



Energetische Verwertung von Getreide und Halmgutpellets

Gefördert durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

Themen-Nr.: 42.19.430/2003

Projekt/Förderkennzeichen (FKZ): 22008401

Langtitel: Energetische Verwertung von Getreide und Halmgutpellets

Kurztitel: Getreideverbrennung

Projekt: Energie- und Industriepflanzen

Projektleiter: Dr. habil. Armin Vetter

Abteilung: Pflanzenproduktion

Abteilungsleiter: Dr. habil. Armin Vetter

Laufzeit: 04/2003 bis 08/2005

Auftraggeber: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

Namen der Bearbeiter: Dipl.-Ing. Thomas Hering,
Dipl.-Ing. (FH) Denis Peisker

Jena, im April 2006

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	01
2. Beschreibung der untersuchten Biomassefeuerungsanlagen	02
3. Überblick der durchgeführten Emissionsmessungen	05
4. Ergebnisse	08
4.1 Kohlenmonoxid (CO)	08
4.2 Staub	
Messergebnisse und Abhängigkeit vom Aschegehalt im Brennstoff	13
4.3 Stickoxide (NO _x)	
Messergebnisse und Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt im Brennstoff	22
4.4 Schwefeldioxid (SO ₂)	
Messergebnisse und Abhängigkeit vom Schwefelgehalt im Brennstoff	29
5. Zusammenfassung	34
6. Messverfahren und Versuchsaufbau der Felduntersuchungen TLL / TLUG	35
7. Literaturverzeichnis	38

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	01
2. Beschreibung der untersuchten Biomassefeuerungsanlagen	02
3. Überblick der durchgeführten Emissionsmessungen	05
4. Ergebnisse	08
4.1 Kohlenmonoxid (CO)	08
4.2 Staub	
Messergebnisse und Abhängigkeit vom Aschegehalt im Brennstoff	13
4.3 Stickoxide (NO _x)	
Messergebnisse und Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt im Brennstoff	22
4.4 Schwefeldioxid (SO ₂)	
Messergebnisse und Abhängigkeit vom Schwefelgehalt im Brennstoff	29
5. Zusammenfassung	34
6. Messverfahren und Versuchsaufbau der Felduntersuchungen TLL / TLUG	35
7. Literaturverzeichnis	38

1. Einleitung

Das wesentlichste Ziel des von der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) als Projektträger des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) geförderten Projektes „Energetische Verwertung von Getreide und Halmgutpellets“ war die Eruierung von Möglichkeiten der thermischen Verwertung von Getreide, Strohpellets, Mühlennebenprodukten und Mischungen von halmgut- und holzartigen Brennstoffen in Kleinf Feuerungsanlagen mit einer thermischen Leistung kleiner 100 kW [1]. Neben der Analyse wesentlicher Brennstoffparameter sowie der Erfassung des Entwicklungsstandes vorhandener Anlagentechniken zur Getreide- und Halmgutverbrennung in Europa, lag der Schwerpunkt des Projektes bei der Messung entstehender Emissionen. Parallel zu Prüfstandsuntersuchungen, welche vom Institut für Energetik und Umwelt gGmbH in Leipzig (IE) durchgeführt wurden, fanden im Rahmen einer Kooperationsvereinbarung der beiden in Jena ansässigen Thüringer Landesanstalten für Umwelt und Geologie (TLUG) sowie Landwirtschaft (TLL) Felduntersuchungen an mehreren Praxisanlagen statt.

Der vorliegende Bericht stellt eine Zusammenfassung der wichtigsten Emissionsergebnisse dar.

2. Beschreibung der untersuchten Biomassefeuerungsanlagen

Das Institut für Energetik und Umwelt konzentrierte sich auf die Untersuchungen unter Prüfstandsbedingungen an zwei Anlagen im Leistungsbereich von ca. 20 kW_{th}. Die TLL führte in Zusammenarbeit mit dem Kooperationspartner TLUG ebenfalls Untersuchungen an zwei Praxisanlagen im Leistungsbereich von ca. 20 kW_{th} durch. Die Auswahl der zu prüfenden Feuerungsanlagentypen erfolgte unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. In Abstimmung mit den Projektpartnern wurden die zu diesem Zeitpunkt für Getreide und halmgutartige Brennstoffe geeignetsten bzw. erfolgversprechendsten Anlagen ermittelt.

1. Prüfstandsuntersuchungen des IE

- BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO Wärmetechnik GmbH; Schwabach, Deutschland
- HKRST-FSK 20, Fa. Maskinfabriken REKA A/S; Aars, Dänemark

2. Praxisuntersuchungen der TLL/TLUG

- MULTI HEAT Model 2,5; Fa. BAXI A/S, Dänemark
- AGRO 40; Fa. Agroflam Feuerungstechnik; Oerrath-Untereschbach, Deutschland

Beschreibung der untersuchten Feuerungsanlagen

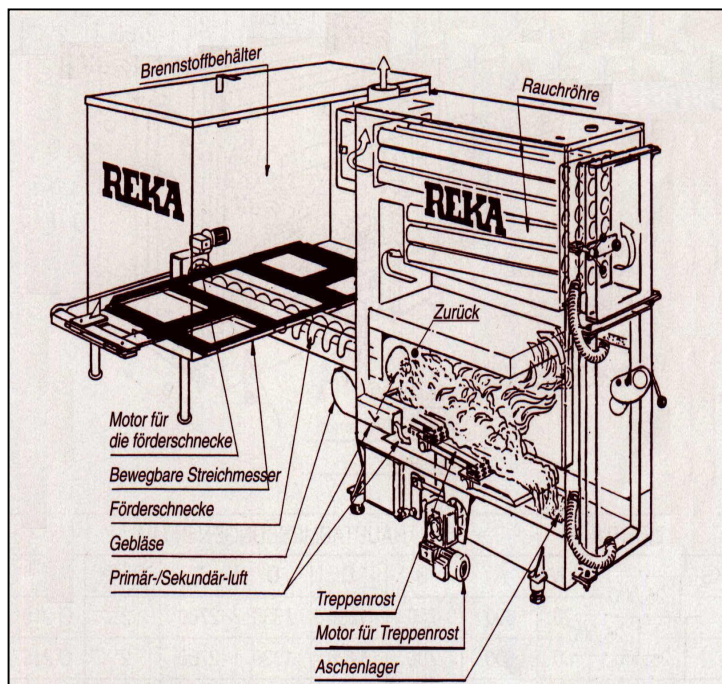
Die im IE vorhandene Anlage vom Typ FERRO BIOMAT FB 23L (s. Abb. 1) hat eine Nennwärmeleistung von 23 kW_{th} bei Einsatz von Holzpellets (Getreide: 19 kW_{th}) und wird ausschließlich für feuerungstechnische Untersuchungen genutzt. Ein mittels Motor angetriebenes



Schubsystem (Schubrostfeuerung) fördert den Brennstoff aus dem Magazin in den Brennraum. Die erforderliche Verbrennungsluft wird in Primär- und Sekundärluft aufgeteilt. Die Zufuhr der Primärluft erfolgt durch Düsen direkt in das Glutbett, die Sekundärluft wird von der Rückseite des Brennraumes eingeblasen. Über die Mikroprozessor-Steuerung der Kesselanlage wird die Verbrennungsluftmenge durch eine Drehzahlregelung des Gebläses an den tatsächlichen Bedarf angepasst. Die bei der Verbrennung anfallende Asche wird durch die Brennstoffnachführung automatisch in den Aschekasten geschoben. Die heißen Abgase aus dem Verbrennungsprozess umströmen die Heizflächen und geben die Wärmeenergie an das wassergefüllte Heizsystem ab.

Abbildung 1: BIOMAT FB 23L

Das Anlagenkonzept der REKA Feuerungsanlage vom Typ HKRST-FSK 20 (s. Abb. 2) mit einer



Nennwärmeleistung von 20 kW_{th} lies aufgrund dänischer Voruntersuchungen eine besonders gute Funktionsweise erwarten. Die Verbrennungszone der Feuerungsanlage ist als beweglicher Treppenrost ausgeführt. Die Anlage verfügt über eine wassergekühlte und feuerfeste Auskleidung des Feuerungsraumes sowie einen halbautomatischen Ascheaustrag. Die erforderliche Verbrennungsluft wird gestuft als Primär- und Sekundärluft dem Treppenrost zugeführt.

