoxid für den Brennstoff Winterweizenstrohpellets (HK WWSP(PCM), 03., 04.04.2012; WWSP PTG 05, 26.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Fünfstunden-/Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 52

Abb. 54: Abhängigkeit der Stickoxidkonzentration vom Stickstoffgehalt im Brennstoff (HK WWSP (PCM), 03.04. und 04.04.2012; WWSP PTG 05, 26.04.2012; HK IHP, 14.03.2012; HK BK(2), 28.03., 24.04. und 25.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen.....53

Abb. 55: Abhängigkeit der Schwefeldioxidkonzentration vom Schwefelgehalt im Brennstoff (HK WWSP (PCM), 03.04. und 04.04.2012; WWSP PTG 05, 26.04.2012; HK IHP, 14.03.2012; HK BK(2), 28.03.,24.04.und, 25.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen.....54

Abb. 56: Abhängigkeit der Chlorwasserstoffkonzentration vom Chlorgehalt im Brennstoff (HK WWSP (PCM), 03.04. und 04.04.2012; WWSP PTG 05, 26.04.2012; HK BK(2), 28.03., 24.04. und 25.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 54

Abb. 57: Abhängigkeit der Rohggasstaubkonzentration vom Rohaschegehalt im Brennstoff (HK WWSP (PCM), 03.04. und 04.04.2012; WWSP PTG 05, 26.04.2012; HK IHP, 14.03.2012; HK BK(2), 28.03., 24.04. und, 25.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen.....55

Abb. 58: Abhängigkeit der Rohgasstaubkonzentration vom Gehalt aerosolbildender Elemente im Brennstoff (HK WWSP(PCM), 03.04. und 04.04.2012; WWSP PTG 05, 26.04.2012; HK IHP, 14.03.2012; HK BK(2), 28.03., 24.04. und 25.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen.....55

Abb. 59: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Gerstenstroh am 26.02.2013; Erhebung von Praxisdaten an der Linka-Anlage; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen.....56

Abb. 60: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Gersten- bzw. Weizenstroh am 27.02.2013; Erhebung von Praxisdaten an der Linka-Anlage; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen.....57

Abb. 61: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Gerstenstroh sowie Gersten- bzw. Weizenstroh für die Messreihen am 26.02. und 27.02.2013; Erhebung von Praxisdaten an Linka-Anlage; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 57

Abb. 62: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_X) und Schwefeldioxid (SO_2) bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (Firma Kaliro, 7 mm) am 26. und 27.06.2013; Erhebung von Praxisdaten am Biomassekessel Typ REH500eco (WERKSTÄTTEN heating-systems GmbH); Messreihe 2, angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 58

Abb. 63: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (Firma Kaliro, 7 mm); 26.-27.06.2013; Erhebung von Praxisdaten am Biomassekessel Typ REH500eco (WERKSTÄTTEN heating-systems GmbH); angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 59

Abb. 64: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden (NO_X bei der Verbrennung von Weizenstroh am 05.12.2013; Erhebung von Praxisdaten am Biomassekessel (Firma Nestro Lufttechnik GmbH); Messreihe 1, angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 60

Abb. 65: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Weizenstroh am 27.11., 29.11. und 05.12.2013; Erhebung von Praxisdaten am Biomassekessel (Firma Nestro Lufttechnik GmbH); angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 60

Abb. 66: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden (NO_X bei der Verbrennung von Gerstenkörnern (Siebabgänge der Saatgutproduktion) am 13.02.2014; Erhebung von Praxisdaten am Ökotherm Compact C3 324 kW_{FWL}; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 61

Abb. 67: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Gerstenkörnern (Siebabgänge der Saatgutproduktion) am 13.02.2014; Erhebung von Praxisdaten am Ökotherm Compact C3 324 kW_{FWL}; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen 62

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Für die Praxisversuche ausgewählte Kompaktathersteller 7

Tab. 2: Übersicht der von der Firma Ecoworxx angebotenen Pelettieranlagen 10

Tab. 3: Übersicht zu den Untersuchungsproben 11

Tab. 4: Schüttdichten der hergestellten Kompaktate (n = 3) 13

Tab. 5: Durchmesser (D) und Länge (L) der erzeugten Briketts aus dem Referenzrohstoff Winterweizenstroh 15

Tab. 6: Normative Anforderungen zu chemischen Inhaltsstoffen nach DIN EN 14961-6 – Tabelle 1 17

Tab. 7: Chemische Inhaltsstoffe der Vergleichsbrennstoffe für die normativen Anforderungen 18

Tab. 8: Informative Anforderungen der chemischen Inhaltsstoffe nach DIN EN 14961-6 – Tabelle 1 18

Tab. 9: Chemische Inhaltsstoffe der Vergleichsbrennstoffe für die informativen Anforderungen 19

Tab. 10: Emissionsgrenzwerte der 1. BImSchV für Halmgutfeuerungsanlagen nach BMUB (2010) 21

Tab. 11: Grenzwerte für Halmgutfeuerungen nach TA Luft (BMUB, 2002) 22

Tab. 12: Emissionsmessungen an einem Prototyp einer neuartigen Kleinfeuerungsanlage .23

Tab. 13: Vergleich von verbrennungsrelevanten Parametern der Brennstoffproben und Emissionen an der Anlage TWIN HEAT M20i 35

Tab. 14: Vergleich von verbrennungsrelevanten Parametern der Brennstoffproben und Emissionen an der Anlage Schmid UTSW 360 49

1. Einleitung und Zielstellung

Auf dem Brennstoffmarkt sind Holzpellets etabliert und deren Nachfrage steigt kontinuierlich. Allerdings sind die Brennstoffressourcen aus Holz begrenzt. Eine Alternative stellen Pellets und Briketts aus Reststoffen der Landwirtschaft und Landschaftspflege dar. Weiser et al. (2014) hat für Deutschland ein nachhaltiges Strohpotenzial von 8 bis 13 Mio. t/a berechnet mit einem stabilen Minimalwert von 7,3 Mio. t/a über einen Zeithorizont bis zum Jahr 2020.

Eine Pelletierung von Halmgut bietet Vorteile hinsichtlich der Energiedichte, Logistik, Dosierung und Normierung. Allerdings fallen zusätzliche Kosten für die Pelletierung an (Neumann, 2007). Diese können sich auf 60 bis 100 Euro/t Pelletierkosten belaufen, zusätzlich zu 50 bis 60 Euro/t Strohbereitstellungskosten (Hering et al., 2005). In den zurückliegenden Jahren gab es eine kontinuierliche Entwicklung der Pelletier- und Brikettiertechnologie für Halmgüter, welche mittlerweile zu einem breiten Angebot von Kompaktierungsverfahren geführt hat.

Neben den rechtlichen Rahmenbedingungen in Deutschland für Strohfeuerungsanlagen gibt es allerdings auch qualitative Ursachen warum Pellets und Briketts aus landwirtschaftlichen Reststoffen insbesondere Halmgütern noch unzureichend auf dem Brennstoffmarkt vertreten sind. Die verbrennungsrelevanten Eigenschaften von Halmgütern zeichnen sich zwar durch einen mit Holz vergleichbaren Heizwert von ca. 17 MJ/kg_{atro} und einen zum Erntezeitpunkt geringen Wassergehalt von ca. 15 % aus, allerdings stellen der erhöhte Ascheanfall von ca. 6 – 8 %, die geringen Ascheerweichungstemperaturen von etwa 700 – 800 °C sowie die hohen Anteile an emissionsrelevanten Inhaltsstoffen wie Schwefel und Chlor besondere Anforderungen an die Verbrennungstechnik. Die Tauglichkeit für bestimmte Feuerungstechnologien muss im Einzelfall erst nachgewiesen werden.

Hering und Peisker (2009) konnten feststellen, dass die unterschiedliche Aufbereitung eines Referenzbrennstoffes (Winterweizenstroh) als Häcksel oder Pellets zu völlig unterschiedlichen Emissionswerten führen kann. Die Emissionsgrenzwerte bei der Verbrennung von nachwachsenden Rohstoffen (Halmgut, Holz) werden in Deutschland durch das Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG) und seine Verordnungen geregelt. So beinhaltet die 1. Bundesimmissionsschutzverordnung (1. BImSchV) für genehmigungsfreie Feuerungsanlagen von 4 bis 100 kW (kleiner Leistungsbereich) detaillierte Festlegungen zur Beschickung (z.B. automatische Zuführung), zur Typenprüfung der Kessel sowie brennstoffspezifische Emissionsgrenzwerte. Bei Einsatz von Halmgütern im Leistungsbereich von Feuerungsanlagen von 100 kW bis 1000 kW (mittlerer Leistungsbereich) finden die Regelungen der 4. Bundesimmissionsschutzverordnung (4. BImSchV) und der technischen Anleitung für Luftreinhaltung (TA Luft) Anwendung und erfordern je Anlage eine individuelle Genehmigung. Dazu kommen erhöhte Aufwendungen bei der Materialwahl der Feuerung, Kosten für die Erteilung und Überwachung der Genehmigung etc. und beeinflussen damit die Etablierung von Halmgütern auf dem Brennstoffmarkt. Im Gegensatz zur Holzverbrennung

gibt es momentan noch sehr wenige Anbieter für die Verbrennung von Halmgut, die die Anforderungen hinsichtlich Funktionalität, Wirtschaftlichkeit und Immissionsschutz ausreichend erfüllen. Gerade neue Konversionstechnologien müssen ihre Eignung noch im Dauerbetrieb nachweisen. Augenmerk sollte hier auf dem Korrosionsverhalten liegen. Dazu sind neutrale Feldtest unabdingbar (Hering, 2007b). Korrosionserscheinungen in Feuerungsanlagen treten im Zusammenhang mit Taupunktunterschreitungen auf, weshalb auf die Brennstoffzuführung, den Wärmetauscher sowie das Abgassystem geachtet werden sollte (Peisker et al., 2007),

Ziel des Projektes „Eignung und Optimierung von Halmgutpresslingen für kleine und mittlere Feuerungsanlagen“ war zunächst die Darstellung des aktuellen Standes der Technik im Bereich der Halmgutkompaktierung und ein Vergleich der Pelletiertechnik an einem Referenzbrennstoff und weiteren Vergleichsbrennstoffen. Schwerpunkt des Projektes war allerdings das Emissionsverhalten von Halmgutpresslingen in Anlagen unterschiedlicher Leistungsklassen und Verbrennungstechnologien sowie die Prüfung der Genehmigungsfähigkeit von Halmgutfeuerungsanlagen durch Feldtests (Praxismessungen). Nach der Etablierung einer Kleinfeuerungsanlage und der Erstellung der Messstrecken an einer kleinen und mittleren Feuerungsanlage am Standort Dornburg wurden umfangreiche Praxismessungen mit unterschiedlichen Brennstoffen durchgeführt.

2. Stand der Technik in der Halmgutkompaktierung

2.1. Methodik

Mittels Literatur- und Marktrecherchen wurden zunächst Produzenten und Händler von Halmgutkompaktaten eruiert. Mit dem Ziel die aktuell am Markt befindlichen Technologien zur Kompaktierung und die derzeitigen stofflichen und energetischen Vermarktungswege der Kompaktate darzustellen, wurde ein Fragebogen entwickelt (Anhang I). Die Schwerpunkte der Befragung lagen auf:

- Angaben zur Kompaktierungsanlage (Technologie, Leistung)
- Angaben zur Produktion (Mengen, eingesetzte Materialien, Hilfsstoffe)
- Angaben zur bisherigen Verwertung der Kompaktate (Absatzmärkte)

Der Fragebogen wurde zunächst digital an ca. 150 Anbieter von Kompaktierungsdienstleistungen und Händler in Deutschland verschickt (Anhang II). Leider war die Rücklaufquote so gering, dass ausgewählte Akteure gezielt telefonisch befragt wurden. Insgesamt konnten 33 Fragebögen für die Auswertung verwendet werden. In einem zweiten Schritt wurde die Recherche um Hersteller bzw. Anbieter von Pellet- und Brikettpressen erweitert (Anhang III).

2.2 Ergebnisse

2.2.1 Angaben zu den Kompaktieranlagen

Von den 33 untersuchten Kompaktatherstellern betreiben 31 eine oder mehrere Pelletpressen, sechs arbeiten mit einer Brikettpresse, zwei mit einer Kanalballenpresse und je einer mit einer Volumenpresse und einer Langgutpresse. (Abb. 1).

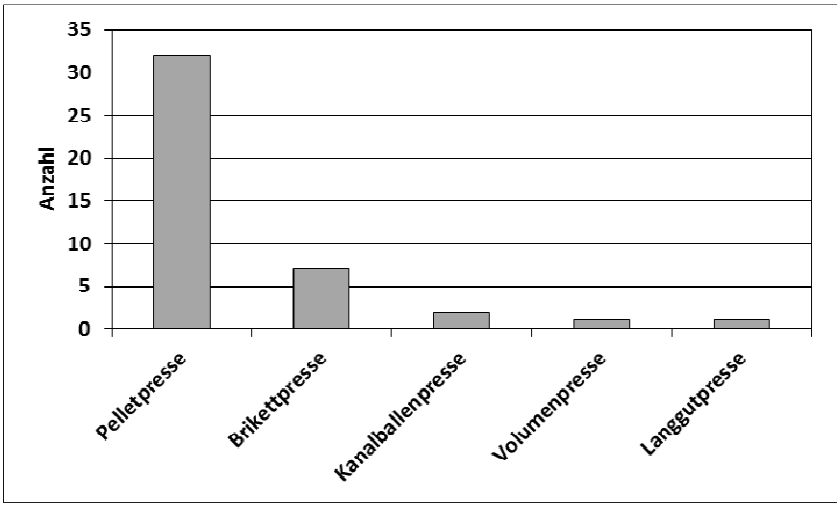


Abb. 1: Pressentypen bei Kompaktieranlagen

Bei nahezu 90 % der Anlagen handelt es sich um stationäre Modelle, lediglich vier Anlagen (11 %) können mobil betrieben werden (Abb. 2).

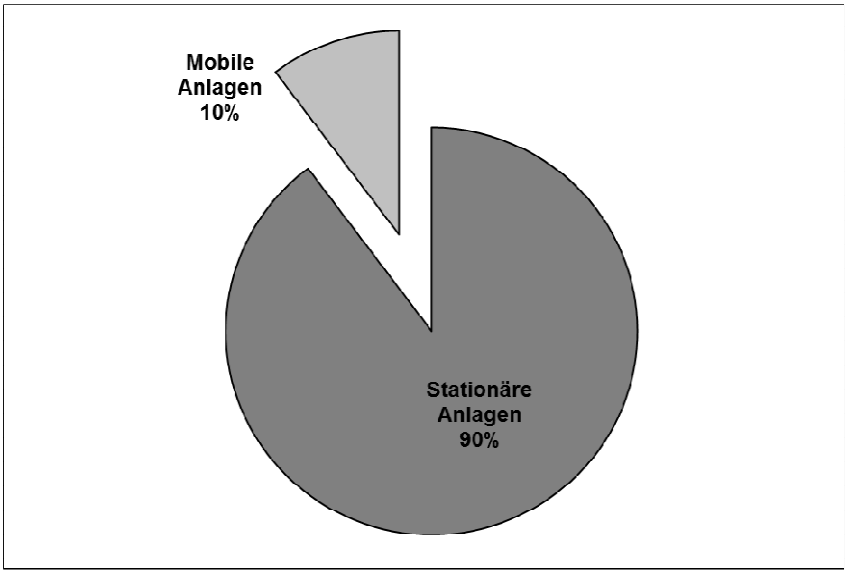


Abb. 2: Anteil mobiler und stationärer Modelle bei Kompaktierungsanlagen

2.2.2 Angaben zur Produktion

In den in dieser Studie untersuchten Kompaktierungsanlagen wird ein breites Spektrum an Rohstoffen verarbeitet. So pelletieren 22 Hersteller Heu bzw. Gras, 18 verarbeiten Stroh, weitere 7 Holz und 6 Miscanthus. Bei den Briketttherstellern verwenden jeweils 5 Betreiber Holz und Miscanthus, 2 Betreiber Heu bzw. Gras und 4 Betreiber Stroh (Abb. 3).

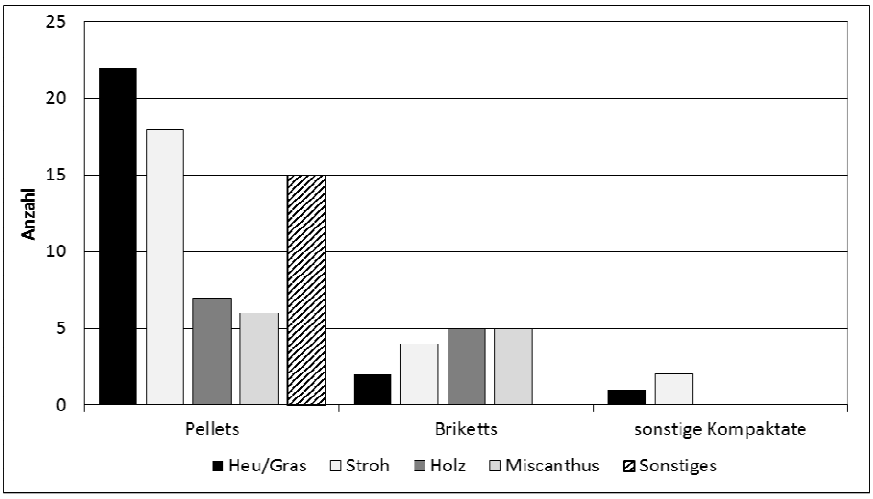


Abb. 3: Spektrum der eingesetzten Rohstoffe für Pellets, Briketts und sonstigen Kompaktaten

Mit einer erfassten Produktionsmenge von ca. 179.000 t/a kompaktieren die Hersteller schwerpunktmäßig Heu bzw. Gras. Kompaktate aus Stroh werden in einem Umfang von etwa 58.000 t/ a, aus Holz mit ca. 27.500 t/ a und aus Miscanthus mit ca. 24.400 t/ a hergestellt (Abb. 4). Da zahlreiche Hersteller keine Angaben über ihre Produktionskapazitäten machen wollten, muss von deutlich höheren Verarbeitungsmengen in Deutschland ausgegangen werden.

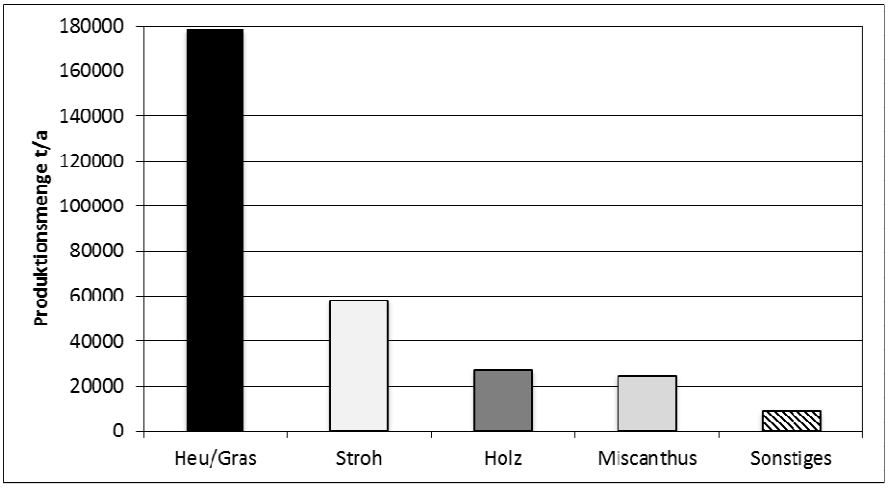


Abb. 4: Produktionsmengen in t/a der eingesetzten Rohstoffe

In der Rubrik „Sonstiges“ wurden in den Fragebögen die Materialien Rapsstroh, Getreide, Getreideausputz, Mais, Grünschnitt, Thymianstroh, Majoranstroh, Biertreber, Gärreste und Papier angegeben.

Einblicke zur Rohstoffbeschaffung bzw. zur Vermarktung lieferten die Antworten zur Frage nach den Einkaufs- und Verkaufsradien. So beziehen die Kompaktierer ihre Rohstoffe in den meisten Fällen aus dem näheren Umkreis um den Produktionsstandort, nahezu 40 % beziehen die Rohstoffe aus einem Umkreis von maximal 50 km und lediglich 6 % haben ein Einzugsgebiet von mehr als 200 km. Das Verkaufsgebiet der Produkte erstreckt sich auf einen Umkreis bis zu 500 km und mehr. Die Pelletierungsprodukte werden in Deutschland, in Eu-

ropa und z. T. weltweit vertrieben. Etwa 25 % der Hersteller gaben an, dass sich ihr Absatzmarkt hauptsächlich auf einen Umkreis bis zu 200 km erstreckt (Abb. 5).

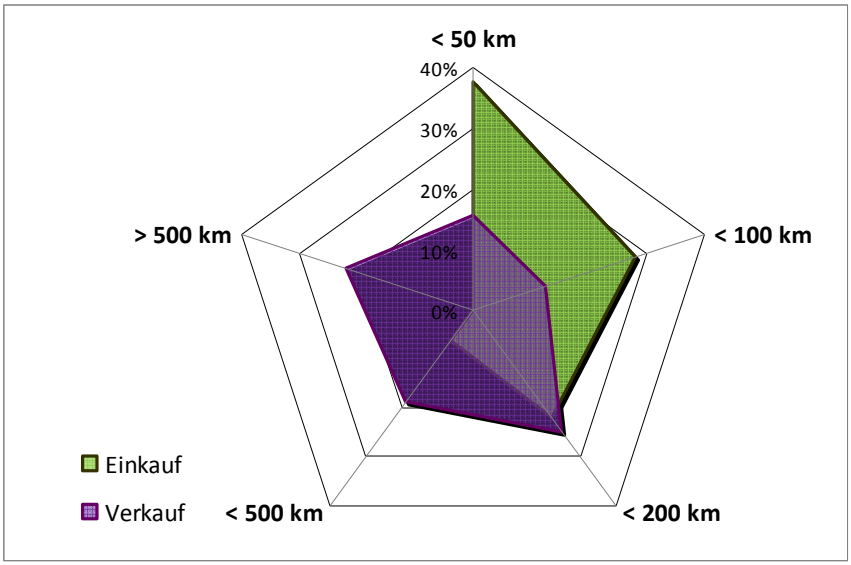


Abb. 5: Vergleich der Rohstoffeinkaufs- und Produktverkaufsradien

Da die befragten Hersteller hauptsächlich mit Pelletpressen arbeiten, beziehen sich die weiteren Auswertungen ausschließlich auf die Pelletproduktion.
Bei einem Blick auf das Jahr der Inbetriebnahme der Pelletpressen zeigt sich ein heterogenes Bild. Die älteste erfasste Anlage ist seit 1975 in Betrieb. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Mehrzahl der Anlagen in den Jahren 1995-1999 sowie 2005-2009 aufgestellt bzw. erneuert wurden (Abb. 6).

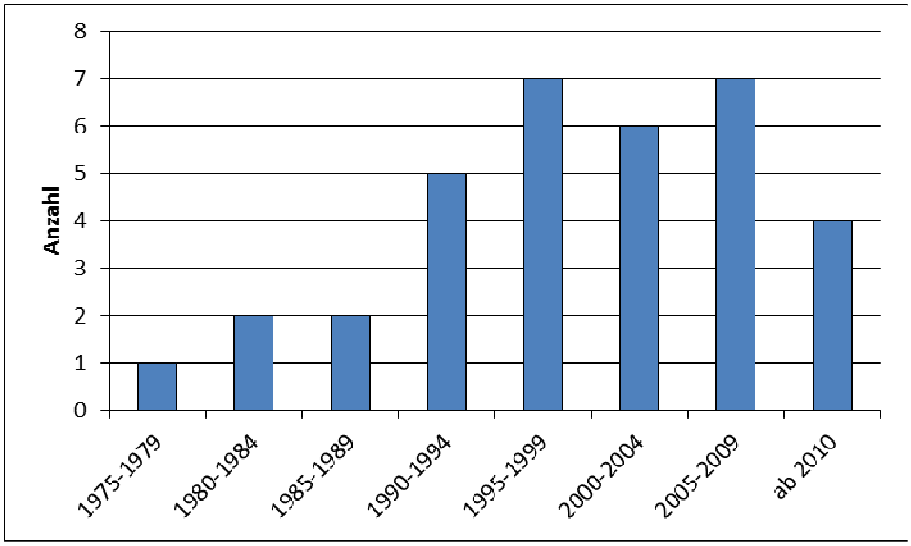


Abb. 6: Inbetriebnahme der Pelletpressen

Von großer Bedeutung für die Produktionsmenge ist die Leistung der Pelletpressen pro Stunde. Diese ist neben der Größe der Anlage auch abhängig vom eingesetzten Material und eventuellen Zuschlagstoffen. Da beim Einsatz von Stroh die Pelletierleistung gegenüber

dem Einsatz von Heu reduziert ist, beziehen sich die folgenden Angaben einheitlich auf den Rohstoff Stroh zur Pelletierung. Nach Angaben der Hersteller weisen 87 % der Pressen eine Stundenleistung von 1 bis 5 t/h bei der Verarbeitung von Stroh auf. Lediglich 6 % der Pelletthersteller arbeiten im Leistungsbereich 5 bis 10 t/h und nur 7 % im Leistungsbereich 10 bis 15 t/h. Der kleinste Leistungsbereich von 1 bis 5 t/h zeigt bei einer weiteren Untergliederung eine gleichmäßige Verteilung. So arbeiten 30 % der Anlagen im Bereich 1 bis 2 t/h, jeweils 17 % im Bereich 2 bis 3 t/h bzw. 3 bis 4 t/h und 23 % produzieren im Bereich 4 bis 5 t/h (Abb. 7).

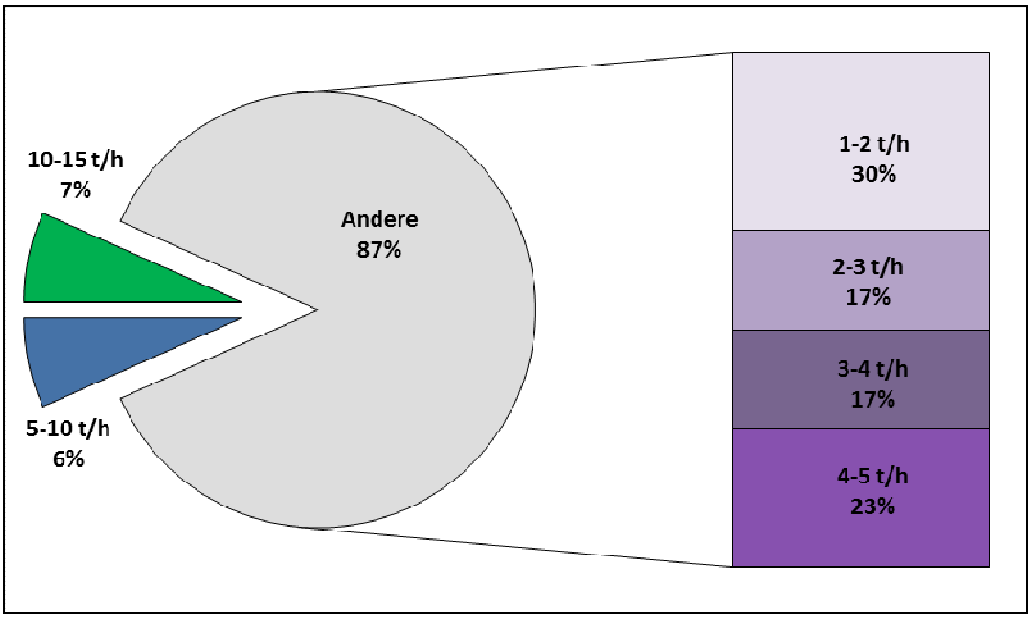


Abb. 7: Leistung der Pelletpressen in t/h bei der Verarbeitung von Stroh

2.2.3 Angaben zur Verwertung

Von den Pelletherstellern werden insgesamt 184.000 t im Jahr produziert und für unterschiedliche Einsatzbereiche bereitgestellt. Diese Einsatzbereiche umfassen zu 55 % den Futtermittelbereich, weitere 34 % werden als Einstreu abgesetzt und lediglich 11 % werden für den Brennstoffmarkt bereitgestellt (Abb. 8). Dagegen werden die produzierten Briketts zu 50 % als Einstreu und zu 50 % als Brennstoff vertrieben.

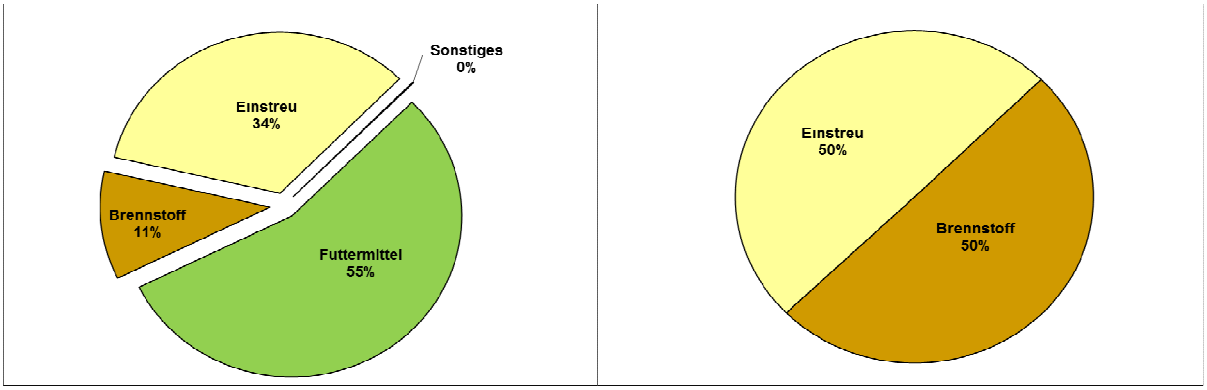


Abb. 8: Verwertung der Pellets (links) und der Briketts (rechts)

2.3 Zusammenfassung

Der größte Teil der Kompaktathersteller betreibt Pelletpressen im stationären Betrieb. Es werden allerdings auch mobile Pelletpressen angeboten. Zu einem deutlich geringeren Anteil werden Brikett-, Kanalballen-, Volumen- und Langgutpressen eingesetzt. Die Leistung der Pelletpressen pro Stunde ist abhängig von der Größe der Anlage aber auch vom eingesetzten Material und eventuellen Zuschlagstoffen. Nach Angaben der Hersteller dominieren mit 87 % bei der Verarbeitung von Stroh Pressen im kleinen Leistungsbereich (1 – 5 t/h). Lediglich 13 % der Pellethersteller verarbeiten Stroh mit höheren Stundenleistungen (6 % bei 5 – 10 t/h und 7 % bei 10 – 15 t/h).

Die eingesetzten Materialien für die Pelletierung sind schwerpunktmäßig Heu bzw. Gras. Stroh wird in einem Umfang von 1/3 der Heu/Gras-Menge verarbeitet, Holz und Miscanthus dagegen nur in einem Umfang von 1/7 der Heu/Gras-Menge. Des Weiteren kommen auch Materialien wie Getreide, Getreideausputz, Mais, Grünschnitt, Thymianstroh, Majoranstroh, Biertreber, Gärreste oder Papier in geringen Mengen zum Einsatz.

Zur Verwertung der Kompaktate (Absatzmärkte) konnte festgestellt werden, dass der Hauptteil der Kompaktate als Futtermittel (79 %) vertrieben wird und nur geringere Anteile werden als Einstreu (18 %) oder für den Brennstoffmarkt (3%) bereitgestellt. Bei den Einkaufs- und Verkaufsradien wird vorrangig regional eingekauft und überregional verkauft.

3. Kompaktierungsversuche und Analyse der Produkte

3.1 Auswahl der Kompaktieranlagen

Im Rahmen einer Marktrecherche wurden zahlreiche Hersteller von Halmgutkompaktaten eruiert (Anhang II). Für die Durchführung der Praxiskompaktierungsversuche erfolgte eine Auswahl von Herstellern (Anhang IV), die möglichst unterschiedlich hinsichtlich Leistung, verwendeter Technik und Anwendungsgebiete waren (Tab. 1).

Tab. 1: Für die Praxisversuche ausgewählte Kompaktathersteller

	Apoldaer Biomassewerk (ABW)	**PCM Greenenergy**	**Ecoworxx**	**Pusch AG**
Kapitel	3.2.1	3.2.2	3.2.3	3.2.4
Typ	stationär	mobil	mobil	stationär
Technik	Ringmatrize (Pellets) Strang-Presse (Briketts)	Ringmatrize		Flachmatrize kombiniert mit Stempelpresse
Durchsatz	1,5 t Pellets/ h	1 – 1,2 t Pellets/ h	0,03 – 0,25 t Pellets/ h	1 – 4 t Pellets/ h
eingesetztes Material	Stroh, Heu/ Gras, Miscanthus, Majoran	Stroh	Stroh	Stroh, Mischpellets

3.2 Verfahren der Kompaktierung

3.2.1 Apoldaer Biomassewerk (ABW)

Pelletierung

Die durch das ABW hergestellten Strohpellets entstammen einer Pelletieranlage mit Ringmatritze. Das Ausgangsmaterial muss hierfür bestimmte Qualitätsmerkmale aufweisen. Der Feuchtegehalt des Strohs darf aus Lagerungs- und Verarbeitungssicht 12 % nicht überschreiten. Zudem sollte der Rohstoff störstofffrei und wenn möglich gute visuelle und biologische Qualität besitzen. Im ersten Arbeitsschritt wird das in gepresster Ballenform vorliegende Winterweizenstroh mit geeigneter Umschlagetechnik der Anlage zugeführt. Es können sowohl Rund- wie auch Quaderballen verarbeitet werden, die zunächst händisch vom Bindematerial befreit werden. Über eine Steintrennmulde werden Störstoffe entfernt, die dem nachfolgenden Ballenauflöser mit rotierendem Messer schaden könnten. Das Messer erzeugt ein Strohhäcksel von ca. 5 bis 7 cm Länge. Eine Förderschnecke übernimmt das Häckselgut und führt es der Hammermühle zu. Ein vorgelagertes Gebläse sowie ein Magnetabscheider entfernen Fein- und Metallteile vor dem Mahlgang. Die mit einem Sieb ausgestattete Hammermühle erzeugt Strohstücke von 8 bis 30 mm Länge. Weitere Reinigungseinrichtungen sind nachgelagert und entstauben das Material. Die mehrmalige Entstaubung dient zur Schonung der nachgelagerten Presswerkzeuge, verursacht jedoch je nach Rohstoffbeschaffenheit auch einen Materialverlust von 10 – 15 %. Für beide Kompaktierverfahren (Pelletierung/Brikettierung) ist die Aufbereitung des Strohs bis an diese Stelle gleich. Zur Pelletierung wird nun das Material über einen Luft- und Magnetabscheider erneut gereinigt und wiederum einer Hammermühle zugeführt. Es verlässt die Mahleinrichtung mit einer Länge von 3 – 8 mm, wird in einem Zyklon abermals entstaubt und in der Mischeinrichtung konditioniert. Hier wird die für die Pelletierung notwendige Feuchte eingestellt. Die Pelletpresse formt im Anschluss mit ihrer Ringmatritze und drei Kollern Pellets im gewünschten Durchmesser von 6 oder 8 mm. Die fertigen Presslinge werden im Kühlturm abgekühlt und entstaubt. Im Endbunker mit Staubabsaugung werden die Pellets zur weiteren Verwendung gelagert.

Brikettierung

Für die Brikettierung ist im Gegensatz zur Pelletierung kein zweiter Hammermühlengang nötig. Das gereinigte Häckselgut gelangt in einen Vorbehälter, in dem gegebenenfalls Zuschlagstoffe eingebracht werden können. Eine Horizontalschnecke bildet die erste Verdichtungsstufe für das Brikett, gefolgt von einer zweiten Verdichtung in Form einer Vertikalschnecke. Eine Kolbenpresse mit beheizten bzw. gekühlten Presswerkzeugen erzeugt einen Pressstrang der anschließend gebrochen, selten gesägt wird. Die so erhaltenen Briketts werden über ein Kühlband zur Abpackung geleitet.

3.2.2 PCM Greenenergy

Bei dem Pelletiersystem von PCM handelt es sich um eine mobile Anlage, die komplett in einem transportablen 45 Fuß Übersee-Container untergebracht ist (Abb. 9). Das autarke System kann per Sattelzugmaschine mit Containerchassis direkt zur Rohstoffquelle transportiert werden. Somit wird der relativ geringen Transportwürdigkeit von Stroh entgegengewirkt. Ein 260 kW Dieselaggregat stellt ausreichend Leistung für die Pelletierung von maximal 1,5 t Pellets pro Stunde bereit. Die möglichen Pelletdurchmesser betragen 6 mm, 8 mm, 10 mm oder 12 mm, je nach eingesetzter Ringmatritze. Die Überwachung und Steuerung des vollautomatischen Prozesses geschieht über eine zentrale Computersteuerung. Mit ihr lassen sich auch Einstellungen der wichtigsten Prozessgrößen vornehmen.

In einem 10 m³ fassenden Vertikalmischer wird das Ausgangsmaterial von einer langsam laufenden Messerwelle (15 U/min) zerkleinert und gelangt über einen Bodenaustrag in einen Separator. Hier wird das Material mittels Paddelwerk aufgelockert und per Magnetabscheider detektiert. Durch die Saugwirkung der nachgeschalteten Hammermühle werden die leichten Biomasseteile eingesogen, schwere Störstoffe werden abgeschieden. Die mit 5 mm Sieb ausgestatte Hammermühle übergibt ihr Mahlgut an ein Abscheidesystem in Form eines Zyklons. Aus diesem Zyklon fällt das gereinigte Material in einen Vorratsbehälter, in dem die Konditionierung des Pressmaterials mit zum Beispiel Wasser stattfindet. Horizontal und Vertikalschnecken übernehmen die Vorverdichtung vor der Pelletpresse mit Ringmatritze und zwei Kollern. Der Pressvorgang findet temperaturgeregelt bei 80 – 100 °C statt. Ein sich anschließender Spiralförderer mit Luft im Gegenstrom kühlt die Pellets auf ca. 60 °C herunter. In speziellen Containern kühlen die fertigen Pellets in 5 – 8 Stunden auf Umgebungstemperatur ab.

Abb. 9: Mobile Pelletieranlage MPA 1000 der Firma PCM auf Containerchassis

3.2.3 Ecoworxx

Ecoworxx bietet so genannte „All in one Pelletmaker“ in drei Leistungsklassen an (Tab. 2). Hierbei variiert der Pelletausstoß zwischen 30 kg/ h und 250 kg/ h je nach angewendetem Modell und eingesetztem Rohstoff. Der kompakte modulare Aufbau der Anlagen vereint eine Misch-, Zerkleinerungs- und Pelletiereinheit in einer Maschine. Je nach eingesetzter Matrize sind auch hier Pelletdurchmesser von 6 mm bis 20 mm wählbar. Abbildung 10 zeigt das Einsteigermodel PM 3.0 E im Vergleich zurm leistungsstarken Modell PM 75 E.

Tab. 2: Übersicht der von der Firma Ecoworxx angebotenen Pelettieranlagen

Modell	PM 22 E	PM 44 E	PM 75 E
Gesamtmasse Anlage	ca. 380 kg	ca. 570 kg	ca. 980 kg
Elektrische Gesamtleistung	ca. 4 kW	ca. 7,5 kW	ca. 14,5 kW
Pelletdurchmesser	6 – 20 mm	6 – 20 mm	6 – 20 mm
Durchsatz	30 - 70 kg/h	50 - 100 kg/h	100 - 250 kg/h
Anschaffungskosten (Netto)	ab 6900,- €	ab 19.800,- €	ab 45.000,- €

Abb. 10: Leistungsstärkste Pelletieranlage PM 75 E (links) und Einsteigermodell PM 3.0 E der Firma Ecoworxx

3.2.4 Pusch AG

Die Pusch AG hat sich auf die Herstellung von Mischbrennstoffpellets spezialisiert. Sie verwendet im Vergleich zu den bekannten Pelletierverfahren eine neuartige Technologie. Hierbei wird durch die Kombination einer Flachmatrize und einer Stempelpresse Biomasse unterschiedlichster Ausgangsform kompaktiert. In Ballenform vorliegende Rohstoffe werden zunächst über einen Ballenauflöser und lose Biomasse über ein Transportband dem Prozess zugeführt. Im Materialmischer wird das Ausgangsmaterial zunächst homogen durchmischt und nach Bedarf durch eventuelle Zuschlagstoffe konditioniert. Die pelletierbereite Charge wird mittels Schneckenfördereinrichtungen den einzelnen Presskammern mit hydraulisch gesteuerten Stempelpaketen zugeführt. Der Stempel presst bzw. stanzt nun die Masse durch

die temperaturgeregelte Flachmatrize. Eine Kühlung der entstandenen Pellets schließt sich diesem Prozess direkt an. Bei diesem Prozess wird komplett auf eine Feinzermahlung mittels energieintensiver Hammermühlen verzichtet. Dies gestaltet den Prozess energieeffizient und verschleißärmer und lässt zudem eine höhere Ausgangsmaterialfeuchte bis zu 18 % zu. Die gesamte Pelletierlinie hat eine Stundenleistung ab einer Tonne, kann aber durch einen modularen Aufbau bis zu 4 Tonnen erreichen.

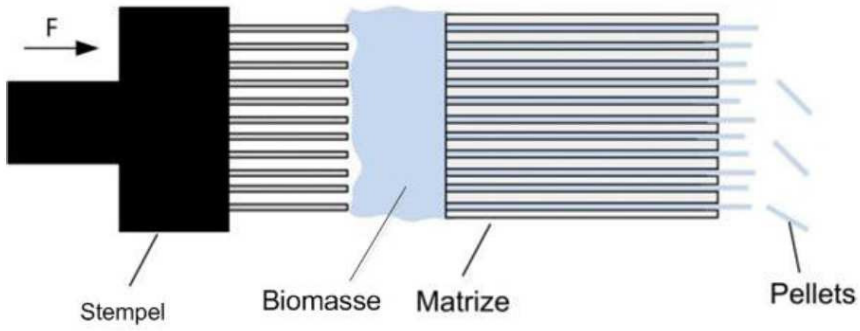


Abb. 11: Schematische Darstellung der Pelletiereinheit innerhalb des von der Firma PUSCH angewendeten Pelletierverfahrens

3.3 Qualitative Analyse der Kompaktate

Zum Vergleich der Kompaktierungstechnologien wurden die Praxisversuche zur Kompaktierung mit ein und demselben Referenzbrennstoff durchgeführt (hier: Winterweizenstroh, Schlag Zwätzener Aue, geborgen am 23.08.2011, WG 10 – 15 % TM, 200 – 220 kg / Quaderballen) (Nr. 1 – 7, Tab. 3).