Abbildung 2: HKRST-FSK 20

Bei der unter Praxisbedingungen untersuchten Feuerungsanlage der Firma BAXI A/S vom Typ MULTI HEAT 2,5, mit einer Nennwärmeleistung von 25 kW_{th} für Holzpellets bzw. 23 kW_{th} für Getreide handelt es sich um eine vom Hersteller für Getreide, Holzpellets und Holz hackschnitzel als geeignet ausgewiesene Muldenfeuerung (s. Abb. 3). Allerdings ist dieser Anlagentyp nur bei

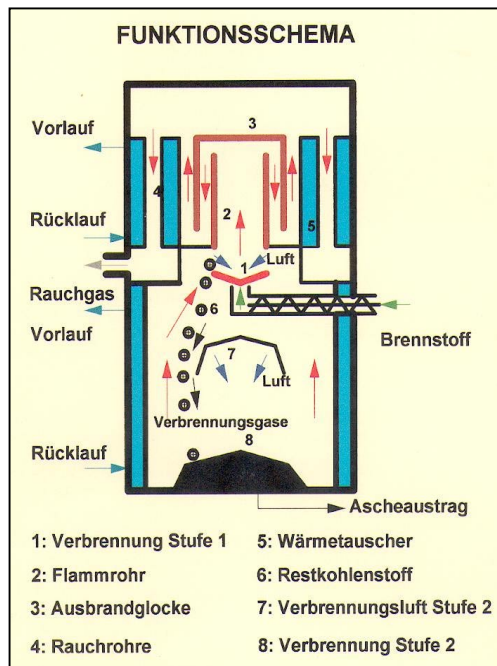


entsprechender Modifizierung der Brennstoffzuführung und der Umstellung der Steuerung für Getreide und Holz hackschnitzel geeignet. Die für den Einsatz von Getreide vom Hersteller empfohlene Schneckenverlängerung der Brennstoffzuführschnecke soll Problemen entgegenwirken, die durch Schlackebildung in der Brennkammer entstehen können. Das beim Einsatz von Holz hackschnitzeln zu installierende Rührwerk soll eine etwaige Brückenbildung des Brennstoffes im Vorratsbehälter verhindern.

Abbildung 3: Multi Heat 2,5

Als vom Hersteller besonders geeignete Getreidearten werden Weizen und Gerste mit einem Wassergehalt von 15 % angegeben. Die untersuchte Anlage verfügt über keine automatische Zündung und Entaschung.

Für die Untersuchung der zweiten Praxisanlage konnte mit dem Agro 40 der Firma Agroflam Feuerungstechnik GmbH ein speziell für Getreidekörner bzw. Halmgutpellets entwickelter Kessel am Thüringer Lehr-, Prüf- und Versuchsgut (TLPVG) in Buttstedt etabliert werden. Die Anlage mit



einer Nennwärmeleistung von 50 kW_{th} für Holzpellets bzw. 40 kW_{th} für Getreide basiert auf einem zweistufigen Verbrennungsprinzip. Während in der ersten Stufe die Trocknung, Vergasung sowie die Verbrennung der gasförmigen Bestandteile erfolgt, wird in einer zweiten Stufe, räumlich und zeitlich von der ersten Stufe getrennt, das verbliebene Kohlenstoffgerüst des jeweiligen Brennstoffes verbrannt (s. Abb. 4). Die Feuerungsanlage ist neben einer automatischen Brennstoffzufuhr mit einem automatischen Zündsystem sowie einem automatischen Ascheaustragsystem ausgerüstet.

Abbildung 4: AGRO 40

3. Überblick der durchgeführten Emissionsmessungen

Die Darstellung der Ergebnisse der durchgeführten Emissionsuntersuchungen sind Konzentrationsangaben bezogen auf 13 % Sauerstoffgehalt im Normzustand (273 K, 1013 hPa) des trockenen Abgases. Kontinuierlich gemessene Parameter sowie Staub sind in Anlehnung an die 1. BImSchV als Viertelstundenmittelwerte bzw. Halbstundenmittelwerte nach TA Luft ausgewiesen. Für die Verbrennungsversuche wurden für alle Anlagen Brennstoffe aus einer Charge verwendet. Lediglich bei der kurzfristig ins Projekt aufgenommenen Feuerungsanlage Agro 40 wurden die verwendeten Wintergersten- und Winterroggenkörner einer anderen Charge entnommen.

Einen Überblick über die insgesamt durchgeführten Emissionsmessungen geben die Tabellen 1 und 2. Die verwendeten Messverfahren sowie der Versuchsaufbau der Untersuchungen der TLL/TLUG sind im Kapitel 6 beschrieben.

Tabelle 2: Übersicht der durchgeführten Feldmessungen (TLL/TLUG)

		Anlage	BAXI Multi-Heat 2,5														Agroflamm Agro 40									
		Brennstoff/Laststufe	Wi-Roggen/Volllast	Wi-Roggen (markiert)/Volllast	Wi-Roggen/Teillast	Wi-Weizen/Volllast	Wi-Gerste/Volllast	Wi-Triticale/Volllast	Hafer/Volllast	Wi-Raps/Volllast	Strohpellets (PTG, 8 mm)/Volllast	Winterweizenkleipellets /Volllast	Winterweizenkleipellets/Teillast	Getreideeinigungsabgänge/Volllast	Wi-Roggen/DIN-Holzpellets (1:1)/Volllast	Industrieholzpellets/Volllast	DIN-Holzpellets/Volllast	Getreidestaub/Volllast	Wi-Roggen/Volllast	Wi-Gerste/Volllast	Hafer/Volllast	Winterweizenstrohpellets (8 mm)/Volllast	Winterroggenstrohpellets (6 mm)/Volllast	Mutterkorn	DIN-Holzpellets/Volllast	
diskont.	kontinuierliche Messungen		O ₂ , CO, NO _x , SO ₂ , Ges.-C, N ₂ O	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Abgasrandbedingungen	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x				
	Staub (Rohgas, 1. BlmSchV)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x
	Staub (Rohgas, TA Luft)																		x				x			
	HCl		x		x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x			x			
PCDD/F; PAK (16 EPA)																			x				x			

4. Ergebnisse

4.1 Kohlenmonoxid (CO)

Der in Bezug auf die Qualität des Ausbrandes und damit letztendlich auch für den Wirkungsgrad einer Anlage entscheidendste Parameter ist der Gehalt an Kohlenmonoxid im Rauchgas. Für Anlagen von mehr als 15 und kleiner 100 kW_{th} gilt für Brennstoffe nach § 3 Abs. 1 Nr. 8 (Stroh oder ähnliche pflanzliche Stoffe) 1.BImSchV ein Grenzwert von 4 g/m³ unter Normbedingungen (d. h. 273 K, 1013 hPa), bezogen auf einen Volumengehalt an Sauerstoff im Abgas von 13 %. Für Brennstoffe nach § 3 Abs. 1 Nr. 4 bis 5a der 1.BImSchV (naturbelassenes (nicht)stückiges Holz, Holzpresslinge) gilt dieser Grenzwert für Anlagen bis 50 kW_{th} (s. Tab. 3).

Tabelle 3: Grenzwerte für Holzfeuerungsanlagen für Brennstoffe nach § 3 Abs. 1 Nr. 4 bis 5a der 1. BImSchV

Nennwärmeleistung in kW	bis 50	über 50 bis 150	über 150 bis 500	ab 500
Massenkonzentration an CO in g/m ³	4	2	1	0,5

Die untersuchten Feuerungsanlagen zeigen neben brennstoffbedingten, deutliche anlagen-spezifische Unterschiede bei den erreichbaren Niveaus an Kohlenmonoxid (s. Abb. 5 bis 8). Während die Versuche mit den holzartigen Referenzbrennstoffen Holzhackschnitzel und DIN-Holzpellets erwartungsgemäß zu guten bis sehr guten Ausbrandergebnissen bei allen Feuerungsanlagen führten, wurden bei der Verbrennung der halmgutartigen Brennstoffe Strohpellets, Getreidekörner bzw. -abgänge sowie Mischungen dieser mit Holzbrennstoffen sehr unterschiedliche Ergebnisse erzielt.

Generell gilt, dass bei den vom IE auf dem Prüfstand untersuchten Anlagen deutlich höhere Kohlenmonoxidgehalte festgestellt wurden, im Vergleich zu den von der TLL/TLUG untersuchten Praxisanlagen.

Ferro

Die an der Ferro Anlage gemessenen Emissionswerte für Körnerchargen waren so unzureichend (s. Abb. 5), dass weitere Messkampagnen an dieser Anlage als nicht sinnvoll erschienen und statt dessen die Versuche am Reka Kessel vertieft wurden. Lediglich bei Gerstenkörnern konnten mit durchschnittlich 1.500 mg/m³ Werte unter 4 g/m³ sicher erreicht werden. Als Ursachen wurden vom IE Schwierigkeiten beim Eintrag des Brennstoffes in den Feuerraum sowie eine nur ungenügende Luftzuführung bzw. Luftverteilung angegeben.