Tab. 3: Übersicht zu den Untersuchungsproben

Nr.	Ausgangsmaterial	Bezeichnung	Kompaktierer
1	Winterweizenstroh	HK WWSP	PCM Greenenergy
2	Winterweizenstroh	HK WWSP	ABW
3	Winterweizenstroh	HK WWSP	Pusch AG
4	Winterweizenstroh	HK WWSP	Ecoworcxx
5	Winterweizenstroh	HK WWSP	Ecoworcxx
6	Winterweizenstroh	HK WWSP	Ecoworcxx
7	Winterweizenstroh	WWSP PTG 05	PTG[1]
8	Landschaftspflegeheu / Dobia	LPHP	ABW
9	Industrieholz	HK IHP	ABW
10	EN plus; Thü	HK IHP	HVT[2]
11	Winterweizenstroh	HK WWSB	ABW
12	Winterweizenbruchkörner	HK BK Charge 1+2	GE Serba[3]

[1]Pelletier- und Transportgesellschaft Apolda, [2] HVT Hobelspanverarbeitung GmbH Dittersdorf, [3] GES Getreideerfassung Serba GmbH

Die Firma Ecoworxx hat speziell drei verschiedene Pelletqualitäten (weich, mittel, hart) des Ausgangsmaterials für unterschiedliche Verwendungsmöglichkeiten hergestellt (Nr. 4-6, Tab.

3). Des Weiteren wurde, um bei den Verbrennungsversuchen einen Vergleich der Eignung Strohpellets gegenüber aufgelöstem Landschaftspflegeheu zu ziehen, noch vorhandenes Restmaterial aus dem bereits abgeschlossenen Vorhaben $GNUT_{Verbrennung}$ (Hochberg et al., 2011) pelletiert (Nr. 8, Tab. 3). Zum Vergleich wurde die Analyse mit Industrieholzpellets (HK IHP – ABW) (Nr. 9, Tab. 3) sowie zertifizierten ENplus Holzpellets (HK HP – HVT) (Nr. 10, Tab. 3) erweitert. Zusätzlich wurde aus dem Referenzbrennstoff Winterweizenstroh eine Charge Briketts hergestellt (Nr. 11, Tab. 3), welche allerdings nicht für Verbrennungsversuche eingesetzt wurde, da hierfür keine speziell dafür ausgelegten Kleinfeuerungsanlagen auf dem Markt angeboten werden. Bei allen Varianten kamen keine Additive zum Einsatz, so dass es sich um reine naturbelassene Strohpellets handelte. Damit lässt sich ein Einfluss des Verfahrens bzw. des Endproduktes auf das Abbrand- und Emissionsverhalten in den Feuerungsanlagen darstellen. Um Rückschlüsse auf weitere alternative Festbrennstoffe zu ziehen wurde als Vergleich zu den Halmgutproben Winterweizenbruchkörner mit untersucht (Nr. 12, Tab. 3). Die mit den oben vorgestellten Verfahren erzeugten Chargen von Kompaktaten wurden hinsichtlich ihrer physikalisch-mechanischen Eigenschaften (Kap. 3.3.1) und ihrer chemisch-stofflichen Eigenschaften untersucht (Kap. 3.3.2).

Mittlerweile liegen die europäischen Normentwürfe zur Klassifizierung von nicht-holzartigen Pellets (DIN EN 14961-6: Feste Biobrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 6: Nicht-holzartige Pellets für nichtindustrielle Verwendung; Deutsche Fassung DIN EN 14961-6:2011) sowie zur Qualitätssicherung der Logistikkette (DIN EN 15234-6: Feste Biobrennstoffe - Qualitätssicherung von Brennstoffen - Teil 6: Nicht-holzartige Pellets für nichtindustrielle Verwendung) vor. Die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft war als Mitglied des deutschen Spiegelkomitees in der DIN-Arbeitsgruppe „Biogene Festbrennstoffe“ an der Erarbeitung und Erstellung dieser Produktnormen beteiligt.

Beim Einsatz von Halmgutkompaktaten zur energetischen Verwertung werden mittlerweile Anforderungen in der DIN EN 14961-6 für nicht-holzartige Pellets für die nichtindustrielle Verwertung (veröffentlicht im April 2012) angewendet. Dabei werden normative sowie informative Anforderungen formuliert (Kay und Hering, 2011). Diese beinhalten im normativen Teil in Bezug auf physikalische Parameter Anforderungen hinsichtlich der Abmaße für Durchmesser (D) und Länge (L), der mechanischen Festigkeit (DU), des Feingutanteils (F) bzw. der Schüttdichte.

3.3.1 Ergebnisse der physikalisch-mechanischen Analyse

3.3.1.1 Feingutanteil und Schüttdichte

Der Feingutanteil (F) lag bei allen untersuchten Pelletchargen (n = 50; 10 Varianten und 5 Wiederholungen) bei den in den normativen Anforderungen formulierten unter 1 % (Anlieferungszustand). Pellets mit geringerer Schüttdichte wiesen dabei tendenziell geringfügig hö-

here Feingutanteile auf als Pellets mit höherer Schüttdichte. Die vergleichbaren Winterweizenstrohproben (Nr. 1 - 6) verdeutlichen die durchaus großen Schwankungsbreiten der Schüttdichten für ein und denselben Ausgangsrohstoff (Tab. 4). Dies ist zum einen auf die Pelletiertechnologie als solche und zum anderen auf den eigentlichen Pelletierprozess (Einstellmöglichkeiten der Technologie) bzw. das Bedienpersonal zurückzuführen.

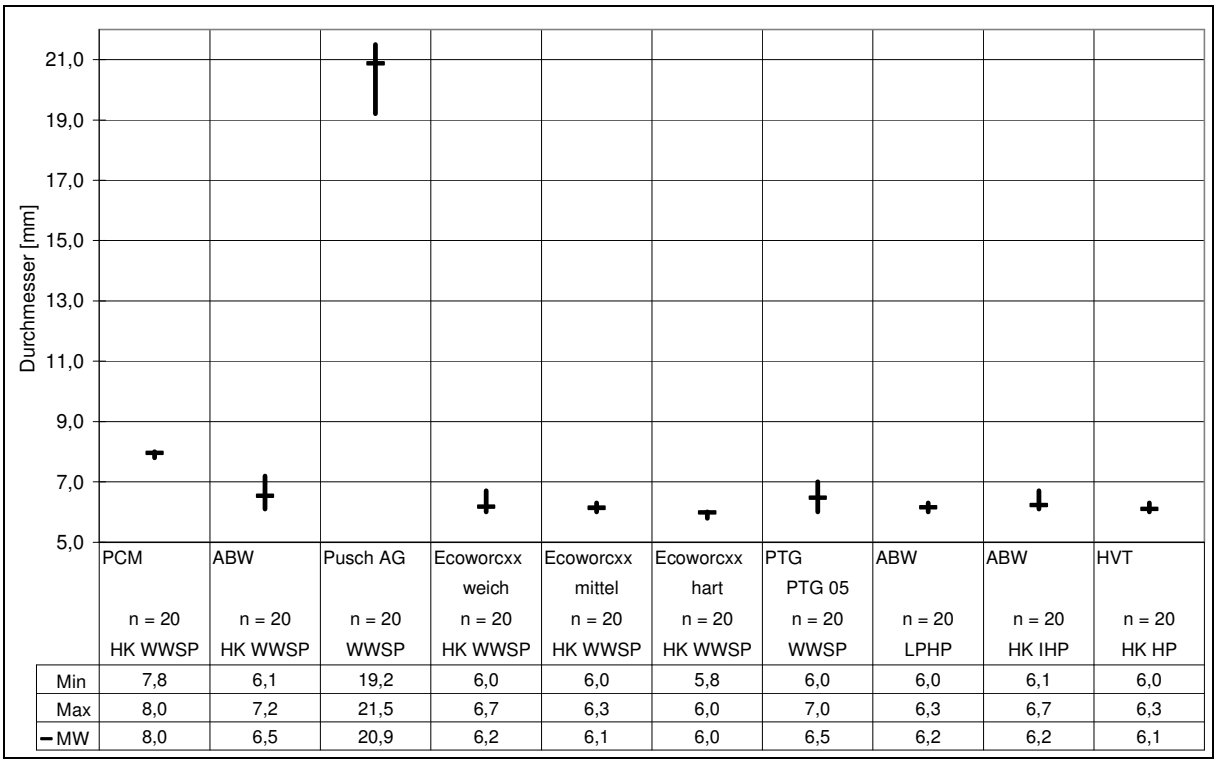
Tab. 4: Schüttdichten der hergestellten Kompaktate (n = 3)

Nr.	Ausgangsmaterial	Bezeichnung	Kompaktierer	kg/m³
1	Winterweizenstroh	HK WWSP	PCM Greenenergy	680
2	Winterweizenstroh	HK WWSP	ABW	464
3	Winterweizenstroh	HK WWSP	Pusch AG	700
4	Winterweizenstroh (weich)	HK WWSP	Ecoworcxx	495
5	Winterweizenstroh (mittel)	HK WWSP	Ecoworcxx	594
6	Winterweizenstroh (hart)	HK WWSP	Ecoworcxx	689
7	Winterweizenstroh	WWSP PTG 05	PTG	611
8	Landschaftspflegeheu / Dobia	LPHP	ABW	695
9	Industrieholz	HK IHP	ABW	692
10	EN plus; Thü	HK IHP	HVT	657

Dies eröffnet Möglichkeiten für die Produktion von an den Verbraucher bzw. den Markt angepassten Pelleteigenschaften. So werden für bestimmte Einsatzzwecke wie z.B. für die energetische Verwertung eine möglichst hohe Schüttdichte sowie Homogenität und damit eine Vergleichbarkeit der einzelnen Pelletchargen gefordert. Für den Einsatz als Einstreupellets ist jedoch die Saugfähigkeit der Produkte von höherer Priorität, welche bei geringeren Pressdichten Vorteile aufweisen. Um Logistikkosten zu optimieren sind hohe Schüttdichten von Vorteil, weil dadurch Transport-, Umschlag- sowie Lagerkosten minimiert werden können. Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass bei der Pelletierung von Stroh Schüttdichten bis zu 900 kg/m³ erreicht werden können. In Bezug auf eine energetische Verwertung mussten diese hochverdichteten Pellets jedoch aufgrund ihrer schlechten Zündbarkeit sowie dichten Glutbettlagerung als ungeeignet eingeschätzt werden.
Generell kann festgestellt werden, dass eine in der Norm geforderte Schüttdichte von mehr als 600 kg/m³ (BD600, ≥ 600) prinzipiell mit jeder im Projekt eingesetzten Technologien sicher erreicht werden kann. Um die Produktion energie- bzw. kosteneffizient auszurichten ist eine sichere aber nur geringfügig über den Anforderungen liegende Schüttdichte anzustreben. Die mit den anderen eingesetzten Rohstoffen (Varianten 7 bis 10, Tab. 4) erreichten Schüttdichten zeigen, dass die Ergebnisse mit denen für Getreidestroh vergleichbar sind. Des Weiteren werden damit Ergebnisse bereits abgeschlossener Projekte zur Pelletierung von Getreidestroh bestätigt (Hering und Peisker, 2005).

3.3.1.2 Durchmesser und Länge

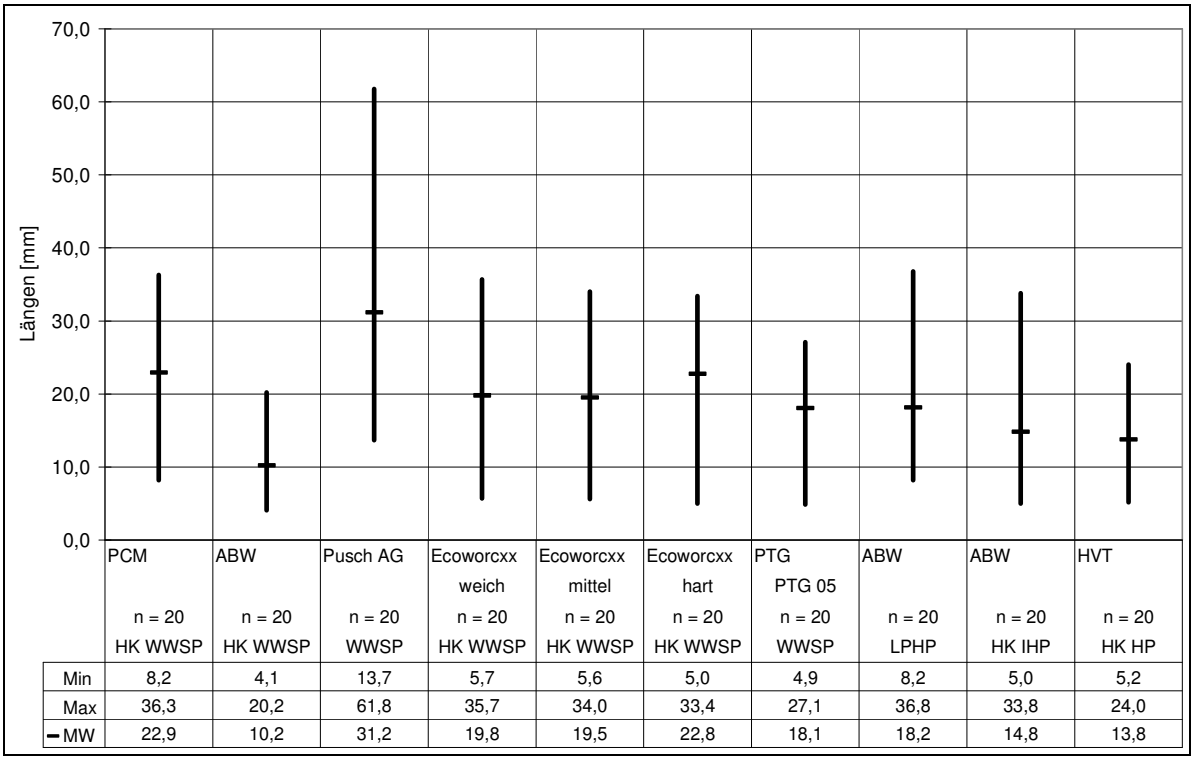
Für die Einhaltung der Anforderungen der DIN EN 14961-6 ist der Zustand der Pelletiertechnik, insbesondere der Verschleiß der Matrizen, für die Einhaltung geforderter Qualitätsparameter von besonderer Bedeutung. Die Qualitätsparameter umfassen hierbei Anforderungen für bestimmte Toleranzen für den Durchmesser von Pellets bzw. bestimmte Durchmesser-Längenverhältnissen. Die Unterschiede in der Pelletiertechnik drückten sich bei den untersuchten Proben in den Schwankungsbreiten der Durchmesser aus (Abb. 12). Nach DIN EN 14961-6, Tabelle 1 fallen dabei alle hergestellten Chargen, mit Ausnahme der Kompaktate der Pusch AG, in die Durchmesserklasse (D) D06 ≤ x ≤ D10 mit einer Toleranz von D ± 1. Lediglich die Charge HK WWSP ABW überschreitet die Toleranz im Durchmesserspektrum etwas nach oben, was auf einen höheren Verschleißzustand der Matrize zurückzuführen ist.



	PCM n = 20 HK WWSP	ABW n = 20 HK WWSP	Pusch AG n = 20 WWSP	Ecoworcxx weich n = 20 HK WWSP	Ecoworcxx mittel n = 20 HK WWSP	Ecoworcxx hart n = 20 HK WWSP	PTG PTG 05 n = 20 WWSP	ABW n = 20 LPHP	ABW n = 20 HK IHP	HVT n = 20 HK HP
Min	7,8	6,1	19,2	6,0	6,0	5,8	6,0	6,0	6,1	6,0
Max	8,0	7,2	21,5	6,7	6,3	6,0	7,0	6,3	6,7	6,3
MW	8,0	6,5	20,9	6,2	6,1	6,0	6,5	6,2	6,2	6,1

Abb. 12: Vergleich der Schwankungsbreiten der Durchmesser (D) der Pellets in Abhängigkeit der Pelletiertechnologie, der Einstellungen und des eingesetzten spezifischen Halmgutmaterials im Vergleich zu zertifizierten ENplus Holzpellets

Die geforderten Längen (L) im Bereich von 3,15 ≤ L ≤ 40 nach DIN EN 14961-6, Tabelle 1 werden im Mittel ebenso eingehalten (Abb. 13). Auch hier weichen die Kompaktate der Pusch AG von der Forderungen ab und erreichen maximale Längen von über 60 mm (Mittelwert 31,2 mm).



	PCM n = 20 HK WWSP	ABW n = 20 HK WWSP	Pusch AG n = 20 WWSP	Ecoworcxx weich n = 20 HK WWSP	Ecoworcxx mittel n = 20 HK WWSP	Ecoworcxx hart n = 20 HK WWSP	PTG PTG 05 n = 20 WWSP	ABW n = 20 LPHP	ABW n = 20 HK IHP	HVT n = 20 HK HP
Min	8,2	4,1	13,7	5,7	5,6	5,0	4,9	8,2	5,0	5,2
Max	36,3	20,2	61,8	35,7	34,0	33,4	27,1	36,8	33,8	24,0
MW	22,9	10,2	31,2	19,8	19,5	22,8	18,1	18,2	14,8	13,8

Abb. 13: Vergleich der Schwankungsbreiten der Länge (L) der Pellets in Abhängigkeit der Pelletiertechnologie, der Einstellungen und des eingesetzten spezifischen Halmgutmaterials im Vergleich zu zertifizierten ENplus Holzpellets

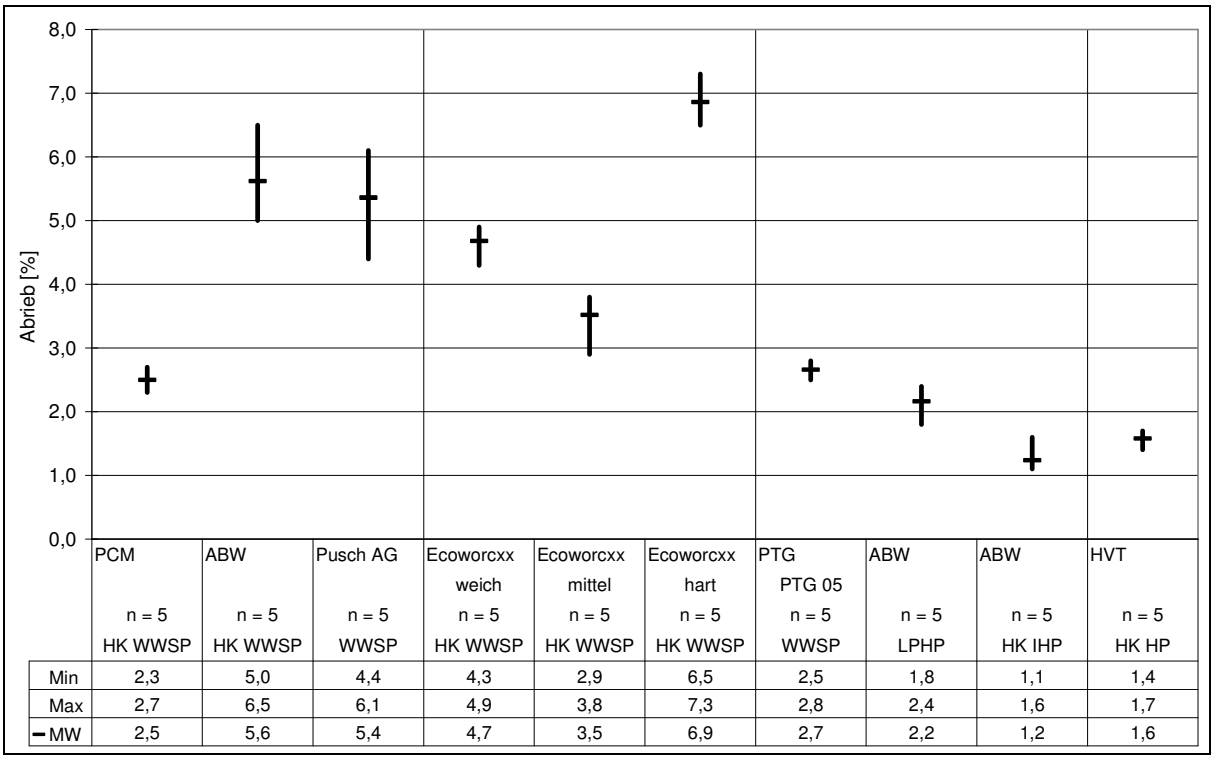
Die Ergebnisse zu den erzeugten Winterweizenstrohbriketts (HK WWSB) zeigen hinsichtlich der erreichten Durchmesserstruktur ein relativ homogenes Resultat mit einer geringen Standardabweichung, allerdings große Schwankungen bei der Länge (Tab. 5). Da jedoch im Projekt keine energetische Verwertung für derartige Kompaktate vorgesehen war, wurden die Briketts vom Hersteller ohne weitere Qualitätsanforderungen hinsichtlich einzuhaltender Durchmesser-Längenverhältnisse hergestellt. Die Ergebnisse verdeutlichen somit lediglich die Brikettierbarkeit von Stroh ohne Zusatzstoffe. Dies ist durchaus für bestimmte, wenngleich auch momentan sehr eingeschränkte, Einsatzzwecke von Bedeutung, da beim Brikettiervorgang Energiekosten eingespart werden können. Dies betrifft vor allem den nicht notwendigen Einsatz von Hammermühlen. Im Projekt konnten allerdings keine belastbaren Daten zur Quantifizierung dieser Einsparung erhoben werden.

Tab. 5: Durchmesser (D) und Länge (L) der erzeugten Briketts aus dem Referenzrohstoff Winterweizenstroh

Strohbriketts	Einheit	Minimalwert	Maximalwert	Mittelwert	Standardabweichung
Durchmesser	[mm]	61	70	67	2,3
Länge	[mm]	19	156	61	34,3

3.3.1.3 Mechanische Festigkeit (Abrieb)

Der Abrieb zur Beurteilung der mechanischen Festigkeit (DU) von Pellets ist im Bereich Arbeitsschutz insbesondere bei Produktions- und Umschlagprozessen von besonderer Relevanz (Staubexplosion). Darüber hinaus stellt er einen entscheidenden Qualitätsparameter für den Verbrennungsprozess selbst dar. Hier werden in der Norm Werte für die mechanische Festigkeit (DU) von ≥ 97,5 % gefordert. Das entspricht einem maximalen Abriebwert von weniger als 2,5 %. Bei der Bewertung der erreichbaren Pelletqualitäten wird ersichtlich, dass für diesen Parameter die größten Abweichungen von der geforderten Norm auftreten. Während die untersuchten Holzpellets HK IHP ABW und EN plus; Thü (Nr. 9 und 10) erwartungsgemäß die Anforderungen an die Abriebwerte erfüllten, zeigte sich, dass keine der erzeugten Winterweizenstrohpellets (WWSP) diese Anforderung erfüllen konnte (Abb. 14). Den geforderten Abriebwerten am nächsten waren allerdings die Pelletproben HK WWSP – PCM sowie HK WWSP – PTG 05 (Nr. 1 und 7) mit Werten zwischen 2 und 3 % Abrieb. Die Halmgutpellets aus Landschaftspflegeheu (LPHP) konnten die Anforderungen bezüglich der Mechanischen Festigkeit einhalten (Abb. 14).



	PCM n = 5 HK WWSP	ABW n = 5 HK WWSP	Pusch AG n = 5 WWSP	Ecoworcxx weich n = 5 HK WWSP	Ecoworcxx mittel n = 5 HK WWSP	Ecoworcxx hart n = 5 HK WWSP	PTG PTG 05 n = 5 WWSP	ABW n = 5 LPHP	ABW n = 5 HK IHP	HVT n = 5 HK HP
Min	2,3	5,0	4,4	4,3	2,9	6,5	2,5	1,8	1,1	1,4
Max	2,7	6,5	6,1	4,9	3,8	7,3	2,8	2,4	1,6	1,7
MW	2,5	5,6	5,4	4,7	3,5	6,9	2,7	2,2	1,2	1,6

Abb. 14: Schwankungsbreiten des Abriebs der verschiedenen Pelletvarianten in Abhängigkeit von der Pelletiertechnologie

3.3.2 Ergebnisse der chemisch-stofflichen Analyse

3.3.2.1 Normative Anforderungen

Bei der Einschätzung der Konzentrationen der chemischen Inhaltsstoffe sind die normativen Anforderungen nach DIN EN 14961-6 – Tabelle 1 zu beachten (Tab. 6). Die Pellets aus dem Referenzbrennstoff Winterweizenstroh in diesem Projekt werden nach den Grenzwerten der DIN EN 14961-6 – Tabelle 1 „Pellets aus Getreidestroh – Tabelle 1“ (Tab. 6) eingeschätzt.

Tab. 6: Normative Anforderungen zu chemischen Inhaltsstoffen nach DIN EN 14961-6 –Tabelle 1

Eigenschaftsklasse	Einheit	Pellets aus Getreidestroh	Pellets aus halmgutartiger Biomasse	Pellets aus halmgutartiger Biomasse
		Tabelle 1	**Tabelle 2 - A**	**Tabelle 2 - B**
Stickstoff, N, EN 15105	m-% wf	N0.7 ≤ 0,7	N1.5 ≤ 1,5	N2.0 ≤ 2,0
Schwefel, S, EN 15289	m-% wf	S0.10 ≤ 0,10	S0.20 ≤ 0,20	S0.20 ≤ 0,20
Chlor, Cl, EN 15289	m-% wf	Cl0.10 ≤ 0,10	Cl0.20 ≤ 0,20	Cl0.30 ≤ 0,30
Aschegehalt, A[A], EN 14775	m-% wf	A6.0 ≤ 6	A5.0 ≤ 5	A10 ≤ 10
		A6.0 + > 6[B]		

[A] Die tatsächliche aschebezogene Eigenschaftsklasse ist anzugeben. [B] anzugebender Wert.

Dabei zeigen die Ergebnisse, dass keine der untersuchten Pelletvarianten für Winterweizenstroh alle normativen Anforderungen für Getreidestroh - Tabelle 1 einhalten kann (Tab. 7). Die Stickstoff- und Schwefelgehalte liegen geringfügig über den geforderten Werten. Die drei Pelletvarianten vom Kompaktierer Ecoworxx weisen die geringsten Chlorkonzentrationen im Vergleich der Winterweizenstrohpellets auf. Bei den Landschaftspflegeheupellets sind die Werte für Stickstoff deutlich höher, die Schwefel- und Chlorkonzentrationen jedoch deutlich geringer als bei den Winterweizenstrohpellets. Bei Anwendung der Werte für „halmgutartige Biomasse – Tabelle 2A“ können bei den hier untersuchten Halmgutpellets (WWSP+LPHP) die Grenzwerte für N, S und Cl eingehalten werden. Die Werte der Rohaschegehalte werden jedoch deutlich überschritten. Die Anforderungen für Pellets aus halmgutartiger Biomasse - Tabelle 2-B werden von allen Halmgutpelletchargen erfüllt. Des Weiteren ist der hohe Stickstoffgehalt der Industrieholzpellets auffällig. Dieser nach § 3 Nr. 6 der 1. BImSchV zugelassenen Brennstoff für holzbe- und verarbeitende Betriebe weist ein mehr als 5-fach erhöhtes Niveau an Stickstoff im Brennstoff auf. Eine Auflistung aller untersuchten Parameter zur chemisch-stofflichen Analyse findet sich im Anhang VI und VII.

Tab. 7: Chemische Inhaltsstoffe der Vergleichsbrennstoffe für die normativen Anforderungen

Ausgangsmaterial	Bezeichnung	Lieferant	N	S	Cl	Rohasche	AEB*
			% TM	% TM	% TM	% TM	mg/kg TM
Winterweizenstroh	HK WWSP	PCM	0,9	0,11	0,17	10,2	11129
Winterweizenstroh	HK WWSP	ABW	0,7	0,12	0,17	8,3	11110
Winterweizenstroh	HK WWSP	Pusch AG	0,5	0,0 1	0,16	6,1	11096
Winterweizenstroh (weich)	HK WWSP	Ecoworxx	0,8	0,12	0,10	7,5	11043
Winterweizenstroh (mittel)	HK WWSP	Ecoworxx	0,7	0,12	0,10	7,0	11058
Winterweizenstroh (hart)	HK WWSP	Ecoworxx	0,7	0,12	0,09	7,1	10885
Winterweizenstroh	WWSP PTG 05	PTG	0,6	0,01	0,18	9,3	15824
Landschaftspflege-heu	LPHP	ABW	1,4	0,01	0,09	9,3	12916
Industrieholz	HK IHP	ABW	4,1	0,03	0,02	1,1	1308
EN plus; Thü	HK IHP	HVT	0,1	n.n.	n.n.	< 1,0	85

*AEB = Aerosolbildende Inhaltsstoffe: Cl, S, K, Na, Zn, Pb, n.n. = nicht nachweisbar

3.3.2.2 Informative Anforderungen

Neben den normativen Parametern werden in DIN EN 14961-6 – Tabelle 1 auch Eigenschaftsklassen für weitere Parameter (Schwermetallgehalte bzw. Ascheschmelzpunkte), sogenannte informative Anforderungen, ausgewiesen (Tab. 8).

Tab. 8: Informative Anforderungen der chemischen Inhaltsstoffe nach DIN EN 14961-6 –Tabelle 1

Eigenschaftsklasse	Einheit	Pellets aus Getreidestroh	Pellets aus halmgutartiger Biomasse	Pelles aus halmgutartiger Biomasse
		Tabelle 1	**Tabelle 2 - A**	**Tabelle 2 - B**
Arsen, As, EN 15297	mg/kg wf	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Cadmium, Cd, EN 15297	mg/kg wf	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
Chrom, Cr, EN 15297	mg/kg wf	≤ 50	≤ 50	≤ 50
Kupfer, Cu, EN 15297	mg/kg wf	≤ 20	≤ 20	≤ 20
Blei, Pb, EN 15297	mg/kg wf	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Quecksilber, Hg, EN 15297	mg/kg wf	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
Nickel, Ni, EN 15297	mg/kg wf	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Zink, Zn, EN 15297	mg/kg wf	≤ 100	≤ 100	≤ 100
Asche-Schmelzverhalten*, CEN/TS 15370-1	°C	Sollte angegeben werden	Sollte angegeben werden	Sollte angegeben werden

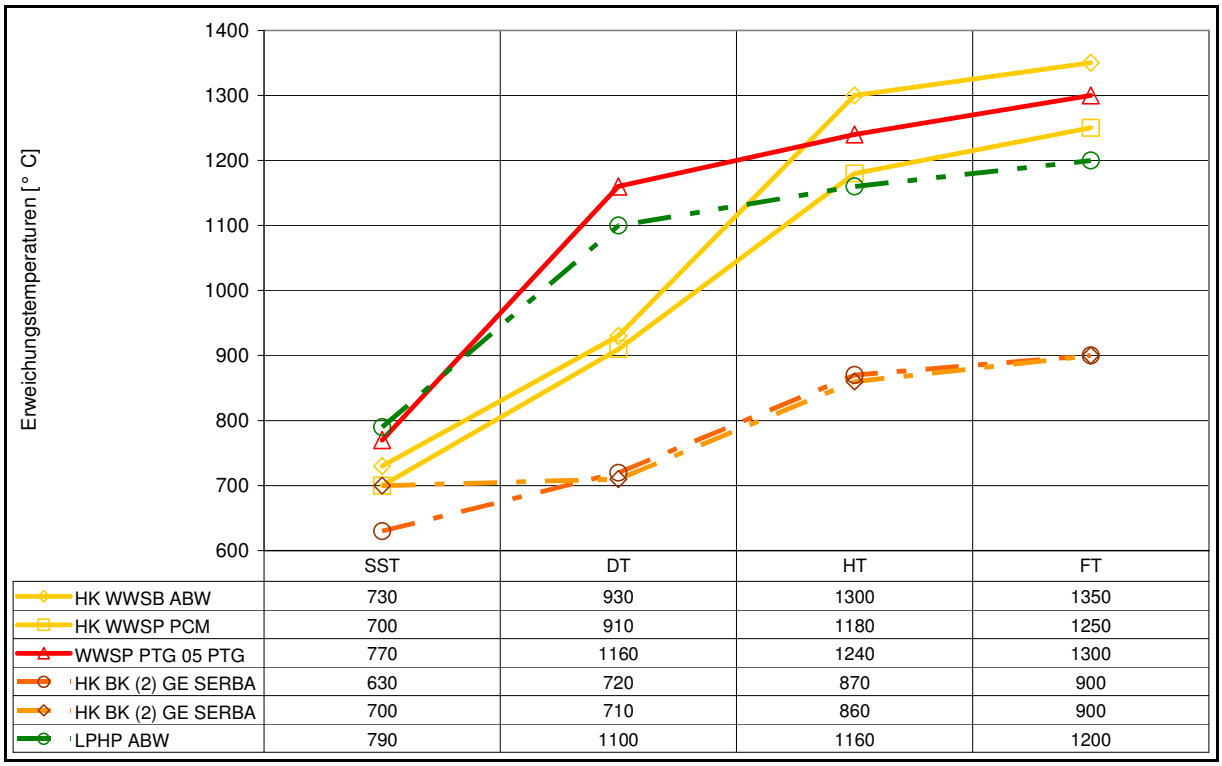
*sämtliche charakteristischen Temperaturen [Temperaturen am Beginn der Schrumpfung (SST), Erweichungstemperatur (DT), Halbkugeltemperatur (HT) und Fließtemperatur (FT)] in oxidierten Zuständen sollten angegeben werden

Sämtliche spezifische Anforderungen hinsichtlich der Schwermetallkonzentrationen werden von keiner einzigen Pelletcharge auch nur annähernd erreicht bzw. überschritten (Tab. 9).

Tab. 9: Chemische Inhaltsstoffe der Vergleichsbrennstoffe für die informativen Anforderungen

Ausgangs-material	Bezeich-nung	Lieferant	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Ni	Zn
						mg/ kg TM				
Winterweizen-stroh	HK WWSP	PCM	0,10	0,14	1,9	3,2	0,35	0,015	0,34	13,4
Winterweizen-stroh	HK WWSP	ABW	0,07	0,10	1,3	3,4	0,45	0,017	0,47	13,6
Winterweizen-stroh	HK WWSP	Pusch AG	0,07	0,10	3,7	3,9	0,63	0,012	0,88	14,0
Winterweizen-stroh (weich)	HK WWSP	Ecoworxx	0,06	0,06	4,4	3,2	0,24	0,011	0,43	16,1
Winterweizen-stroh (mittel)	HK WWSP	Ecoworxx	0,05	0,05	1,1	3,0	0,49	0,011	0,25	14,3
Winterweizen-stroh (hart)	HK WWSP	Ecoworxx	0,06	0,05	2,2	3,1	0,84	0,012	0,36	14,5
Winterweizen-stroh	WWSP PTG 05	PTG	0,15	0,06	5,4	6,3	2,7	0,011	1,2	9,0
Landschafts-pflegeheu	LPHP	ABW	0,26	0,03	3,6	5,6	1,1	0,010	2,1	24,3
Industrieholz	HK IHP	ABW	0,01	0,20	1,4	2,9	4,9	0,005	0,46	31,3
EN plus; Thü	HK IHP	HVT	0,01	0,20	0,10	11,9	0,66	0,004	0,10	14,6

Die Untersuchung der Ascheschmelzpunkte zeigt erwartungsgemäß zu vorherigen Untersuchungen (Hering et al., 2005; Hering und Peisker, 2009) relativ niedrige Schrumpfungs- und Erweichungstemperaturen des Referenzbrennstoffes Winterweizenstroh (HK WWSB ABW / HK WWSP PCM) (Abb. 15, Anhang VIII). Niedrige Temperaturen geben zugleich aber auch die Möglichkeit der Erhöhung dieser Temperaturen durch geeignete Additive, wie z.B. Tonmehl (Hering und Peisker, 2005), wie der Vergleichsbrennstoff WWSP PTG 05 belegt. Ebenso auffällig sind die höheren Erweichungstemperaturen beim Landschaftspflegeheu (LPHP ABW) (Abb. 15). Die Ascheschmelzpunkte der bei den Verbrennungsversuchen eingesetzten Winterweizenbruchkörner weisen um ca. 200 Kelvin tiefere Erweichungstemperaturen als die Strohchargen auf.



	SST	DT	HT	FT
HK WWSB ABW	730	930	1300	1350
HK WWSP PCM	700	910	1180	1250
WWSP PTG 05 PTG	770	1160	1240	1300
HK BK (2) GE SERBA	630	720	870	900
HK BK (2) GE SERBA	700	710	860	900
LPHP ABW	790	1100	1160	1200

Abb. 15: Vergleich der Ascheschmelzpunkte (DIN CEN/TS 15370-1) der bei den Verbrennungsversuchen eingesetzten Halmgutbrennstoffe [Temperaturen am Beginn der Schrumpfung (SST), Erweichungstemperatur (DT), Halbkugeltemperatur (HT) und Fließtemperatur (FT) im oxidierten Zustand]

Um den in der **DIN EN 14961-6 für nicht-holzartige Pellets für nichtindustrielle Verwendung** formulierten Anforderungen in der Praxis gerecht zu werden, ist die Einführung eines Qualitätsmanagementsystems (QM) zwingend notwendig. Dies betrifft zum einen die Analyse bzw. Eingangskontrolle der zu verwendenden Rohstoffe, die Produktion der Kompaktate als auch zum anderen die weitere Logistikkette wie die Lagerung beim Produzenten, den Transport sowie die Einbringung in das entsprechende Lagersystem beim Endkunden. Nur eine vollständige ununterbrochene qualitätsgerechte Logistik und Lagerung ermöglicht die Sicherstellung der Kompaktatqualität im Lager des Endkunden, welche eine hohe Funktionssicherheit der Konversionsanlage garantiert und die Grundlage für einen effizienten und emissionsarmen Betrieb einer Feuerungsanlage legt.

4. Verbrennungsversuche zur Emissionsmessung

4.1 Rechtliche Regelungen zu den Emisssionsgrenzwerten

Kleinfeuerungsanlagen im Leistungsbereich von 4 bis 100 kW zur Verbrennung von Halmgut unterliegen den rechtlichen Bestimmungen der 1. BImSchV. Im Leistungsbereich über 100 kW greifen die Regelungen der 4. BImSchV und der TA Luft.

Die 1. BImSchV für Kleinfeuerungsanlagen wurde im Jahr 2010 novelliert und beinhaltet für den Betrieb von Halmgutfeuerungen deutlich reduzierte Grenzwerte. In Bezug auf Kohlenmonoxid (CO) gelten für Neuanlagen seit dem 22.03.2010 Grenzwerte von 1,0 g/m³ und für Staub Grenzwerte von 0,10 g/m³ (Stufe 1). Für Neuanlagen, die ab dem 01.01.2015 ihren Betrieb aufnehmen, gilt die Stufe 2 der Verordnung. In dieser Stufe reduzieren sich die Werte auf 0,4 g/m³ für CO bzw. auf 0,02 g/m³ für Staubemissionen bei 13 % O_2-Bezug (Tab. 10). Im Vergleich zur vorhergehenden Verordnung sind damit in Bezug auf die CO-Emissionen nur noch 1/4 und in Stufe 2 sogar nur ein 1/10 des alten Grenzwertes erlaubt. Beim für die Praxis relevanten Staubgrenzwert handelt es sich um eine Reduktion auf 2/3 des alten Grenzwertes für die Stufe 1 bzw. weniger als 1/7 für die Stufe 2. Dies zieht allerdings deutlich höhere spezifische Investitionen für Abscheidetechnologien nach sich.

Tab. 10: Emissionsgrenzwerte der 1. BImSchV für Halmgutfeuerungsanlagen nach BMUB (2010)

	1. BImSchV			
Anlagengröße	4 ≤ x < 100 kW			
		vor dem 22.03.2010	**ab 22.03.2010**	**ab 01.01.2015**
O_2-Bezug		**13 %**	**13 %**	**13 %**
CO	**nach § 5(1)**	4 g/m³	1,0 g/m³	0,4 g/m³
Staub	**nach § 5(1)**	0,15 g/m³	0,10 g/m³	0,02 g/m³

Halmgutfeuerungsanlagen ab 100 kW fallen in den Regelungsbereich der 4. BImSchV, sind damit genehmigungspflichtig und unterliegen den Grenzwerten der TA Luft (Tab. 11). In diesem Leistungsbereich müssen neben den Parametern CO und Staub auch Stickoxid- (NOx), gegebenenfalls Schwefeloxid- (SOx) und Gesamtkohlenstoff-Emissionen (C_{ges}) überprüft werden. Die derzeit gültigen Vorgaben der TA Luft speziell für Halmgutfeuerungen können im Einzelfall von der genehmigenden Behörde einerseits weiter reduziert und andererseits um weitere Parameter aus dem Allgemeinem Teil der TA Luft ergänzt werden.

Tab. 11: Grenzwerte für Halmgutfeuerungen nach TA Luft (BMUB, 2002)

4. BImSchV (Anforderungen nach TA Luft)						
Anlagengröße		**100 kW ≤ x < 1MW**	**1 ≤ x < 2,5 MW**	**2,5 ≤ x < 5 MW**	**5 ≤ x < 25 MW**	**25 ≤ x < 50 MW**
O_2-Bezug		**11%**	**11%**	**11%**	**11%**	**11%**
	nach					
CO	**§ 5.4.1.3**	0,25 g/m³	0,25 g/m³	0,25 g/m³	0,25 g/m³	0,25 g/m³
Staub	**§ 5.4.1.3**	50 mg/m³	20 mg/m³	20 mg/m³	20 mg/m³	20 mg/m³
NO_X	**§ 5.4.1.3**	0,50 g/m³	0,40 g/m³	0,40 g/m³	0,40 g/m³	0,40 g/m³
SO_x	**§ 5.2.4**	0,35 g/m³	0,35 g/m³	0,35 g/m	0,35 g/m	0,35 g/m
C_{ges}	**§ 5.2.5**	50 mg/m³	50 mg/m³	50 mg/m³	50 mg/m³	50 mg/m³
Besonderheiten				kontinuierliche Messung von Kohlenmonoxid		
					Staubmessung qualitativ	Staubmessung kontinuierlich

4.2 Voruntersuchungen an einem Prototyp

Zu Beginn des Projektes wurde an einem Prototyp einer neuartigen halmguttauglichen Feuerungstechnologie Voruntersuchungen hinsichtlich des Verbrennungs-, Betriebs- und Emissionsverhaltens des Kessels durchgeführt (Abb. 16).

Abb. 16: Prototyp einer neuartigen Kleinfeuerungsanlage (< 50 kW) für die Verbrennung von Halmgütern

Diese Felduntersuchungen dienten u.a. als Grundlage zur Abwägung für die Wahl einer geeigneten Testanlage für weitere Verbrennungsversuche. Die Anlage zeigte bei punktuellen Messungen (Staubmessgerät Wöhler SM 96 CO, Bezugssauerstoff 13 %) Emissionen von 0,798 g/m³ bzw. 0,193 g/m³ für CO und von 0,021 g/m³ bzw. 0,012 g/m³ für Staub (Tab. 12).

Tab. 12: Emissionsmessungen an einem Prototyp einer neuartigen Kleinfeuerungsanlage

	O_2-Bezug	Brennstoff	CO (g/m³)	Staub (g/m³)
1. Messung	13 %	Strohpellets	0,798	0,021
2. Messung	13 %	Strohpellets	0,193	0,012

4.3 Beschreibung der eingesetzten Feuerungstechnologien

Schwerpunkte der Arbeiten des dritten Arbeitspaketes bestanden in der Durchführung von Verbrennungsversuchen an einer kleinen und einer mittleren Feuerungsanlage. Dabei wurden wie geplant die Arbeiten an einer Anlage im Geltungsbereich der 1. BImSchV und an einer Anlage im Geltungsbereich der 4. BImSchV und damit im Geltungsbereich der TA Luft durchgeführt. Nachdem bereits im zweiten Berichtszeitraum Verbrennungsversuche an einem Prototyp einer neuartigen halmguttauglichen Feuerungstechnologie hinsichtlich des Verbrennungs-, Betriebs- und Emissionsverhaltens des Kessels durchgeführt wurden (Kay und Hering, 2011), erfolgten daraufhin Messungen an realen Praxisanlagen.

4.3.1 Geltungsbereich der 1. BImSchV – TWIN HEAT M20i

Zunächst erfolgte die Auswahl der Kleinfeuerungsanlage (KFA) im Geltungsbereich der 1. BImSchV. Da der ursprünglich geplante Einsatz einer KFA mit 40 kW_{FWL} der Firma AGROOM aufgrund der Insolvenz der Firma nicht möglich war, musste sehr kurzfristig Ersatz beschafft werden und es erfolgte der Einsatz einer Kleinfeuerungsanlage der Firma TWIN HEAT aus Dänemark, welche freundlicherweise kostenlos vom deutschen Händler, der Firma Hans-Jürgen Helbig GmbH aus Nörten-Hardenberg zur Verfügung gestellt wurde (Anhang IX).
Konkret wurde der Twinheat Farmfire mit 29 kW maximaler Feuerungswärmeleistung (bezogen auf Holzpellets) eingesetzt (Abb. 17). Diese KFA ist laut Herstellerangaben eine automatische Biobrennstoffanlage für Holzpellets, Holzhackschnitzel und Getreide und wird besonders als Anlage für die Landwirtschaft, Gärtnereien, größere Gebäude und Industriebetriebe empfohlen. Es besteht zusätzlich die Möglichkeit zur Stückholzfeuerung im Notbetrieb. Es gibt bei dieser Anlage drei unterschiedliche Typen in verschiedenen Größen von 29, 48 oder 80 kW. Die Anlage ist mit einem angeflanschten Vorratsbehälter ausgestattet.

Abb. 17: Twinheat Farmfire 29 kW (links, [1]) und Feldmessungen am TWIN HEAT M 20i am Standort Dornburg (Foto rechts: Th. Hering, TLL)

Man kann wählen zwischen einem Fassungsvermögen von 300, 500, 700 und 1400 Liter. Die Feuerungsanlage besteht aus drei Einheiten, der Kesseleinheit, dem wassergekühltem Brennerkopf und dem Vorratsbehälter mit robustem Brückenbrecher. Zusätzlich ist sie ausgestattet mit einem Sprenklersystem mit Rückbrandsicherung, Steuerung, Zuluftregler für Stückholz im Notbetrieb, einer Abgastemperaturregulierung im Kessel (manueller Bypass), sowie einer serienmäßigen Lambdasonde. Gegen Mehrpreis kann die Anlage mit einer automatischen Ascheaustragung und einer automatischen Wärmetauscher-Reinigung ausgestattet werden. Die Kombifeuerungsanlage wurde vom Dänischen Technologischen Institut (DTI) nach DS/EN 303-5 für die Brennstofftypen Holzpellets, Hackschnitzel und Getreide geprüft. Dabei konnten sehr gute Ausbrandqualitäten (geringe CO-Emissionen) nachgewiesen werden (DANAK-Prüfbericht).

4.3.2 Geltungsbereich der 4. BImSchV – Schmid UTSW 360

Des Weiteren wurden die Untersuchungen an einer Anlage im Leistungsbereich der 4. BImSchV an der TLL hauseigenen Feuerungsanlage am Standort Dornburg durchgeführt (Abb. 18). Es handelt sich dabei um eine Anlage der Firma Schmid AG (Schweiz), (Anhang IX). Von dieser Firma werden generell vier verschiedene Feuerungssysteme für unterschiedliche Biobrennstoffe angeboten. Bei dem für Sonderbrennstoffe wie z.B. Halmgüter spezifisch geeignetem System handelt es sich um die UTSW–Kesseleinheit, welche mit einem beweglichen Schrägvorschubtreppenrost ausgerüstet ist. Das Brennmaterial wird von der hinteren Seite der Feuerung auf den Schrägvorschubrost zugeführt. Der Rost besteht aus wassergekühlten Rostbalken und die Roststäbe sind so konstruiert, dass diese sich gegenseitig überlappen und dadurch der Rostdurchfall klein ist.

Abb. 18: Schematischer Aufbau einer UTSW- Kesselserie (links, [2]) und Feldmessungen am UTSW 360 in Dornburg (Rechts, Foto: Th. Hering, TLL)

Im Weiteren ist der Rost so ausgelegt, dass eine gleichmäßige Verteilung der in verschiedenen Zonen zugeführten Primärluft möglich ist und dadurch eine ruhige, ungestörte Vergasungszone entsteht. Der Antrieb der Rostwagen erfolgt hydraulisch, wobei die Bewegungsintervalle automatisch der Leistung angepasst werden. Die komplette Brennkammer ist wassergekühlt und mit feuerfestem Material ausgekleidet und sorgt für eine entsprechende Kühlung auch beim Einsatz von Brennstoffen, welche niedrige Ascheschmelzpunkte aufweisen. Die in der Brennkammer und dem Ausbrandzug zugeführte Sekundärluft ermöglicht eine gestufte Verbrennung. Damit sind eine Optimierung des Ausbrandergebnisses (Minimierung der CO-Emissionen) und eine Reduktion der Stickoxidkonzentrationen in den Abgasen möglich. Dadurch sind im Vergleich zu herkömmlichen Feuerungssystemen besonders niedrige Emissionswerte erreichbar. Die Asche wird durch den Vorschubrost langsam zum Ende des Rostes transportiert und dort der automatischen Entaschung zugeführt. Das Entaschungssystem ist auch für Brennmaterial mit hohen Aschegehalten (ca. 10 %) ausgelegt. Optional kann bei diesem System eine Unterrostentaschung eingesetzt werden. Damit können Aschefraktionen welche durch den Rost fallen ebenso ausgetragen werden. Die Feuerungseinheit ist komplett von der Primär- und Sekundärluft umspült und sorgt zusammen mit der Isolation für minimale Abstrahlung. Über der Feuerung ist ein entsprechend dimensionierter 3-Zug Rauchrohrkessel aufgesetzt. Zur Minimierung von groben Flugaschepartikeln befindet sich direkt hinter dem Wärmetauscher ein Multizyklon [2]. Des Weiteren ist die Anlage ausgestattet mit einem filternden Abscheider, einem Metallgewebefilter der Firma Oskar Winkel aus Amberg. Jeweils drei Filterpatronen sind in vier aufeinanderfolgenden Abscheidekammern installiert. Während des Betriebs der Anlage erfolgt eine zeitgesteuerte aufeinanderfolgende diskontinuierliche Abreinigung der Filterpatronen in den einzelnen Kammern (Hering, 2007a). Als Steuerung wird beim UTSW die „Schmid Pyrotronic Modular“ verwendet. Für die Rege-

lung der Anlage ist eine SPS eingesetzt, welche mit 5 Regelkreisen für die Leistungs-, Verbrennungs-, Unterdruck-, Lambda- und Luftmengenregulierung arbeitet. Über ein bedienungsfreundliches Display können alle wichtigen Anlagendaten abgerufen werden. Um eine entsprechende Kombination mit einer Visualisierung wäre die Anlage erweiterbar [2].

4.4 Voruntersuchungen an den Feuerungsanlagen

An beiden Anlagen wurden zahlreiche Voruntersuchungen mit verschiedenen Brennstoffen, u.a. auch Agrarholzpappelhackschnitzel, durchgeführt (Anhang X). Diese sind notwendig um Werkseinstellungen gegebenenfalls auf den Brennstoff optimiert einzustellen bzw. einen Vergleich zu empfohlenen Werkseinstellungen darzustellen. Die folgenden Abbildungen zeigen einen Überblick über die Ausbrandergebnisse ausgewählter Einstellungsmessungen (Abb. 19 - Abb. 22).

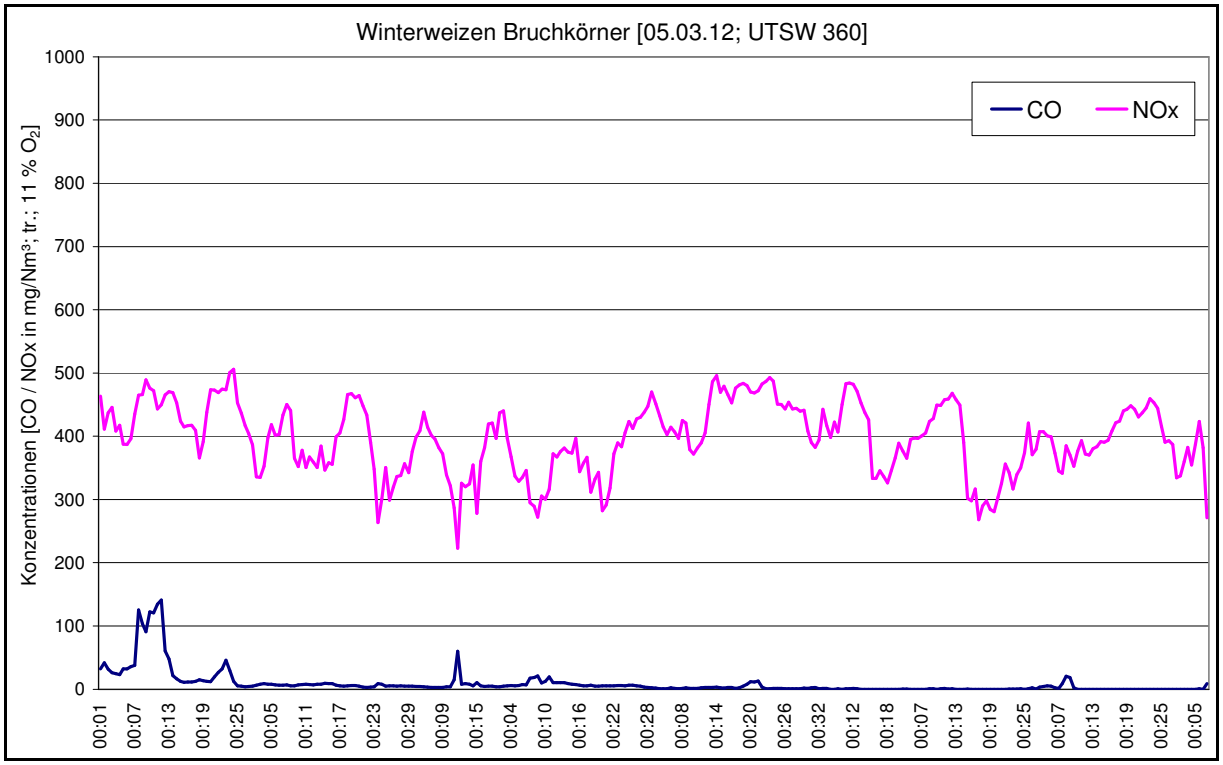


Abb. 19: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Winterweizenbruchkörnern (HK BK (1), 05.03.2012); mittlere Nennwärmeleistung 307 kW; Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

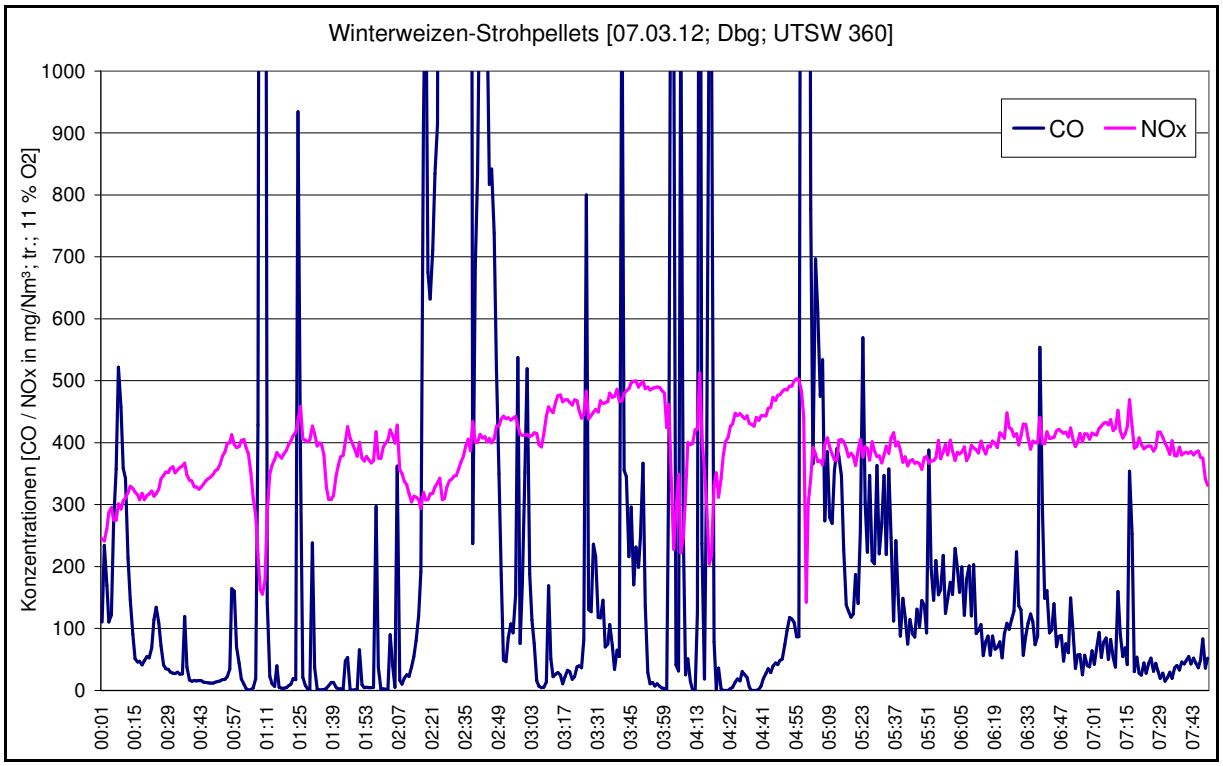


Abb. 20: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (HK WWSP, 07.03.2012); mittlere Nennwärmeleistung 259 kW; Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

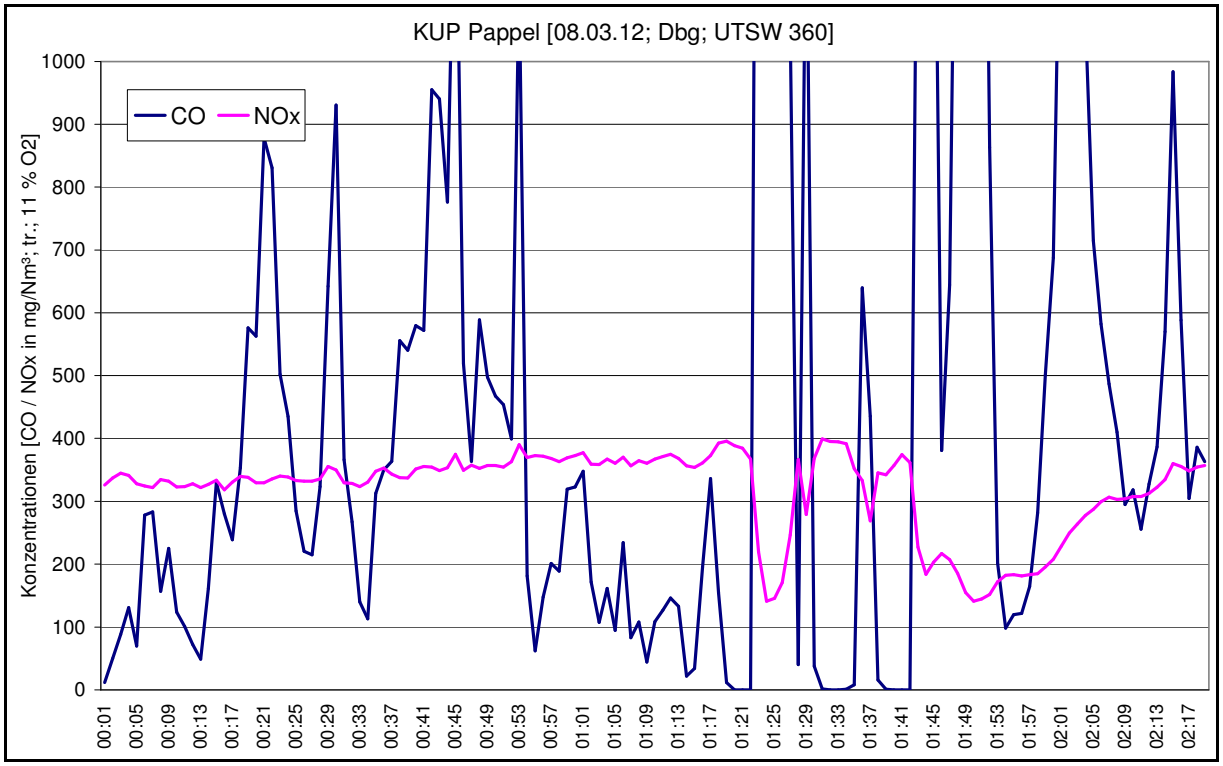


Abb. 21: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Agrarholzpappelhackschnitzeln (HK AHPaHS, 08.03.2012); mittlere Nennwärmeleistung 280 kW; Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

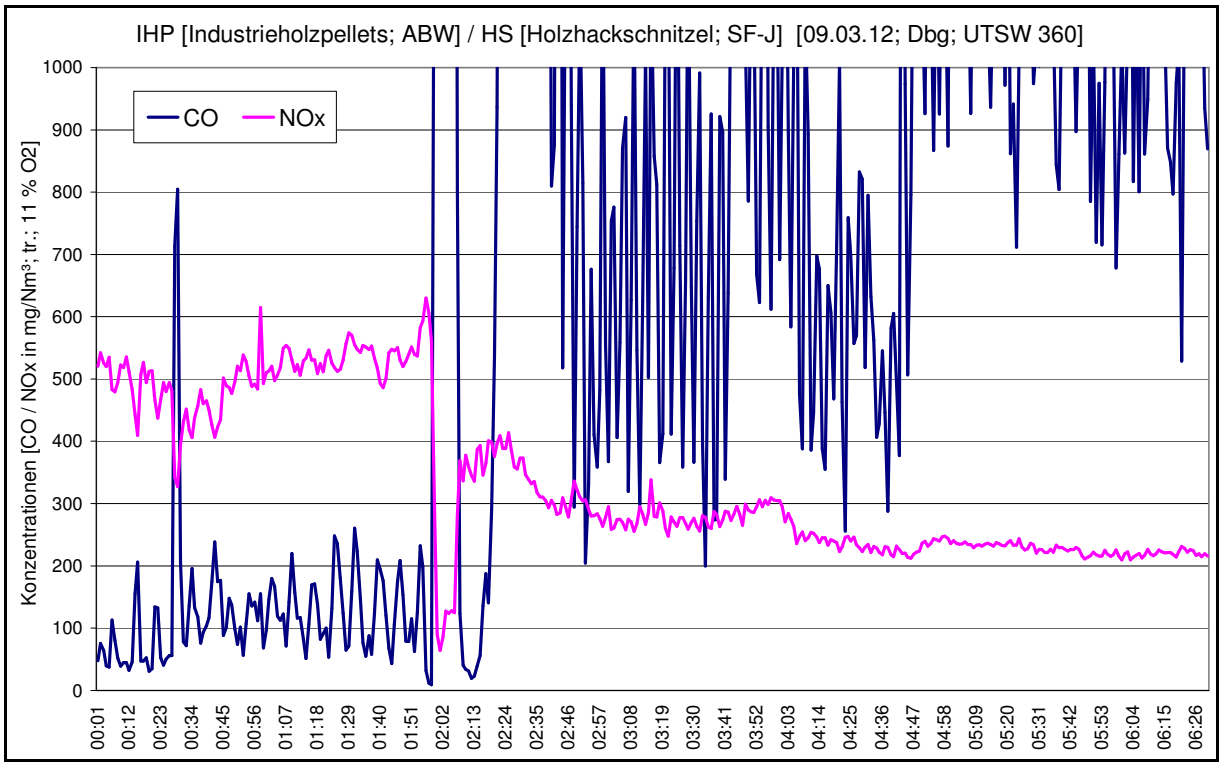


Abb. 22: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Industrieholzpellets bzw. Waldrestholzhackschnitzeln (HK IHP ABW / HS SF-J, 09.03.2012); mittlere Nennwärmeleistung 328 kW; Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Fazit

Aus den Voruntersuchungen wird deutlich, dass jeder Brennstoff spezifisch eingestellt und optimiert werden muss um die entsprechend hohe Anforderung der Emissionsgrenzwerte einzuhalten. Des Weiteren ist festzuhalten, dass die etablierte Anlagenkonfiguration nicht für jeden Brennstoff emissionsgerecht optimierbar war. Das betrifft vor allem die Brennstoffe mit einer nur geringen Energiedichte aufgrund hoher Wassergehalte wie z.B. Agrarholzpappelhackschnitzel (HK AHPaHS), (Abb. 21). Außerdem wird deutlich, dass brennstoffspezifische Programme für die einzelnen Applikationsformen und Ausgangsstoffe notwendig sind (Abb. 22).

4.5 Methodik der Verbrennungsversuche

Nach Auswertung und Diskussion der Ergebnisse der Voruntersuchung mit dem Kooperationspartner (TLUG, Landesmesstelle analog § 26 BImSchG), wurden die entsprechenden Messreihen (Feuerungsanlagen, Brennstoffe, Emissionsparameter) aufgestellt und durchgeführt (Anlage XI). Die Anordnung der Messstellen sowie die Probenahmemethodik der Anlage UTSW-360 ist in Anlage XII und der Anlage M20i in Anlage XIII dargestellt.

Kontinuierliche Messungen

In den Verbrennungsversuchen wurden folgende Analysemethoden für die kontinuierlich zu messenden Abgaskomponenten eingesetzt:

Nichtdispersive Infrarotabsorption (NDIR)

Die nach diesem Prinzip arbeitenden Messgeräte werden zur Messung von CO-, CO_2-, NO-, N_2O- und SO_2- Konzentrationen eingesetzt. Es kamen Messgeräte der Firma Maihak AG zum Einsatz. Regelmäßig erfolgte die Kalibrierung der Messgeräte mit folgenden zertifizierten Prüfgasen:

CO	834	mg/m³	Messgerät: UNOR 6N
CO_2	18,1	Vol.-%	Messgerät: UNOR 610
NO	805	mg/m³	Messgerät: UNOR 610
SO_2	798	mg/m³	Messgerät: UNOR 610
N_2O	52,5	mg/m³	Messgerät: UNOR 6N
O2	25	Vol.-%	Messgerät: UNOR 610

Berechnung der NO_2-Konzentration

Für diese Aufgabe wird ein NO_2/NO- Konverter INOX-CV der Firma INSAT AG eingesetzt. Das im Messgas enthaltene NO_2 wird im Konverter zu NO reduziert. Das reduzierte NO und das bereits enthaltene NO im Messgas gelangt zur Messeinheit und wird detektiert. Die Summe aus NO und reduziertem NO_2 ergibt den Gehalt an NO_x (Summenwert) im Messgas.

Flammenionisationsdetektor (FID)

Mit dem FID wurden die organischen Kohlenstoffverbindungen als Summe des gesamtorganischen Kohlenstoffes (C_{ges}) gemessen. Das Messgerät FID-Analysator Modell 3006 der Firma Bernath-Atomic kam zum Einsatz.

Zu Beginn jedes Versuchstages wurde das FID mittels eines zertifizierten Prüfgases (Propan) von 133 mg/m³ kalibriert.

Magnetodynamisches Messverfahren

Die paramagnetischen Eigenschaften des Sauerstoffs werden bei diesem Messverfahren zur Bestimmung des O_2 - Gehaltes genutzt. Das Messgerät OXOR 610 der Firma Maihak kam dabei zum Einsatz.

Diskontinuierliche Messungen

In den Verbrennungsversuchen wurden folgende Analysemethoden für die diskontinuierlich zu messenden Abgaskomponenten eingesetzt:

Gesamtstaub-Rohgas: VDI 2066 Blatt 2

Zur Bestimmung des Staubgehaltes wurden drei Messungen mit jeweils 30 Minuten Messdauer durchgeführt. Die Probe wurde isokinetisch dem Rauchgas entnommen.

Das Rückhaltesystem der Partikelemission bestand aus Titanfilterhülse gestopft mit feinfaseriger Quarzwolle und nachgeschaltetem Planfilter aus Quarzfaser (Munktel 360).
Analytik: Trocknung und Abkühlung (Exsikkator) der Filter, anschließende Auswaage
Messgeräte: DMS-Waage, MC BB 100 der Satorius AG

Gesamtstaub: 1. BImSchV
Die Staubmessungen mit Hilfe des Schornsteinfegermessgerätes SM96-CO der Fa. Woehler wurden nach Anlage III der 1. BImSchV durchgeführt (drei Messungen mit jeweils 15 Minuten Messdauer).
Analytik: Trocknung und Abkühlung (Exsikkator) der Filter, anschließende Auswaage
Messgeräte: DMS-Waage, MC BB 100 der Satorius AG

Chlorwasserstoff als HCl: nach VDI 3480 Blatt 1
Die Probenahme erfolgte mittels beheizter Entnahmesonde, Partikelfilter und 2 in Reihe geschalteter Gaswaschflaschen, welche mit destilliertem Wasser als Absorptionsmittel gefüllt waren.
Analytik: Methode nach Mohr, Titration mit Silbernitratlösung

PCDD/F, PAK: nach EN 1948-1, 2, 3
Die Probenahme wurde mittels gekühlter Sonde, Kondensatgefäß und XAD-Kartusche durchgeführt. In das Kondensatgefäß wurden 300 ml Wasser (für HPLC) vorgelegt. Diese Vorlage wurde mit $^{13}C_{12}$ –12378 PeCDF, $^{13}C_{12}$ –123789HxCDF, $^{13}C_{12}$ –1234789HpCDF gespikt (Probenahmestandard). Die Probe wurde über 5 Stunden dem Rauchgas entnommen, so dass ca. 2 bis 2,5 m^3 i. N. tr. Teilgasvolumen pro Stunde gesammelt werden konnte. Die Probenahme erfolgte isokinetisch.
Analytik:
Das gesamte Kondensat sowie ggf. das Sondenmaterial wurde einer dreifachen flüssig/flüssig- Extraktion mit Toluol unterzogen. Das Toluol wurde vorher zur mehrstufigen Spülung der Originalflaschen eingesetzt. Adsorbens und Staubfilter wurden mit dem Toluol aus der Extraktion 16 h im Soxhlet extrahiert. Die Proben wurden zur $^{13}C_{12}$-markierten PCDD/F (alle 2378-Kongenere der zu analysierenden Homologengruppen) versetzt (Extraktionsstandard). Nach säulenchromatographischer Reinigung erfolgte die Zugabe von $^{13}C_{12}$-1234-TetraCDD (Spritzenstandard), um die Wiederfindungsraten der vorher eingesetzten $^{13}C_{12}$-markierten PCDD/F-Standards bestimmen zu können. Zur Analyse wurde der Gaschromatograph HP 5890 II, gekoppelt mit dem HP-MSD 5970, verwendet. Als Kapillare fand eine SP 2331 Verwendung. Wie auch in der Literatur beschrieben, lassen sich die 12378-

und 12348-PentaCDF sowie die 123478- und 123479-HexaCDF an SP-2331 als GC- Phase nicht trennen. Es werden deshalb die entsprechenden Summenwerte angegeben, die als Maximalwerte der Kongeneren mit 2378-Cl-Substitutionsmuster anzusehen sind. Die Wiederfindung der eingesetzten internen Standards (Extraktionsstandard) bezogen auf das $^{13}C_{12}$-1234-TetraCDD, als Maß für die Zuverlässigkeit der Probenaufbereitung, sollten zwischen 50% und 115% liegen.

Messgeräte: GC 5890 II von Hewlett Packard,
MSD 5971 bzw. 5973 von Hewlett Packard

4.6 Ergebnisse der Messreihen

Eine Übersicht der Ergebnisse der Messungen für die Anlagen beider Geltungsbereiche befindet sich in Anhang XIV.

4.6.1 Geltungsbereich der 1. BImSchV – TWIN HEAT M20i:

In den Abbildungen 23 bis 28 sind die Emissionskonzentrationen für Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NOx) und Schwefeldioxid (SO_2) sowie deren Schwankungsbreiten für den holzartigen Vergleichsbrennstoff Industrieholzpellets (HK IHP), die Landschaftspflegeheupellets (HK LPHP) und die Winterweizenstrohpellets (WWSP PTG 05) dargestellt.

Bei der Verbrennung der Industrieholzpellets vom 18.04.2012 zeigt sich, dass die Verbrennung der Pellets fast vollständig verläuft (Abb. 23). Dies zeigt sich in sehr geringen Schwankungen der CO-Konzentrationen (Abb. 24). Auffällig sind die bei der Verbrennung von Industrieholzpellets vergleichsweise hohen NOx-Werte, die auf die hohen N-Werte (4,09 % d. TM) in den Pellets zurückzuführen sind (Tab. 13). In Bezug auf die Einhaltung der Staubgrenzwerte, im Mittel 57 mg/Nm³ (13 % O_2; Anhang XIV), ist ggf. auf die Notwendigkeit des Einsatzes von Abscheidemaßnahmen hinzuweisen. Dies gilt insbesondere für Neuanlagen bei einer Inbetriebnahme ab dem 01.01.2015.

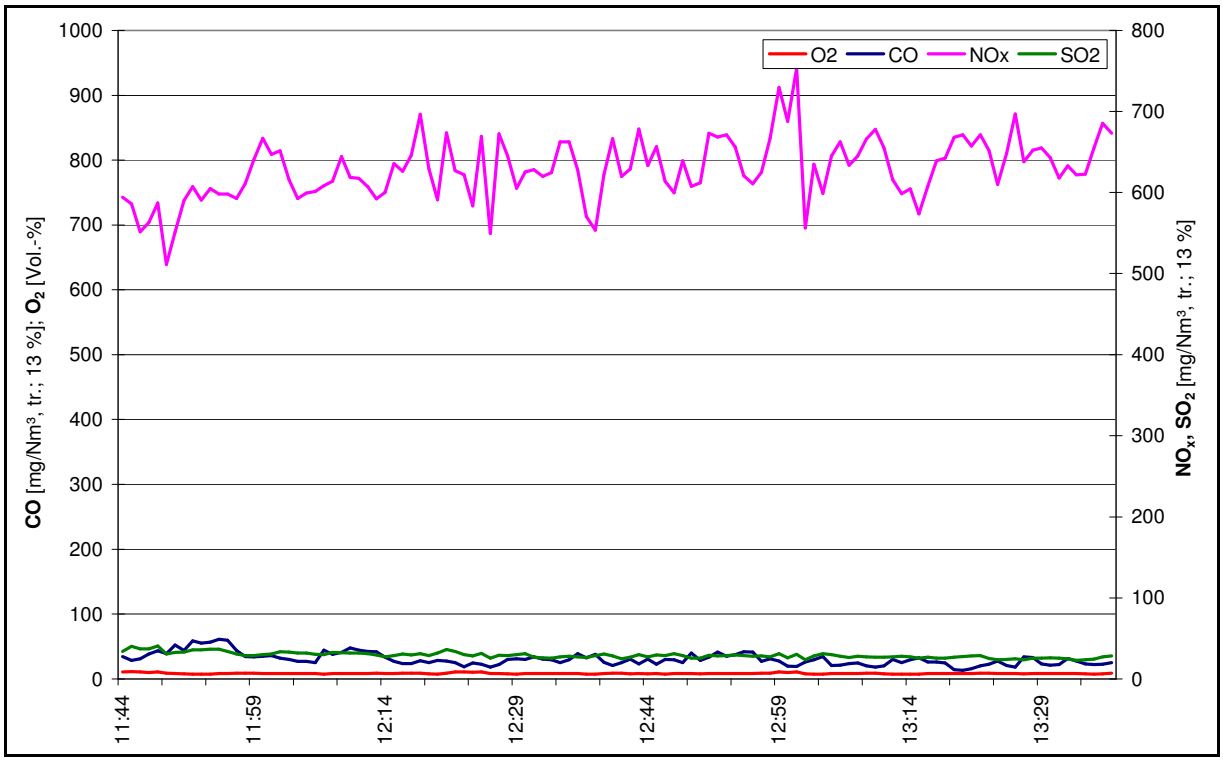
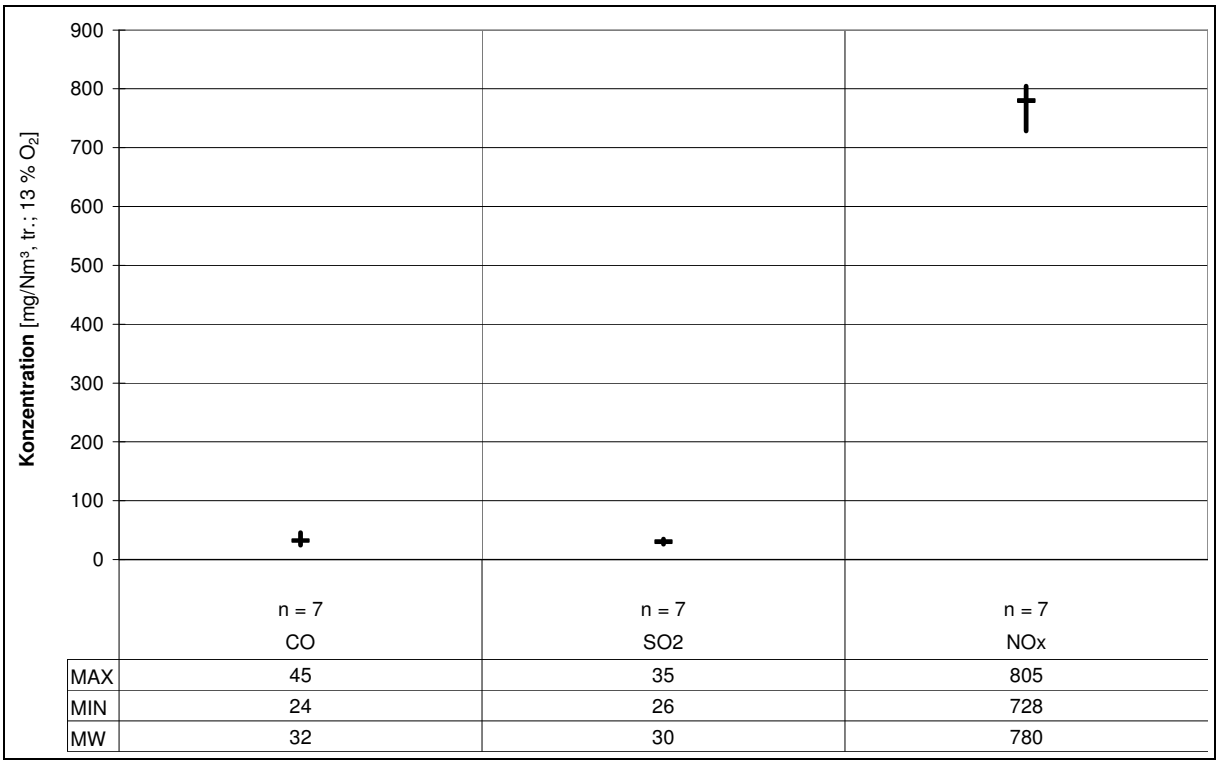


Abb. 23: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_X) und Schwefeldioxid (SO_2) bei der Verbrennung von Industrieholzpellets (HK IHP, 18.04.2012); mittlere Nennwärmeleistung 23 kW; Erhebung von Praxisdaten am M 20i, Fa. TWINHEAT; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen



	n = 7 CO	n = 7 SO2	n = 7 NOx
MAX	45	35	805
MIN	24	26	728
MW	32	30	780

Abb. 24: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Industrieholzpellets (HK IHP, 18.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am M 20i, Fa. TwinHeat; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen.

Die Schwankungsbreiten der Emissionskonzentrationen für Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NOx) und Schwefeldioxid (SO_2) für den Brennstoff Landschaftspflegeheupellets (HK LPHP; Abb. 25) sind deutlich größer als bei den Industrieholzpellets (HK IHP) allerdings werden auch hier alle Grenzwerte eingehalten. In Bezug auf die Messwerte für Staub ist auch für diese Brennstoffe ab 1.1.2015 eine entsprechend geeignete Abscheidemaßnahme zu integrieren (Tab. 13).

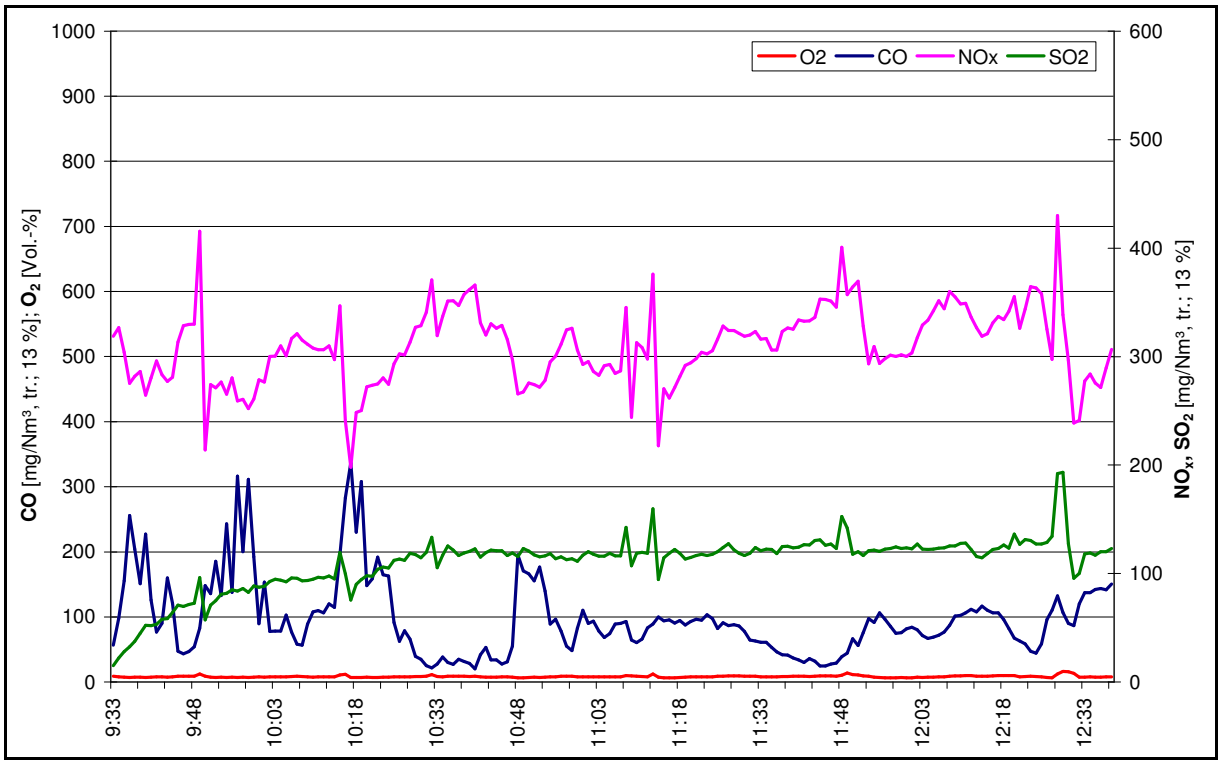
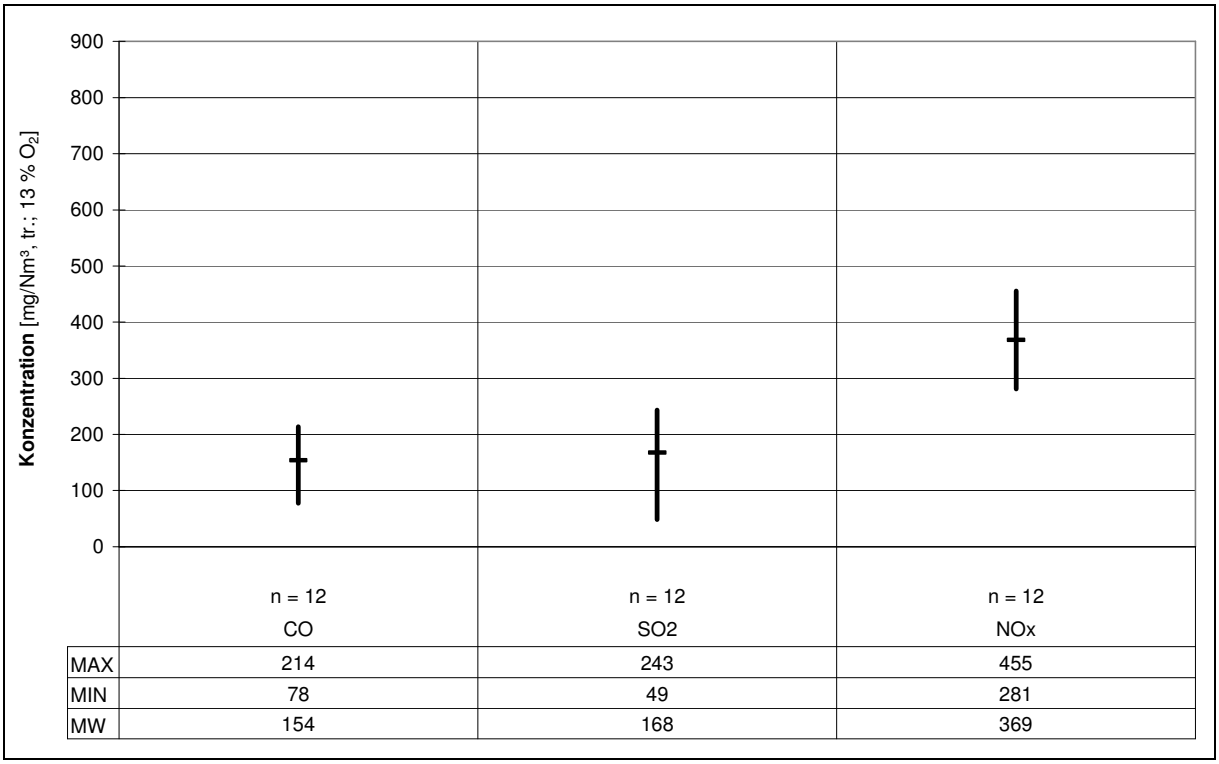


Abb. 25: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_X) und Schwefeldioxid (SO_2) bei der Verbrennung von Landschaftspflegeheupellets (HK LPHP, 13.04.2012); mittlere Nennwärmeleistung 25 kW; Erhebung von Praxisdaten am M 20i, Fa. TwinHeat; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Bei dem Brennstoff Winterweizenstrohpellets (WWSP PTG 05) wurden für Stickoxide (NOx) und Schwefeloxid (SO_2) analog zu Brennstoff HK IHP nur sehr geringe Schwankungen festgestellt (Abb. 27 und 28 bzw. 23 und 24). Allerdings zeigen die Kohlenmonoxidemissionen (CO) sehr hohe Schwankungsbreiten. Diese werden vor allem durch massive Verschlackungen im Bereich des Ausbrandrohres verursacht. Die Verschlackungen sind teilweise so stark, dass nach etwa 3 bis 4-stündigem Betrieb der Anlage ein manuelles Entfernen des Schlackepropfens notwendig wird.