Eine Mitverbrennung von Getreidekörnern mit DIN-Holzpellets (DIN-HP bzw. HP) führte zu einer deutlichen Verminderung der Kohlenmonoxidemissionen, die Zumischung von Getreidekörnern bis zu 30 % (Weizen, WW bzw. Roggen, WR) zu durchschnittlichen Ausbrandergebnissen von 101 bzw. 436 mg/m³. Maximalgehalte von bis zu 4.400 mg/m³ bei der Zumischung von 50 % Roggenkörnern zeigen jedoch die Grenzen der Zumischung für diesen Feuerungsanlagentyp.

In Bezug auf die Verbrennung der Halmgutpellets kann festgestellt werden, dass der Grenzwert von 4 g/m³ mit durchschnittlich ca. 800 mg/m³ (minimal 219 und maximal 1.901 mg/m³) auch mit Einstreustrohpellets (Winterweizenstrohpellets, WWSP) sicher eingehalten werden kann.

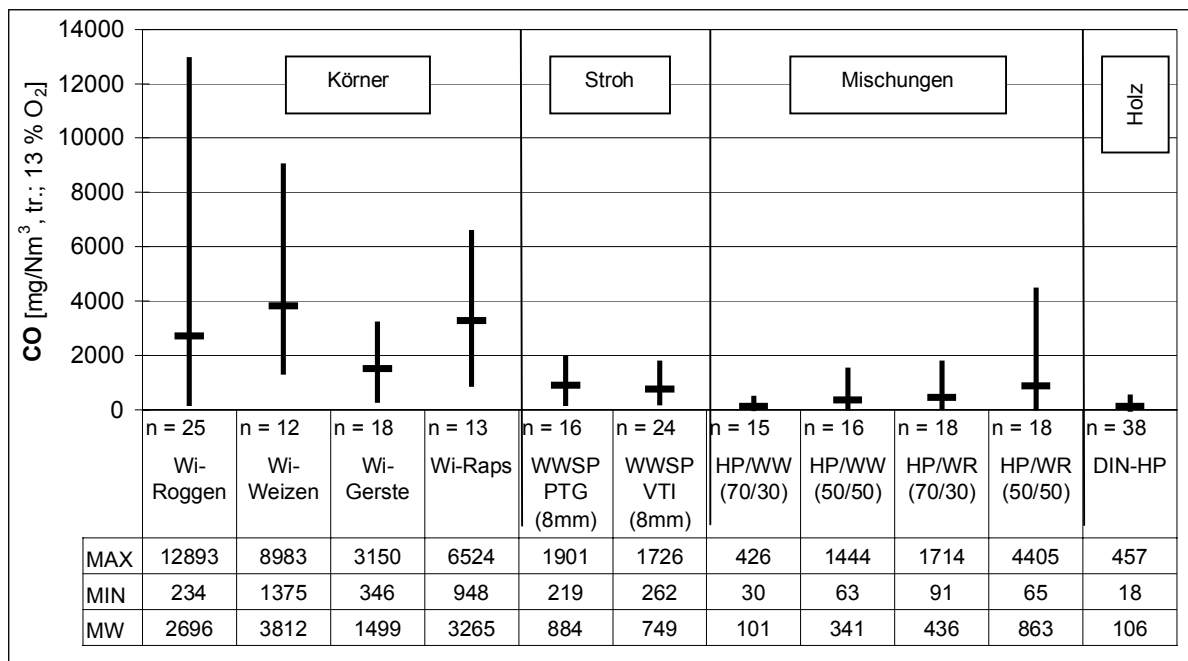


Abbildung 5: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH – 2003/04; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Reka

Die Untersuchungen der Reka Anlage zeigen ähnliche Ergebnisse (s. Abb. 6). Hier ergaben die Messungen für die untersuchten Körnerchargen neben den größten Schwankungsbreiten auch die höchsten Durchschnittswerte. An dieser Anlage zeichnen sich ähnliche Vorteile bei der Verbrennung von Gerste ab wie bei der Ferro Anlage. Zusätzlich wurden hier Hafer- und Triticalekörner untersucht, welche Kohlenmonoxidgehalte kleiner 1.000 mg/m^3 , am Beispiel der Triticale sogar kleiner 100 mg/m^3 , aufwiesen.

Eine Mitverbrennung von Getreidekörnern mit Holzhackschnitzeln führte auch bei dieser Anlage zu einer deutlichen Verminderung der durchschnittlichen Kohlenmonoxidemissionen. Dabei lagen selbst bei Zumischung von 50 % Getreidekörnern die maximal festgestellten Werte mit kleiner 800 mg/m^3 deutlich unter denen der Ferro Anlage. Vorteile ergeben sich bei beiden Anlagen durch die Zumischung von Weizenkörnern gegenüber Roggenkörnern.

Die Ergebnisse zeigen, dass diese Anlage besser für die Verbrennung von Halmgutpellets geeignet ist als die Ferro Anlage. Hier wurden maximale Emissionswerte für die Einstreupellets von 1.000 mg/m^3 festgestellt.

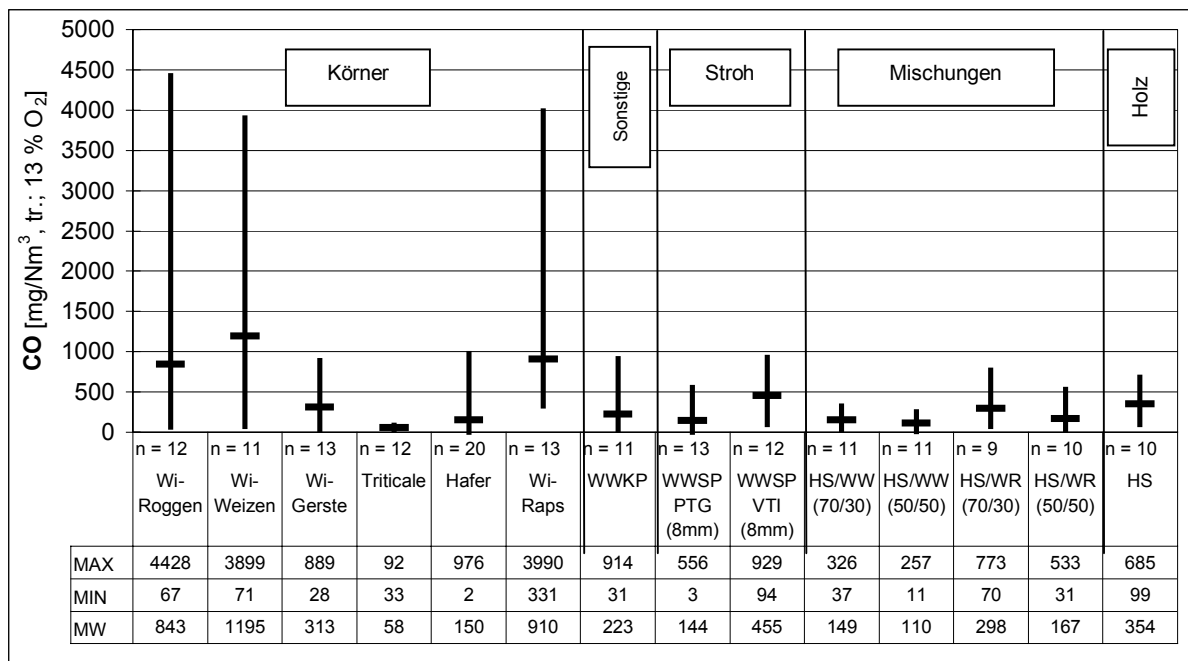


Abbildung 6: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2003/04; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Baxi

Die Ergebnisse der Verbrennungsversuche an der Baxi Anlage verdeutlichen in Bezug auf die Körnerverbrennung eine weitere Verbesserung im Vergleich zur Reka Anlage. Die Mittelwerte der Kohlenmonoxidemissionen aller untersuchten Getreidekornchargen (s. Abb. 7) lagen mit kleiner 100 mg/m^3 sowie Maximalgehalten von 423 mg/m^3 auf einem deutlich niedrigeren Niveau und wiesen zudem geringere Schwankungsbreiten auf als vergleichbare Brennstoffe in den bereits dargestellten Prüfstandsuntersuchungen. Angemerkt werden muss, dass es besonders bei den eingesetzten Nacktgetreidearten, Halmgutpellets und den sonstigen landwirtschaftlichen Brennstoffarten zu nicht unwesentlichen Verschlackungen im Bereich des Feuerraumes gekommen ist, welche nur aufgrund einer manuellen Entnahme zu keiner Funktionsstörung der Anlage und damit verbundenen CO-Spitzen führten. Inwieweit mechanische Veränderungen des Brennstoffeintrag- bzw. Ascheaustragsystems zu positiven Effekten hinsichtlich der Minimierung der Schlackebildung beitragen, konnte bislang nicht geprüft werden.