	n = 12 CO	n = 12 SO2	n = 12 NOx
MAX	214	243	455
MIN	78	49	281
MW	154	168	369

Abb. 26: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Landschaftspflegeheupellets (HK LPHP, 13.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am M 20i, Fa. TwinHeat; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

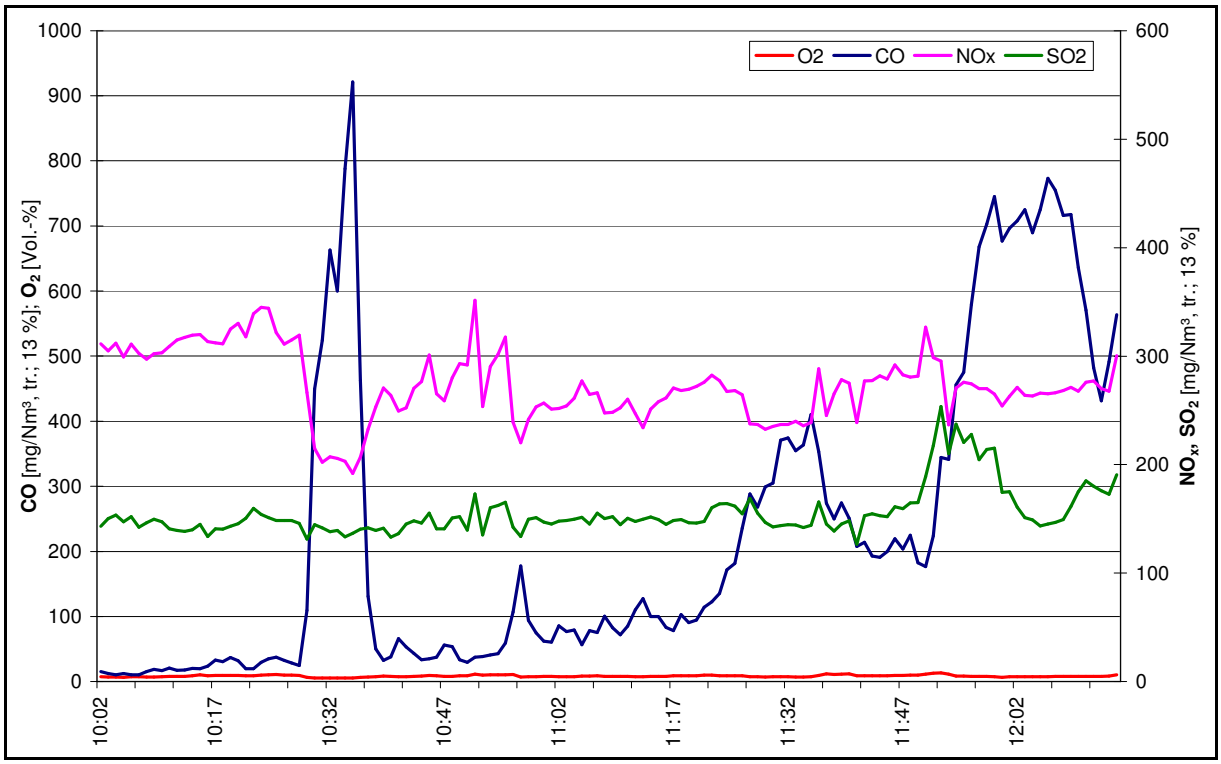


Abb. 27: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_X) und Schwefeldioxid (SO_2) bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (WWSP PTG 05, 17.04.2012); mittlere Nennwärmeleistung 24 kW; Erhebung von Praxisdaten am M 20i, Fa. TwinHeat; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

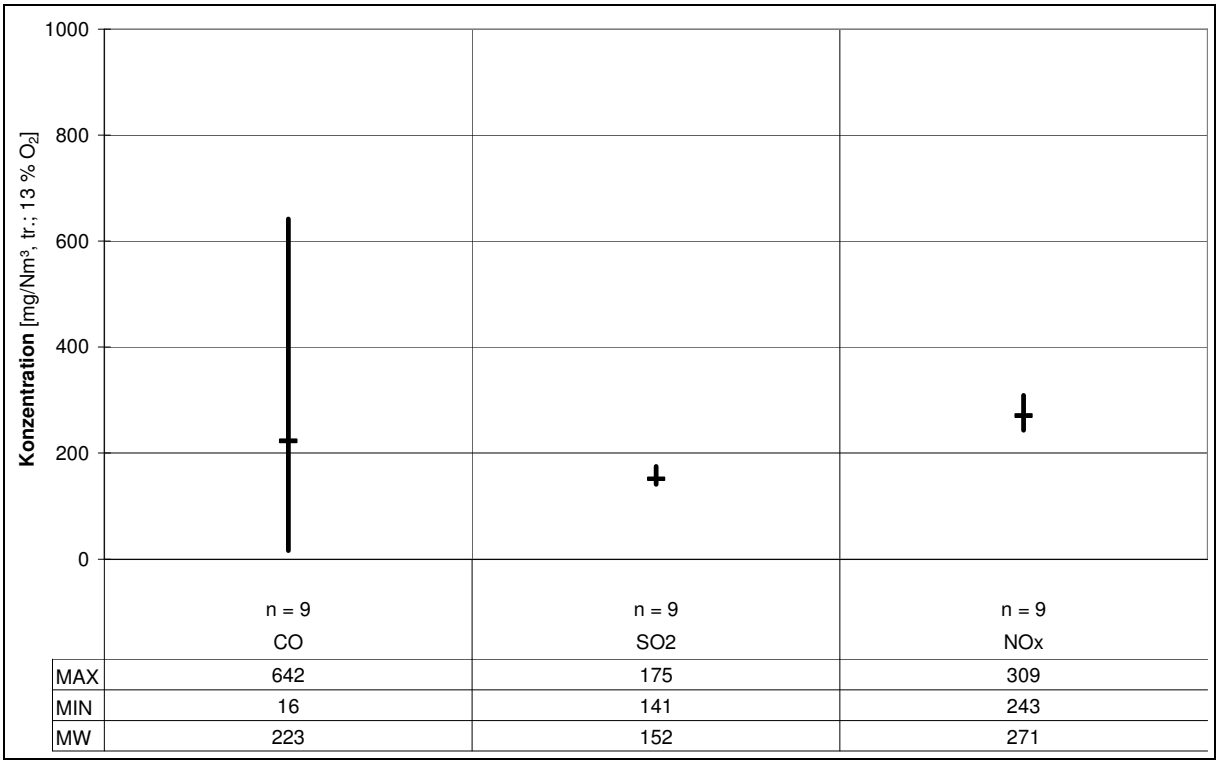


Abb. 28: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (WWSP PTG 05, 17.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am M 20i, Fa. TwinHeat; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Tab. 13: Vergleich von verbrennungsrelevanten Parametern der Brennstoffproben und Emissionen an der Anlage TWIN HEAT M20i

	HK IHP	**HK LPHP**	**WWSP PTG 05**
Emissionen			
Datum der Verbrennung	18.04.2012	13.04.2012	17.04.2012
CO [g/Nm^3 tr, 13% O_2]	0,03	0,15	0,22
NOx [g/Nm^3 tr, 13% O_2]	0,78	0,37	0,27
Staub [g/Nm^3 tr, 13% O_2] (n = 3)	0,06	0,08	0,13
SOx [g/Nm^3 tr, 13% O_2]	0,03	0,17	0,15
HCl [mg/Nm^3 tr, 13% O_2] (n = 3)	20,3	13,7	34,4
chem.-stoffl. Parameter			
C [% der TM]	48,4	44,8	43,2
N [% der TM]	4,09	1,42	0,61
Cl [% der TM]	0,02	0,09	0,22
S [% der TM]	0,03	0,09	0,11
Aschegehalt [% der TM]	1,07	9,29	9,27
Ascheerweichungspunkt [°C]		1100	1160
Aerosolbildende Stoffe [mg/kg der TM]	1308	13482	18488
Wassergehalt [%]	9,6	10,9	10,4
physik.-mechan. Parameter			
Schüttdichte[kg/m3]	692	695	611
Länge (Schwankung) [mm]	5,0 - 33,8	8,2 - 36,8	4,9 - 27,1
Durchmesser (Schwankung) [mm]	6,1 - 6,7	6,0 - 6,3	6,0 - 7,0
Mechan. Festigkeit (Schwankung) [Abrieb in %]	1,1 - 1,6	1,8 - 2,4	2,5 - 2,8

Unter Beachtung der geringen Anzahl von Wertepaaren werden die bekannten Zusammenhänge zwischen den Gehalten an Stickstoff, Schwefel bzw. Chlor im Brennstoff und den dazu korrespondierenden Emissionskomponenten Stick- und Schwefeldioxid bzw. Chlorwas-

serstoff in den Abbildungen 29 bis 33 dargestellt. Es zeigte sich, dass vor allem der Stickstoffgehalt der Pellets mit den Stickoxiden (Abb. 29), der Schwefelgehalt der Pellets mit den Schwefeloxiden (Abb. 30) sowie die aerosolbildenden Inhaltsstoffe (AEB) der Pellets mit den Staubemissionen (Abb. 33) korrelieren. Im Vergleich der Stickoxidemissionen der Kompaktate sind die mit ca. 300 mg/Nm³ deutlich geringeren Konzentration der Halmgutkompaktate gegenüber den Industrieholzpellets auffällig.

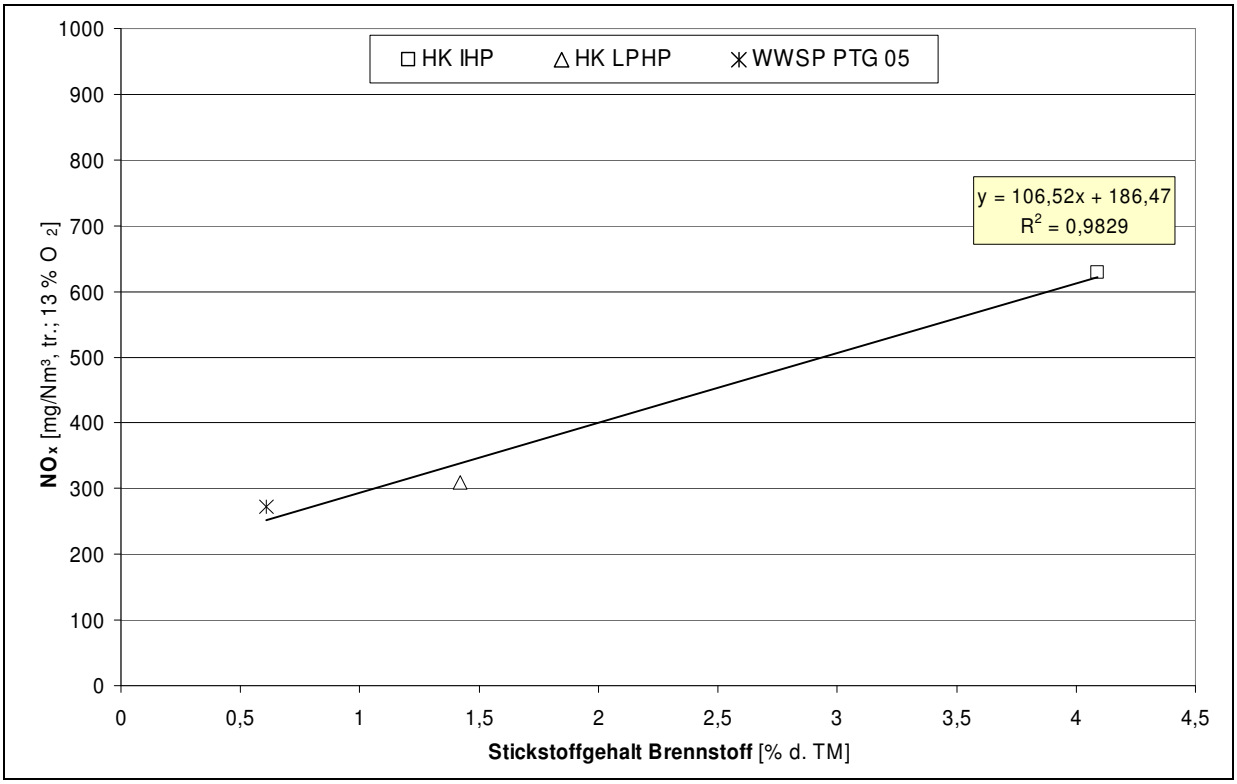


Abb. 29: Abhängigkeit der Stickoxidkonzentration vom Stickstoffgehalt im Brennstoff (HK IHP, 18.04.2012; HK LPHP, 13.04.2012 und WWSP PTG 05, 17.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am M 20i, Fa. TwinHeat; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Bei höheren Chlorgehalten der Brennstoffe ist jedoch lediglich eine Tendenz zu höheren HCL-Konzentrationen (Abb. 31) festzustellen. In Bezug auf eine Vorhersage für die zu erwartenden Staubemissionen hat sich der Summenparameter der aerosolbildenden Stoffe (Abb. 33) als der deutlich bessere Parameter gegenüber den Rohaschegehalten der Brennstoffe bestätigt (Abb. 32).

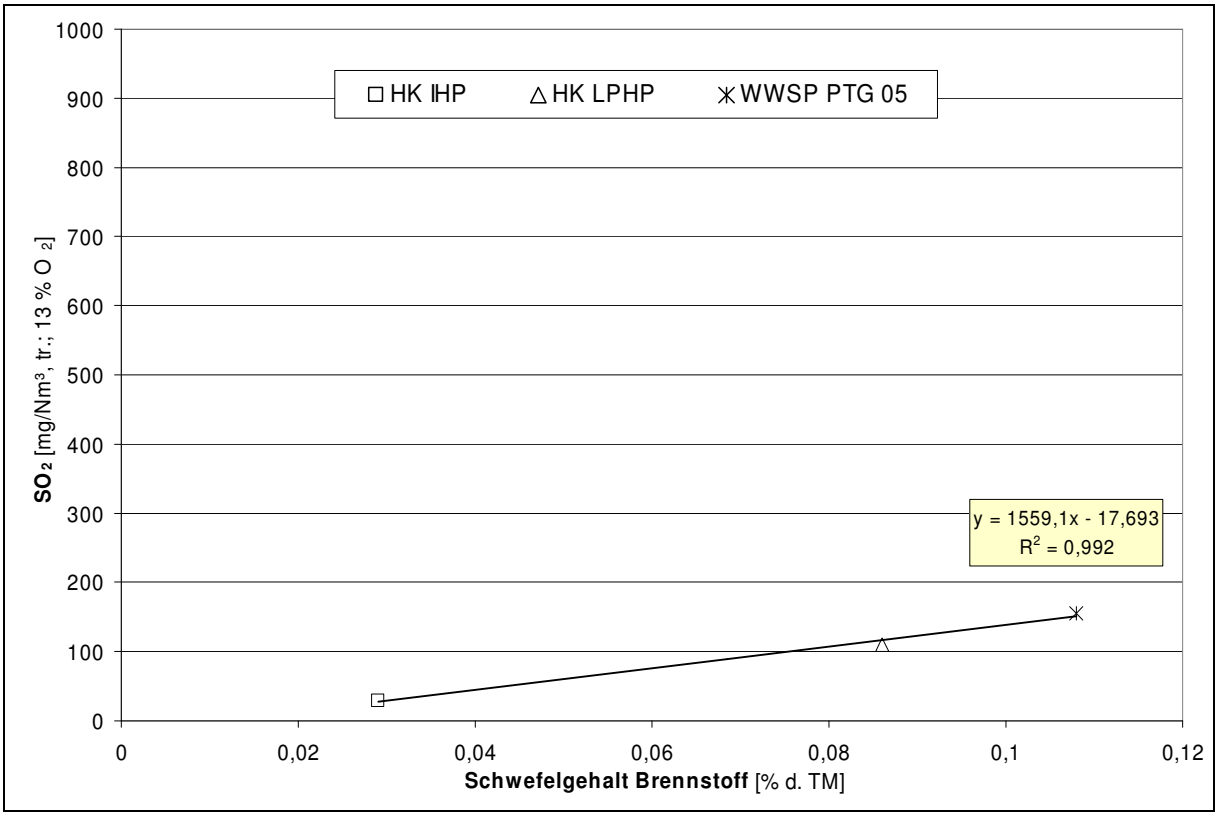


Abb. 30: Abhängigkeit der Schwefeldioxidkonzentration vom Schwefelgehalt im Brennstoff (HK IHP, 18.04.2012; HK LPHP, 13.04.2012 und WWSP PTG 05, 17.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am M 20i, Fa. TwinHeat; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

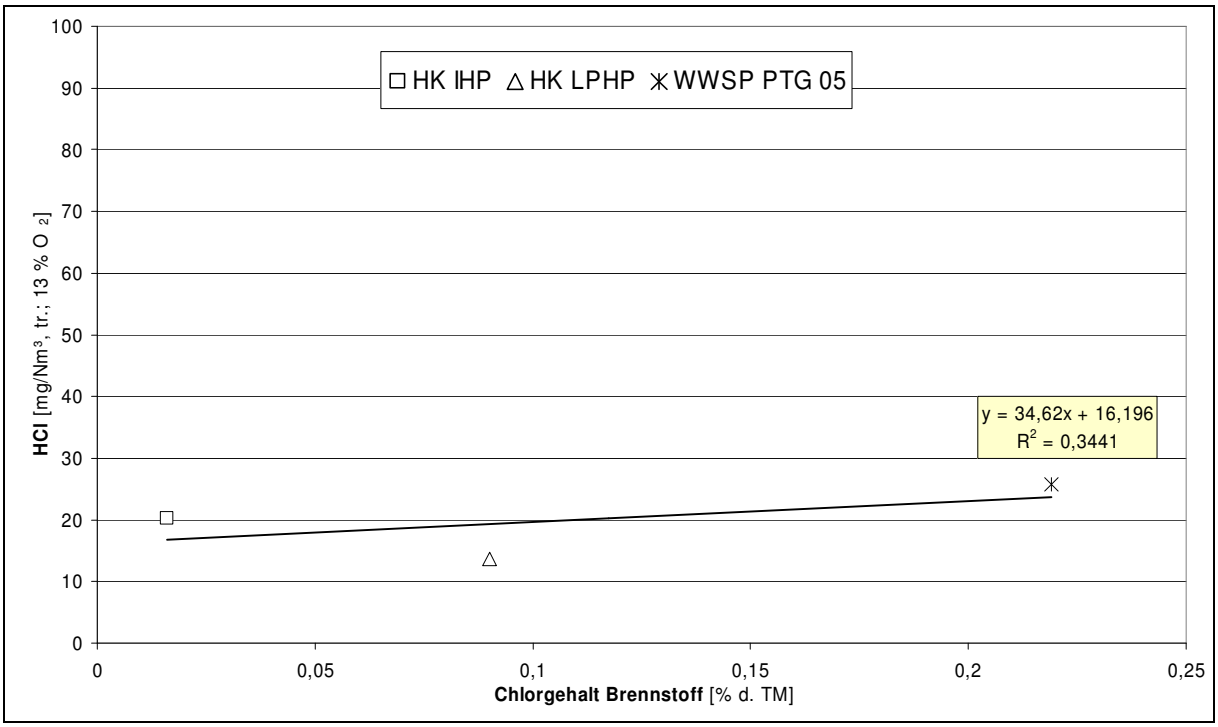


Abb. 31: Abhängigkeit der Chlorwasserstoffkonzentration vom Chlorgehalt im Brennstoff (HK IHP, 18.04.2012; HK LPHP, 13.04.2012 und WWSP PTG 05, 17.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am M 20i, Fa. TwinHeat; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

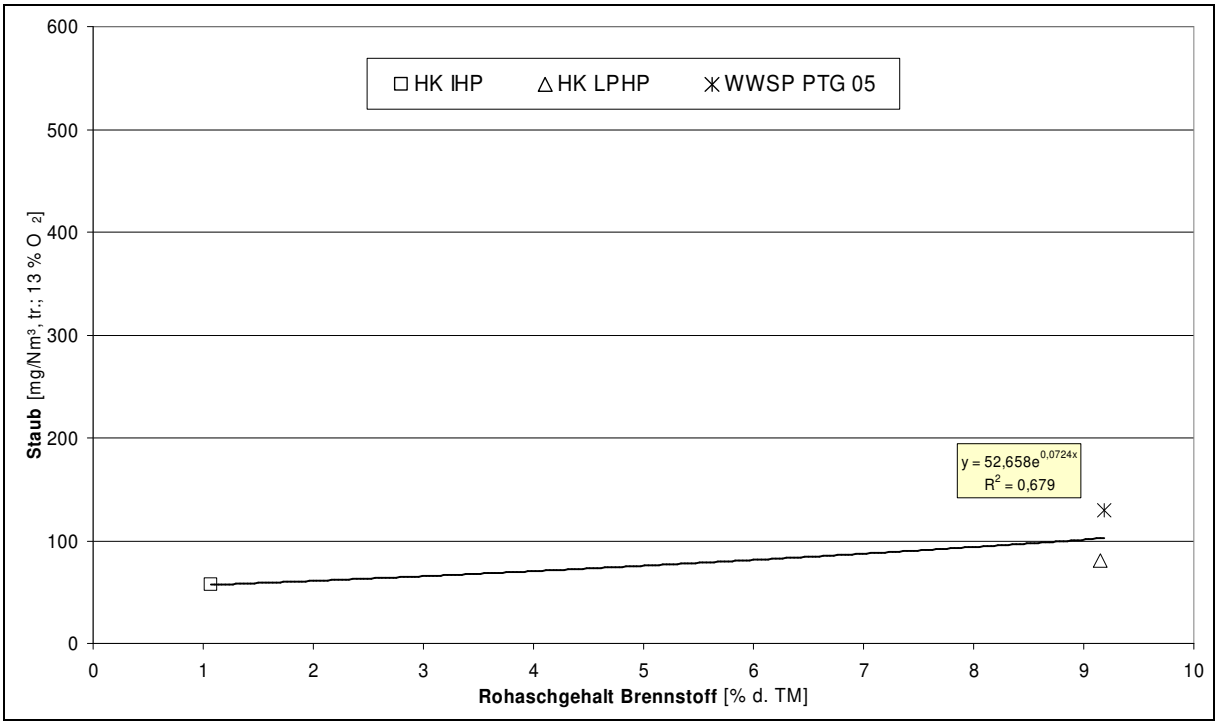


Abb. 32: Abhängigkeit der Rohgasstaubkonzentration vom Rohaschegehalt im Brennstoff (HK IHP, 18.04.2012; HK LPHP, 13.04.2012 und WWSP PTG 05, 17.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am M 20i, Fa. TwinHeat; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen.

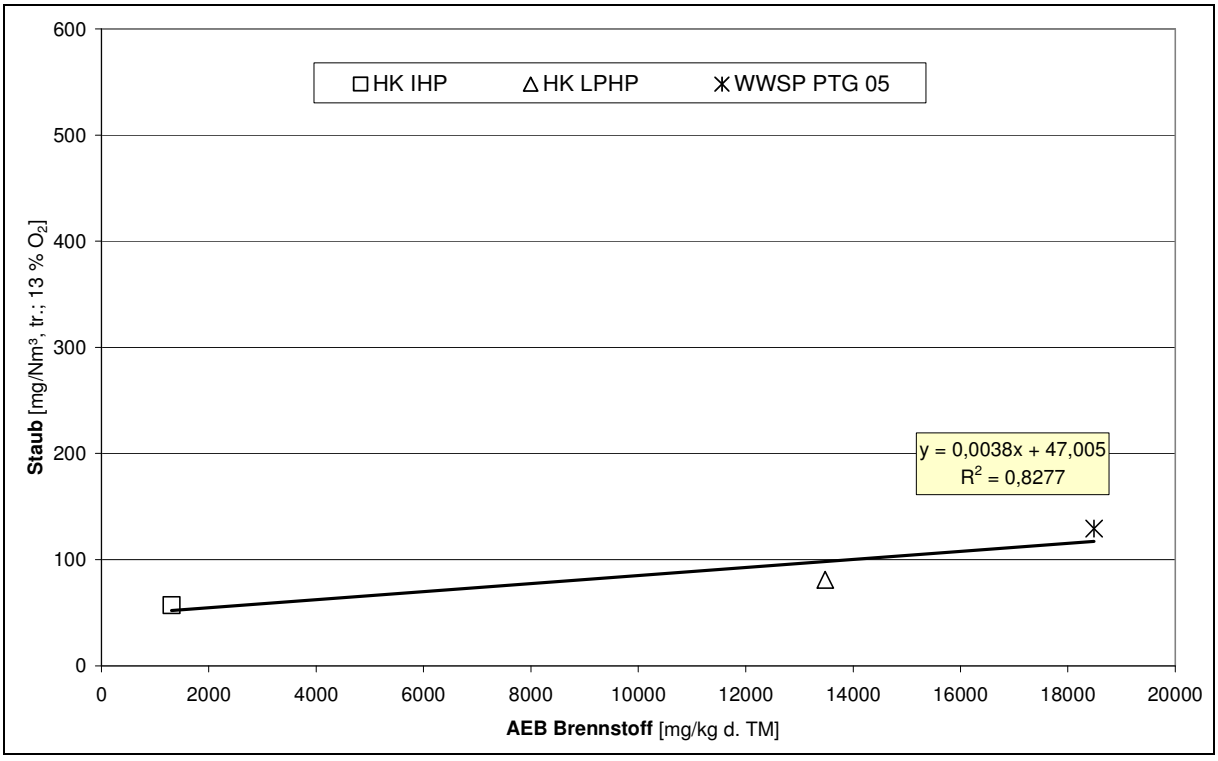


Abb. 33: Abhängigkeit der Rohgasstaubkonzentration vom Gehalt aerosolbildender Elemente im Brennstoff (HK IHP, 18.04.2012; HK LPHP, 13.04.2012 und WWSP PTG 05, 17.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am M 20i, Fa. TwinHeat; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Fazit

Mit Ausnahme der massiven Verschlackungen beim Einsatz von Winterweizenstrohpellets konnten mit allen eingesetzten Brennstoffen relativ gute Ausbrandergebnisse erzielt werden, welche selbst den Anforderungen der 2. Stufe der 1. BImSchV (0,4 g/Nm³ CO, 13 % O_2) genügen. In Bezug auf die Einhaltung der Staubgrenzwerte ist jedoch auf die Notwendigkeit des Einsatzes von Abscheidemaßnahmen hinzuweisen. Dies gilt insbesondere für Neuanlagen bei einer Inbetriebnahme ab dem 01.01.2015 bzw. bei Bestandsanlagen für den Brennstoff Stroh (Anhang XIV). Orientierungsmessungen für den Parameter Chlorwasserstoff zeigen mittlere Werte von kleiner 30 mg/Nm³ für Landschaftspflegeheu als auch Industrieholzpellets. Die mittleren HCL-Werte für Stroh liegen dagegen leicht über 30 mg/Nm³ (Anhang XIV).

4.6.2 Geltungsbereich der 4. BImSchV – Schmid UTSW 360:

In den Abbildungen 34 bis 49 sind die Emissionskonzentrationen für Kohlenmonoxide (CO), Stickoxide (NOx) und Schwefeldioxide (SO_2) sowie deren Schwankungsbreiten für die Brennstoffe Industrieholzpellets (HK IHP), Winterweizenbruchkörner (HK BK(2)) und zwei verschiedene Qualitäten an Winterweizenstrohpellets (WWSP PCM, WWSP PTG 05) dargestellt.

Bei orientierenden Emissionsmessungen bei der Verbrennung von Industrieholzpellets (14.03.2012) zeigte sich, dass bei der normalen Einstellung der Anlage für Waldrestholzhackschnitzel hinsichtlich Staub- und CO-Emissionen die Anforderungen an Bestandsanlagen der 1. BImSchV (Anlagen mit Inbetriebnahme bis 31.12.2014) uneingeschränkt erfüllt werden konnte (Abb. 34 und 35). Bei einer Optimierung bzw. Anpassung der Technologie an den Brennstoff sind noch weitere Emissionsminderungspotenziale möglich. Der eingesetzte Metallvliesfilter erzielte ausreichende Abscheideleistungen mit Staubwerten kleiner 20 mg/Nm³ (Anhang XIV).

Um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, erfolgten die Emissionsmessungen der Winterweizenbruchkörner an drei verschiedenen Tagen (28.03./ 24.04./ 25.04.2012). Die Ergebnisse belegen zum einen mit sehr geringen Schwankungen eine hohe Reproduzierbarkeit für die CO, NO_x und SO_2-Emissionen (Abb. 36 - Abb. 42) und zum anderen einen gleichmäßigen und nahezu vollständigen Ausbrand. Während der Messungen wurde insbesondere Wert auf die Minimierung der CO-Konzentrationen gelegt (Halbstundenmittelwerte n=22; 8 mg/Nm³). Trotz des relativ stickstoffhaltigen Brennstoffs (n=3; 2,1 % d. TM) können dennoch im Zuge des sehr guten Ausbrandes (sehr geringe CO-Konzentrationen) die Anforderungen der 4. BImSchV in Bezug auf die NO_x-Werte (0,50 g/Nm³) eingehalten werden.

Die Untersuchungen der Winterweizenstrohpellets (WWSP PCM und WWSP PTG 05) zeigten, dass die Anforderungen der 4. BImSchV/ TA Luft hinsichtlich der CO-Emissionen (Halbstundenmittelwerte n=16; 100 mg/Nm³; WWSP PCM; Abb. 43 - Abb. 46) eingehalten wurden. Mit dem Einsatz der in Bezug auf die Schüttdichte bzw. die Länge optimierten Charge WWSP PTG 05 (Schüttdichte 611 kg/m³; Richtwert DIN EN 14961-6, Tabelle 1, Pellets aus Getreidestroh 600 kg/m³, vgl. Tab. 14) konnten diese Werte während der Messungen mit WWSP PTG 05 (n=4; 50 mg/Nm³) noch einmal halbiert werden (Abb. 47, Abb. 48). Die mit den Strohpelletchargen erreichten NO_x-Konzentrationen sind in Bezug auf die gegenwärtigen Grenzwerte als genehmigungsfähig einzustufen.

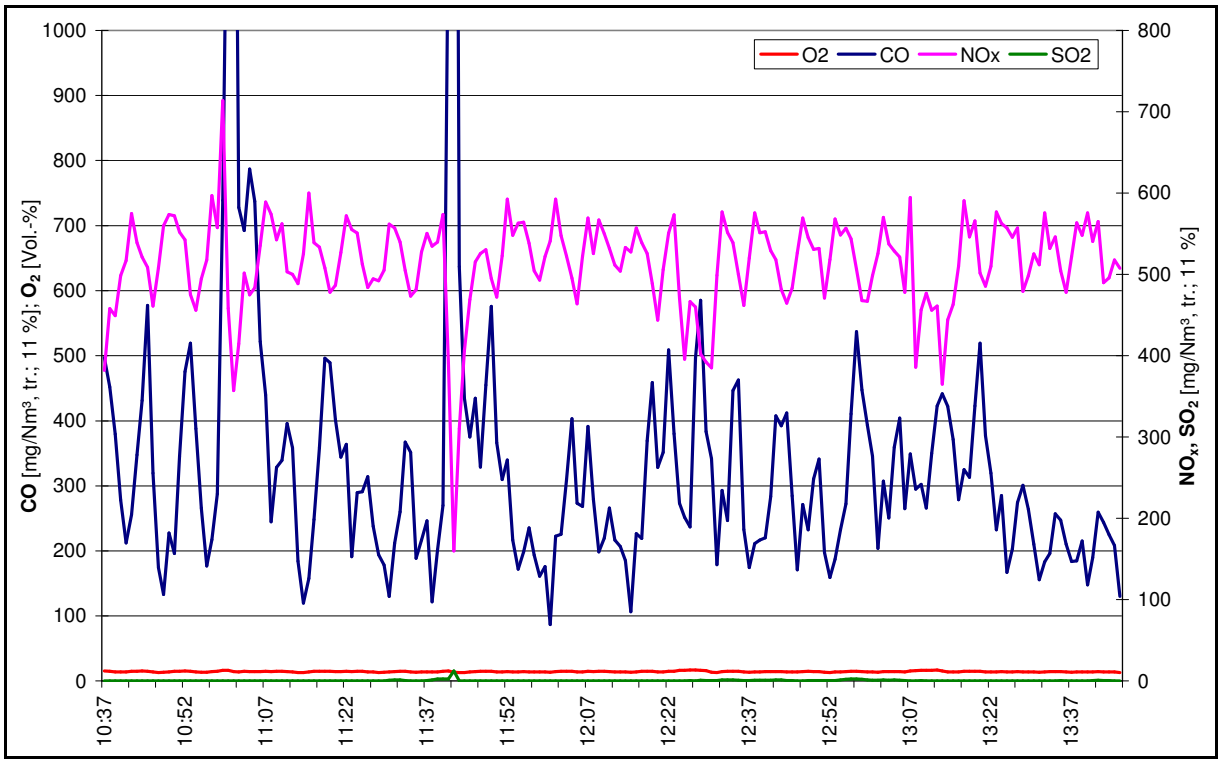
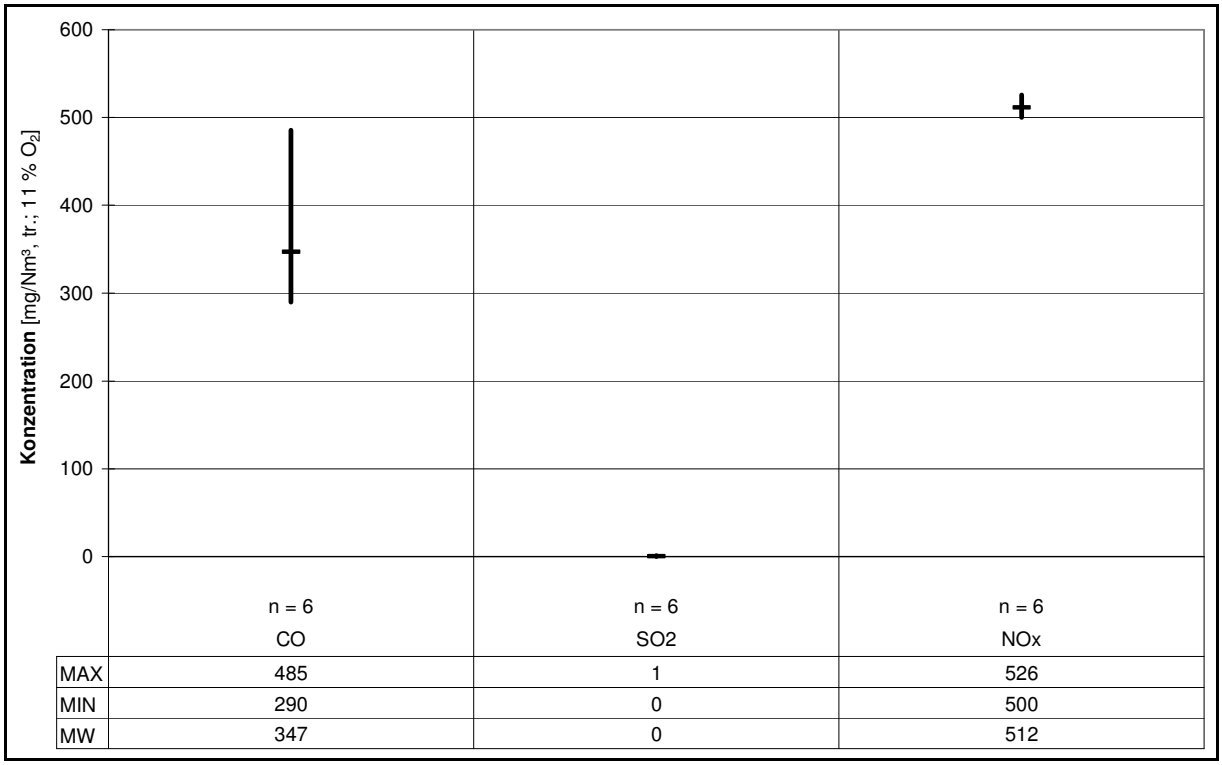


Abb. 34: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_X) und Schwefeldioxid (SO_2) bei der Verbrennung von Industrieholzpellets (HK IHP, 14.03.2012); mittlere Nennwärmeleistung 314 kW; Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen



	n = 6 CO	n = 6 SO2	n = 6 NOx
MAX	485	1	526
MIN	290	0	500
MW	347	0	512

Abb. 35: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Industrieholzpellets (HK IHP, 14.03.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

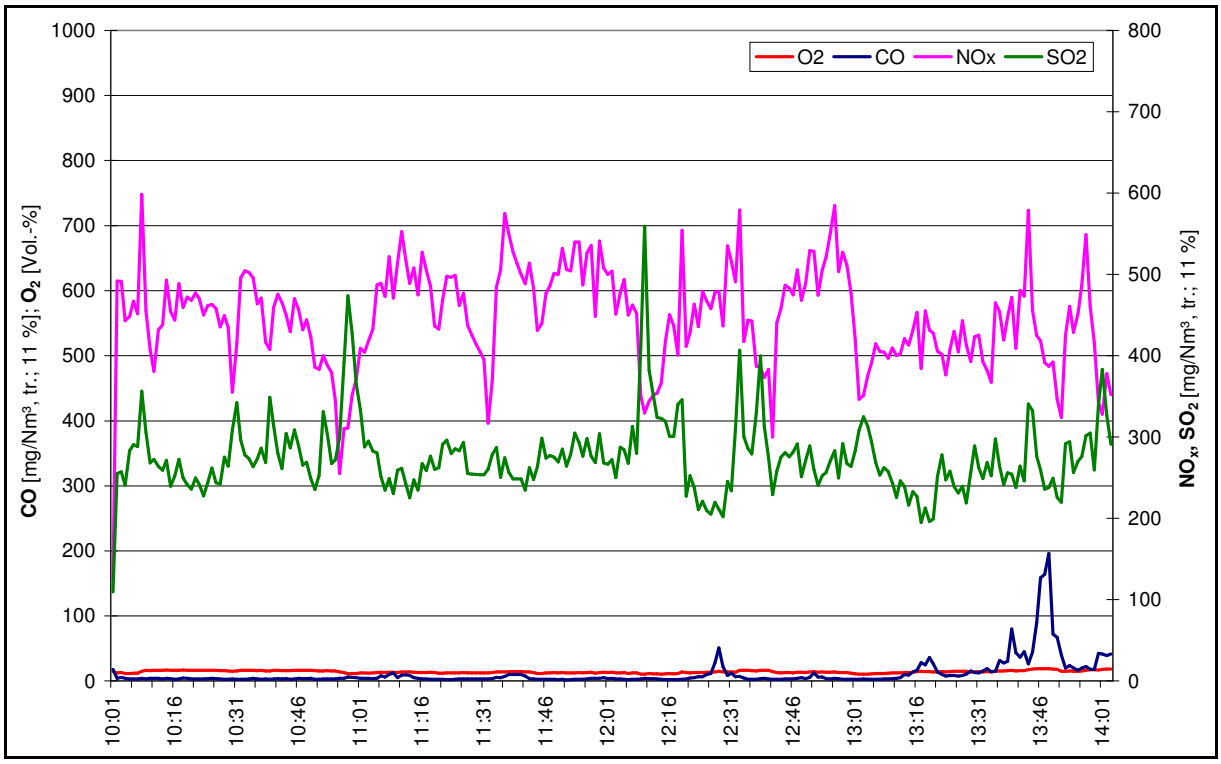
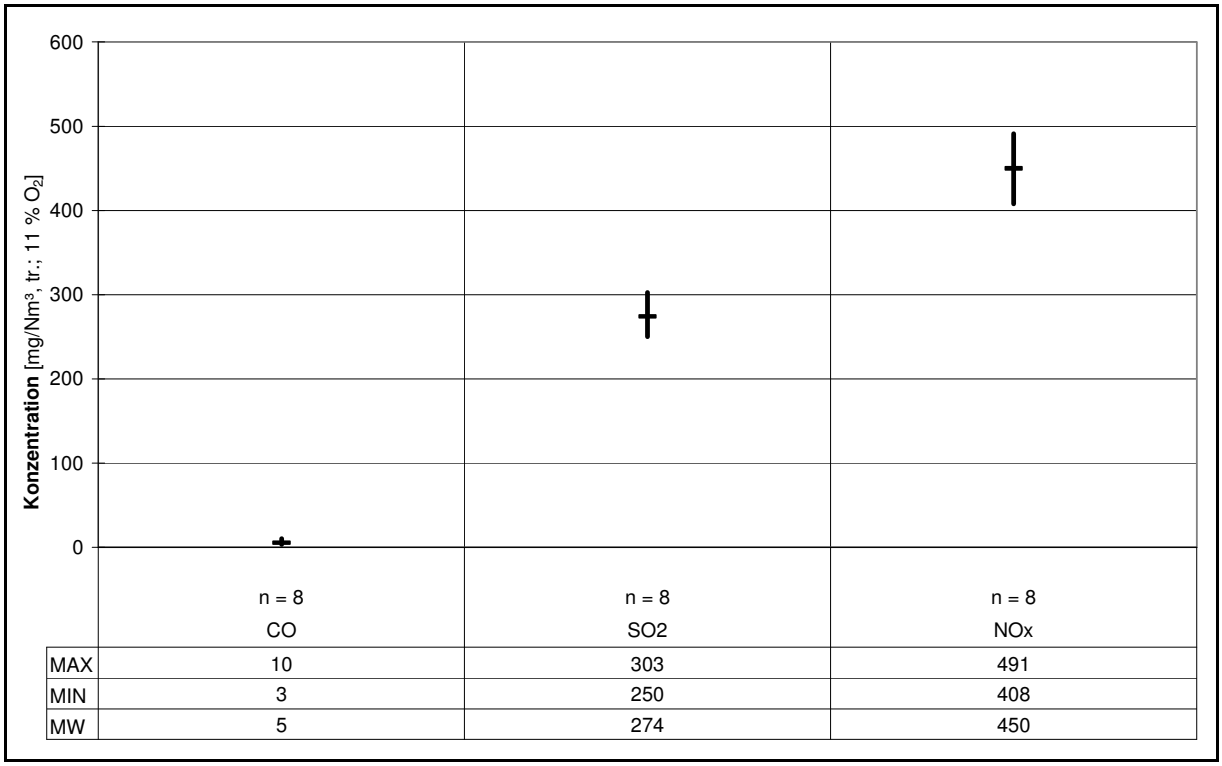


Abb. 36: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_X) und Schwefeldioxid (SO_2) bei der Verbrennung von Winterweizenbruchkörnern (HK BK(2), 28.03.2012); mittlere Nennwärmeleistung 316 kW; Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen



	CO	SO2	NOx
MAX	10	303	491
MIN	3	250	408
MW	5	274	450

Abb. 37: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Winterweizenbruchkörnern (HK BK(2), 28.03.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

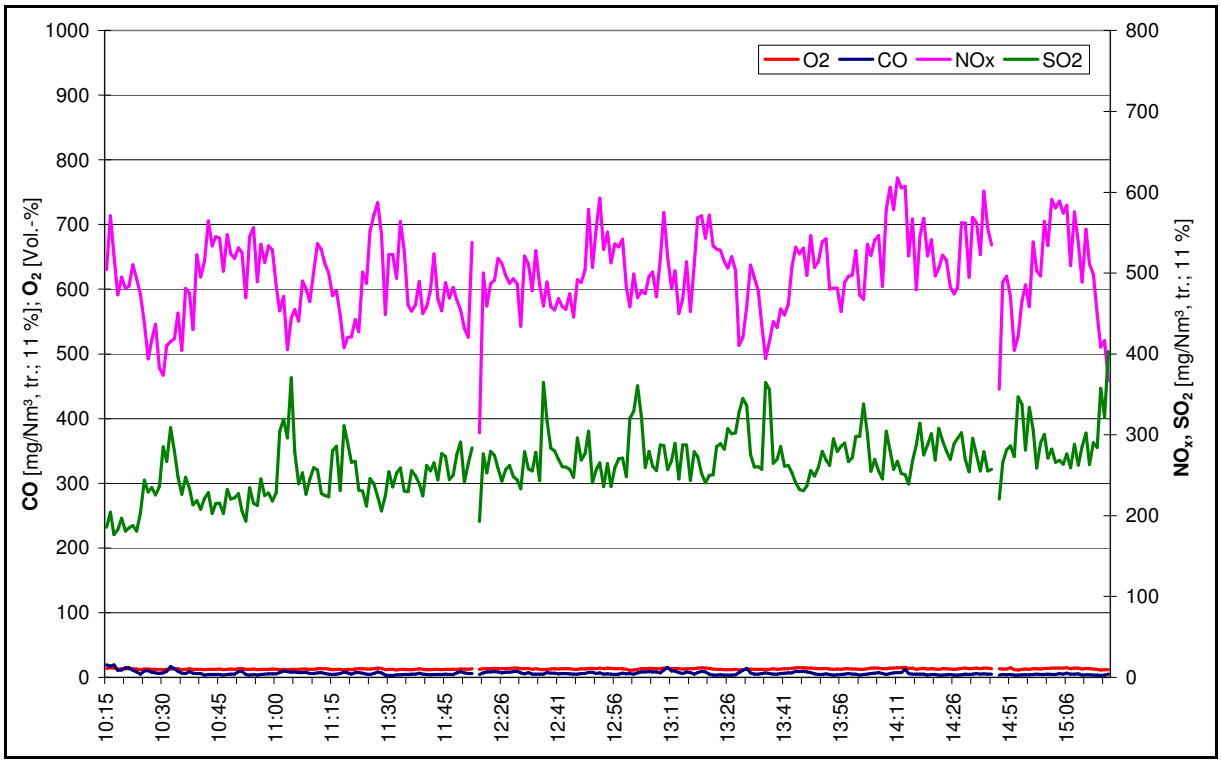
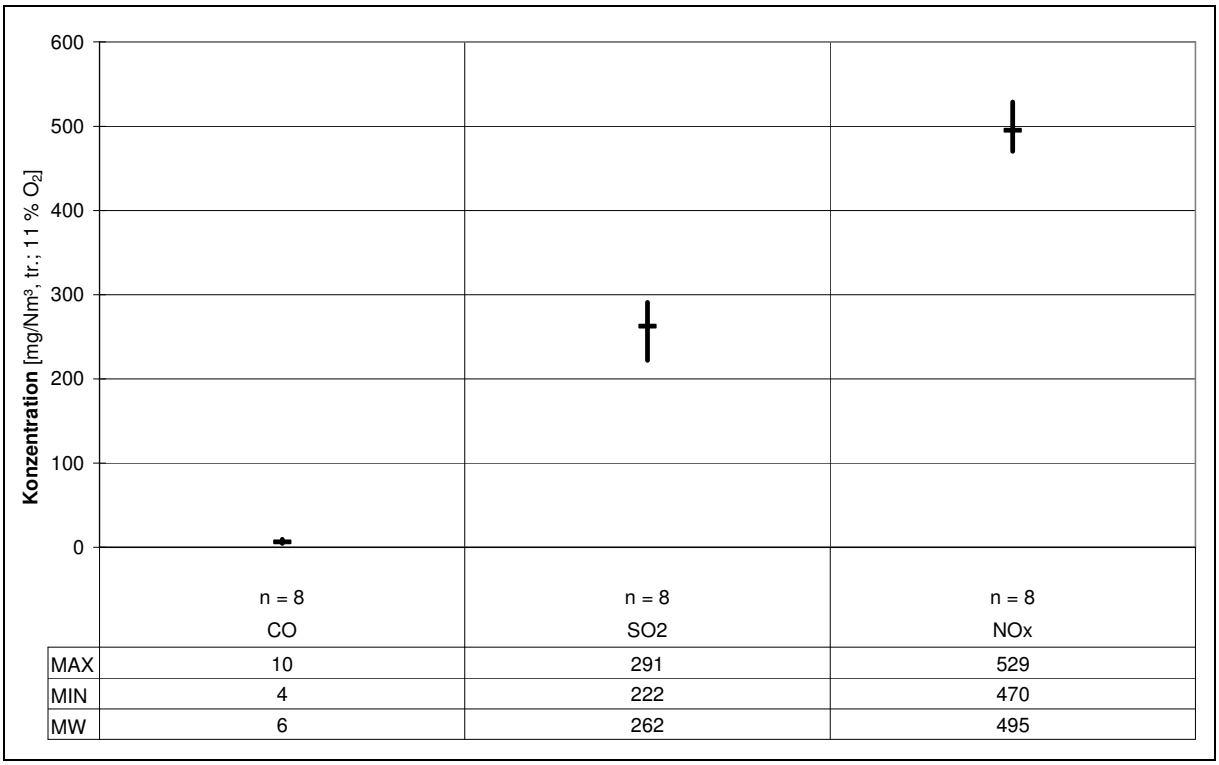


Abb. 38: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_X) und Schwefeldioxid (SO_2) bei der Verbrennung von Winterweizenbruchkörnern (HK BK(2), 24.04.2012); mittlere Nennwärmeleistung 318 kW; Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen



	CO	SO2	NOx
MAX	10	291	529
MIN	4	222	470
MW	6	262	495

Abb. 39: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Winterweizenbruchkörnern (HK BK(2), 24.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

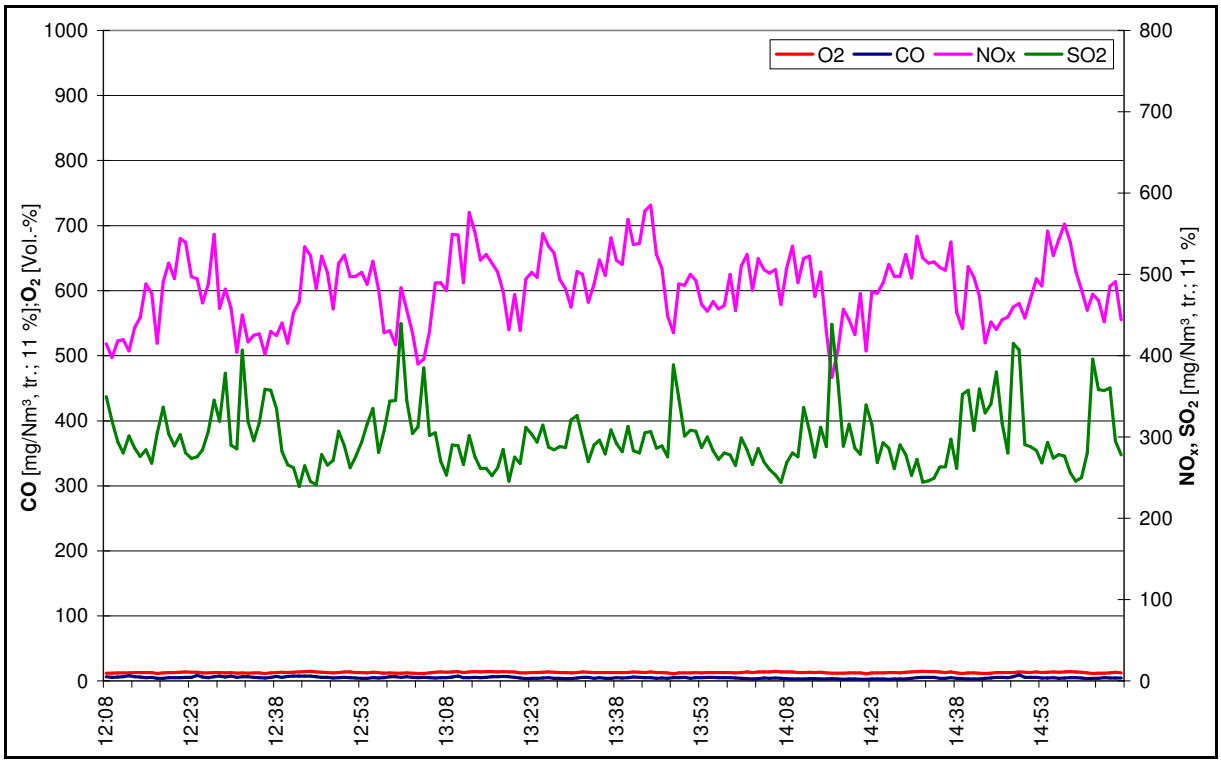
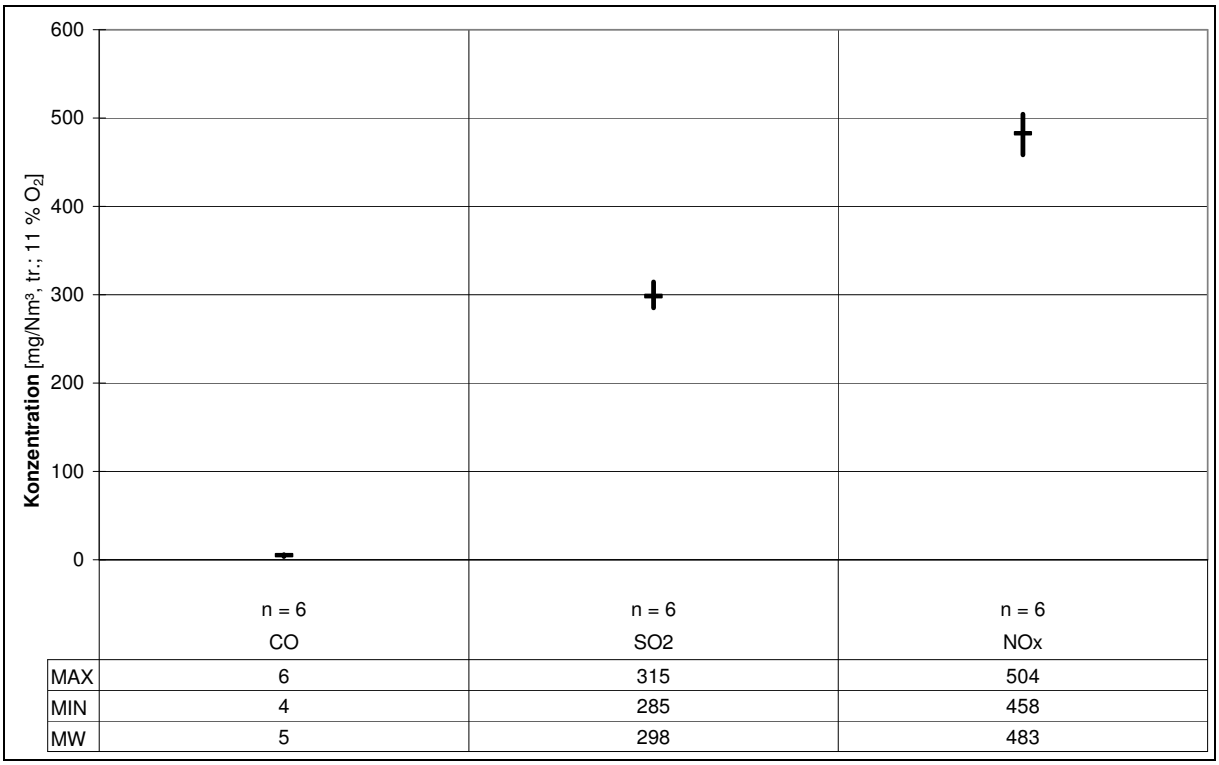
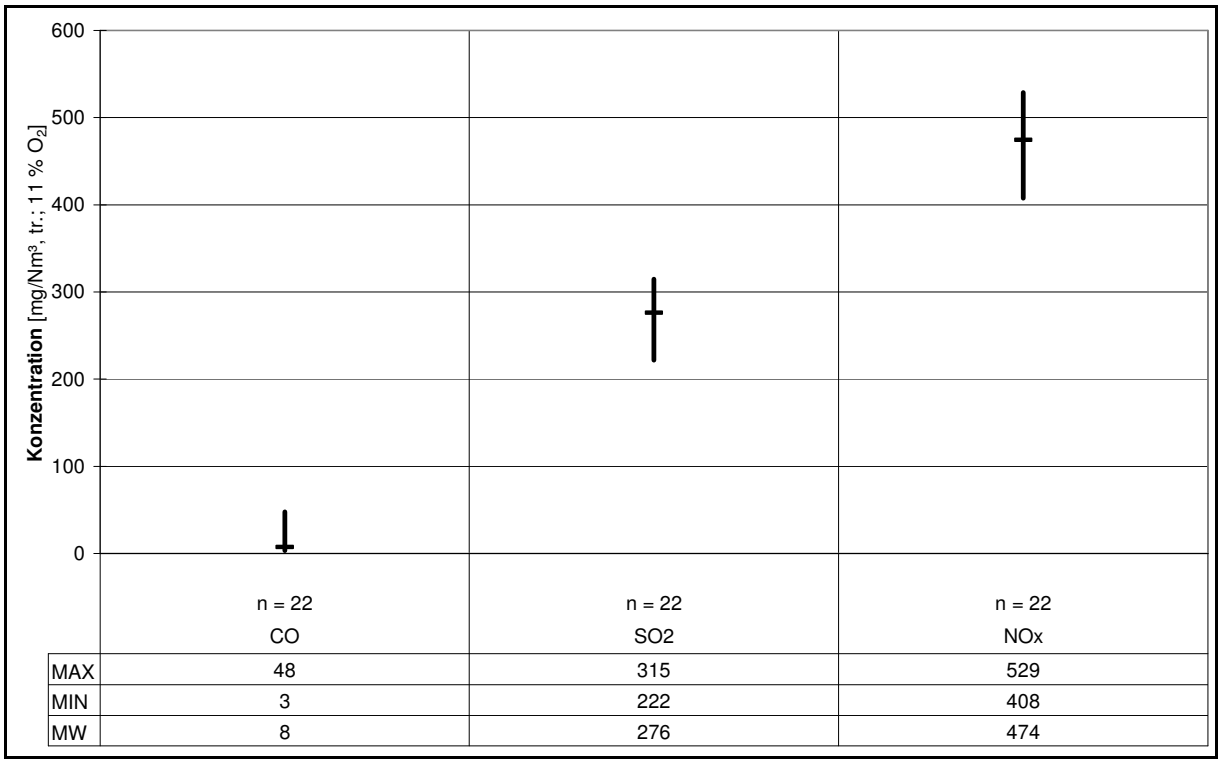


Abb. 40: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_X) und Schwefeldioxid (SO_2) bei der Verbrennung von Winterweizenbruchkörnern (HK BK(2), 25.04.2012); mittlere Nennwärmeleistung 324 kW; Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen



	CO	SO2	NOx
MAX	6	315	504
MIN	4	285	458
MW	5	298	483

Abb. 41: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Winterweizenbruchkörnern (HK BK(2), 25.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen



	CO	SO2	NOx
MAX	48	315	529
MIN	3	222	408
MW	8	276	474

Abb. 42: Zusammenfassung der Konzentrationen von Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid und Stickoxiden bei der Verbrennung von Winterweizenbruchkörnern (HK BK(2), 28.03.2012; HK BK(2), 24.04.2012; HK BK(2), 25.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

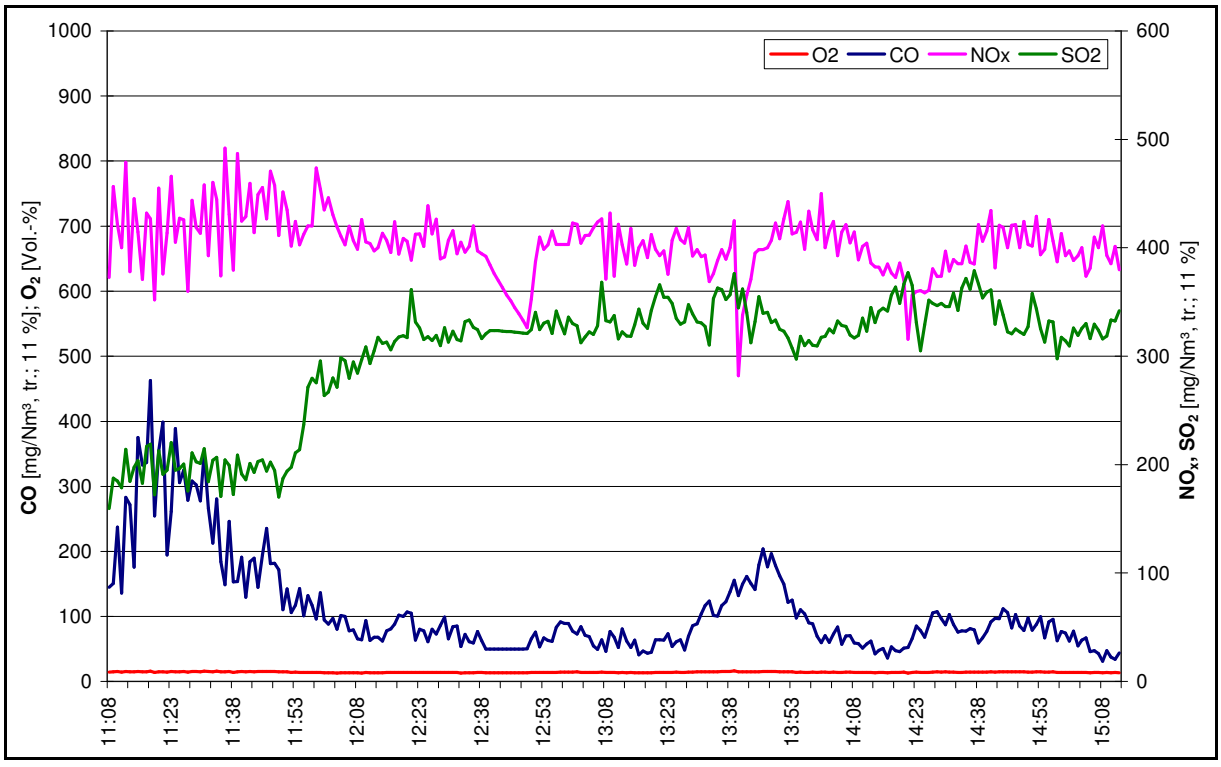


Abb. 43: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_X) und Schwefeldioxid (SO_2) bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (HK WWSP(PCM), 03.04.2012); mittlere Nennwärmeleistung 277 kW; Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen.

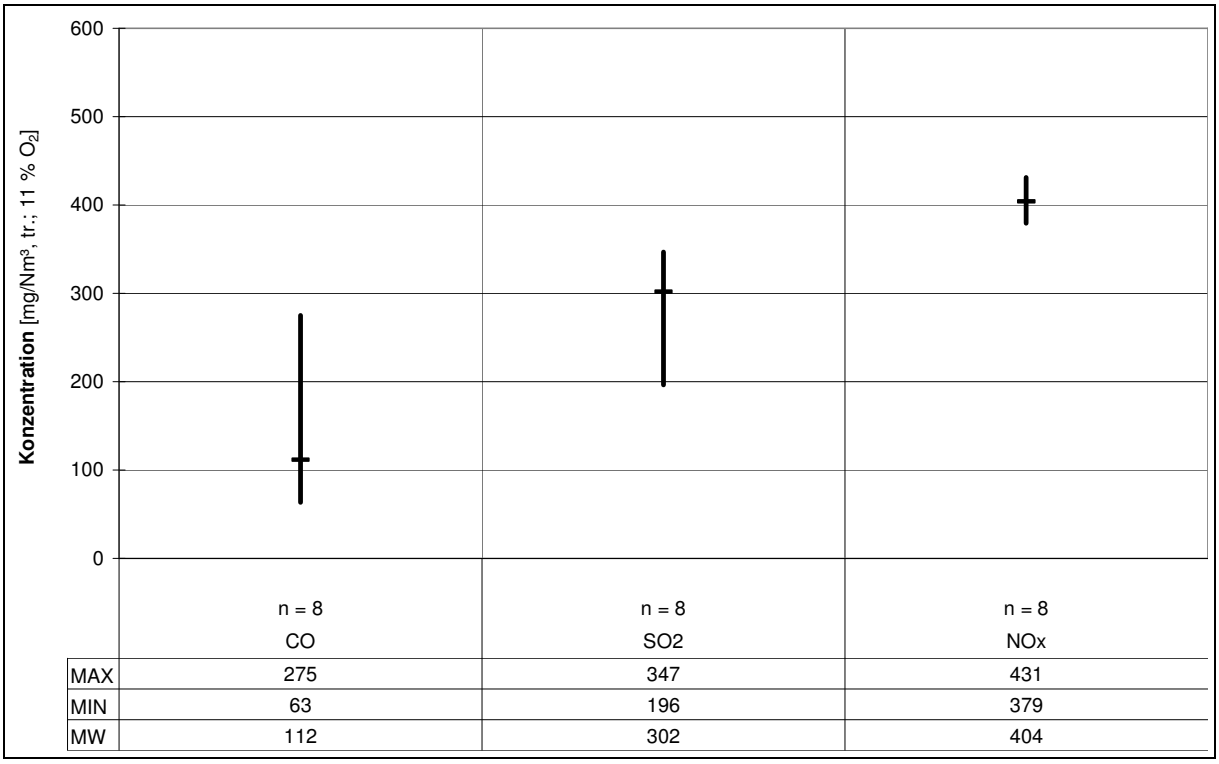


Abb. 44: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (HK WWSP(PCM), 03.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

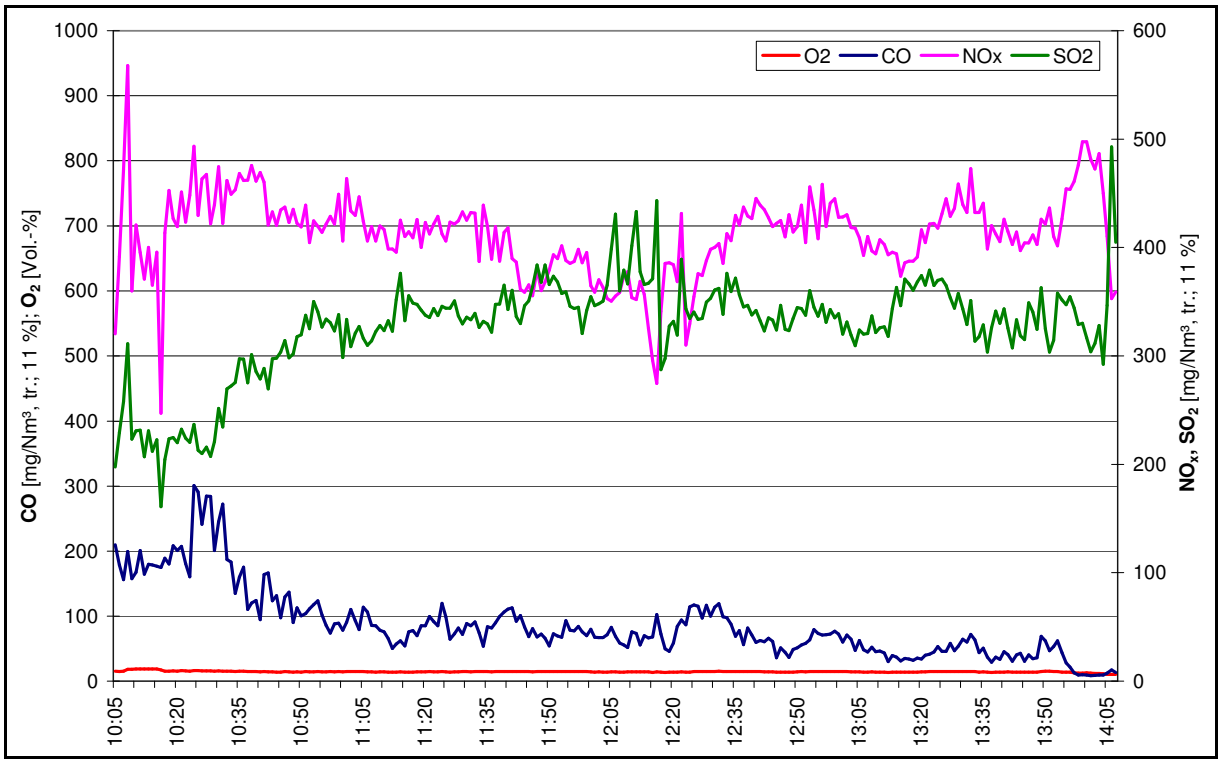


Abb. 45: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_X) und Schwefeldioxid (SO_2) bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (HK WWSP(PCM), 04.04.2012); mittlere Nennwärmeleistung 285 kW; Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

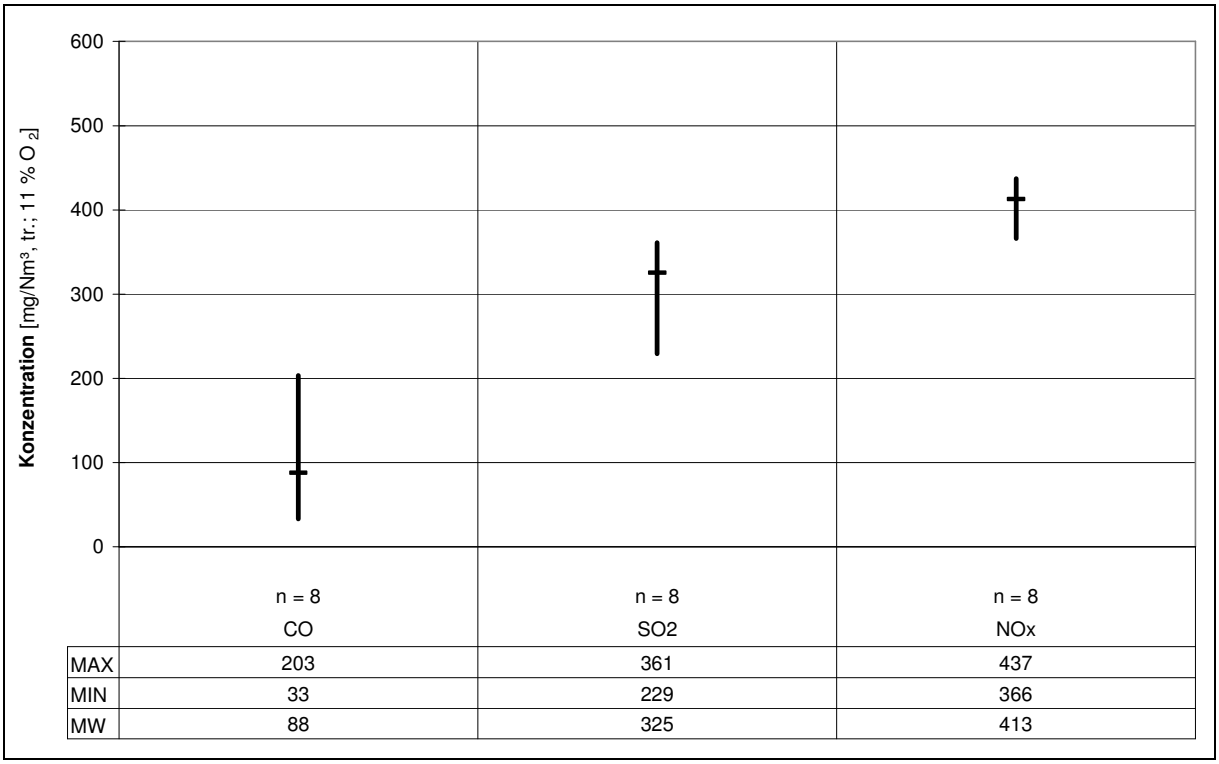


Abb. 46: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (HK WWSP(PCM), 04.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

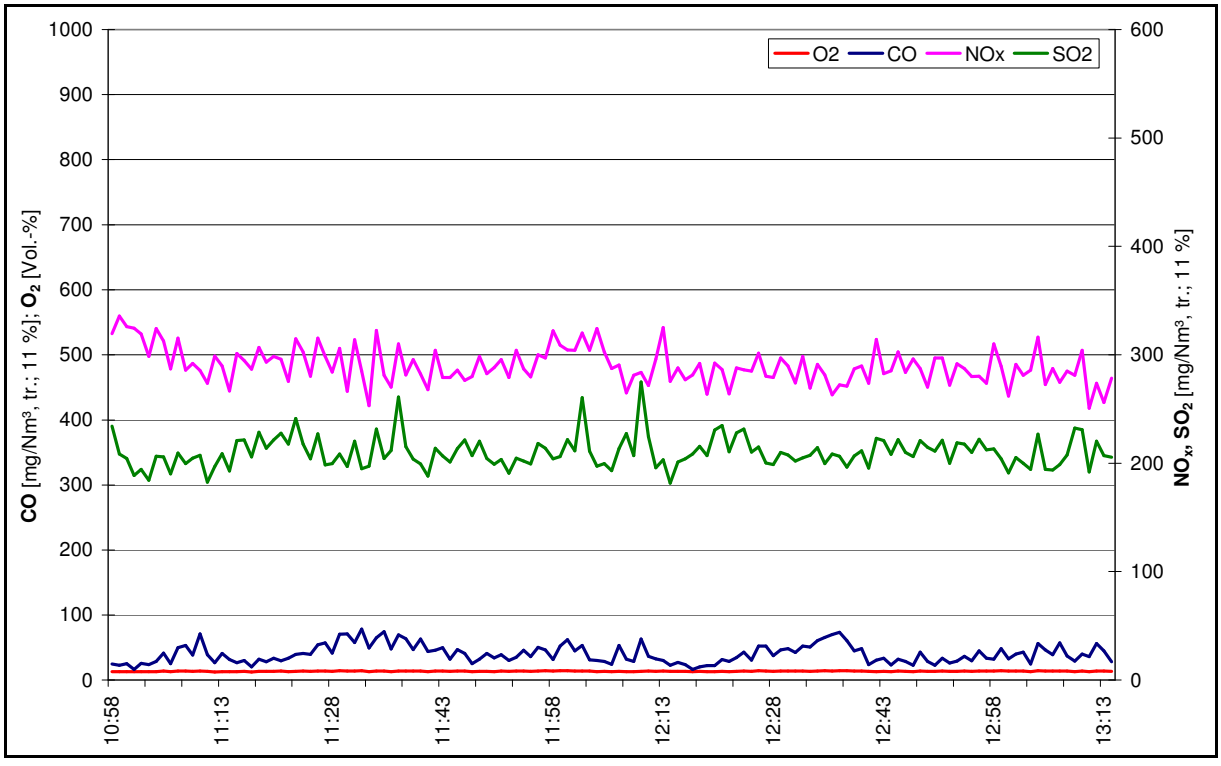
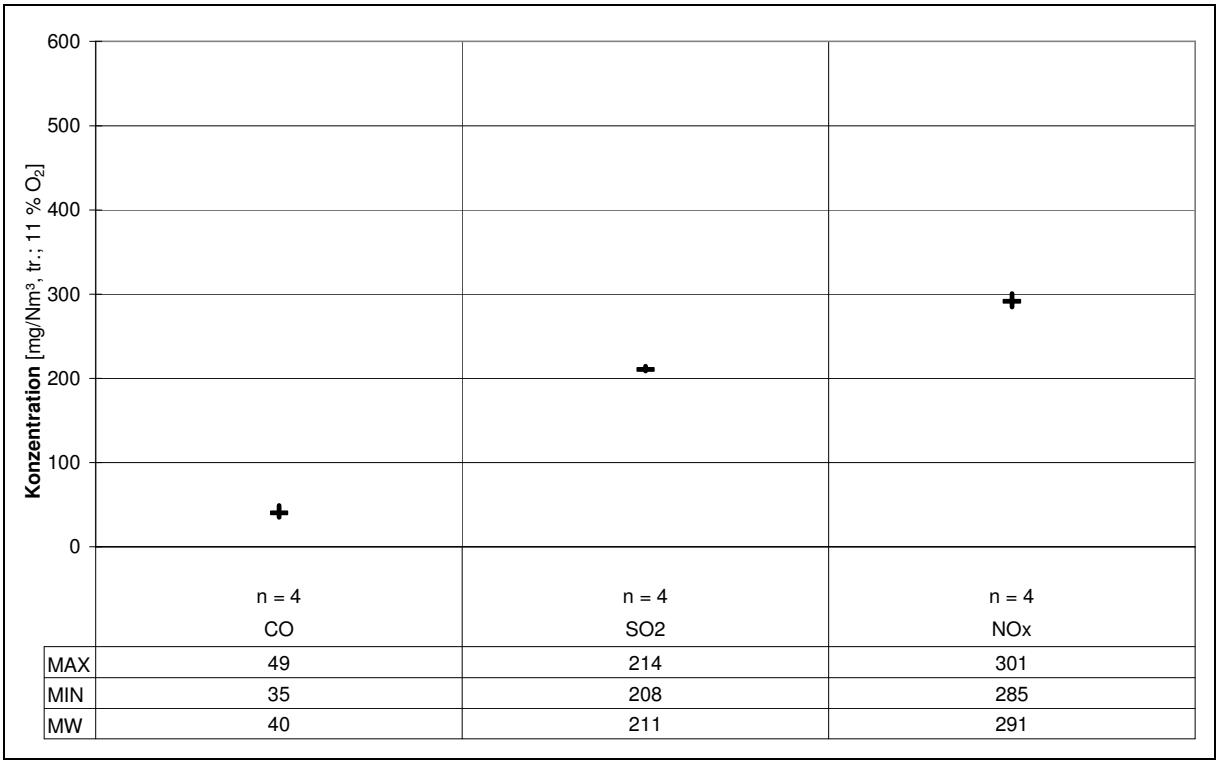
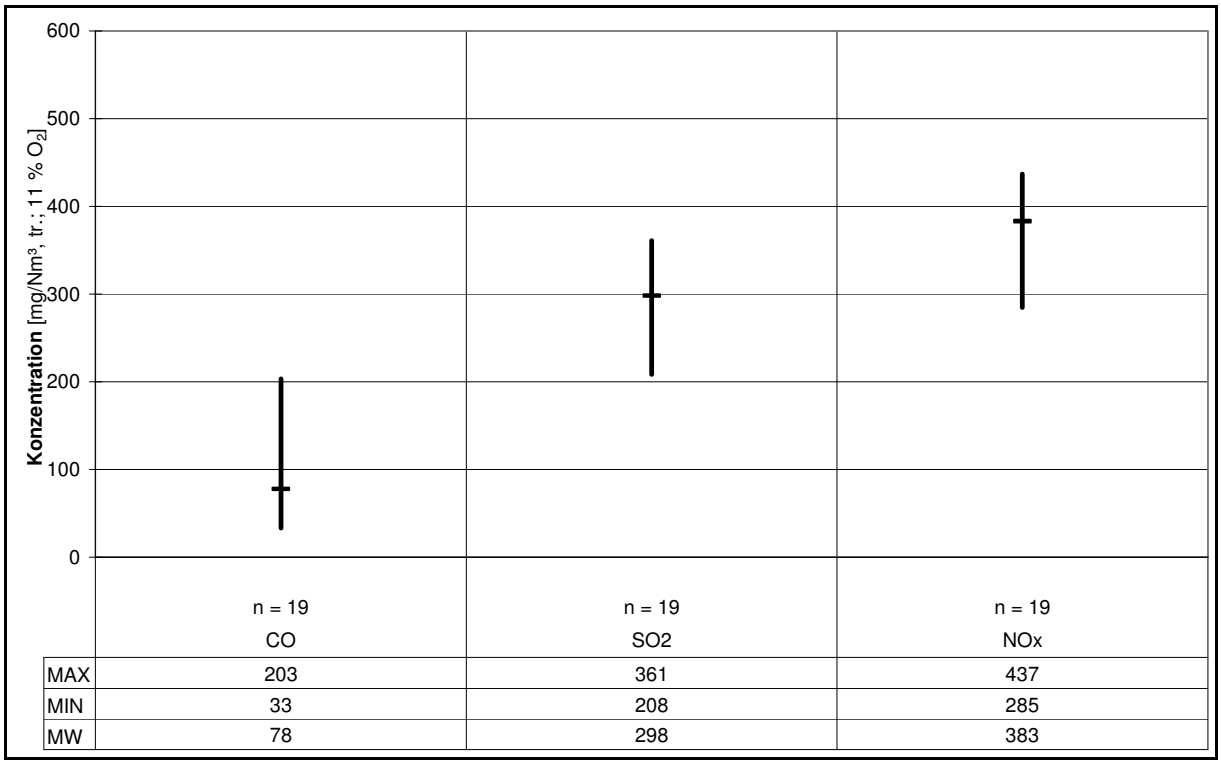


Abb. 47: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_X) und Schwefeldioxid (SO_2) bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (WWSP PTG 05, 26.04.2012); mittlere Nennwärmeleistung 334 kW; Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen



	n = 4 CO	n = 4 SO2	n = 4 NOx
MAX	49	214	301
MIN	35	208	285
MW	40	211	291

Abb. 48: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (WWSP PTG 05, 26.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen



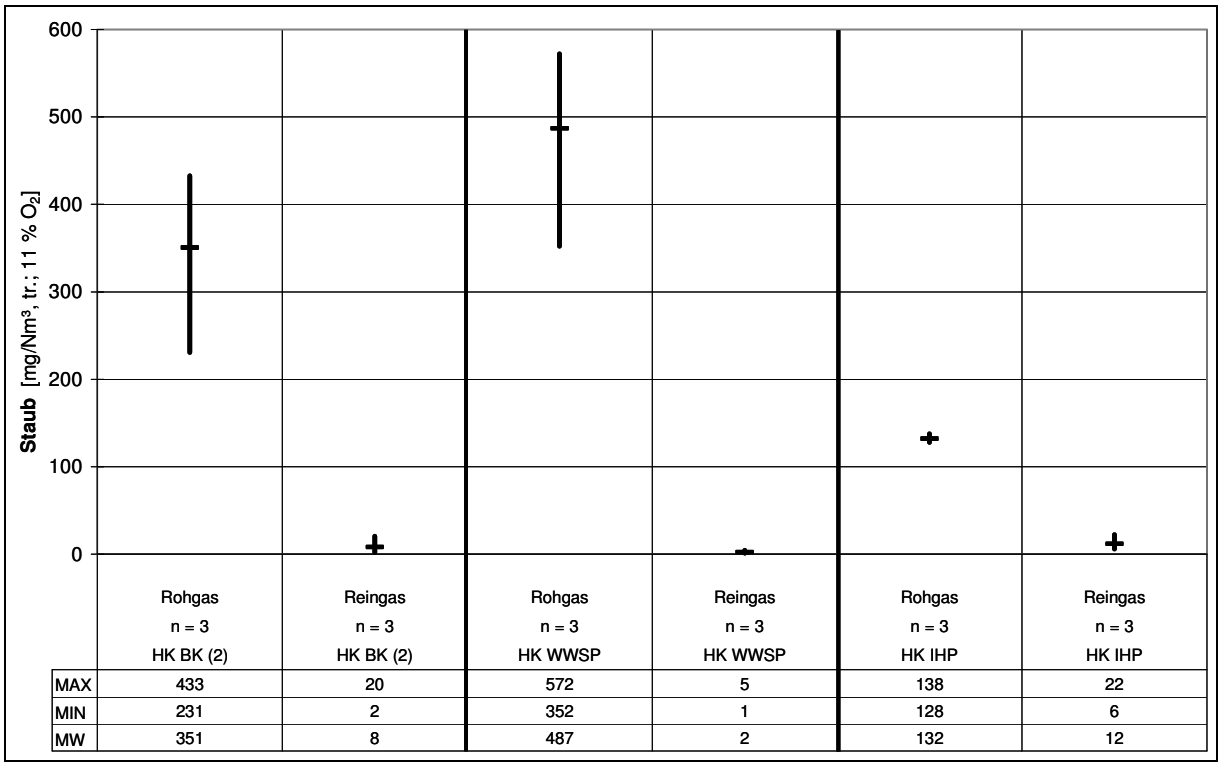
	n = 19 CO	n = 19 SO2	n = 19 NOx
MAX	203	361	437
MIN	33	208	285
MW	78	298	383

Abb. 49: Zusammenfassung der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (HK WWSP(PCM), 03.04.2012; HK WWSP(PCM), 04.04.2012; WWSP PTG 05, 26.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Tab. 14: Vergleich von verbrennungsrelevanten Parametern der Brennstoffproben und Emissionen an der Anlage Schmid UTSW 360

	HK IHP	HK BK (2)	HK BK (2)	HK BK (2)	HK BK (2)	WWSP PCM	WWSP PCM	WWSP PCM	WWSP PTG 05
Emissionen									
Datum der Verbrennung	14.03.2012	28.03.2012	24.04.2012	25.04.2012	Mittelwert	03.04.2012	04.04.2012	Mittelwert	26.04.2012
CO [g/Nm^3 tr, 11% O_2]	0,35	0,01	0,01	0,01		0,11	0,09		0,04
NOx [g/Nm^3 tr, 11% O_2]	0,51	0,45	0,53	0,50		0,40	0,41		0,29
Staub Rohgas [mg/Nm^3 tr, 11% O_2]	132,2	230,8	432,7	388,3	350,6	536,0	590,73	563,3	352,1
Staub Reingas [mg/Nm^3 tr, 11% O_2]	11,8	2,5	1,9	20,4	8,3	4,56	10,17	7,36	1,40
SOx [g/Nm^3 tr, 11% O_2]	x	0,30	0,29	0,32		0,30	0,33		0,21
HCl Rohgas [mg/Nm^3 tr, 11% O_2]	x	15,8	14,6	59,6	30,0	64,8	132,9	98,87	61,2
HCl Reingas [mg/Nm^3 tr, 11% O_2]	x	8,5	1,9	22,5	11,0	49,1	62,2	55,69	29,5
PCDD/F [mg/Nm^3 tr, 11% O_2]	x	0,21	0,06	0,04		0,36	0,06		0,05
chem.-stoffl. Parameter									
C [% der TM]	48,4	45,0	45,0	45,0		43,6	43,6		43,2
N [% der TM]	4,09	2,01	2,15	2,15		0,88	0,90		0,60
Cl [% der TM]	0,02	0,072	0,068	0,068		0,31	0,27		0,18
S [% der TM]	0,03	0,13	0,14	0,14		0,16	0,14		0,09
Aschegehalt [% der TM]	1,07	1,57	1,74	1,74		9,93	10,7		9,27
Ascheerweichungspunkt [°C]	x	720	710	710		910	910		1160
Aerosolbildende Stoffe [mg/kg der TM]	1308	6061	6395	6395		17002	14798		15824
Wassergehalt [%]	9,6	14,4	14,4	14,4		10,3	10,3		10,4
physik.-mechan. Parameter									
Schüttdichte[kg/m3]	692	x	x	x		680	680		611
Länge (Schwankung) [mm]	5,0 - 33,8	x	x	x		8,2 - 36,3	8,2 - 36,3		4,9 - 27,1
Durchmesser (Schwankung) [mm]	6,1 - 6,7	x	x	x		7,8 - 8,0	7,8 - 8,0		6,0 - 7,0
Mechan. Festigkeit (Schwankung) [Abrieb in %]	1,1 - 1,6	x	x	x		2,3 - 2,7	2,3 - 2,7		2,5 - 2,8

Bei Betrachtung des diskontinuierlich ermittelten Parameters Staub ist festzustellen, dass im Gegensatz zu den eingesetzten Industrieholzpellets noch deutlich höhere Rohgasstaubgehalte bei den Getreidechargen (ca. 350 mg/Nm³) und bei Winterweizenstrohpellets (ca. 563 mg/Nm³; WWSP PCM) nachgewiesen wurden (Abb. 50; Anhang XIV). Dies bestätigt die Erwartungen aufgrund der steigenden Anteile an aerosolbildenden Komponenten (Tab. 14)
Die eingesetzte Abscheidetechnologie sichert mit Abscheideleistungen von 91 bis 99 % jedoch die Einhaltung von Werten unter 20 mg/Nm³. Der Nachweis der Funktionssicherheit und die Bestätigung der Abscheideleistungen im Dauerbetrieb stehen allerdings noch aus. Auf dem Prinzip dieser Abscheidetechnologie basierend, fand in den letzten Jahren eine Markteinführung für den Einsatz bei Holzfeuerungsanlagen statt. Die technische Stabilität und eine ökonomische Einschätzung der eingesetzten Technik sollte aufgrund der höheren Anforderungen bei Halmgutfeuerungsanlagen (höhere Rohgasstaubbelastungen) längerfristig geprüft werden.