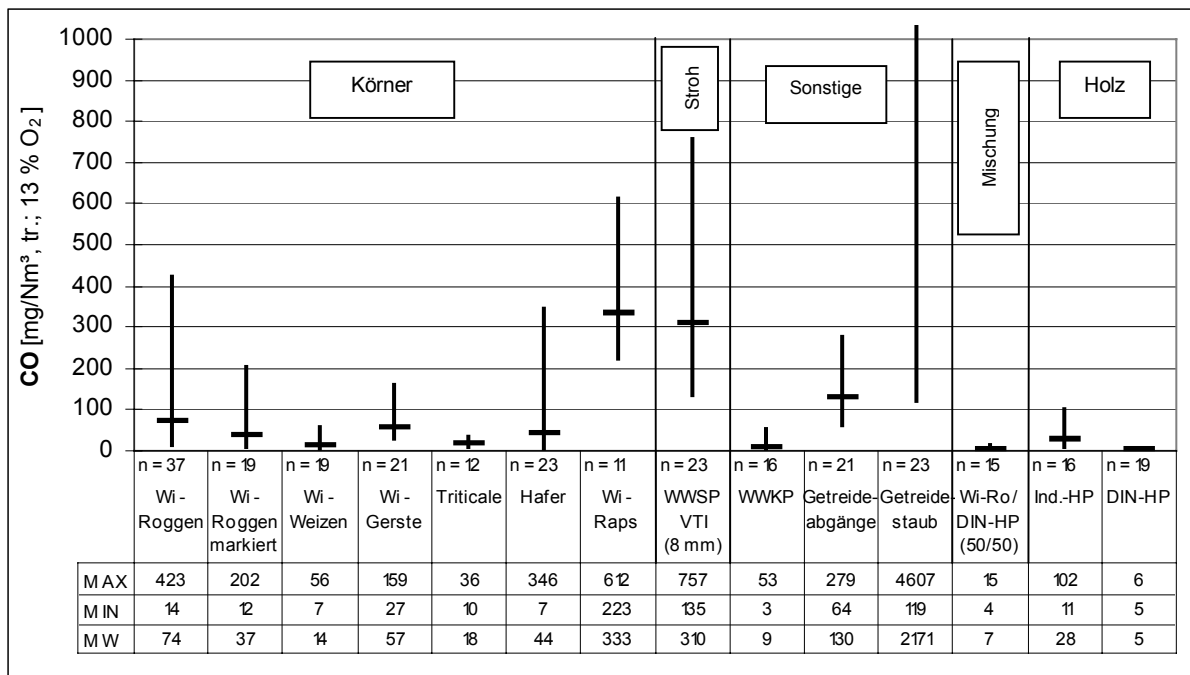


Abbildung 7: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S – 2003/04; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Die einzig geprüfte Variante zur Mischung von Holzpellets mit Roggenkörnern (1:1) führte auch bei dieser Anlagentechnik zu einer deutlichen Verbesserung der Ausbrandergebnisse gegenüber der reinen Getreidevariante. Zudem wurde neben der Minimierung der Schlackeanteile, das bei den Getreidechargen festgestellte sehr träge Zündverhalten wesentlich verbessert. Rapskörner, welche nach Eintrag in den Feuerraum aufgrund einer schnellen Ölfreisetzung explosionsartig verbrennen, weisen neben einem höheren CO-Niveau auch einen deutlich unruhigeren Verbrennungsverlauf auf als die anderen eingesetzten Brennstoffe.

Der Einsatz von Winterweizeneinstreustrohpellets (WWSP) führt, mit Ausnahme des untersuchten Getreidestaubes, zu deutlich höheren Konzentrationen und Schwankungsbreiten hinsichtlich der CO-Emissionen als alle anderen untersuchten Brennstoffe, erfüllt aber die rechtlichen Anforderungen. Aufgrund hoher Asche- und Schlackeanteile sind diese Pelletqualitäten an dieser Anlage nur im quasikontinuierlichem Betrieb einsetzbar.

Die weiterhin untersuchten Brennstoffe Winterweizenkleiepellets (WWKP) und Industrieholzpellets (Ind.-HP) zeigen hinsichtlich des Ausbrandes gute Ergebnisse mit Maximalwerten von 53 bzw. 102 mg/m³. Bei diesen beiden Brennstoffen muss jedoch besonders auf die Unterschiede beim Ascheanfall sowie der Verschlackungsneigung hingewiesen werden (s. Tab. 4).

Während der Gesamtaschegehalt (Aschegehalt plus Schlackengehalt) bei WWKP bei 7,95 % lag und der Schlackeanteil daran 40 % betrug, lag der Gesamtaschegehalt der Industrieholzpellets lediglich bei 0,90 % und der Schlackeanteil davon bei 11 %.

Tabelle 4: Vergleich der Asche- und Schlackeanteile ausgewählter biogener Festbrennstoffe (Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S – 2003/04)

Brennstoff	Aschegehalt	Schlackegehalt
	in Masse – % vom Brennstoff	
DIN-Holzpellets	0,93	0,00
Industrieholzpellets	0,80	0,10
Winterweizenkleipellets - WWKP	4,77	3,18
Winterweizeneinstreusstrophpellets - WWSP	2,67	0,67
Winterroggen	0,99	0,81
Wintergerste	2,08	0,31

Agroflamm

Die erste in Deutschland speziell für den Einsatz von Stroh- und Grüngutpellets sowie Getreidekörnern entwickelte Kleinfeuerungsanlage weist kaum zu verbessernde Ausbrandergebnisse auf (s. Abb. 8). Die Kohlenmonoxidkonzentrationen für alle untersuchten Getreidekörnerchargen, auf die der Kessel jeweils individuell eingestellt werden muss, liegen mit deutlich kleiner 50 mg/m³ teilweise unter den Werten, welche mit dem Referenzbrennstoff Holzpellets zu erreichen sind. Es sind bei entsprechend vorgenommener individueller Getreidekörneinstellung keine signifikanten Brennstoffunterschiede feststellbar.

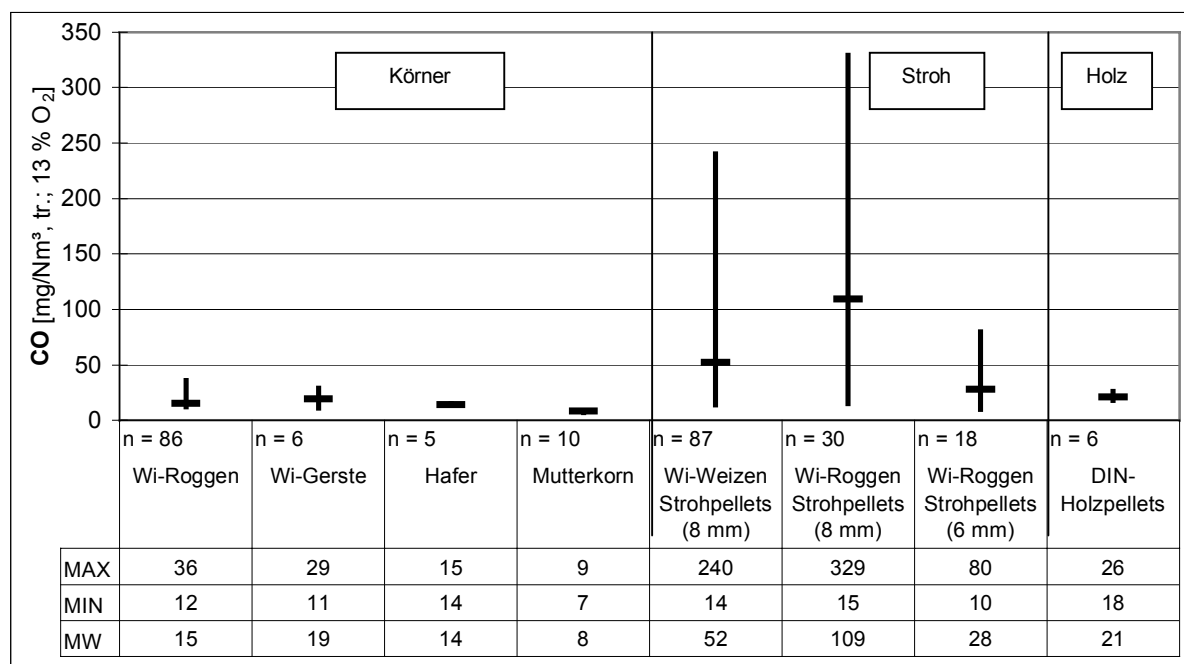


Abbildung 8: Vergleich der Kohlenmonoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflamm – 2004/05; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

In Bezug auf die Verwertung von Halmgutpellets kann festgestellt werden, dass bei individueller Einstellung für die eingesetzte Strohart und den jeweiligen Pelletdurchmesser die mit Abstand besten Ergebnisse für nicht mit Zuschlagstoffen versehene Strophpellets erreicht wurden. Hier werden die geforderten Grenzwerte für Kohlenmonoxidkonzentrationen um ein Vielfaches unterschritten.