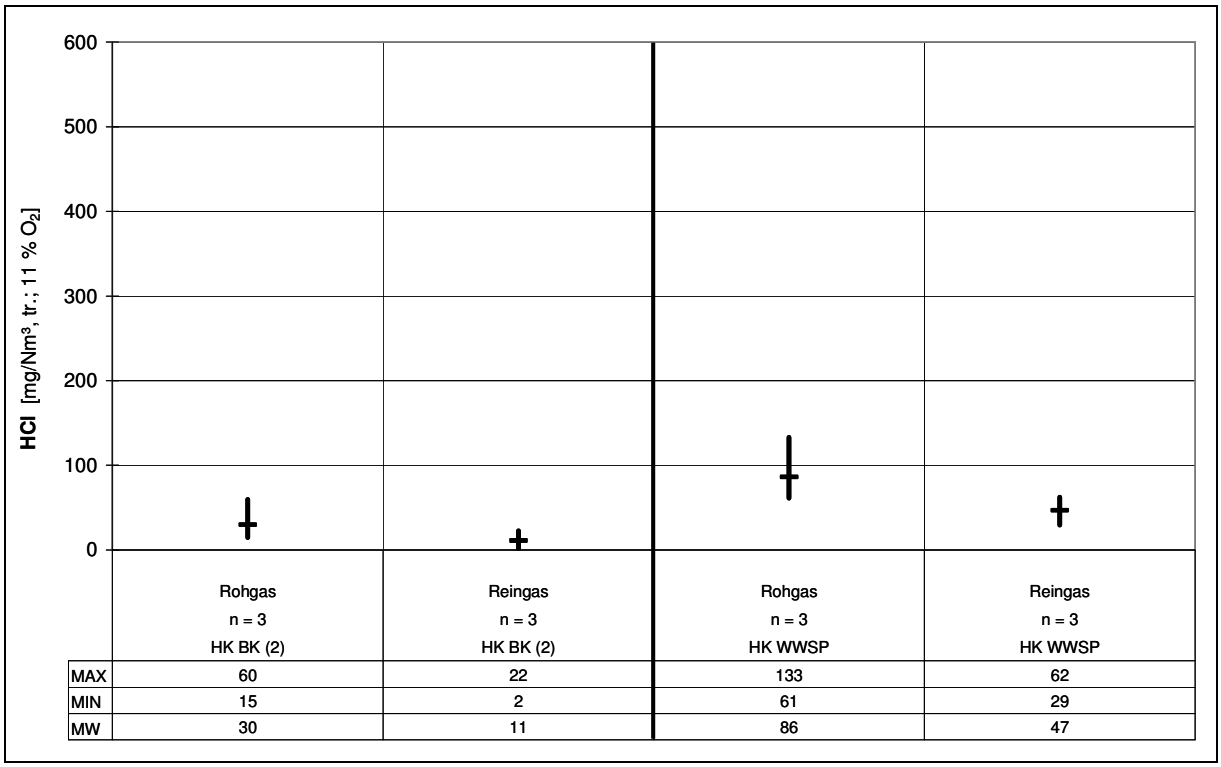


	Rohgas n = 3 HK BK (2)	Reingas n = 3 HK BK (2)	Rohgas n = 3 HK WWSP	Reingas n = 3 HK WWSP	Rohgas n = 3 HK IHP	Reingas n = 3 HK IHP
MAX	433	20	572	5	138	22
MIN	231	2	352	1	128	6
MW	351	8	487	2	132	12

Abb. 50: Vergleich der Staubkonzentration im Roh- und Reingas der Brennstoffe (HK BK(2), 28.03., 24.04. und, 25.04.2012; HK WWSP(PCM), 03.04. und 04.04.2012; WWSP PTG 05, 26.04.2012; HK IHP, 14.03.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Messwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

In Bezug auf die für die Halmgutkompaktate ermittelten HCl-Emissionen ist festzustellen, dass bei der Verbrennung der Getreidechargen mit Chlorgehalten von ca. 0,07 % d. TM und einer Abscheideleistung des Filters zwischen 46 und 87 % potenzielle Anforderungen von 30 mg/Nm³ sicher unterschritten werden können (Anhang XIV, Tab. 14, Abb. 51). Beim Einsatz

der Strohchargen mit Chlorgehalten von ca. 0,25 % d. TM und Abscheideleistungen bis zu 50 % müssen gegebenenfalls weitere emissionsmindernde Maßnahmen ergriffen werden.



	Rohgas n = 3 HK BK (2)	Reingas n = 3 HK BK (2)	Rohgas n = 3 HK WWSP	Reingas n = 3 HK WWSP
MAX	60	22	133	62
MIN	15	2	61	29
MW	30	11	86	47

Abb. 51: Vergleich der HCl-Konzentration im Roh- und Reingas der Brennstoffe (HK BK(2), 28.03., 24.04. und, 25.04.2012; HK WWSP(PCM), 03.04. und 04.04.2012; WWSP PTG 05, 26.04.2012) Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Messwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Die Ergebnisse der diskontinuierlich gemessenen Dioxin- und Furangehalte (PCDD/F) für die Winterweizenbruchkörner (Abb. 52) und die Winterweizenstrohpellets (Abb. 53) belegen, dass mit erhöhten CO-Emissionen auch erhöhte PCDD/F einhergehen. Bei beiden Brennstoffen ist jedoch festzustellen, dass die jeweils erste Messung erhöhte PCDD/F-Konzentrationen aufweist. Dies wurde in der Vergangenheit immer wieder bei Feldmessungen festgestellt (Hering et al., 2005; Hering und Peisker, 2009) und ist wahrscheinlich auf Memory-Effekte zurückzuführen. Die Folgemessungen, welche nach ununterbrochenem Einsatz ein und desselben Brennstoffes gemacht wurden, belegen PCDD/F Konzentrationen deutlich unterhalb des in der TA Luft aufgeführten Grenzwertes von 0,1 ng/Nm³. Um die statistische Sicherheit dieser Aussagen zu erhöhen, wäre ein langfristig begleitendes Messprogramm an Praxisanlagen zu empfehlen.

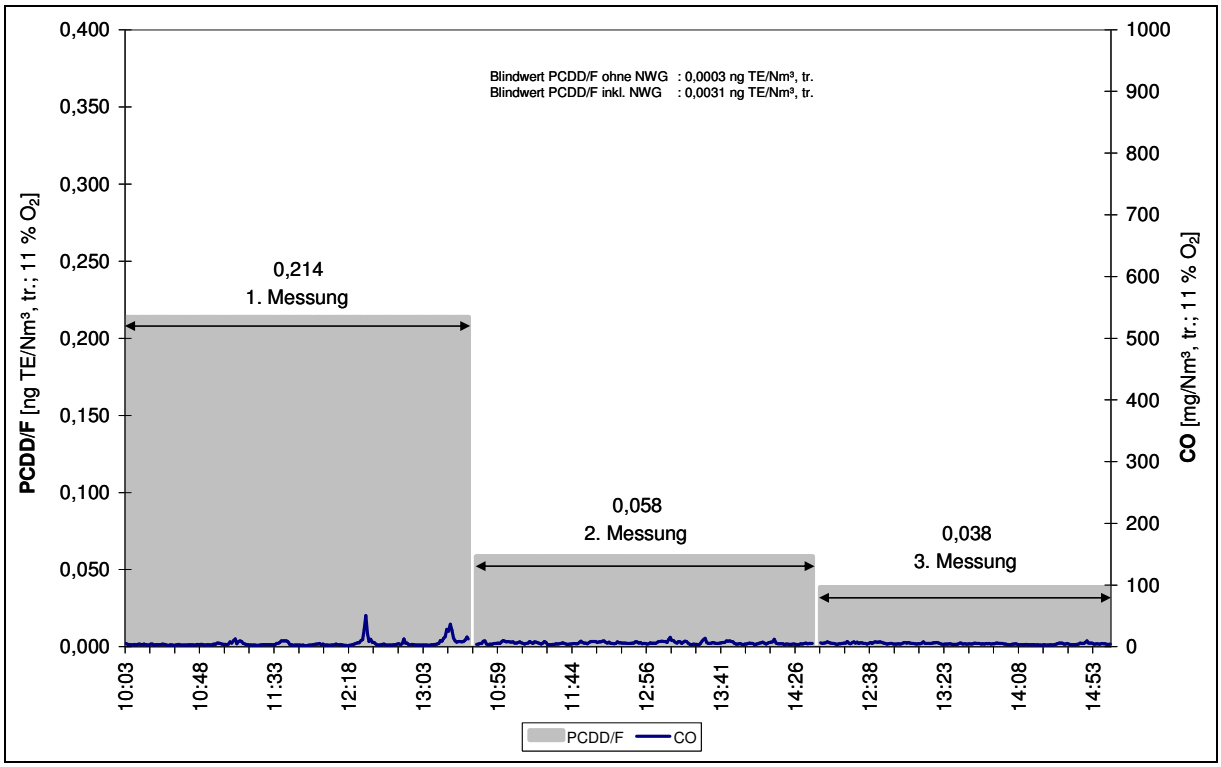


Abb. 52: Gegenüberstellung der diskontinuierlich gemessenen Dioxin-/ Furangehalte mit der kontinuierlich gemessenen Konzentration an Kohlenmonoxid für den Brennstoff Winterweizenbruchkörner (HK BK(2), 28.03., 24.04. und 25.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Fünfstunden-/Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

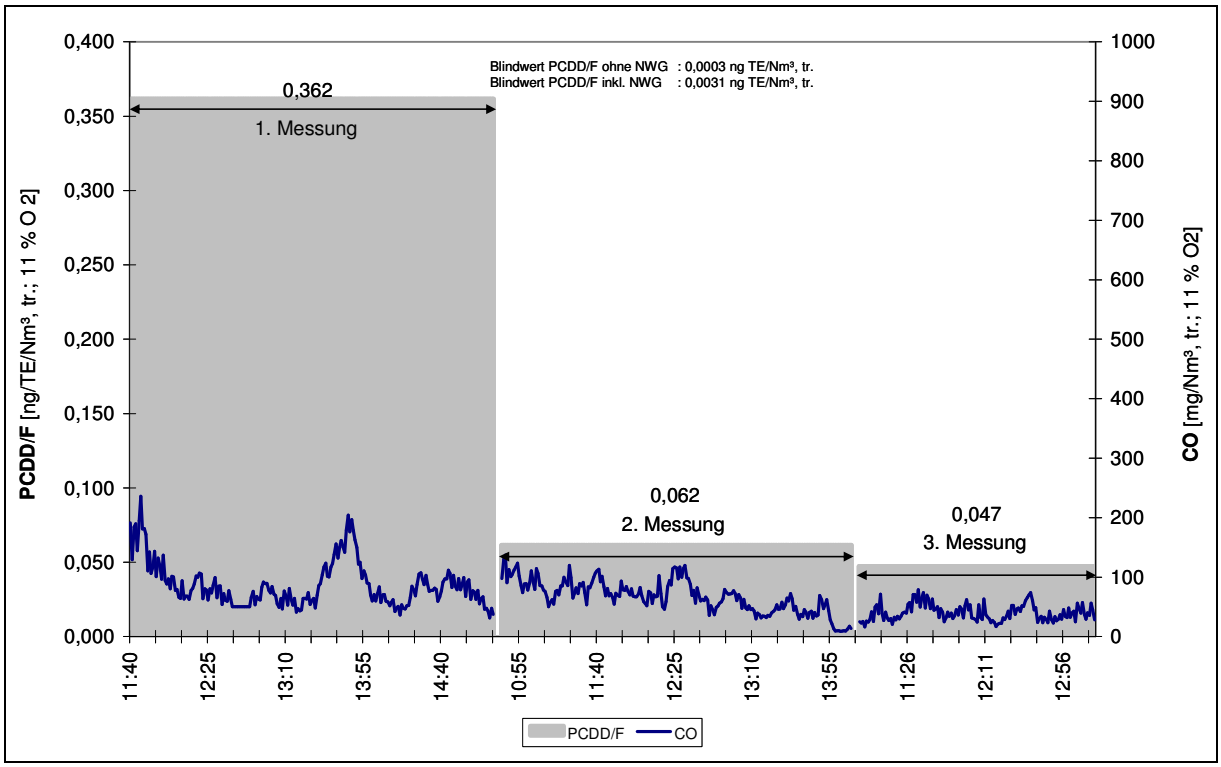


Abb. 53: Gegenüberstellung der diskontinuierlich gemessenen Dioxin-/Furangehalte mit der kontinuierlich gemessenen Konzentration an Kohlenmonoxid für den Brennstoff Winterweizenstrohpellets (HK WWSP(PCM), 03., 04.04.2012; WWSP PTG 05, 26.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Fünfstunden-/Minutenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Analog zu den Messungen an der TWIN HEAT M20i Kleinfeuerungsanlage sind auch hier die Zusammenhänge zwischen verbrennungsrelevanten chemischen-stofflich Inhaltsstoffen der Brennstoffe und den Emissionsparametern sichtbar. Es zeigte sich auch hier wieder eine hohe Korrelation zwischen dem Stickstoffgehalt der Brennstoffe mit den Stickoxiden (Abb. 54), dem Schwefelgehalt mit den Schwefeldioxid (Abb. 55) sowie den aerosolbildenden Inhaltsstoffen mit den Rohgasstaubemissionen (Abb. 58). Lediglich eine Tendenz konnte auch hier für die Beziehung Chlorgehalt der Brennstoffe zu HCl-Konzentrationen (Abb. 56) sowie Rohaschegehalt zur Staubemission (Abb. 57) festgestellt werden.

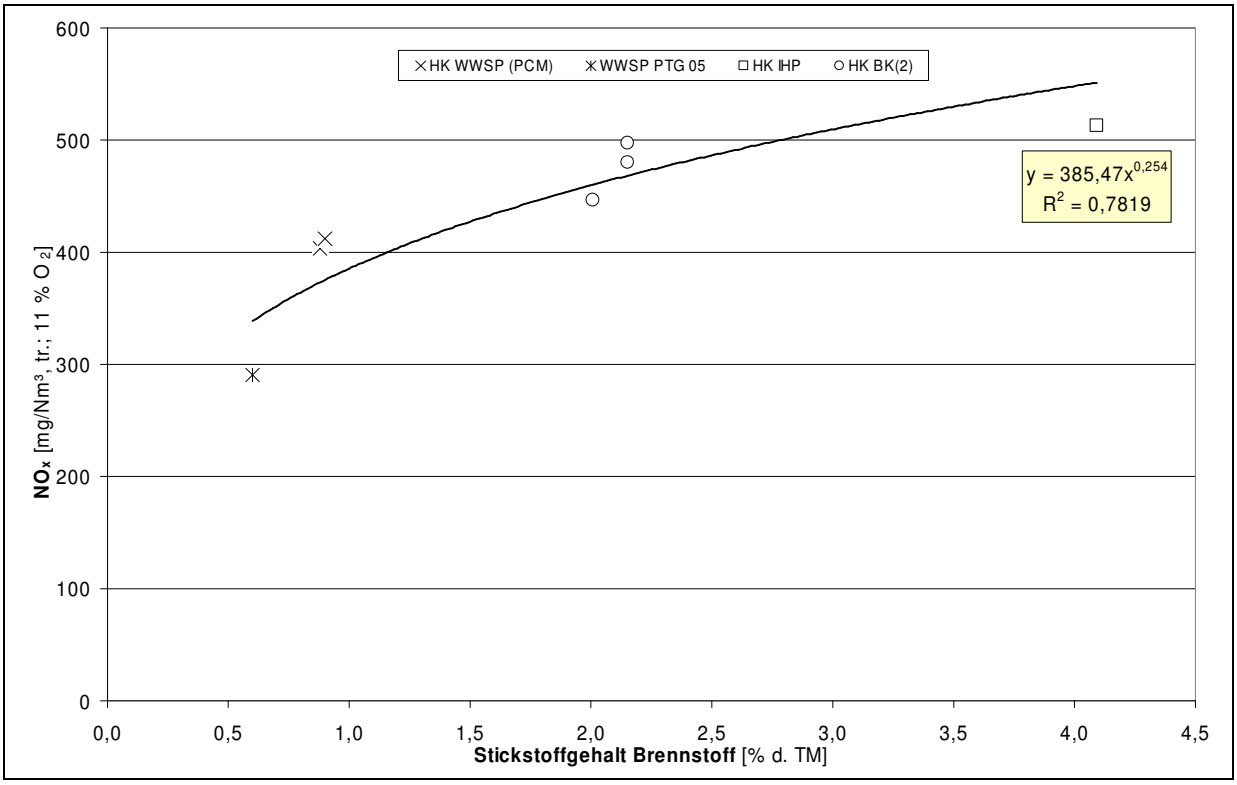


Abb. 54: Abhängigkeit der Stickoxidkonzentration vom Stickstoffgehalt im Brennstoff (HK WWSP (PCM), 03.04. und 04.04.2012; WWSP PTG 05, 26.04.2012; HK IHP, 14.03.2012; HK BK(2), 28.03., 24.04. und 25.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

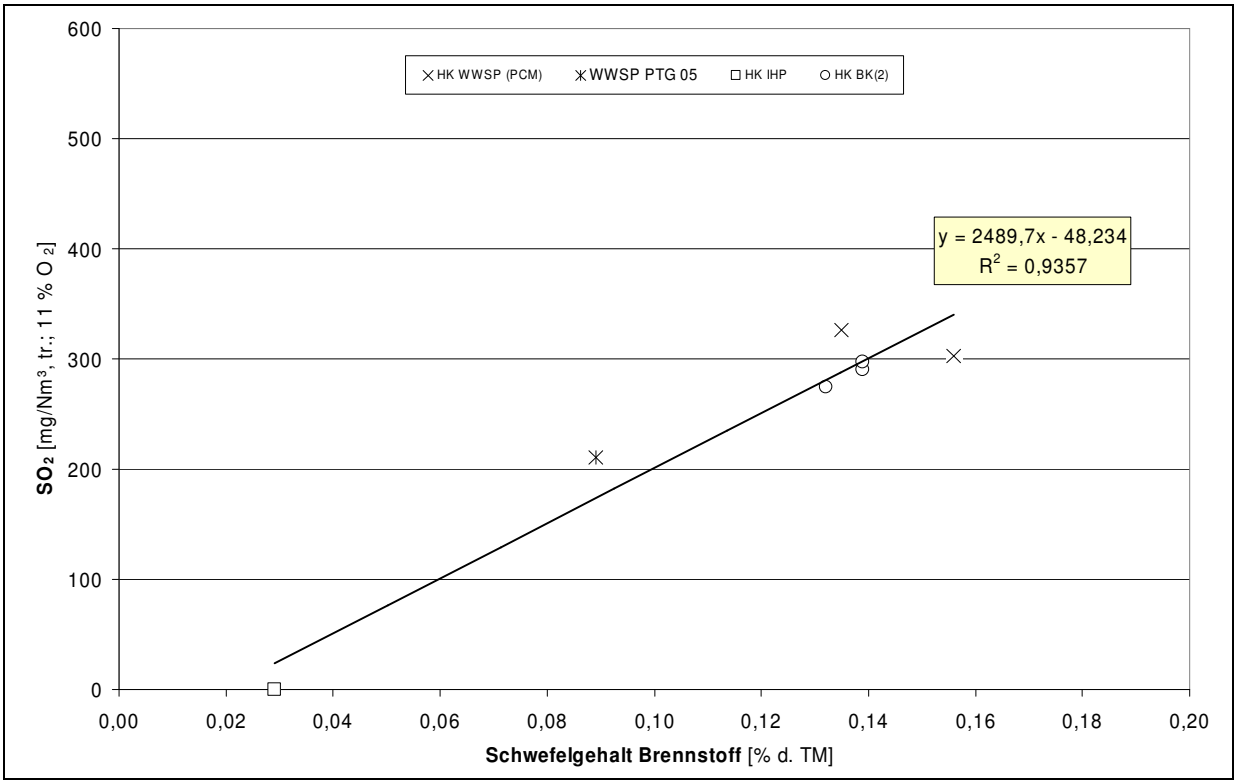


Abb. 55: Abhängigkeit der Schwefeldioxidkonzentration vom Schwefelgehalt im Brennstoff (HK WWSP (PCM), 03.04. und 04.04.2012; WWSP PTG 05, 26.04.2012; HK IHP, 14.03.2012; HK BK(2), 28.03.,24.04.und, 25.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

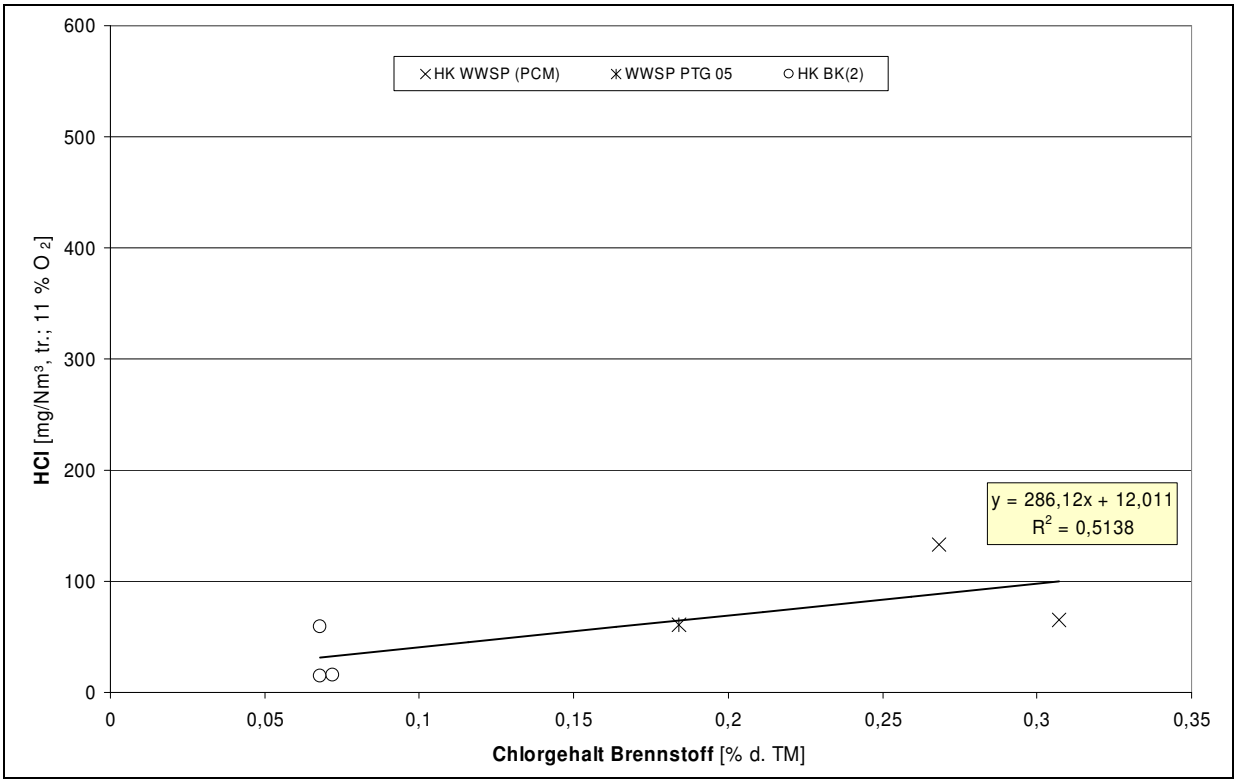


Abb. 56: Abhängigkeit der Chlorwasserstoffkonzentration vom Chlorgehalt im Brennstoff (HK WWSP (PCM), 03.04. und 04.04.2012; WWSP PTG 05, 26.04.2012; HK BK(2), 28.03., 24.04. und 25.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

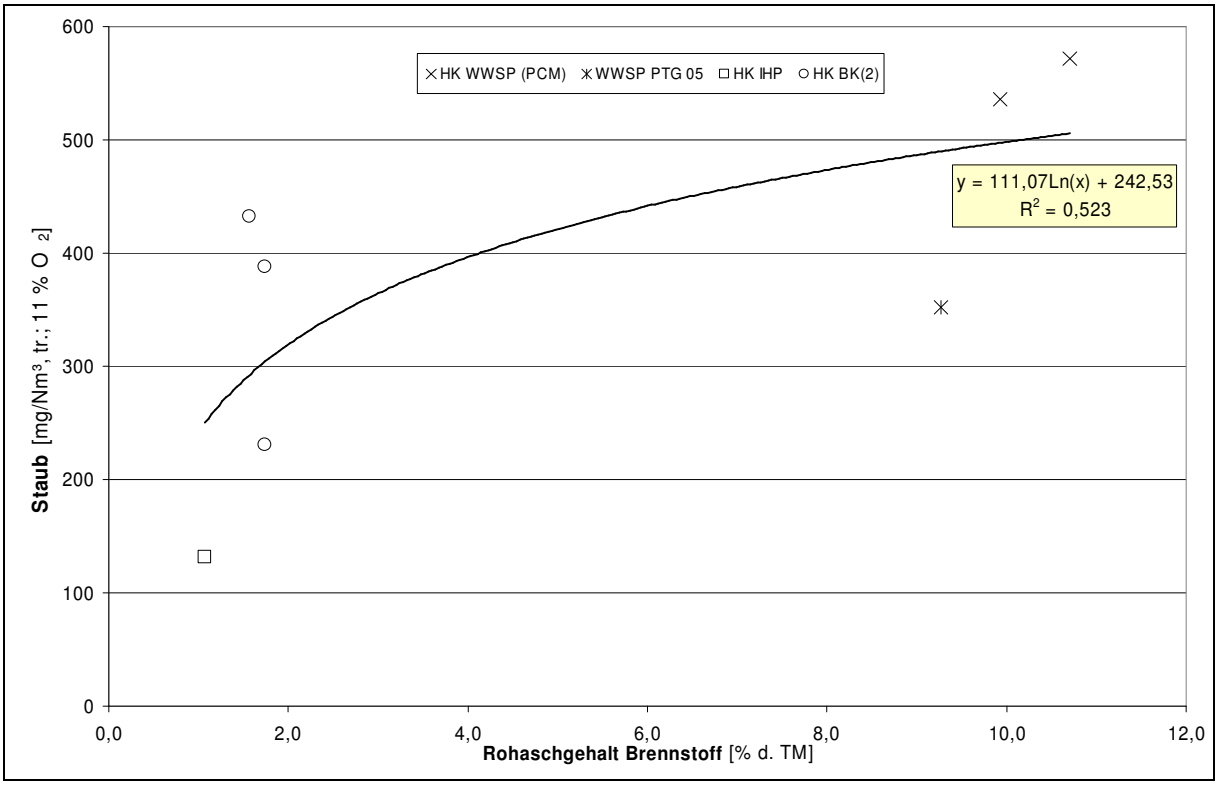


Abb. 57: Abhängigkeit der Rohggasstaubkonzentration vom Rohaschegehalt im Brennstoff (HK WWSP (PCM), 03.04. und 04.04.2012; WWSP PTG 05, 26.04.2012; HK IHP, 14.03.2012; HK BK(2), 28.03., 24.04. und, 25.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

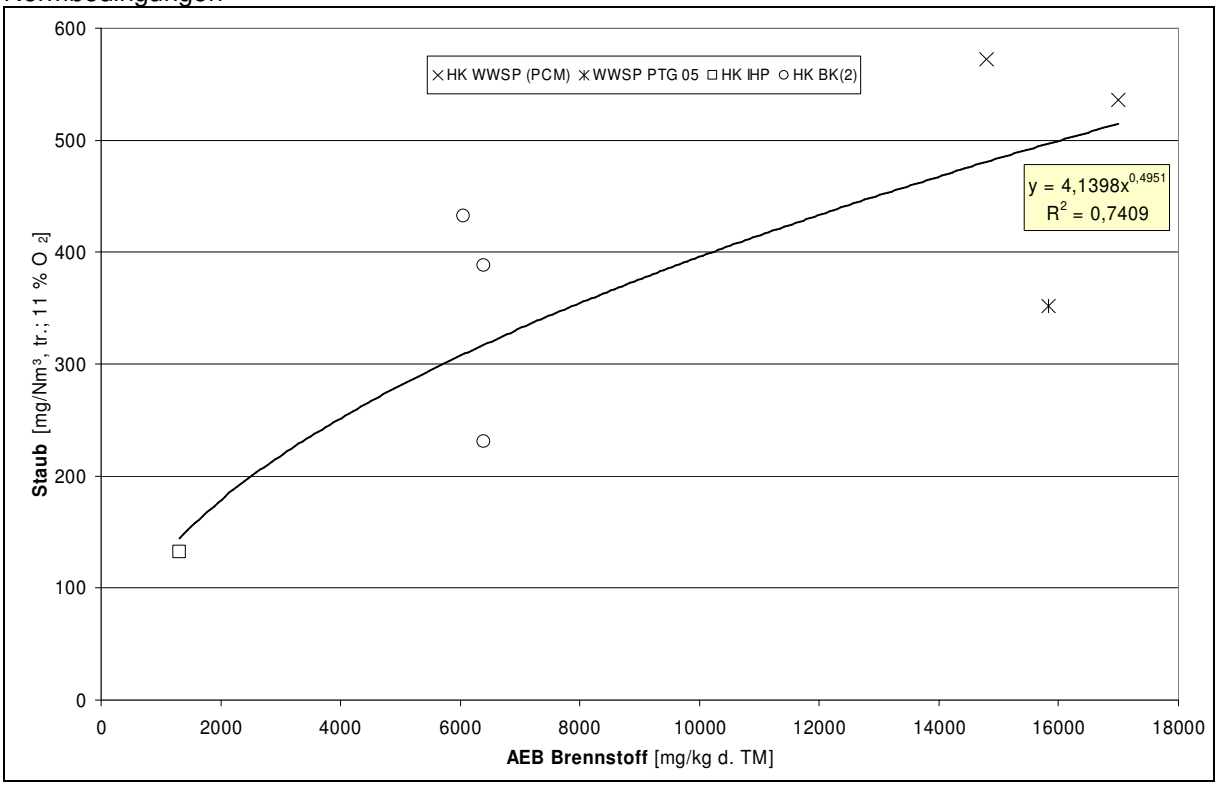


Abb. 58: Abhängigkeit der Rohgasstaubkonzentration vom Gehalt aerosolbildender Elemente im Brennstoff (HK WWSP(PCM), 03.04. und 04.04.2012; WWSP PTG 05, 26.04.2012; HK IHP, 14.03.2012; HK BK(2), 28.03., 24.04. und 25.04.2012); Erhebung von Praxisdaten am UTSW 360, Fa. Schmid AG; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

4.7 Weitere Feldmessungen

In der letzten Projektphase wurden Emissionsmessungen bei der Verbrennung von halmgutartigen Brennstoffen im Rahmen von Feldversuchen bei Feuerungsanlagen mittlerer Leistungsklasse (Nennwärmeleistung 100 – 1.000 kW) durchgeführt, welche in den Geltungsbereich der 4. BImSchV fallen und damit den Anforderungen der TA Luft unterliegen. Ziel dieser Messungen war die Genehmigungsfähigkeit dieser Anlagen unter Praxisbedingungen zu untersuchen. Für jede untersuchte Anlage werden kurz die eingesetzte Feuerungstechnologie beschrieben und die Ergebnisse dargestellt. Ein Vergleich der relevanten Emissionswerte mit den Grenzwerten der 4. BImSchV ist in Tabelle 15 dargestellt.

4.7.1 Standort Küllstedt

Am Standort Küllstedt steht eine 600 kW-Anlage der Firma Linka. Es handelt sich dabei um eine wassergekühlte Brennmuldenfeuerung mit einem eingebauten Vorschubtreppenrost. Die Verbrennung der Brennstoffe Gerstenstroh am 26.02.2013 (Abb. 59) und Gersten- bzw. Weizenstroh am 27.02.2013 (Abb. 60 und 61) zeigten Emissionswerte, welche noch deutlich zu optimieren sind. Dabei gilt es zunächst eine kontinuierliche und gleichmäßige Brennstoffzufuhr zu erreichen, um dann in weiteren Maßnahmen die Emissionen zu mindern. Dabei ist schwerpunktmäßig zunächst der Ausbrand (CO-Wert) zu optimieren.

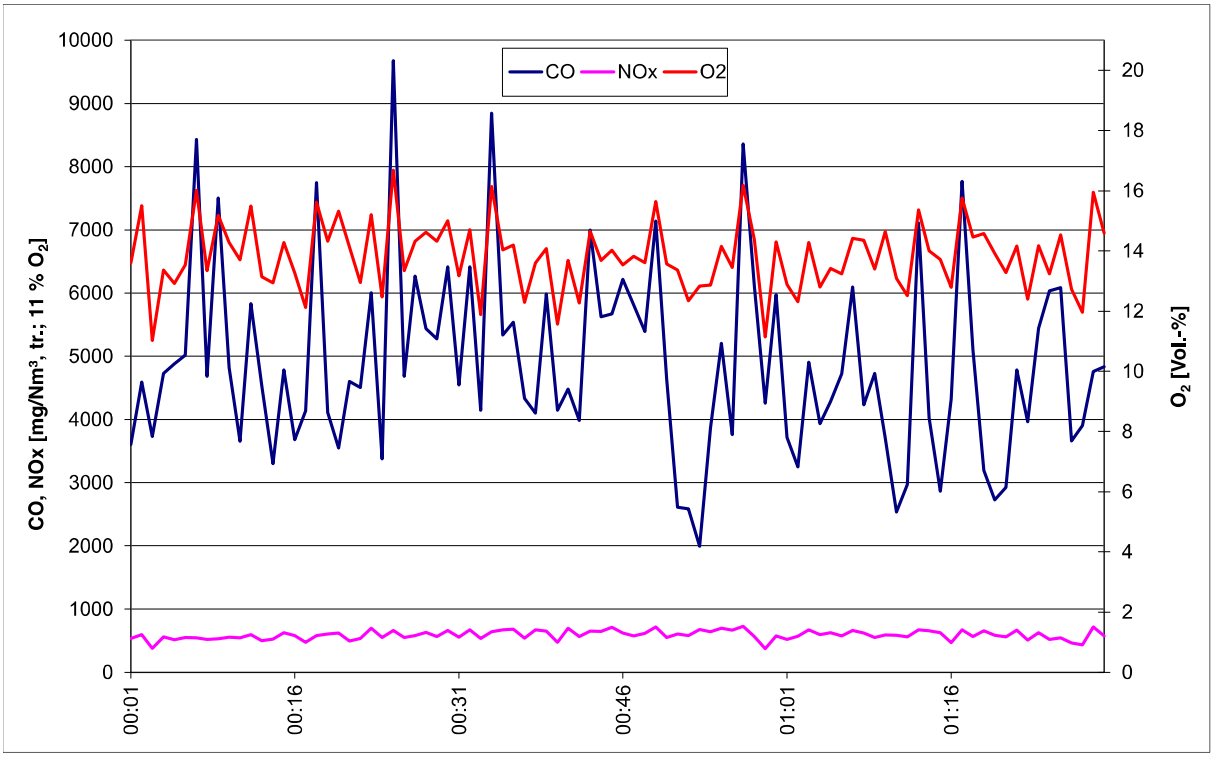


Abb. 59: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Gerstenstroh am 26.02.2013; Erhebung von Praxisdaten an der Linka-Anlage; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

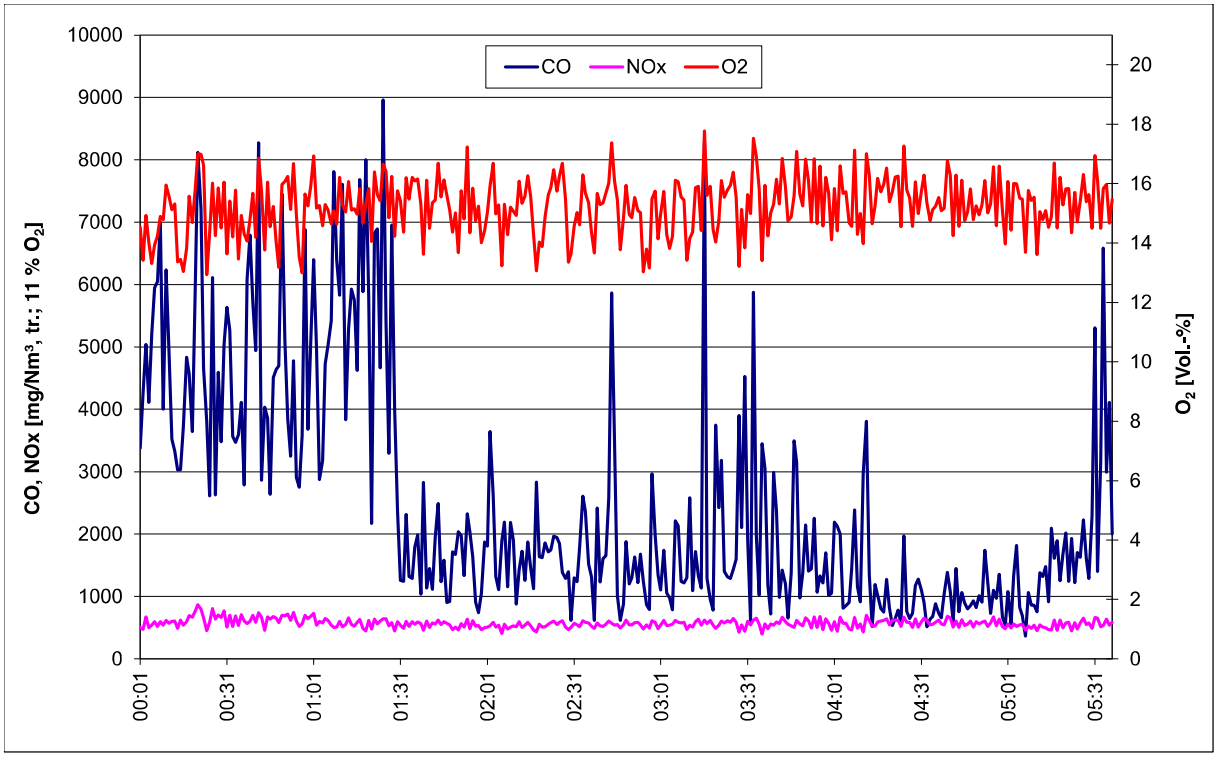
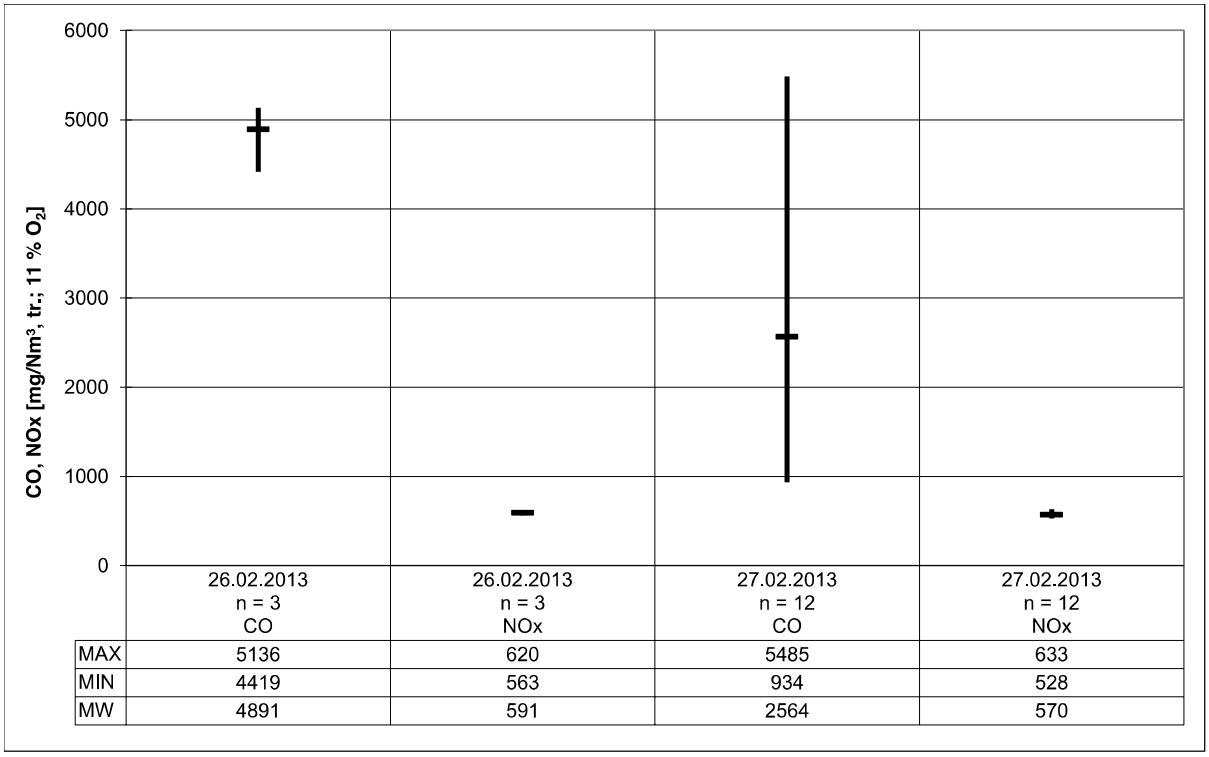


Abb. 60: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Gersten- bzw. Weizenstroh am 27.02.2013; Erhebung von Praxisdaten an der Linka-Anlage; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen



	26.02.2013 n = 3 CO	26.02.2013 n = 3 NOx	27.02.2013 n = 12 CO	27.02.2013 n = 12 NOx
MAX	5136	620	5485	633
MIN	4419	563	934	528
MW	4891	591	2564	570

Abb. 61: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Gerstenstroh sowie Gersten- bzw. Weizenstroh für die Messreihen am 26.02. und 27.02.2013; Erhebung von Praxisdaten an der Linka-Anlage; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

4.7.2 Standort Nordhorn

Am Standort Nordhorn kam ein Biomassekessel (Typ REH500eco) der Firma WERKSTÄTTEN heating–systems GmbH zum Einsatz. Es handelt sich dabei um eine, in dieser Leistungsklasse (ca. 500 kW) erstmalig zur Anwendung kommende Drehrohrofenfeuerung mit separater Nachbrennkammer. Diese Technologie hat sich bisher durch gute Emissionswerte und eine geringe Verschlackungsneigung bei schwierigen Brennstoffen ausgezeichnet. Bei dem Einsatz von Stroh oder ähnlichen pflanzlichen Stoffen in einer Verbrennungsanlage 300 – 500 kW müssen die Grenzwerte für Kohlenmonoxid (CO): 0,25 g/m^3, Stickstoffoxiden (NO_x): 0,50 g/m^3 und Schwefeldioxid (SO_2): 0,35 g/m^3 eingehalten werden.

Erste Voruntersuchungen durch die TLL im Frühjahr 2013 zeigten sehr gute Ausbrandergebnisse. Daraufhin wurden weitere Messreihen durch eine nach § 26 BImSchG zugelassene Messstelle und ein erweitertes Parameterspektrum vereinbart. Die Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen für die genehmigungsrelevanten Emissionsparameter CO, NO_x und SO_2 sind in den Abbildungen 62 und 63 dargestellt. Die Messreihen am 26. bzw. 27.06.2013 zeigen bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (Hersteller: Firma Kaliro, 7 mm) Emissionswerte deutlich unter den geforderten Grenzwerten (Abb. 62). Der vollständige Messbericht ist als Anlage 1 angefügt.

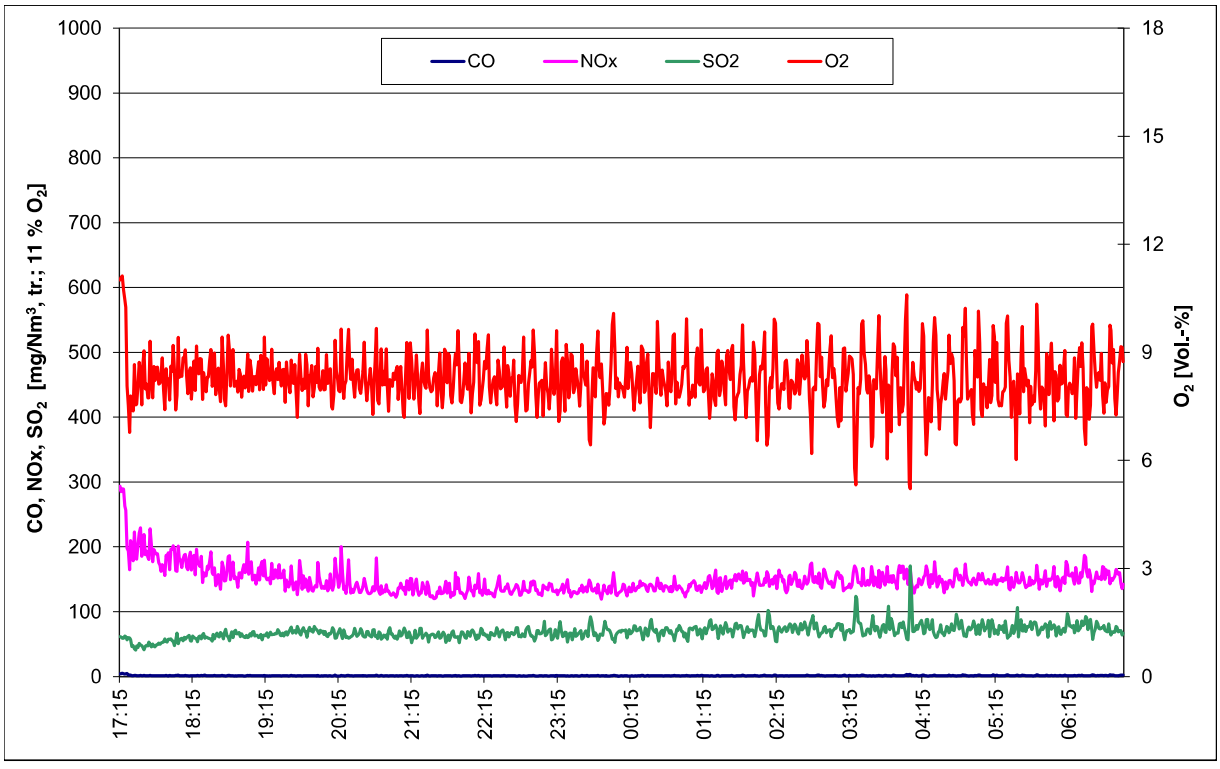
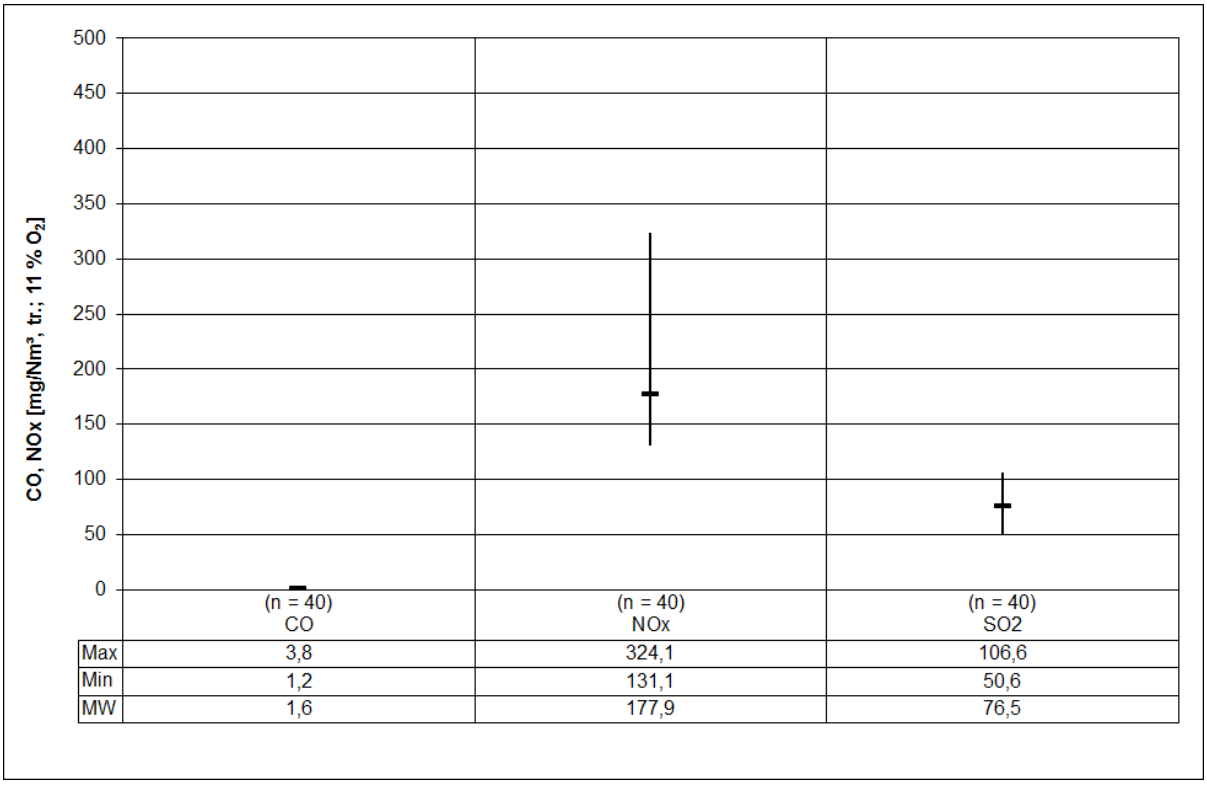


Abb. 62: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_X) und Schwefeldioxid (SO_2) bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (Firma Kaliro, 7 mm) am 26. und 27.06.2013; Erhebung von Praxisdaten am Biomassekessel Typ REH500eco (WERKSTÄTTEN heating-systems GmbH); Messreihe 2, angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Bei Betrachtung des Maximalwertes der Halbstundenmittelwerte von 3,8 mg/Nm³ für einen Messzeitraum von 20 aufeinanderfolgenden Stunden ist keine weitere Optimierung hinsichtlich des Ausbrandergebnisses mehr notwendig (Abb. 623). Damit konnten für den Brennstoff Stroh erstmalig Werte an der unteren Nachweisgrenze der Messgeräte festgestellt werden. Durch die optimierte Luftzuführung und das sich ständig bewegende Glutbett konnte mit Mittelwerten von 180 mg/Nm³ auch eine deutliche Stickoxidminderung erreicht werden.



	(n = 40) CO	(n = 40) NOx	(n = 40) SO2
Max	3,8	324,1	106,6
Min	1,2	131,1	50,6
MW	1,6	177,9	76,5

Abb. 63: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Winterweizenstrohpellets (Firma Kaliro, 7 mm); 26.-27.06.2013; Erhebung von Praxisdaten am Biomassekessel Typ REH500eco (WERKSTÄTTEN heating-systems GmbH); angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Interessant und notwendig erscheint bei dieser Technologie zum einen das Langzeitverhalten und zum anderen mögliche einsatzfähige Brennstoffsortimente zu untersuchen.

4.7.3 Standort Hainchen (Schkölen)

Ein weiterer Biomassekessel, bei dem Feldmessungen durchgeführt wurden, war ein Kessel mit 500 kW_{FWL} der Firma Nestro Lufttechnik GmbH am Firmenstandort Hainchen im Saale-Holzland Kreis. Es handelt sich dabei um eine Weiterentwicklung einer herkömmlichen Vorschubtreppenrosttechnologie. Die im Zeitraum 27.11. bis 05.12. 2013 durchgeführten Messungen zeigen (Abb. 654 und 65), dass zwar erste Optimierungsmaßnahmen umgesetzt werden konnten, die CO-Konzentrationen bei der Verbrennung von Weizenstroh aber noch deutlich über den gesetzlichen Anforderungen liegen. Hier sind weitere anlagentechnische Optimierungen sowohl bei der Brennstoffzufuhr als auch bei der Verbrennungsführung not-

wendig, um neben einer hohen Funktionssicherheit auch einen emissionsarmen Betrieb solcher Anlagen zu gewährleisten.

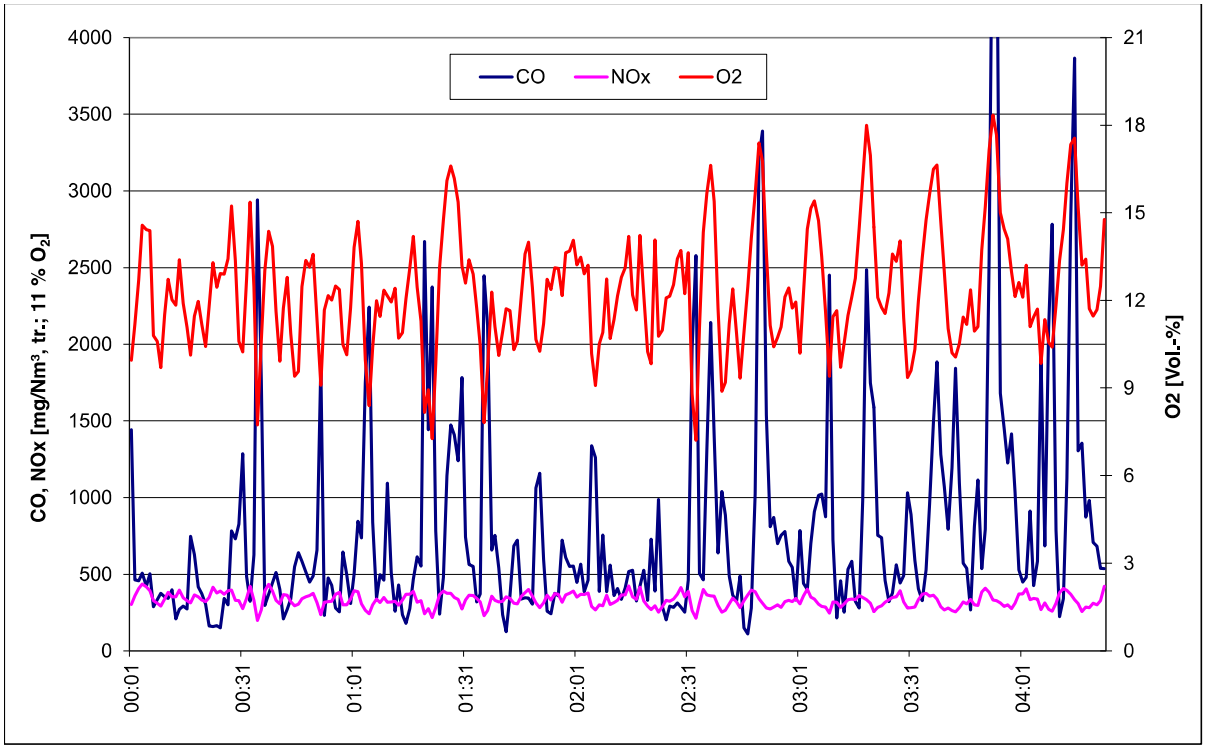
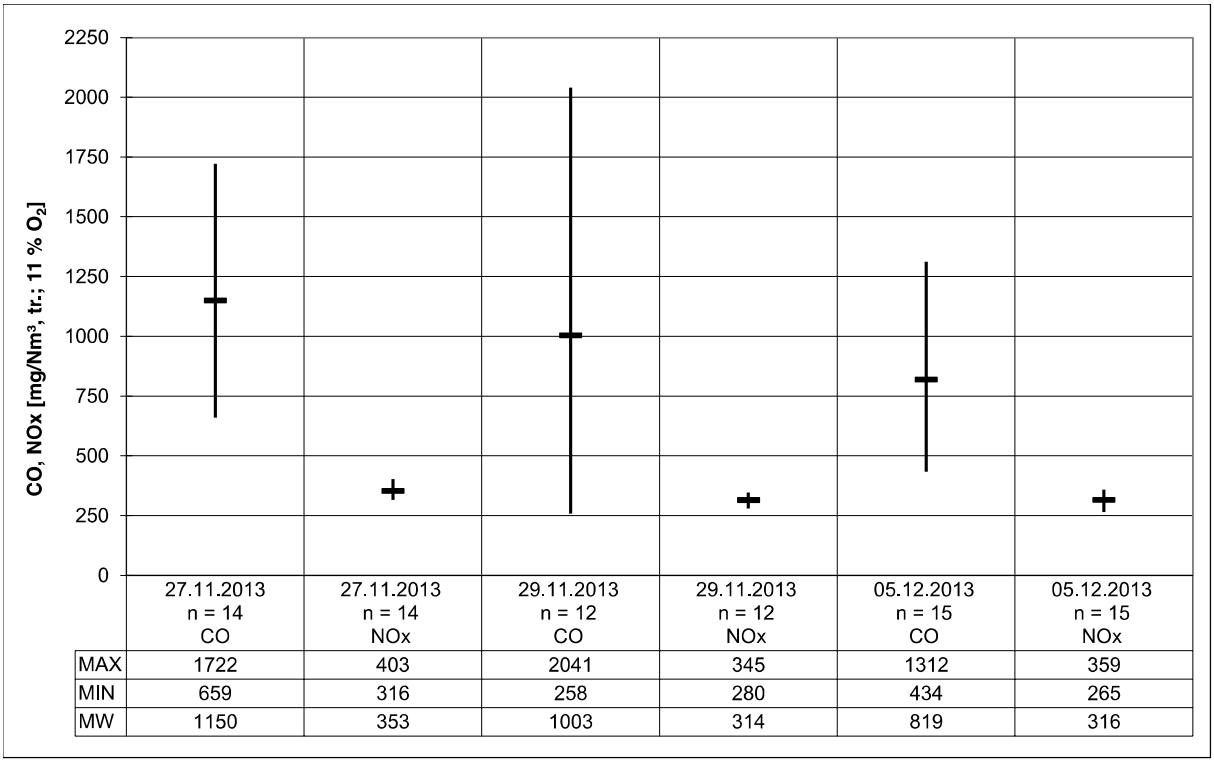


Abb. 64: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden (NO_X bei der Verbrennung von Weizenstroh am 05.12.2013; Erhebung von Praxisdaten am Biomassekessel (Firma Nestro Lufttechnik GmbH); Messreihe 1, angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen



	27.11.2013 n = 14 CO	27.11.2013 n = 14 NOx	29.11.2013 n = 12 CO	29.11.2013 n = 12 NOx	05.12.2013 n = 15 CO	05.12.2013 n = 15 NOx
MAX	1722	403	2041	345	1312	359
MIN	659	316	258	280	434	265
MW	1150	353	1003	314	819	316

Abb. 65: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Weizenstroh am 27.11., 29.11. und 05.12.2013; Erhebung von Praxisdaten am Biomassekessel (Firma Nestro Lufttechnik GmbH); angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

4.7.4 Standort Leutewitz

Am Standort Leutewitz steht eine Ökotherm-Anlage der Firma A.P. Bioenergietechnik GmbH. Es handelt sich dabei um eine wassergekühlte Brennmuldenfeuerung. Die Ergebnisse der Verbrennungsversuche mit dem Brennstoff Gerstenkörner (Siebabgänge der Saatgutproduktion) am 13.02.2014 (Abb. 66) zeigen ein gutes Ausbrandverhalten bei gleichzeitig verhältnismäßig geringen NO_x-Konzentrationen (Abb. 67). Aufgrund dieser guten Ergebnisse wurde hier auch eine Messung mit einer Messstelle nach § 26 BImSchG empfohlen. Im Rahmen eines Sächsischen Forschungsprojektes wurden diese Messungen vom Institut für Luft- und Kältetechnik im Winter 2014 vorgenommen.

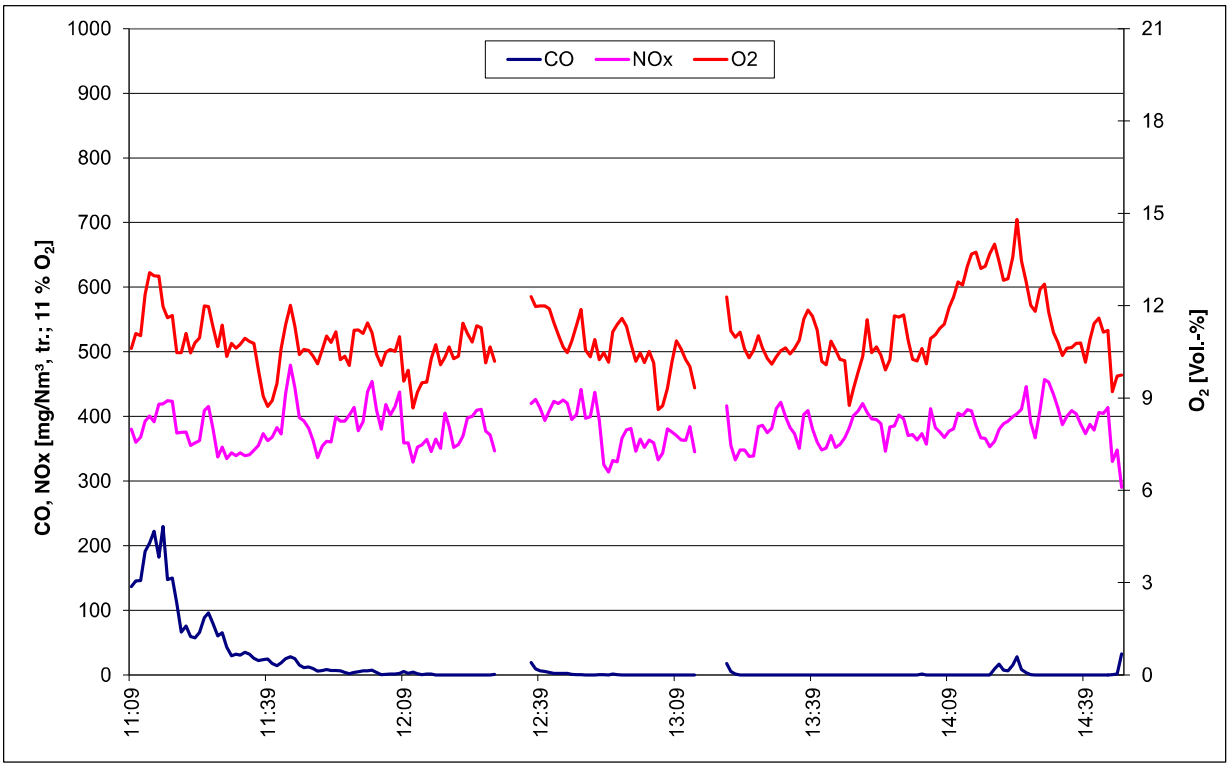
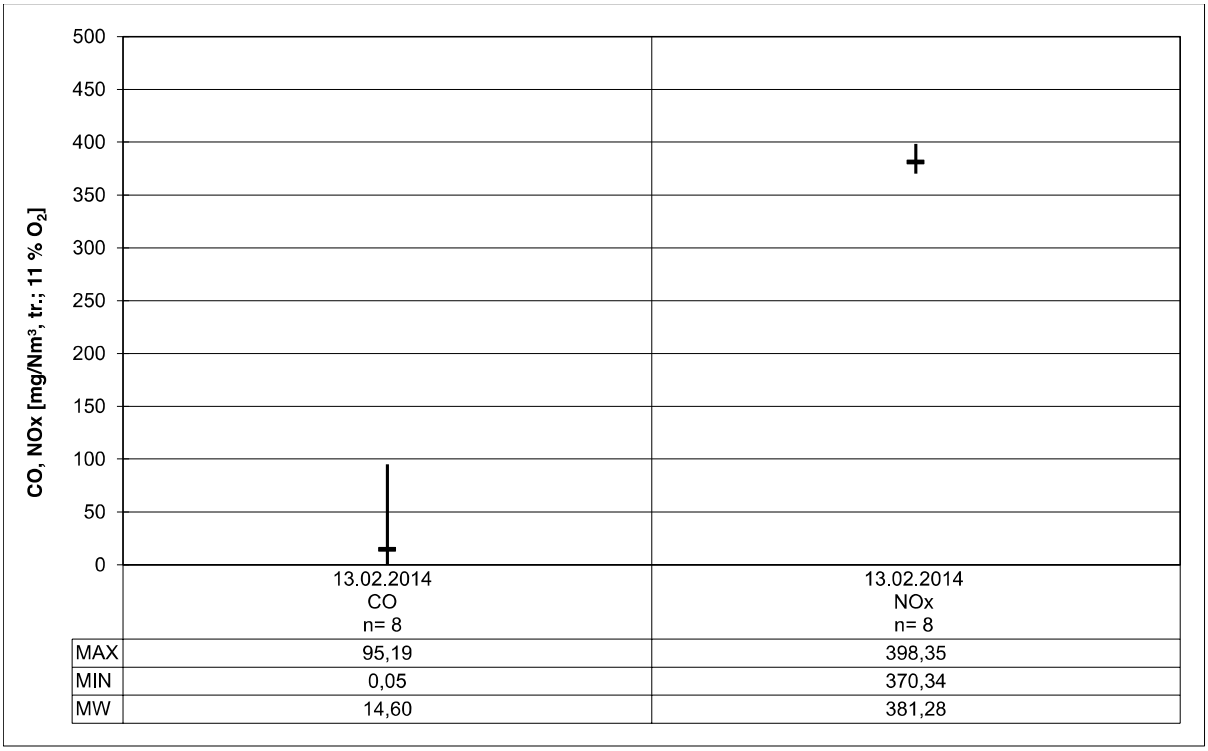


Abb. 66: Entwicklung der Emissionskonzentrationen von Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden (NO_X bei der Verbrennung von Gerstenkörnern (Siebabgänge der Saatgutproduktion) am 13.02.2014; Erhebung von Praxisdaten am Ökotherm Compact C3 324 kW_{FWL}; angegeben als Minutenwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen



	13.02.2014 CO n= 8	13.02.2014 NOx n= 8
MAX	95,19	398,35
MIN	0,05	370,34
MW	14,60	381,28

Abb. 67: Vergleich der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden (NO_X) bei der Verbrennung von Gerstenkörnern (Siebabgänge der Saatgutproduktion) am 13.02.2014; Erhebung von Praxisdaten am Ökotherm Compact C3 324 kW_{FWL}; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

4.8 Zusammenfassung und Fazit

Die Evaluierung des Emissionsverhaltens von kleinen und mittleren Feuerungsanlagen konnte aufzeigen, dass es mittlerweile Technologien gibt, welche selbst mit anspruchsvollen Brennstoffen wie z.B. Halmgütern die hohen emissionsrechtlichen Anforderungen der 1. als auch der 4. BImSchV / TA Luft erfüllen. Es gilt jedoch auch gleichzeitig festzuhalten, dass der Nachweis der Genehmigungsfähigkeit nicht mit jeder am Markt angebotenen Technologie erbracht werden konnte. Teilweise sind bei einzelnen Anbietern noch enorme Optimierungsarbeiten notwendig. Für eine bessere Einschätzung der Eignung der einzelnen Feuerungstechnologien sollte man die verschiedenen Halmgüter weiter unterteilen. Insbesondere ist zu empfehlen, zwischen kornartigen und strohartigen Brennstoffen als auch der angewandten Applikationsform (Ballen, Ballenscheiben, Häcksel, Briketts bzw. Pellets) zu unterscheiden. Die bisher angewandte Vorgehensweise der 1. BImSchV die Regelbrennstoffe in einer Brennstoffklasse (§ 3 Nr. 8) für Halmgüter zusammenzufassen erscheint als nicht ausreichend. Den bei naturbelassenen landwirtschaftlichen Rohstoffen aufgrund von u.a. witterungsbedingten inhomogenen physikalisch-mechanischen als auch chemisch-stofflichen Eigenschaften wird die Einordnung in eine Brennstoffklasse nicht gerecht. Gegebenenfalls wäre eine weitere Unterteilung der Brennstoffe in Anlehnung an die Klassifizierung analog der DIN EN 14961-6 Tabelle 1 sinnvoll.

Neben dem Erreichen eines guten Ausbrandergebnisses haben sich die Staubemissionen als kritischster Verbrennungsparameter gezeigt. Hier ist der Einsatz von entsprechend geeigneten Abscheidetechnologien unabdingbar. Gerade bei Kleinfeuerungsanlagen gibt es momentan nur einzelne Prototypen, welche für den Einsatz mit Halmgütern getestet wurden. Langzeiterfahrungen liegen kaum vor. Hier sind verstärkte Anstrengungen notwendig, um marktfähige und ökonomisch darstellbare Anlagenkonzepte zu entwickeln, zu erproben und in den Markt einzuführen.
Für den Bereich mittelgroßer Anlagen (ab 100 kW_{FWL}) wurden meist herkömmliche Abscheidetechnologien im „downscaling“ an die kleineren Leistungsbereiche angepasst. Diese haben ihre Wirksamkeit im Wesentlichen nachgewiesen. Die erhöhten Investitionskosten müssen allerdings über deutliche Brennstoffkostenvorteile ausgeglichen werden. Ein Anreizsystem für die Entwicklung neuer effizienter und preiswerter Technologien sowie ein Markteinführungsprogramm wäre für die weitere Etablierung derartiger Anlagenkonzepte sinnvoll.
Generell ist festzuhalten dass neben dem Anlagenkonzept, der Auslegung der richtigen Anlagenleistung sowie der Qualität des eingesetzten Rohstoffes die Auswahl von geeigneten Feuerungstechnologien und eine ordnungsgemäße Anlagenführung (Einstellungen, Wartung) die Grundvoraussetzungen für einen effizienten, emissionsarmen und damit genehmigungsfähigen Betrieb der Wärmeerzeugungsanlagen sind.

5. Relevante Ergebnisse von Seiten Dritter - Darstellung der aktuellen Informationsrecherchen nach Nr. 2.1 BNBest-BMBF 98

Mittlerweile liegen die Europäischen Normen zur Klassifizierung von nicht-holzartigen Pellets (DIN EN 14961-6: Feste Biobrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 6: Nicht-holzartige Pellets für nichtindustrielle Verwendung; Deutsche Fassung 14961-6, April 2012) sowie zur Qualitätssicherung der Logistikkette (DIN EN 15234-6: Feste Biobrennstoffe - Qualitätssicherung von Brennstoffen - Teil 6: Nicht-holzartige Pellets für nichtindustrielle Verwendung; Deutsche Fassung FprEN 15234-6:2011) vor. Die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft in der Person von Herrn Thomas Hering ist als Mitglied des deutschen Spiegelkomitees der DIN-Arbeitsgruppe „Biogene Festbrennstoffe“ an der Erarbeitung und Erstellung dieser Produktnormen aktiv beteiligt gewesen. Trotz der Einwände durch die TLL, in Bezug auf die für in der Praxis gewinnbaren naturbelassenen Strohchargen zu hohen Anforderungen bezüglich der Konzentrationen bestimmter normativer Eigenschaftsklassen, wurden sie auf europäischer Ebene so beschlossen. Die Entwicklung einer parallelen Klassifizierung, wie im Arbeitsschwerpunkt 4 ursprünglich vorgeschlagen, wird daher als nicht mehr sinnvoll eingeschätzt.

6. Literatur

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2010): „Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV." vom 26. Januar 2010, Bundesgesetzblatt Teil I Nr. 4, ausgegeben zu Bonn am 1. Februar 2010, S. 38 – 56.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2002): „Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Technische Anleitung Luft – TA Luft." Gemeinsames Ministerialblatt vom 30. Juli 2002, Heft 25 – 29, S. 511 – 605.

DANAK: Prüfbericht 300-ELAB-1367.

Hering, Th (2007a).: Das Biomasseheizwerk Dornburg. Merkblatt TLL, 8 S. September 2007

Hering, Th. (2007b): Brennstoff für Priviligierte. In: Bauernzeitung Ausg.: 1, S. 26-27.

Hering, Th.; Peisker, D.; Vetter, A. (2005): Energetische Verwertung von Getreide und Halmgutpellets. Abschlussbericht, Eigenverlag der TLL, 78 S.

Hering, Th., Peisker, D. (2009): Untersuchung zum Emissionsverhalten von Getreide und halmgutartigen Brennstoffen in Feuerungsanlagen in der Praxis. Abschlussbericht. Eigenverlag der TLL, Jena.

Hochberg, H., Gödecke, K., Hering, Th., Schmidt, F., Lochmann, Y., Hochberg, E., Jäger, U. (2011): Optimierung der nachhaltigen Biomassebereitstellung von repräsentativen Dauergrünlandtypen für die thermische Verwertung (GNUT-Verbrennung). Endbericht zum Verbundprojekt, Eigenverlag der TLL.

Kay, S., Hering, Th. (2011): Eignung und Optimierung von Halmgutpresslingen für kleine und mittlere Feuerungsanlagen, 2. Zwischenbericht, Eigenverlag der TLL, 16 S.

Neumann, H. (2007): Neue Pellets sollen knappes Brennholz ersetzen. In: top agrar. Ausg.: 12, S. 98-100.

Peisker, D., Hering, Th. Vetter, A. (2007): Energetische Verwertung von Stroh – Möglichkeiten und Grenzen. Eigenverlag der TLL, Jena.

Weiser, C., Zeller, V., Reinicke, F., Majer, S., Vetter, A., Thraen, D. (2014): Integrated assessment of sustainable cereal straw potential and different straw-based energy applications in Germany. Applied Energy. 114, 749-762.

Internetadressen:

[1] www.helbig-gmbh.de/biomassefeuerung/twinheat.html

[2] www.holzfeuerung.ch

Anhang I: Fragebogen zur Halmgut-Kompaktierung

Befragung zur Marktsituation der Halmgut-Kompaktierung

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
Sonja Kay und Thomas Hering
Apoldaer Straße 4 - 07774 Dornburg-Camburg
Tel.: 036427-868110 -Fax: 036427-22340 - Mail: sonja.kay@tll.thueringen.de

Angaben zum Unternehmen:

1. Name des Unternehmens:	
2. Ansprechpartner, Anschrift, Telefon, Fax, Email, Homepage:	
3. Welche Produkte bieten Sie an?	

Angaben zur Anlage:

4. Verwenden Sie stationäre und/oder mobile Kompaktieranlagen?

☐ Stationäre Anlage ☐ Mobile Anlage Bemerkung:

5. Welche Kompaktiertechnologie und wie viele Einzelanlagen verwenden Sie?

☐ Pellet-Presse		☐ Brikettier-Presse		Sonstiges
☐ Ringmatrize		☐ Strang-Presse		
☐ Flachmatrize		☐ Walzen-Presse		
☐ Zahnradpresse		☐ Presskammer		

6. Von welchem Hersteller ist/sind Ihre Anlagen und wie ist die genaue Bezeichnung? (z.B. Firma Muster, Typ P-123)

- Pelletpresse	
- Brikettierpresse	
- Sonstiges	

7. Welche Leistung hat/haben die Presse/n? (in t/h)

Pelletpresse		Brikettpresse		Sonstiges	

8. In welchem Jahr wurde/n die Presse/n gekauft und in Betrieb genommen?

Pelletpresse		Brikettpresse		Sonstiges	

Angaben zur Produktion:

9. Welche Mengen produzieren Sie pro Jahr?

Pelletpresse	Brikettpresse	Sonstiges
☐ < 500 t/a	☐ < 500 t/a	☐ < 500 t/a
☐ 500 -1.000 t/a	☐ 500 -1.000 t/a	☐ 500 -1.000 t/a
☐ 1.001 -2.500 t/a	☐ 1.001 -2.500 t/a	☐ 1.001 -2.500 t/a
☐ 2.501 - 5.000 t/a	☐ 2.501 - 5.000 t/a	☐ 2.501 - 5.000 t/a
☐ 5.001 - 10.000 t/a	☐ 5.001 - 10.000 t/a	☐ 5.001 - 10.000 t/a
☐ > 10.000 to/a	☐ > 10.000 to/a	☐ > 10.000 to/a

10. Welche Materialien setzen Sie ein und zu welchen Anteilen? (in Tonnen)

Pellets:	Holz		Stroh		Heu/Gras		Miscanthus		Sonstiges		
Briketts:	Holz		Stroh		Heu/Gras		Miscanthus		Sonstiges		
Sonstiges:	Holz		Stroh		Heu/Gras		Miscanthus		Sonstiges		

11. Welche Hilfsstoffe verwenden Sie?

12. Verwenden Sie zusätzliche Technologien? Wenn ja, welche?

Trockner ☐	Ballenauflöser ☐	Hammermühle ☐	Dampferzeuger ☐
Mischer ☐	Kühler ☐	Sonstiges	
Siebanlage ☐	Absackanlage ☐	Sonstiges	

13. Aus welchem Einzugsgebiet beziehen Sie Ihre Rohstoffe? In welchem Umkreis verkaufen Sie Ihre Produkte? (in km)

Rohstoff | Produkt

14. In wessen Auftrag kompaktieren Sie und zu welchen Anteilen? (in %)

☐ Lohnverarbeitung/Dienstleistungbetrieb | ☐ in Eigenregie /Verkaufsbetrieb

15. Gibt es saisonale Schwankungen in Ihrer Produktion? (z.B.: Sommer: Gras - Futter, Herbst: Stroh - Brennstoff, etc.)

Angaben zur Verwertung:

16. Welche Verwendung finden Ihre Kompaktate und zu welchen Anteilen? (in %)

Pellets:	Einstreu	Brennstoff	Futtermittel	Sonstiges	
Briketts:	Einstreu	Brennstoff	Futtermittel	Sonstiges	
Sonstiges:	Einstreu	Brennstoff	Futtermittel	Sonstiges	

17. Ist Ihr Produkt normiert oder zertifiziert? Wenn ja, anhand welcher Vorgaben? (z.B. QM, HACCP, RAL, DIN, EN,...)

Pellets | Briketts | Sonstiges

18. Welche Absatzmärkte bedienen Sie? Zu welchen ungefähren Anteilen? (in %)

Pellets:	Handel	Direktvertrieb	Eigenbedarf	Sonstiges	
Briketts:	Handel	Direktvertrieb	Eigenbedarf	Sonstiges	
Sonstiges:	Handel	Direktvertrieb	Eigenbedarf	Sonstiges	

19. Welche Preise erzielen Sie für Ihre Produkte? (in €/t ab Werk lose Ware)

Pellets | Briketts | Sonstiges

20. Haben Sie Anregungen, Fragen, Wünsche oder Bemerkungen?

Per E-Mail senden | Herzlichen Dank für Ihre Unterstützung!! | Formular drucken

Eine Probe Ihrer Pellets, Briketts oder anderen Kompaktate sowie Prospektmaterial Ihrer Produkte ist bei uns immer herzlich willkommen!