4.2 Staub – Messergebnisse und Abhängigkeit vom Aschegehalt im Brennstoff

Der zweite im Geltungsbereich der 1. BImSchV relevante Parameter ist der Gehalt an Staub im Rauchgas. Hier fordert die Verordnung die Einhaltung eines *Staubgrenzwertes von 150 mg/m³*, bezogen auf einen Volumengehalt an Sauerstoff im Abgas von 13 % unter Normbedingungen. Bei den Versuchen wurden (wenn möglich) drei Wiederholungsmessungen pro Brennstoff nach den Anforderungen der 1. BImSchV, Anlage III direkt im Rohgas durchgeführt. Teilweise erfolgten vergleichende Messungen mit dem Messverfahren nach TA Luft (VDI 2066, Blatt 2 bzw. 7).

Zur Erprobung der Minderung der Staubemissionen kam im Technikum des IE versuchsweise ein Elektrofilter-Prototyp der Firma A. P. Bioenergietechnik GmbH aus Hirschau zum Einsatz, begleitet durch ergänzende Staubmessungen für ausgewählte Brennstoffe der Kampagne 2003/2004.

Während die Verbrennung der eingesetzten holzartigen Referenzbrennstoffe (Holzhackschnitzel bzw. Holzpellets) nur zu sehr geringen Staubemissionen im Rohgas führte, musste beim Einsatz von Getreide, speziell von Nacktgetreidearten, ein wesentlich höheres Staubemissionsniveau festgestellt werden (s. Abb. 9 bis 13). Deutliche Unterschiede in der Höhe der Konzentrationen von Staub im Rohgas gab es zwischen den einzelnen Feuerungstechniken. An der Anlage der Firma Agroflam konnten die besten Ergebnisse mit deutlich unter 100 mg/m³ nachgewiesen werden.

Die Mitverbrennung mit Holzhackschnitzeln führte bei allen untersuchten Anlagen zu einer Minderung der Staubemissionen gegenüber der reinen Getreideverbrennung und bestätigt somit auch die Ergebnisse der LfU in Bayern /2/.

Die für den Regelbrennstoff Stroh, hier in Form von Strohpellets, ermittelten Staubemissionen weisen teilweise deutliche Überschreitungen des gesetzlich geforderten Grenzwertes auf.

Ferro

Die Auswertung der Ergebnisse der Staubemissionen der Ferro Anlage ergibt Mittelwerte für die untersuchten Nacktgetreidekörner zwischen 316 mg/m³ bei Winterweizen und 347 mg/m³ bei Winterroggen, wobei Maximalgehalte bis ca. 700 mg/m³ ermittelt wurden (s. Abb. 9). Damit liegen die Werte deutlich über dem Grenzwert von 150 mg/m³, welcher in der 1. BImSchV für Holz und Stroh gefordert wird.

Die Brennstoffmischungen und der Referenzbrennstoff Holzpellets unterschreiten den Grenzwert der 1. BImSchV deutlich und erreichen im Mittel 30 bis 56 mg/m³ für die Mischungen bzw. 17 mg/m³ für Holzpellets. Mit Zunahme der Getreideanteiles sind auch erhöhte Staubemissionen feststellbar. Diese liegen bei 50 %iger Zumischung von Winterroggen zu Holzpellets bei maximal 66 mg/m³ auf einem sehr niedrigen Niveau.

Die untersuchten Einstreustrohpellets weisen maximale Staubgehalte von bis zu 435 mg/m³ auf. Die große Schwankungsbreite ist ein Indiz für die relative Inhomogenität der untersuchten Chargen.

Der Vergleich mit Daten aus externen Untersuchungen bestätigt, dass der Staubgrenzwert für Getreide als auch für Halmgutpellets mit dieser Anlagentechnik nicht ohne zusätzliche Sekundärmaßnahmen eingehalten werden kann.

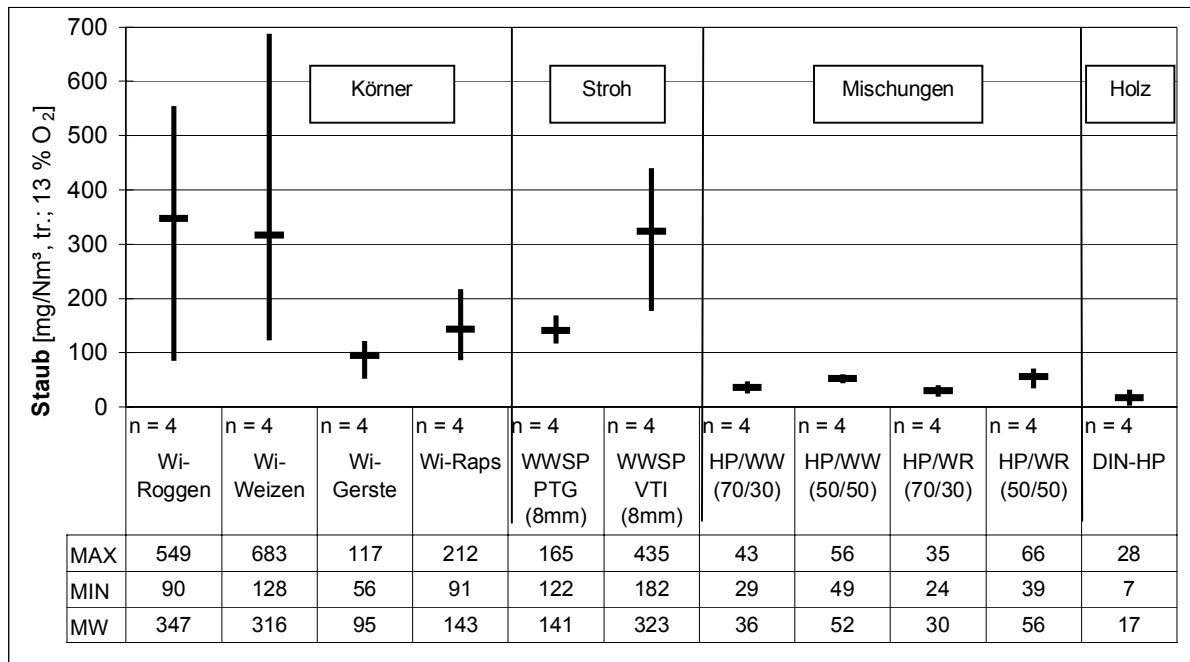


Abbildung 9: Vergleich der Staubkonzentrationen (TA Luft) verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH – 2003/04; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Reka

An der Reka Anlage wurde mit Ausnahme der Einstreustrohpellets der Grenzwert der 1. BImSchV für die Staubemissionen in Bezug auf die Maximumwerte als auch im Mittel sicher eingehalten. Der für Weizen als Maximum angegebene Wert von 315 mg/m³ resultiert aus einer Einzelmessung, welcher als Ausreißer betrachtet werden muss. Bei Vernachlässigung dieses Wertes liegen die Emissionswerte im Schwankungsbereich von 49 bis 124 mg/m³. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass der eingesetzte Sonderbrennstoff Winterweizenkleiepellets mit im Mittel 62 mg/m³ ein ähnliches Staubniveau aufweist wie die Getreidekörner (s. Abb. 10).

Eine Minimierung der Staubemissionen ist auch an dieser Anlage durch den Einsatz von Mischungen aus Körnerchargen und Holzbrennstoffen (hier Holzhackschnitzel) zu verzeichnen. Aufgrund des niedrigeren Emissionsniveaus der Körnerchargen und der etwas höheren Staubwerte des eingesetzten Referenzbrennstoffes Holzhackschnitzel (im Mittel 65 mg/m³) ist das Minimierungspotential jedoch nicht so hoch wie bei der Ferro Anlage. Dies könnte durch Mischungen mit Holzpellets noch weiter verbessert werden.

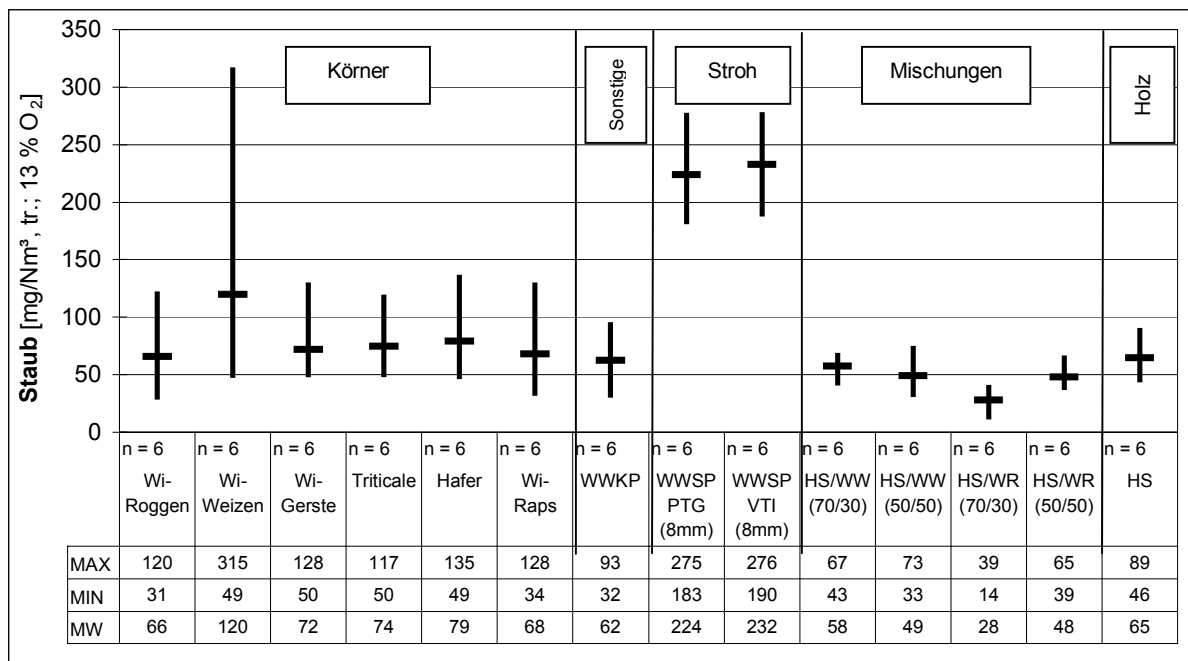


Abbildung 10: Vergleich der Staubkonzentrationen (TA Luft) verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2003/04; angegeben als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Die Grenzwertüberschreitungen für die untersuchten Einstreustrohpelletchargen verdeutlichen die Notwendigkeit des Einsatzes von Sekundärmaßnahmen, um einen gesetzeskonformen Praxisbetrieb zu gewährleisten.

Initiiert durch die TLL wurde im Technikum des IE versuchsweise ein Elektrofilter-Prototyp der Firma A. P. Bioenergie-technik GmbH aus Hirschau installiert und ergänzende Staubmessungen für festgelegte Brennstoffe der Kampagne 2003/2004 durchgeführt.

In Abbildung 11 werden die gemittelten Staubemissionen aus den Versuchen mit dem Elektrofilter den Messungen ohne Filter gegenübergestellt. Mit Ausnahme der Brennstoffchargen Winterroggen, Einstreustrohpellets (WWSP VTI) und Kleipellets erfolgte bei den untersuchten Brennstoffen eine Reduzierung der Staubemissionen durch den Einsatz des Elektrofilters. Beim Einsatz der Einstreustrohpelletcharge WWSP PTG wurde durch die sekundäre Staubminderung der Grenzwert nach der 1. BImSchV sicher eingehalten. Die Ergebnisse sind nur bedingt zur Verallgemeinerung von Zusammenhängen und Abhängigkeiten heranzuziehen, da es sich zum Einen um einen recht begrenzten Messumfang und zum Anderen um eine nicht vollständig adaptierte und hinsichtlich des Strömungsprofils der Abgase optimierte Technik handelt. Hier wären weitergehende Untersuchungen zielführend.

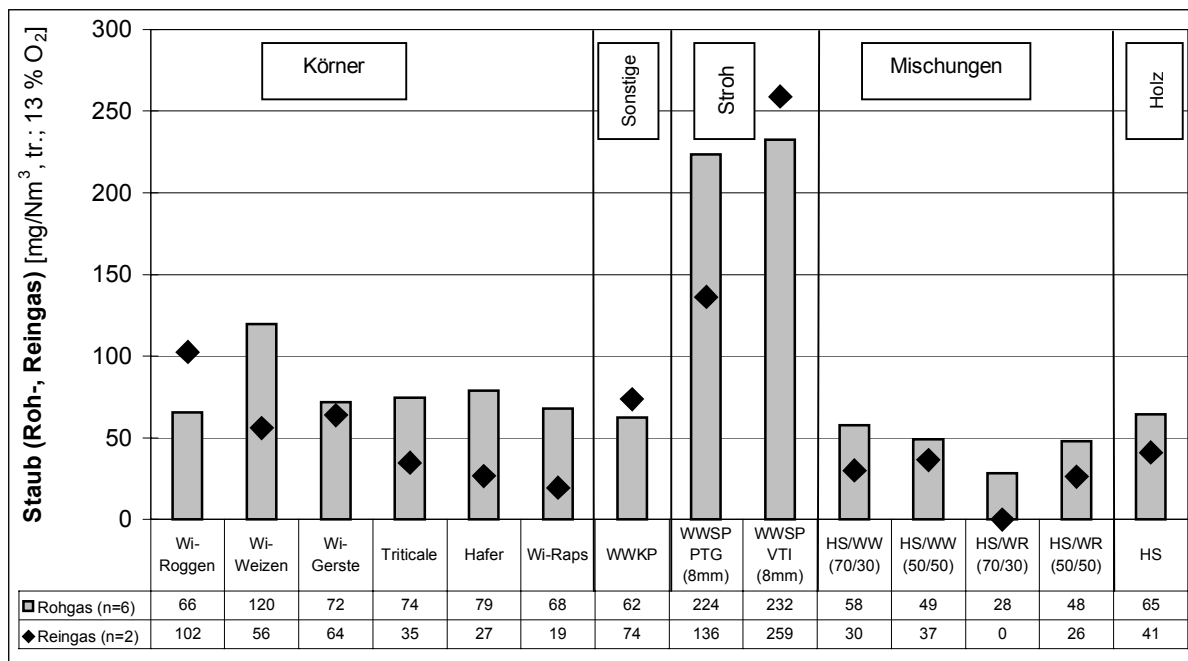


Abbildung 11: Vergleich der Staubkonzentrationen (1. BlmSchV) verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen im Roh- und Reingas (Elektrofilter) – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2004/05; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Baxi

Bei der Untersuchung der Baxi Anlage wurde festgestellt, dass die durchschnittlichen Staubgehalte der Getreidekörnerchargen von 179 bis 302 mg/m³ generell über dem Grenzwert für Regelbrennstoffe der 1. BlmSchV liegen. Dabei sind etwas geringere Staubniveaus bei den Spelzgetreidearten Hafer (179 mg/m³) und Wintergerste (243 mg/m³) nachweisbar (s. Abb. 12).

Für Mischungen mit holzartigen Brennstoffen konnte eine Reduzierung der Staubkonzentrationen gegenüber der reinen Getreidekörnerverbrennung erzielt werden. Diese ist jedoch nicht ausreichend, um die Einhaltung des Grenzwertes der 1. BlmSchV zu gewährleisten.

Beim Einsatz von Halmgutpellets wurden für Winterweizeneinstreustohpellets (WWSP PTG) mit im Mittel 273 mg/m³ bzw. für Winterweizenkleiepellets (WWKP) 630 mg/m³ ebenfalls deutliche Überschreitungen des Grenzwertes festgestellt. Lediglich beim Einsatz von Rapskörnern konnten neben den holzartigen Brennstoffen Staubwerte kleiner 100 mg/m³ erreicht werden.

Bei diesem Anlagentyp ist somit beim Einsatz von halmgutartigen Brennstoffen, weder in Bezug auf Getreidekörner noch in Bezug auf Strohpellets, die Einhaltung des Grenzwertes ohne sekundäre Abscheidetechnik gegeben.

Die Untersuchungen zum Teillastverhalten mit Winterroggenkörnern zeigen eine Minimierung der Staubentwicklung.