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft - TZNR
Ansprechpartner: Sonja Kay und Thomas Hering
Apoldaer Straße 4 - 07774 Dornburg - Tel.:036427-868110 - Fax:036427-22340 - Mail: sonja.kay@tll.thueringen.de

Anhang II: Anbieter von Kompaktierungsdienstleistungen

Nr	Hersteller	Ort	PLZ	Land	Brikett	Holz	Sonstiges
1	ABW Apoldaer Biomassewerk UG	Appolda	99510	D		Holz	Stroh
2	Agrarhandel B+B Müller GbR	Böhringen	78661	D			Stroh
3	Agrar-Profi GmbH	Glött	89353	D			Stroh
4	Agro Bio Tech GmbH	Trappenkamp	24610	D			Stroh
5	Agroservice Langenwolmsdorf GmbH	Dürrröhrsdorf-Dittersbach	01833	D	Cobs		Stroh, heu
6	Allspan GmbH Spanverarbeitung	Karlsruhe	76189	D		Holz	
7	ante-holz GmbH	Bromskirchen-Somplar	59969	D		Holz	
8	Apenbrink & Co	Bielefeld	33739	D		Holz	
9	AV Handels GmbH	Schwäbisch Gmünd	73527	D	Brikett	Holz	Stroh
10	B&B Bioenergie GmbH	Calau	03205	D		Holz	
11	Bachmann Strohpellets	Natternbach	4723	A			Stroh
12	BauerPower- EnergievomLand	Rüsselsheim	65428	D			Stroh
13	Baust Holzbetriebs GmbH	Eslohe	59889	D		Holz	
14	Bayerische Pellet- und Brennstoffwerke Kanak e.K.	Kirchberg	94259	D	Brikett	Holz	
15	Bayerwald Pellet GmbH & Co. KG	Regen	94209	D	Brikett	Holz	
16	BayWa AG	München	81925	D		Holz	
17	BEH Bioenergie GmbH Mittenaar	Mittenaar	35756	D		Holz	
18	Bernd Jorkisch GmbH & Co. KG	Daldorf	24603	D		Holz	
19	Bibo Natur	Gescher	48712	D			Stroh
20	Binderholz Deutschland GmbH	Kösching	85092	D		Holz	
21	Bio-Energie Mudau GmbH & Co. KG	Mudau	69427	D		Holz	
22	Bioenergie Sonnen Pellet GmbH	Buchenbach	79256	D		Holz	
23	BioPELL GmbH	Empfingen	72186	D		Holz	
24	Blankenburg-Öhls GmbH	Mainzholzen	37632	D		Holz	
25	BOSZ-BIO-ENERGIE GmbH	Nusbaum-Freilingen	54675	D		Holz	
26	BSVG Biostoffverwertungsgesellschaft Klix mbH	Großdubrau OT Klix	02694	D	Brikett	Holz	
27	bvl biomasse-verwertung-leinetal GmbH	Hardegsen	37181	D	Brikett	Holz	
28	Curo Spezialfutter GmbH & Co.KG	Ostenfelde	59320	D			
29	Demmel Bioenergie GmbH	Hürtgenwald-Vossenack	52393	D		Holz	
30	DS Technologie Entwicklungs- und Betriebsgesellschaft mbH	Lauchhammer	01979	D			Schafwolle
31	EC Bioenergie GmbH	Heidelberg	69126	D		Holz	
32	Ecoworxx GmbH	Raddestorf	31604	D		Holz	Stroh
33	EKO Energy GmbH	Düsseldorf	40211	D		Holz	
34	Emil Steidle GmbH & Co. KG	Sigmaringen	72488	D		Holz	
35	Energiepellets Oberhonnefeld GmbH	Oberhonnefeld Gierend	56587	D		Holz	
36	EnviCont Ltd.	Dresden	01099	D	Brikett		Stroh
37	Enviva Pellets GmbH & CO.KG	Straubing	94315	D		Holz	
38	EVS GmbH & Co. KG	Hengersberg	94491	D		Holz	

Nr	Hersteller	Ort	PLZ	Land	Brikett	Holz	Sonstiges
39	Fallert Ortenauer Holzenergie GmbH & Co.KG	Appenweier	77767	D	Brikett	Holz	
40	FireStixx Hartleitner GmbH & Co. KG	Ziertheim	89446	D		Holz	
41	FireStixx Holz-Energie GmbH	Vilsbiburg	84137	D		Holz	
42	FMS Futtermittel GmbH Selbelang	Selbelang	14641	D	Cobs		Heu
43	FNG Fehrbellin Naturholz GmbH	Fehrbellin	16833	D		Holz	
44	FP Franken-Pellets GmbH & Co. KG	Stadtsteinach	95346	D	Brikett	Holz	
45	Futter- und Trocknungsgenossenschaft Wolfratshausen West eG	Münsing/Degerndorf	82541	D	Cobs		Gras
46	Futtertrocknung Altenstadt eG	Altenstadt	86972	D	Ballen		Stroh
47	Futtertrocknung Altusried e.G.	Altusried	87452	D	Cobs		Heu
48	Futtertrocknung Erkheim e.G.	Erkheim	87746	D	Cobs		Heu
49	Futtertrocknung Geiselharz eG	Amtzell	88279	D			
50	Futtertrocknung Hergatz e.G.	Hergatz	88145	D	Cobs		Heu
51	Futtertrocknung Kaufbeuren eG	Germaringen-Ketterschwang	87656	D	Ballen		Stroh
52	Futtertrocknung Mindelheim e.G.	Mindelheim	87719	D	Cobs		Gras
53	Futtertrocknung Röckersbühl eG	Röckersbühl	92361	D		Holz	Stroh
54	Gebr. Hosenfeld GmbH & Co. KG	Hosenfeld	36154	D		Holz	
55	GEE Energy GmbH & Co. KG	Hamburg	20459	D	Brikett	Holz	Rinde
56	Georg Reuss	Bebra-Solz	36179	D		Holz	
57	German Pellets GmbH	Wismar	23966	D		Holz	
58	Graf Pellets	Krumbach-Niederraunau	86381	D		Holz	
59	Groß- und Einzelhandel für Tiereinstreu und Futtermittel	Seelingstädt	07580	D			Stroh
60	Grünfuttertrocknungsgenossenschaft Buschhof e.G.	Lauterhofen	92283	D	Cobs		Heu
61	Grünfuttertrocknungsgenossenschaft Kirchdorf a.H. eG	Bruckmühl	83052	D	Cobs		Heu
62	Haas Holzprodukte GmbH	Falkenberg	84326	D	Brikett	Holz	
63	Hanse BioEnergy Holding GmbH & Co. KG	Trappenkamp	24610	D		Holz	Stroh
64	Heggenstaller Vertriebs GmbH	Unterbernbach	86556	D		Holz	
65	Heinrich Eggersmann GmbH & Co.KG	Rinteln	31737	D	Cobs		Heu
66	Herbert Ströh GmbH & Co.KG	Hamburg	22397	D			Stroh
67	Heukorb	Renningen	71272	D	Cobs		Stroh, Heu
68	Holzenergie Odenwald GmbH & Co.KG	Grasellenbach	64689	D		Holz	
69	Holz-Energie-Zentrum Olsberg GmbH	Olsberg	59939	D		Holz	
70	Holzindustrie Schlitz GmbH & Co. KG	Schlitz	36110	D		Holz	
71	Holzkontor & Pelletierwerk Schwedt GmbH	Schwedt/Oder	16303	D		Holz	
72	Holzwerke Pröbstl GmbH	Fuchstal-Asch	86925	D		Holz	
73	Hot'ts Deutschland	Simbach am Inn	84359	D	Brikett	Holz	
74	Höveler Spezialfutterwerke GmbH & Co.KG	Dormagen	41542	D	Brikett		Stroh
75	HOWEE Holzwertstoffe Eberswalde GmbH	Eberswalde	16225	D		Holz	
76	HPP Holz Pellet Produktion Sachsen GmbH & Co. KG	Dohna	01809	D		Holz	
77	Hubert Schmid Bauunternehmen GmbH	Marktoberdorf	87616	D	Cobs		
78	HVT Hobelspanverarbeitung GmbH	Dittersdorf	07907	D		Holz	
79	IBK Knoblich GbR	Frankfurt (Oder)	15234	D		Holz	Stroh

Nr	Hersteller	Ort	PLZ	Land	Brikett	Holz	Sonstiges
80	IN-Energie GmbH & Co. Betreiber KG	Großmehring / Interpark	85098	D		Holz	
81	Iwo-Pellet Rhein.Main GmbH	Offenbach	63075	D		Holz	
82	jumbo group logistik GmbH	Buttenwiesen	86647	D			
83	JuraPellets Daubenspeck GmbH & Co. KG	Ursensollen	92289	D	Brikett	Holz	
84	juwi Bio GmbH	Wörrstadt	55286	D		Holz	
85	Kaliro GbR	Rheine	48432	D			Stroh
86	Knauber Holding GmbH & Co. KG	Bonn	53115	D		Holz	
87	KSM-Stoker Österreich	Oberwaltersdorf	2522	A			Stroh
88	Läderach Agro AG	Henggart	8444	CH			Stroh
89	Ländliche Dienstleistungs- und Handelsgenossenschaft Niederbobritzsch e.G.	Niederbobritzsch	09627	D			
90	Landwirtschaftliche Trocknungsgenossenschaft Neuhof a.d.Zenn und Umgebung eG	Neuhof a. d. Zenn	90616	D		Holz	Stroh
91	Lange & Meyer GbR	Hilgermissen	27318	D			Stroh
92	Lockfisch GmbH	Kienberg	83361	D			
93	Lohnunternehmer Harald Seipp	Ober-Hörgern	35516	D			Stroh
94	marstall GmbH	Oberstaufen	87534	D	Cobs		Heu
95	Maschinenringe Schleswig-Holstein e.V.	Nienborstel	24819	D			Stroh
96	MH Bioenergie Stackelitz GmbH	Stackelitz	06862	D		Holz	
97	Mühlendorfer Pferdefutter	Mühldorf	84453	D	Quader		
98	Muskator-Werke GmbH	Düsseldorf	40221	D			Stroh
99	Naturholzzentrum Kehl	Kehl	77694	D		Holz	
100	NEST - Neue Energie Steinfurt GmbH	Steinfurt	48565	D			Gärrest
101	Nullpunkt Biomasse - Bioenergie	Wenkheim	97956	D			Stroh
102	P.O.L.I. Invest GmbH	Berlin	10117	D		Holz	
103	PCM planning consultng management gmbh	Künzell	36093	D			
104	Pellet Energy GermanyGmbH	Rosenheim	83026	D		Holz	
105	Pellets GmbH	Notzingen	73274	D		Holz	
106	pelltec gmbh	Laupen	8637	CH		Holz	Stroh
107	Pelltec GmbH	Sonsbeck	47665	D		Holz	
108	Pusch AG	Marienrachdorf	56242	D			Mischpellets
109	Raiffeisen-Landbund eG	Niedernwöhren	31712	D			Stroh
110	Raiffeisen-Trocknungsgenossenschaft Münchberg und Umgebung e.G.	Münchberg	95213	D	Cobs		Heu
111	Raiffeisen-Trocknungsgenossenschaft Prebitz eG	Prebitz	95473	D			Stroh
112	Raiffeisen-Waren Zentrale Rhein-Main eG	Köln	50668	D			Stroh
113	Römer Holz-Großhandel	Emskirchen	91448	D		Holz	
114	RWZ Ebeleben	Ebeleben	99713	D			Stroh
115	S+K GmbH Haus- und Energietechnik	Rot am See	74585	D			Stroh
116	Sägewerk Assenmacher	Ormont	54597	D		Holz	
117	Schellinger KG	Weingarten	88250	D		Holz	
118	SCM Produktions- und Vertriebs- GmbH	Staasdorf	3430	A			
119	Sonnen - Pellets Krauchenwies GmbH & Co. KG	Krauchenwies	72505	D		Holz	
120	Sorpetaler Fensterbau GmbH & Co. KG	Sundern-Hagen	59846	D		Holz	

Nr	Hersteller	Ort	PLZ	Land	Brikett	Holz	Sonstiges
121	St. Hippolyt Nutrition Concepts	Schlitz	36110	D	Cobs		Heu
122	STAWAG Stadtwerke Aachen AG	Aachen	52070	D		Holz	
123	Süd-Energie Bioplus GmbH	Monsheim	67590	D		Holz	
124	SÜGEMI GmbH	Themar	98660	D			
125	Suwa Kräuterhandel	Aschersleben	06449	D			Kräuter
126	Tangermünder Holzpelletwerke GmbH	Tangermünde	39590	D		Holz	
127	Theodor Herbert GmbH & Co. KG	Motten	97786	D		Holz	
128	Thermospan - Gregor Ziegler GmbH	Plößberg	95703	D		Holz	
129	thükra GmbH	Gotha	99867	D			
130	Trockenfutter GmbH Oberoschitz	Schleiz	07907	D			Stroh
131	Trockenwerk Großschirma e.G.	Großhartmannsdorf	09618	D	Cobs		Stroh, Heu
132	Trocknung Niemegk	Niemegk	14823	D			
133	Trocknungemeinschaft Wechingen	Wechingen	86759	D	Cobs		Heu
134	Trocknungsgenossenschaft Ellingen eG	Ellingen	91792	D		Holz	
135	Trocknungsgenossenschaft Hilpoltstein eG	Hilpoltstein	91161	D	Cobs		Gras
136	Trocknungsgenossenschaft Lengenfeld e.G.	Velburg	92355	D	Cobs		Heu
137	Trocknungsgenossenschaft Oberallgäu e.G.	Burgberg	87545	D	Cobs		Heu
138	Trocknungsgenossenschaft Ostrachtal eG	Ostrach	88356	D	Cobs		Gras, Mais
139	Trocknungsgenossenschaft Tirschenreuth eG.	Tirschenreuth	95643	D	Cobs		Stroh, Gras
140	Trocknungsgenossenschaft Windsbach eG	Windsbach	91575	D	Cobs		Stroh, Heu
141	Trocknungsgenossenschaft Wolfratshausen Ost eG	Egling	82544	D	Cobs		Gras
142	Trocknungsgesellschaft Bopfingen und Umgebung	Bopfingen	73441	D		Holz	
143	Trocknungswerk Donaualtheim eG	Dillingen	89407	D			Stroh
144	Trocknungswerk Lamerdingen eG	Lamerdingen	86862	D			Stroh
145	Tröger - Der Einrichter	Arzberg	95659	D		Holz	
146	VIS NOVA Trading GmbH	Bremen	28217	D		Holz	
147	vonNeuhoff Landhandel und Dienstleistung	Dresden	01157	D	Brikett	Holz	
148	Vorwerk Mineralöl Handelsgesellschaft mbH	Mansfeld	06343	D		Holz	
149	Wasser- und Bodenverband "Marburger Land"	Amöneburg	35287	D	Brikett		Stroh
150	WEAG & Mohr GmbH & Co. KG	Trier	54294	D		Holz	
151	Westerwälder Holzpellets GmbH	Langenbach	57520	D		Holz	
152	Westpellets GmbH & Co. KG	Titz Ameln	52445	D		Holz	
153	Wotsch Lufttechnische Anlagen	Wildenau	4933	A			Stroh
154	ZG Raiffeisen Karlsruhe	Bretten	75015	D		Holz	
155	Zschortauer Futtermittel GmbH	Rackwitz	04519	D			

Anhang III: Hersteller bzw. Anbieter von Pellet- und Brikettpressen

Nr.	Hersteller	Ort	PLZ	Land
1	Adelmann GmbH	Karlstadt	97753	D
2	Agrarsysteme Hornung	Unterschneidheim-Zöbingen	73485	D
3	AGRIFA GmbH	Varel	26316	D
4	Amandus Kahl	Reinbek	21465	D
5	ANDRITZ AG	Graz	8045	A
6	AVS	Bratislava	81105	SLO
7	BauerPower	Rüsselsheim	65428	D
8	BHS Energy	Pennsylvania		USA
9	Biegger	Bregenz	6900	A
10	Bliss Industries	Ponca City, Oklahoma	74602	USA
11	Bogma	Ulricehamm	52390	SWE
12	Bopat - Bastwöste	Melle - Buer	49328	D
13	Bühler GmbH	Braunschweig	38114	D
14	C.F: Nielsen A/S	Baelun	9574	S
15	CO. MA. FER	Gollebeato Brecia	25060	I
16	Country Kerry	Killarney		IRL
17	CPM Europe BV	Amsterdam	1031	NL
18	Ecomec srl	localita Fornaci	25131	I
19	Ecoworxx GmbH	Raddestorf	31604	D
20	Falkner Maschinenbau	Roppen	6426	A
21	Friedli AG	Oberburg	3414	CH
22	Fuchs -Almabois	Wie am Rhein	79576	D
23	Gama Pardubice	Pardubice	50303	CZ
24	GHEbavaria Maschinen GmbH	Eibelstadt	97246	D
25	GROSS Apparatebau GmbH	Heilbronn	74072	D
26	Höcker Polytechnik GmbH	Hilter	49176	D
27	Holzmag GmbH	Dornach	4143	CH
28	Hosokawa Bepex GmbH	Leingarten	74211	D
29	Ing. Firma R. Sjöstrand	Huddinge	1137	S
30	Kemyx SpA	Frontanelle di Bardano	5010	I
31	Kilia Spezialmaschinen	Neumünster	24536	D
32	Köppern GmbH	Hattingen	45529	D
33	Larus Impianti	Friesco	26010	I

Nr.	Hersteller	Ort	PLZ	Land
34	Lehmann - Maschinenbau	Pöhl	08543	D
35	Maschinen Brück KG	Bad Camberg	65520	D
36	Michael Schmitt	Saarlouis	66740	D
37	Mischi G. Maschinen	Meran / Tirol	39012	I
38	Morums Industri	Stocka	82070	S
39	Münch - Edelstahl GmbH	Hilden	40721	D
40	mütek Systemtechnik GmbH	Filderstadt	70794	D
41	Nestro Lufttechnik	Schkölen	07619	D
42	Neuhauser-Pelletstechnik	Weißkirchen a.d. Traun	4616	A
43	New Air Technical Services			UK
44	Pawert- SPM AG	Muttenz	4132	CH
45	PCM planning consulting management gmbh	Künzell	36093	D
46	PelHeat			
47	PTN Pelleting Technology Nederland	VR Schijndel	5482	NL
48	Radviliskis machine company	Radviliskis	82151	LT
49	Reinbold Entsorgungstechnik	Ilsfeld	74360	D
50	RUF Maschinenbau GmbH	Zaisertshofen	86874	D
51	Sahut Conreur	Raismes	59590	F
52	Salzhausener Maschinenbautechnik Salmatec GmbH	Salzhausen	21376	D
53	Schuko H. Schulte-Südhoff GmbH	Bad Laer	49196	D
54	Schweden Power Chippers	Borås, Sverige	50630	S
55	Siegel Anlagenbau	Feldkirchen	9560	A
56	Spänex GmbH	Ulsar	37170	D
57	TH - Alternativ - Energie	Seeg	87637	D
58	TRITEC GmbH	Weisenhorn	89264	D
59	UMA “Universalūs medžio produktai“	Ukmergės r. sav.	20101	LT
60	Van Aarsen International Headquarters	EW Panhell	6097	NL
61	VOTECS Zerkleinerungstechnik	Ilsfeld	74358	D
62	Wego Wärme- und Lufttechnik	Uhingen	73066	D
63	WEIMA Maschinenbau GmbH	Ilsfeld	74360	D
64	Wessel GmbH Kessel- Apparatebau	Xanten	46509	D
65	Wider Maschinenbau GmbH	Straßwalchen	5204	D
66	WINKEL Lufttechnik GmbH	Osburg	54317	D
67	ZM-Technik für Holz AG	Mühledorf	4583	CH
68	Jumbo-Group	Buttenwiesen	86647	D

Anhang IV: Kontaktadressen der Kompaktierbetriebe in den Praxisversuchen

PCM GreenEnergy
Sebastian Auth
Grezzbachstraße 5
36093 Künzell (Fulda)
Tel.: +49(0)661 / 9338-602
Fax.: +49(0)661 / 9338-143
mobil: +49(0)171 / 5408 927
e-mail: sebastian.auth@pcmgmbh.de
Internet: www.pcm-greenenergy.de

ABW Apoldaer Biomassewerk UG
Bernd Pilz
Sulzaer Straße 96
99510 Apolda
Tel.: +49(0)3644/ 84390
Fax.: +49(0) 3212/ 1346515
mobil: +49(0)151/40720267
e-mail: bp.apw@web.de

Ecoworxx
Reiner Büsching
Kreuzkrug 44
31604 Raddestorf
Tel.: +49(0) 57 65 / 94 26 68
Fax.: +49(0) 57 65 / 94 26 77
e-mail: info@ecoworxx.de
Internet: www.ecoworxx.de

Pusch AG
Guido Pusch
Auf der Weid 1-15
56242 Marienrachdorf
Tel.: +49(0) 2626/ 925 69 – 0
Fax.: +49(0) 2626 / 925 69 – 29
e-mail: info@pusch.ag
Internet: www.pusch.ag

Anhang V: Bilder der untersuchten Kompaktate

Proben-Nr. 1: HK WWSP PCM [8 mm]

Proben-Nr. 2: HK WWSP ABW [6 mm]

Proben-Nr.3: WWSP Pusch AG [20 mm]

Proben-Nr. 4-6: HK WWSP Ecoworxx [6 mm]

Proben-Nr. 7: HK WWSP PTG 05 [6 mm]

Proben-Nr. 8: HK LPHP ABW [6mm]

Proben-Nr. 9: HK IHP ABW [6 mm]

Proben-Nr. 10: HK HP HVT [6 mm]

Proben-Nr. 11: Strohbriketts ABW [60 mm]

Proben-Nr. 12: HK BK (Charge 2) GE Serba

Anhang VI: Ergebnisse der chemischen Inhaltsstoffanalyse der Kompaktate

Probenbez.		2012/P 1	2012/P 2	2012/P 3	2012/P 4	2012/P 5	2012/P 6	2012/P14	2012/P15	2012/P16	2012/P17	2012/P18
Pelletbez.		BK Charge 1	WWSP ABW	WWSP PCM	IHP ABW	LPHP ABW	ABW Strohcobs	PUSCH AG	EN plus, Thür.	Ecoworxx (weich)	Ecoworxx (mittel)	Ecoworxx (hart)
Trockensubstanz	% der FM	86,5	89,1	89,7	90,4	89,1	90,5	0,0042	0,0091	0,0031	0,0025	0,0029
Rohasche	% der TM	1,47	8,27	10,2	1,07	9,29	8,31	97,3	96,3	96,5	95,9	97,4
Gesamt-Stickstoff	% der TM	2,02	0,7	0,93	4,09	1,37	0,58	6,11	<1,00	7,49	7	7,13
H	% der TM	6,52	5,59	5,5	6,04	5,64	5,76	0,5	0,07	0,76	0,73	0,74
C	% der TM	45,3	44,4	43,6	48,4	44,8	44,7	5,98	6,32	5,9	5,91	5,93
Ni (ETA-AAS)	mg/kg	0,23	0,44	0,32	0,44	1,95	0,3	46,4	51,2	46	46,6	45,5
Ni (ETA-AAS)	mg/kg TM	0,25	0,47	0,34	0,46	2,08	0,31	0,86	0,094	0,42	0,24	0,35
Hg (AAS) DMA80	mg/kg	0,0016	0,016	0,014	0,0046	0,0098	0,013	0,88	0,098	0,43	0,25	0,36
Hg (AAS) DMA80	mg/kg TM	0,0017	0,017	0,015	0,0049	0,01	0,014	0,011	0,0038	0,011	0,01	0,011
As (ICP-MS)	mg/kg	0,0067	0,07	0,097	0,091	0,24	0,042	0,012	0,0039	0,011	0,011	0,012
As (ICP-MS)	mg/kg TM	0,0072	0,074	0,1	0,096	0,26	0,044	0,068	0,0078	0,056	0,043	0,062
Cd (ICP-MS)	mg/kg	0,03	0,093	0,13	0,19	0,03	0,12	0,07	0,0081	0,058	0,045	0,064
Cd (ICP-MS)	mg/kg TM	0,032	0,099	0,14	0,2	0,032	0,13	0,094	0,19	0,057	0,05	0,052
Cr (ICP-MS)	mg/kg	0,12	1,21	1,77	1,28	3,36	0,91	0,097	0,2	0,059	0,052	0,053
Cr (ICP-MS)	mg/kg TM	0,13	1,29	1,87	1,35	3,59	0,95	3,6	0,1	4,27	1,03	2,13
Pb (ICP-MS)	mg/kg	0,016	0,42	0,33	4,63	1,04	0,19	3,7	0,1	4,43	1,07	2,19
Pb (ICP-MS)	mg/kg TM	0,017	0,45	0,35	4,88	1,11	0,2	0,61	0,64	0,23	0,47	0,82
Tl (ICP-MS)	mg/kg	<0,0001	0,0032	0,0034	0,015	0,016	0,0026	0,63	0,66	0,24	0,49	0,84
Tl (ICP-MS)	mg/kg TM	<0,0001	0,0034	0,0036	0,016	0,017	0,0027	0,0041	0,0088	0,003	0,0024	0,0028
Ca (RFA)	% der TM	0,046	0,411	0,385	0,155	0,857	0,388	0,346	0,075	0,318	0,326	0,329
P (RFA)	% der TM	0,224	0,085	0,077	0,029	0,156	0,075	0,044	0,008	0,078	0,079	0,078
Na (RFA)	mg/kg TM	<35,0	35,5	<35,0	102	93,5	<35,0	61,8	<35,0	47,1	133	40,1
Mg (RFA)	% der TM	0,084	0,132	0,127	0,03	0,149	0,121	0,091	0,012	0,111	0,112	0,104
K (RFA)	% der TM	0,382	0,82	0,823	0,072	1,08	0,656	0,861	0,002	0,884	0,872	0,875
Cu (RFA)	mg/kg TM	4,66	3,39	3,17	2,93	5,61	3,15	3,89	11,9	3,21	3,02	3,09
Mn (RFA)	mg/kg TM	23,8	38,9	37,1	116	62,9	27,8	37,7	126	26,6	25	26,7
Zn (RFA)	mg/kg TM	24,2	13,6	13,4	31,3	24,3	13,9	14	14,6	16,1	14,3	14,5
Fe (RFA)	mg/kg TM	34,6	167	156	95,8	864	94,6	145	<2,0	213	156	226
S (RFA)	% der TM	0,133	0,116	0,111	0,029	0,085	0,108	0,085	<0,0005	0,115	0,117	0,117
Br (RFA)	mg/kg TM	3,4	4,8	4,6	<1,0	1,1	3,1	3,7	<1,0	5,8	6,6	6,2
Al (RFA)	mg/kg TM	31,1	453	401	280	1888	162	192	8,7	272	202	200
Cl (RFA)	% der TM	0,074	0,17	0,174	0,016	0,085	0,125	0,156	<0,0010	0,099	0,102	0,091
Si (RFA)	% der TM	0,029	2,5	2,49	0,123	1,61	2,74	1,6	0,012	2,13	2,26	2,01
Sr (RFA)	mg/kg TM	2	37,4	37,5	6,6	22,2	47,3	27	3,9	19,9	20,4	20,4
Heizwert, oberer (p)	J/g TM	18150	17314	17147	18899	17325	17378	18049	19336	17847	17860	17612
Heizwert, unterer(v)	J/g TM	16731	16095	15948	17583	16098	16125	16748	<17963	16563	16574	16322

Anhang VII: Ergebnisse der chemischen Inhaltsstoffanalyse der Kompaktate (Brennstoffe)

Probenbez.		2012/P 7	2012/P 8	2012/P 9	2012/P 10	2012/P 11	2012/P 12	2012/P 13
Brennstoffbez.		BK Charge 2	WWSP PCM	WWSP PCM	LPHP ABW	WWSP PTG 05	BK Charge 2	WWSP PTG 05
Verbrennungsdatum		V.V. 28.03.12	V.V. 03.04.12	V.V. 04.04.12	V.V. 13.04.12	V.V. 17.04.12	V.V. 24.04.12	V.V. 26.04.12
Trockensubstanz	% der FM	87,1	89,9	89,6	88,9	89,0	85,6	89,6
Rohasche	% der TM	1,57	9,93	10,70	9,15	9,18	1,74	9,27
Gesamt-Stickstoff	% der TM	2,01	0,88	0,90	1,42	0,61	2,15	0,60
AEB	mg/kg TM	6026	17002	14798	13482	18488	6360	15824
H	% der TM	6,58	5,57	5,52	5,68	5,59	6,41	5,56
C	% der TM	45,0	43,8	43,6	44,9	43,9	45,1	43,2
Ni (ETA-AAS)	mg/kg	0,140	0,320	0,370	2,260	1,040	0,190	1,100
Ni (ETA-AAS)	mg/kg TM	0,150	0,340	0,390	2,410	1,110	0,210	1,160
Hg (AAS) DMA80	mg/kg	0,0012	0,0130	0,0140	0,0099	0,0110	0,0017	0,0100
Hg (AAS) DMA80	mg/kg TM	0,0013	0,0140	0,0150	0,0110	0,0120	0,0018	0,0110
As (ICP-MS)	mg/kg	0,0034	0,0940	0,0960	0,2300	0,1400	0,0150	0,1400
As (ICP-MS)	mg/kg TM	0,0036	0,0990	0,1000	0,2500	0,1500	0,0160	0,1500
Cd (ICP-MS)	mg/kg	0,028	0,120	0,120	0,029	0,060	0,029	0,054
Cd (ICP-MS)	mg/kg TM	0,030	0,130	0,130	0,031	0,064	0,032	0,057
Cr (ICP-MS)	mg/kg	0,03	1,86	2,24	4,35	5,35	0,22	5,12
Cr (ICP-MS)	mg/kg TM	0,032	1,970	2,380	4,650	5,690	0,240	5,420
Pb (ICP-MS)	mg/kg	0,018	0,240	0,300	1,030	2,080	0,058	2,530
Pb (ICP-MS)	mg/kg TM	0,019	0,250	0,320	1,100	2,210	0,063	2,680
Tl (ICP-MS)	mg/kg	0,0003	0,0027	0,0033	0,0150	0,0070	0,0011	0,0069
Tl (ICP-MS)	mg/kg TM	0,0003	0,0029	0,0035	0,0160	0,0074	0,0012	0,0073
Ca (RFA)	% der TM	0,046	0,369	0,332	0,871	0,330	0,061	0,264
P (RFA)	% der TM	0,227	0,117	0,103	0,160	0,057	0,266	0,047
Na (RFA)	mg/kg TM	<35,0	50,4	49,8	96,1	105,0	<35,0	82,4
Mg (RFA)	% der TM	0,082	0,120	0,110	0,154	0,122	0,100	0,103
K (RFA)	% der TM	0,396	1,230	1,070	1,160	1,510	0,426	1,300
K	mg/kg TM	3960	12300	10700	11600	15100	4260	13000
Cu (RFA)	mg/kg TM	4,76	3,38	3,60	5,84	6,39	4,78	6,25
Mn (RFA)	mg/kg TM	23,6	38,8	35,8	65,4	32,3	28,4	25,4
Zn (RFA)	mg/kg TM	25,8	21,0	18,3	25,2	10,7	29,7	9,0
Fe (RFA)	mg/kg TM	28,7	116,0	115,0	897,0	541,0	61,0	429,0
S (RFA)	% der TM	0,1320	0,1560	0,1350	0,0860	0,1080	0,1390	0,0890
S	mg/kg TM	1320	1560	1350	860	1080	1390	890
Br (RFA)	mg/kg TM	2,8	5,6	4,1	1,3	6,6	<1,0	5,3
Al (RFA)	mg/kg TM	54,5	201,0	237,0	1902,0	5828,0	538,0	4944,0
Cl (RFA)	% der TM	0,072	0,307	0,268	0,090	0,219	0,068	0,184
Cl	mg/kg TM	720	3070	2680	900	2190	680	1840
Si (RFA)	% der TM	0,068	2,640	2,470	1,610	2,360	0,190	2,060
Sr (RFA)	mg/kg TM	2,5	45,3	39,6	23,2	33,0	3,6	29,2
Heizwert, oberer (p)	J/g TM	18248	17081	17391	17383	17162	17097	16816
Heizwert, unterer(v)	J/g TM	16815	15868	16190	16147	15945	15701	15604

Anhang VIII: Ascheschmelztemperaturen der Kompaktate

DIN CEN / TS 15370-1

Ascheschmelztemperaturen

					Verbrennung			SST	DT	HT	FT
PNr.		**Ausgangsmaterial**	**Bezeichnung**	**Lieferant**	**V.-Datum**	**V.-Ort**	**Anzahl**	**°C**	**°C**	**°C**	**°C**
1	A	Winterweizenstroh	HK WWSB	ABW		keine	n = 1	730	930	1300	1350
2	A	Winterweizenstroh	HK WWSP	PCM	03.04.2012	Dornburg	n = 1	700	910	1180	1250
3	C	Winterweizenstroh	WWSP PTG 05	PTG	17.04.2012	Dornburg	n = 1	770	1160	1240	1300
4	B	Bruchkörner Winterweizen	HK BK (2)	GE Serba	28.03.2012	Dornburg	n = 1	630	720	870	900
5	B	Bruchkörner Winterweizen	HK BK (2)	GE Serba	24.04.2012	Dornburg	n = 1	700	710	860	900
6	D	Landschaftspflegeheu	LPHP	ABW	13.04.2012	Dornburg	n = 1	790	1100	1160	1200
6a	D	Landschaftspflegeheu	LPHP	ABW		Dobia	n = 8	820	1100	1160	1200

Anhang IX: Hersteller der im Projekt genutzten Heizanlagen

TWIN HEAT A/S
Nørrevangen 7
DK-9631 Gedsted
Tel.: +45(0) 9864 5222
Fax.: +45(0) 9864 5244
e-mail: kontakt@twinheat.dk
Internet: www.twinheat.dk

TWIN HEAT DE
Hans Jürgen Helbig GmbH
Pappelbreite 3
37176 Nörten-Hardenberg
Tel.: +49(0)5503/9974-0
Fax.: +49(0) 5503/9974-74
e-mail: info@helbig-gmbh.de
Internet: www.helbig-gmbh.de

Schmid AG, energy solutions- Hauptsitz
Hörnlistrasse 12
Postfach 42
CH-8360 Eschlikon
Tel.: +41(0)71/ 973 7373
Fax.: +41(0)71/ 973 7370
Internet: www.holzfeuerung.ch

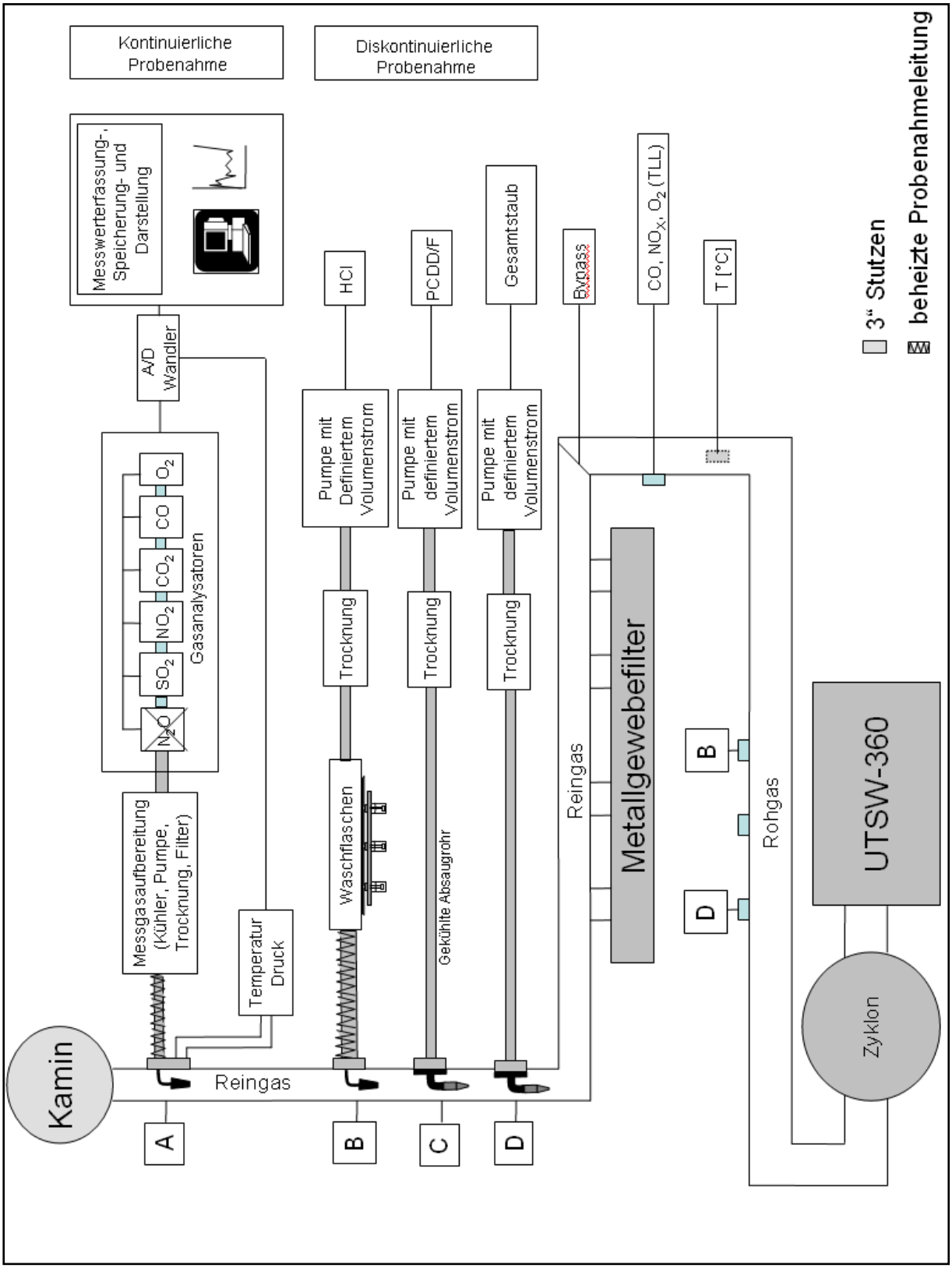
Anhang X: Übersicht der Messungen im Rahmen der Voruntersuchungen

Datum	M 20i	UTSW 360	Bezeichnung	Lieferant	Brennstoff
16.02.2012	x		WWSPallg	PTG	Winterweizenstrohpellets
21.02.2012		x	HSM HK AHPaHS / SF-J	TLL - Stadtforst Jena	Holzhackschnitzelmischung KUP TLL / Waldrestholz
22.02.2012	x		HS SF-J	Stadtforst Jena	Waldrestholzhackschnitzel
22.02.2012		x	HSM HK AHPaHS / SF-J	TLL - Stadtforst Jena	Holzhackschnitzelmischung KUP TLL / Waldrestholz
24.02.2012	x		HK HP	HVT	nach ENPlus zertifizierte Holzpellets
27.02.2012	x		HK BK (1)	AG Gönnatal	Winterweizenbruchkörner
28.02.2012	x		HK AHPaHS	TLL	Agrarholzpappelhackschnitzel TLL
29.02.2012	x		HK AHPaHStr	TLL	Agrarholzpappelhackschnitzel TLL - getrocknet WG < 10 %
01.03.2012	x		HK WWSP ABW / HK IHP ABW	ABW	nacheinander Winterweizenstrohpellets / Industrieholzpellets
02.03.2012	x		WWSP PTG 05	PTG	Winterweizenstrohpellets [2]
05.03.2012		x	HK BK (1)	AG Gönnatal	Winterweizenbruchkörner
06.03.2012		x	HK WWSP ABW	ABW	Winterweizenstrohpellets
07.03.2012		x	HK WWSP ABW	ABW	Winterweizenstrohpellets
08.03.2012		x	HK AHPaHS	TLL	Agrarholzpappelhackschnitzel TLL
09.03.2012		x	HK IHP ABW	ABW	Industrieholzpellets
12.03.2012	x		HK WWSP ABW + 100 % Kalk	ABW / OBI	Winterweizenstrohpellets + 100% kohlensaurer Kalk
13.03.2012	x		HK BK (1) / LPHP	AG Gönnatal / ABWDobia	Winterweizenbruchkörner danach Landschaftspflegeheupellets
14.03.2012	x		LPHP	ABWDobia	Landschaftspflegeheupellets
14.03.2012		x	HK IHP ABW	ABW	Industrieholzpellets
15.03.2012		x	HK WWSP PCM / ABW	PCM / ABW	Winterweizenstrohpellets

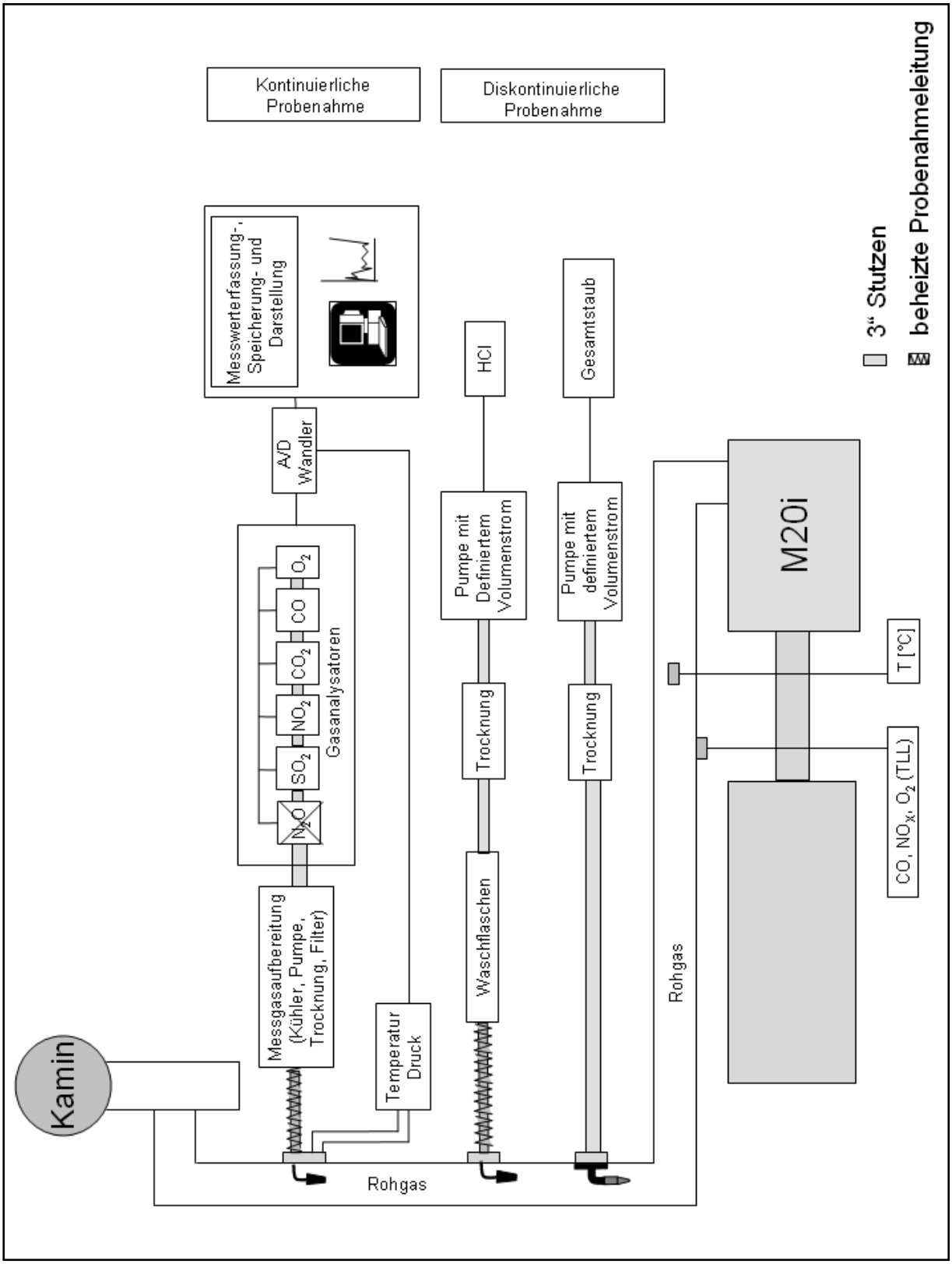
Anhang XI: Untersuchungen mit dem Kooperationspartner TLUG

Nr.	Anlage	Brennstoff	Kompaktierer	Datum	CO	NO_X	SO_2	O_2	Staub		HCl		PCDD/F
									Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Reingas
1	UTSW 360	HK IHP	ABW	14.03.2012	X	X	X	X	3	3			
2	UTSW 360	HK AHPaHS	KUP TLL	28.02.2012	X	X		X					
3	UTSW 360	HK BK (1)	AG Gönnatal	27.03.2012	X	X	X	X					
4a	UTSW 360	HK BK (2)	GE Serba	28.03.2012	X	X	X	X	1	1	1	1	1
4b	UTSW 360	HK BK (2)	GE Serba	24.04.2012	X	X	X	X			1	1	1
4c	UTSW 360	HK BK (2)	GE Serba	25.04.2012	X	X	X	X	1	1	1	1	1
5a	UTSW 360	HK WWSP	PCM	03.04.2012	X	X	X	X					1
5b	UTSW 360	HK WWSP	PCM	04.04.2012	X	X	X	X	2	2			1
6	UTSW 360	WWSP PTG 05	PTG	26.04.2012	X	X	X	X	1	1	1	1	1
7	M 20i	HK IHP	ABW	18.04.2012	X	X	X	X	3		3		
8	M 20i	HK BK (1)	AG Gönnatal	13.03.2012	X	X		X					
9	M 20i	LPHP	ABW	13.04.2012	X	X	X	X	3		3		
10	M 20i	WWSP PTG 05	PTG	17.04.2012	X	X	X	X	3		3		

Anhang XII: Probenahmeschema UTSW-360



Anhang XIII: Probenahmeschema M20i



Anhang XIV: Ergebnisübersicht der Emissionsmessungen

	Brennstoff	Datum	Probenahme	CO			NO_x			SO_2			HCL		Staub		PCDD/F		N	S	Cl	AEB	RA
				Max	Min	MW	Max	Min	MW	Max	Min	MW	mg/Nm³, tr.		mg/Nm³, tr.		ng/Nm³, tr.		% der TM	% der TM	% der TM	mg/kg der TM	% der TM
				mg/Nm³, tr., 11 % O_2									11 % O_2	13 % O_2	11 % O_2	13 % O_2	11 % O_2	13 % O_2					
Schmid UTSW 360	HK IHP	14.03.2012	Roh	485	290	347	526	500	512	1	0	0	X	X	137,8	110,3	X	X	4,09	0,029	0,016	1308	1,07
			Rein												22,2	17,8							
		14.03.2012	Roh												131,1	104,9							
			Rein												7,4	5,9							
		14.03.2012	Roh												127,7	102,2							
			Rein												5,9	4,7							
	HK BK(2)	28.03.2012	Roh	10	3	5	491	408	450	303	250	274	15,75	12,6	230,8	184,6	0,214	0,171	2,01	0,132	0,072	6061	1,57
			Rein										8,51	6,81	2,5	2,0							
	HK BK(2)	24.04.2012	Roh	10	4	6	529	470	495	291	222	262	14,62	11,7	432,7	346,1	0,058	0,047	2,15	0,139	0,068	6395	1,74
			Rein										1,93	1,55	1,9	1,5							
	HK BK(2)	25.04.2012	Roh	6	4	5	504	458	483	315	285	298	59,55	47,64	388,3	310,6	0,038	0,031	2,15	0,139	0,068	6395	1,74
			Rein										22,46	17,97	20,4	16,4							
	HK WWSP	03.04.2012	Roh	275	63	112	431	379	404	347	196	302	64,84	71,4	536,0	428,8	0,362	0,289	0,88	0,156	0,307	17002	9,93
			Rein										49,14	54,12	4,6	3,7							
	HK WWSP	04.04.2012	Roh	203	33	88	437	366	413	361	229	325	132,9	106,32	572,1	457,7	0,062	0,049	0,90	0,135	0,268	14798	10,7
			Rein										62,24	49,8	1,5	1,2							
		04.04.2012	Roh												609,3	487,5							
			Rein												18,8	15,1							
	WWSP PTG 05	26.04.2012	Roh	49	35	40	301	285	291	214	208	211	61,2	48,96	352,1	281,7	0,047	0,038	0,60	0,089	0,184	15824	9,27
			Rein										29,47	23,56	1,4	1,1							
TwinHeat M20i				mg/Nm³, tr, 13 % O_2																			
	HK IHP	18.04.2012	Roh	45	24	32	805	728	780	35	26	30	43,1	27,4	72,2	57,8	X	X	4,09	0,029	0,016	1308	1,07
			Roh										10,6	6,8	73,5	58,8							
			Roh										42,2	26,8	67,8	54,3							
	HK LPHP	13.04.2012	Roh	214	78	154	455	281	369	243	49	168	45,5	28,2	87,4	69,9	X	X	1,42	0,086	0,09	13482	9,15
			Roh										8,8	6,2	126,4	98,3							
			Roh										10,7	6,8	93,1	74,5							
	WWSP PTG 05	17.04.2012	Roh	642	16	223	309	243	271	175	141	152	39,2	24,5	136,9	109,5	X	X	0,61	0,108	0,219	18488	9,18
			Roh										71,4	44,3	237,5	190,0							
			Roh										52,4	34,4	109,9	87,9							