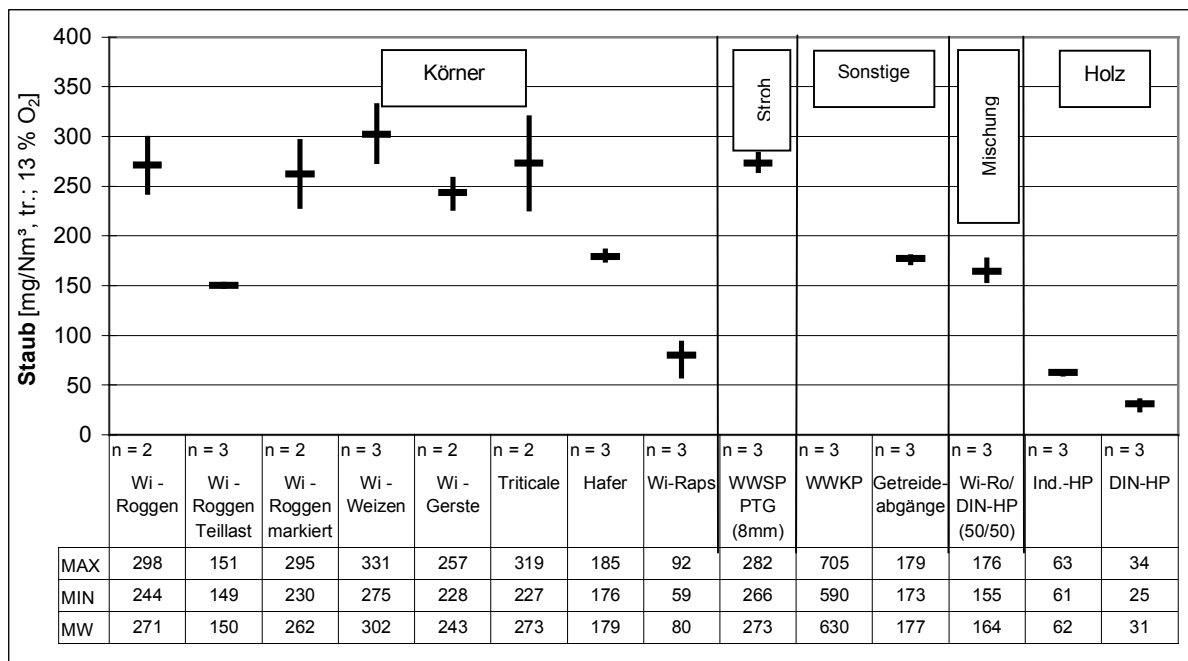


Abbildung 12: Vergleich der Staubkonzentrationen (1. BlmSchV) verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S – 2003/04; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Agroflamm

Die mit Abstand besten Ergebnisse aller untersuchten Anlagen zeigt bei den Staubemissionen der Kessel der Firma Agroflamm (s. Abb. 13). Alle untersuchten Getreidekörnerchargen konnten dabei Staubwerte kleiner 100 mg/m^3 einhalten. Vorteile in Bezug auf die absoluten Konzentrationen von Staub im Rohgas ergaben sich auch an dieser Anlage für die Spelzgetreidearten Wintergerste (MW 33 mg/m^3) und Hafer (MW 24 mg/m^3). Diese lagen sogar noch unter denen des für diese Anlage ausgewiesenen Referenzbrennstoffes DIN-Holzpellets (MW 35 mg/m^3).

Des Weiteren konnte für den Einsatz von, in Bezug auf die energetische Verwertung optimierten, Strohpellets mit Werten von z. T. deutlich unter 50 mg/m^3 der Grenzwert der 1. BlmSchV ohne Sekundärmaßnahmen eingehalten werden.

Es sei jedoch angemerkt, dass diese Ergebnisse nach individueller Einstellung auf jeden einzelnen Brennstoff erzielt wurden.

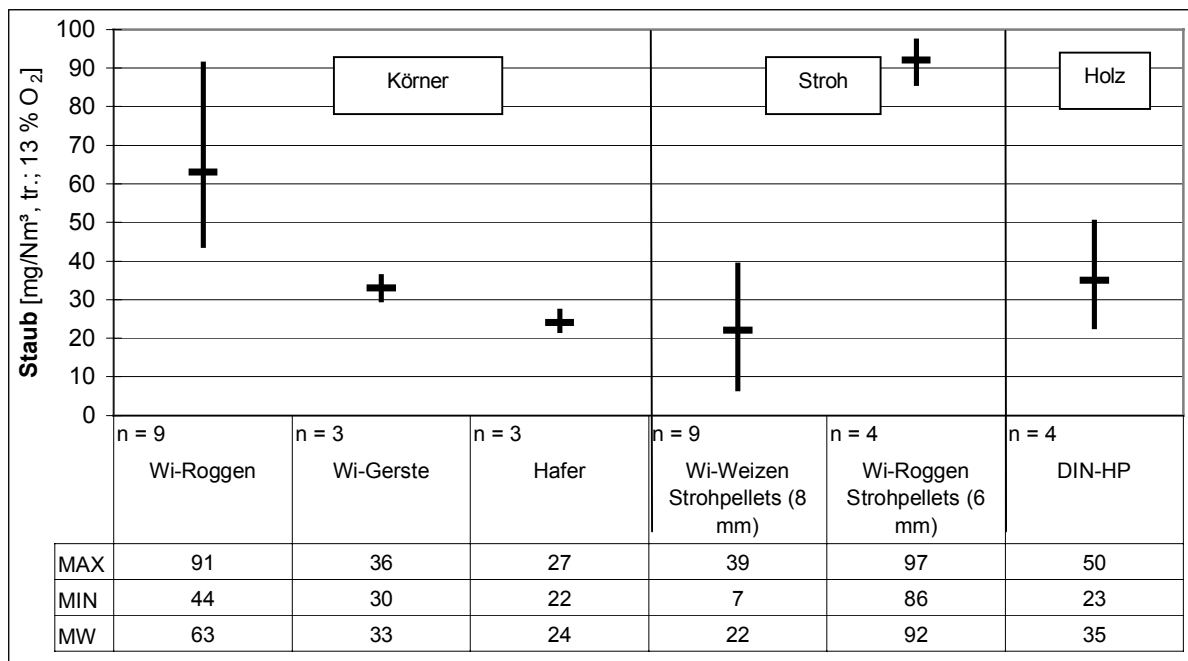


Abbildung 13: Vergleich der Staubkonzentrationen (1. BlmSchV) verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflamm – 2004/05; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Die bei der Verbrennung von Getreide und Halmgutpellets sowie sonstigen Brennstoffen ermittelten Staubemissionen weisen einen tendenziellen Zusammenhang mit den im Labor bzw. im Praxisbetrieb bestimmten Aschegehalten auf, d. h. mit zunehmenden Aschegehalten im Brennstoff steigen die Staubkonzentrationen im Abgas (s. Abb. 14 bis 18). Dabei konnte ein engerer Zusammenhang zwischen den in der Praxis ermittelten Aschegehalten mit den entstehenden Staubemissionen (s. Abb. 16) festgestellt werden, als zwischen den im Labor bestimmten Aschegehalten und den Staubemissionen (s. Abb. 17).

Für die Agroflamm Anlage konnte kein Zusammenhang festgestellt werden (s. Abb. 18).

Gegenwärtig wird aufgrund der in Kraft getretenen europäischen Feinstaubrichtlinie verstärkt auch die Entstehung von Feinstäuben aus Feuerungsanlagen diskutiert. Erste Untersuchungen für halmgutartige Brennstoffe weisen generell höhere Feinstaubanteile gegenüber holzartigen Brennstoffen nach /3/,/4/. Der Hauptanteil der Partikelgrößen liegt dabei < 0,5 µm /5/,/6/.

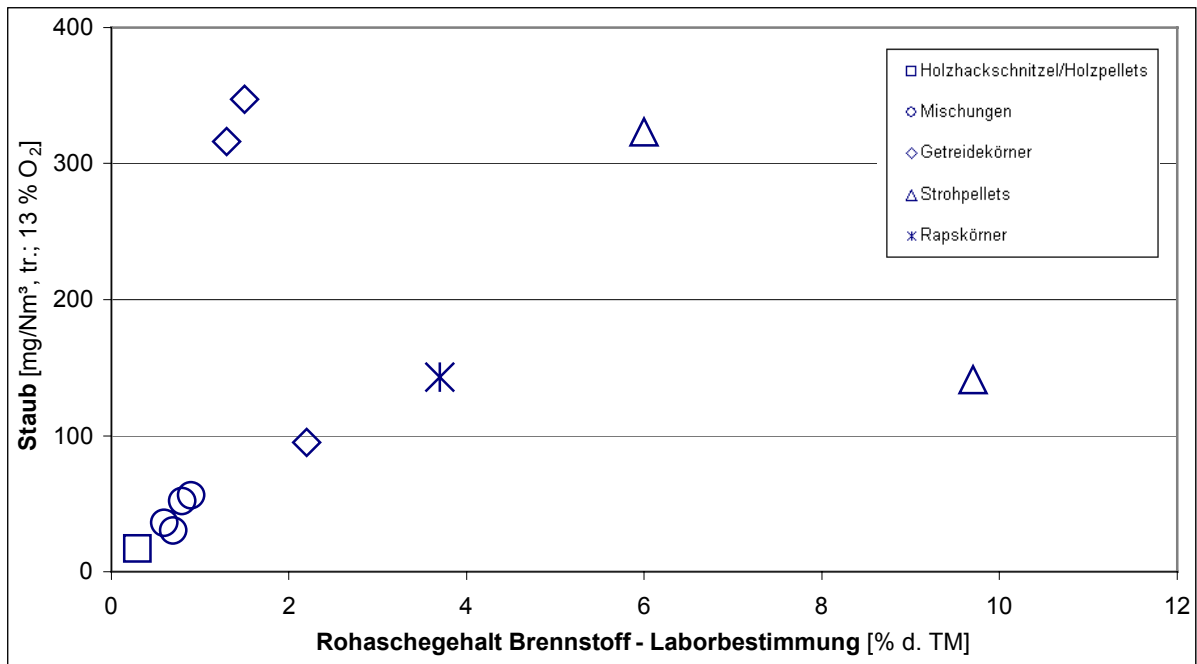


Abbildung 14: Abhängigkeit der Staubkonzentrationen vom Aschegehalt des Brennstoffs – Erhebung von Praxisdaten für Staub am BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH und Labordaten für den Aschegehalt – 2003/04; Staubwerte angegeben als Mittelwert der Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

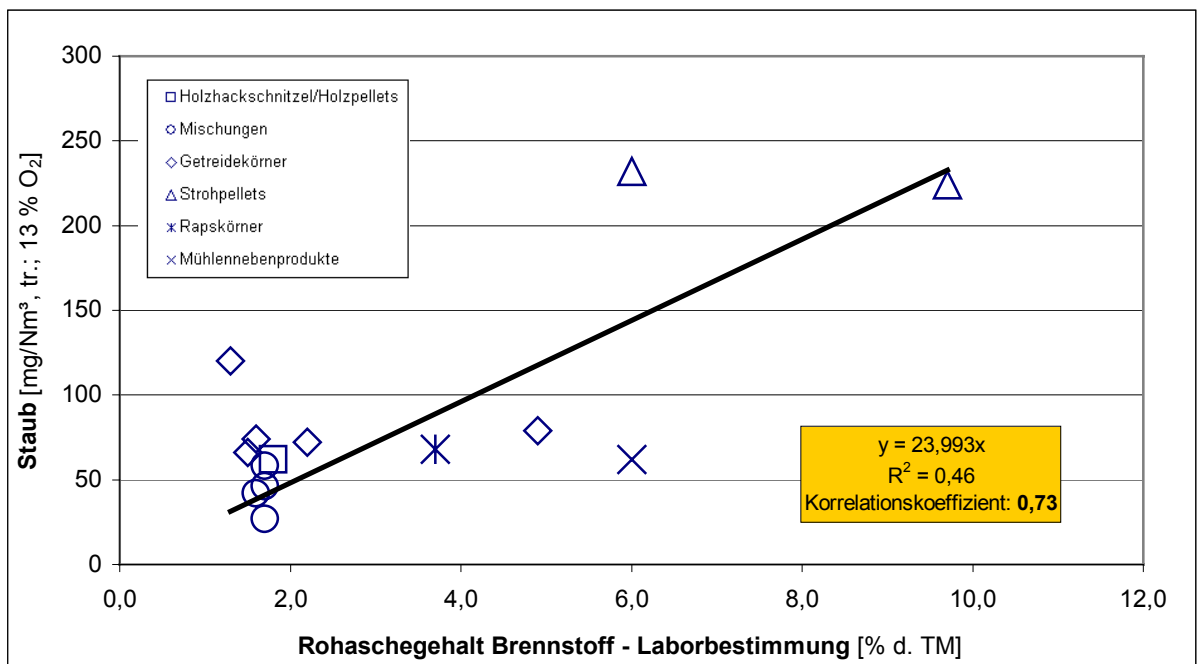


Abbildung 15: Abhängigkeit der Staubkonzentrationen vom Aschegehalt des Brennstoffs – Erhebung von Praxisdaten für Staub am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S und Labordaten für den Aschegehalt – 2003/04; Staubwerte angegeben als Mittelwert der Halbstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

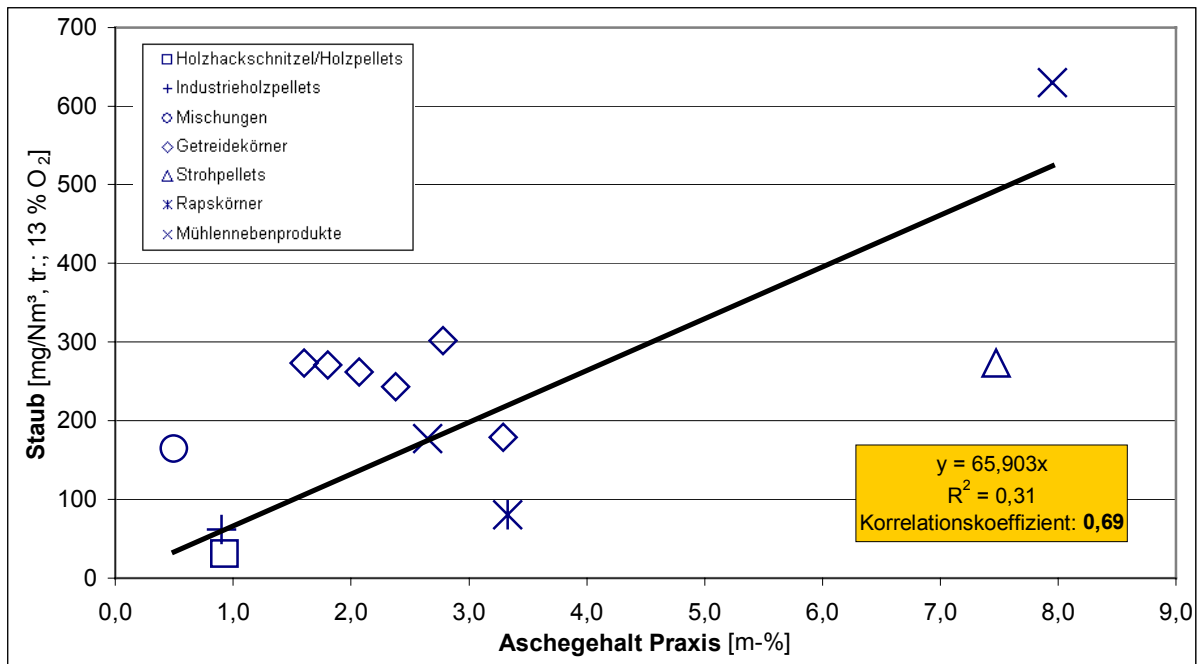


Abbildung 16: Abhängigkeit der Staubkonzentrationen vom Aschegehalt des Brennstoffs – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S – 2003/04; Staubwerte angegeben als Mittelwert der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

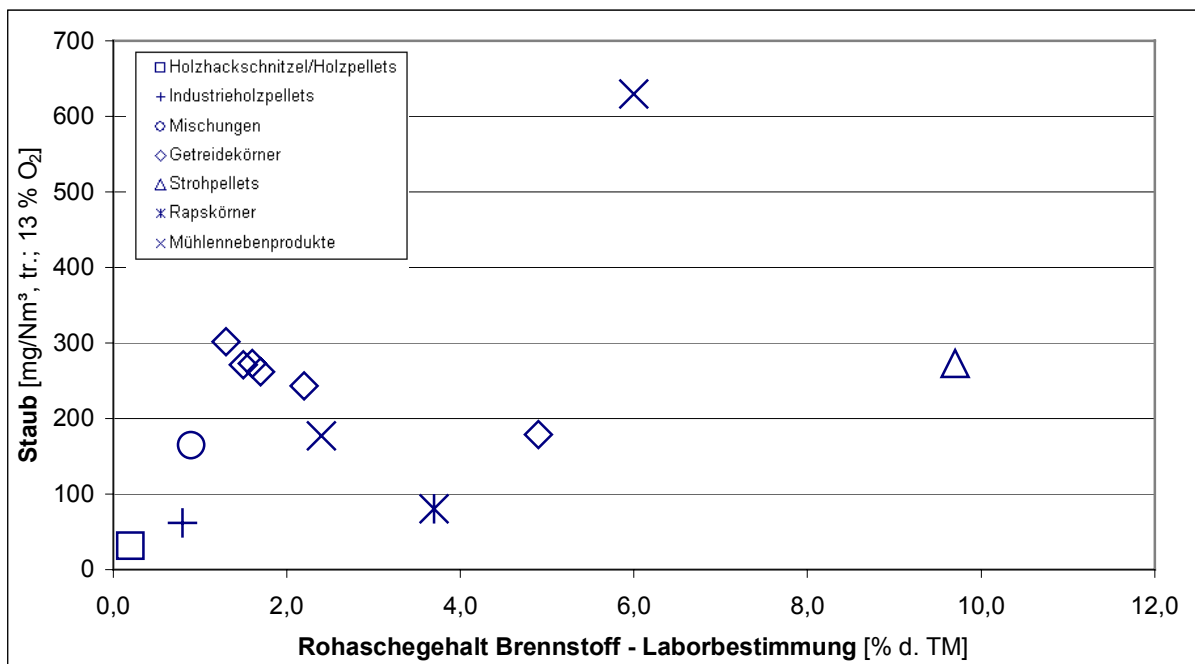


Abbildung 17: Abhängigkeit der Staubkonzentrationen vom Aschegehalt des Brennstoffs – Erhebung von Praxisdaten für Staub am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S und Labordaten für den Aschegehalt – 2003/04; Staubwerte angegeben als Mittelwert der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

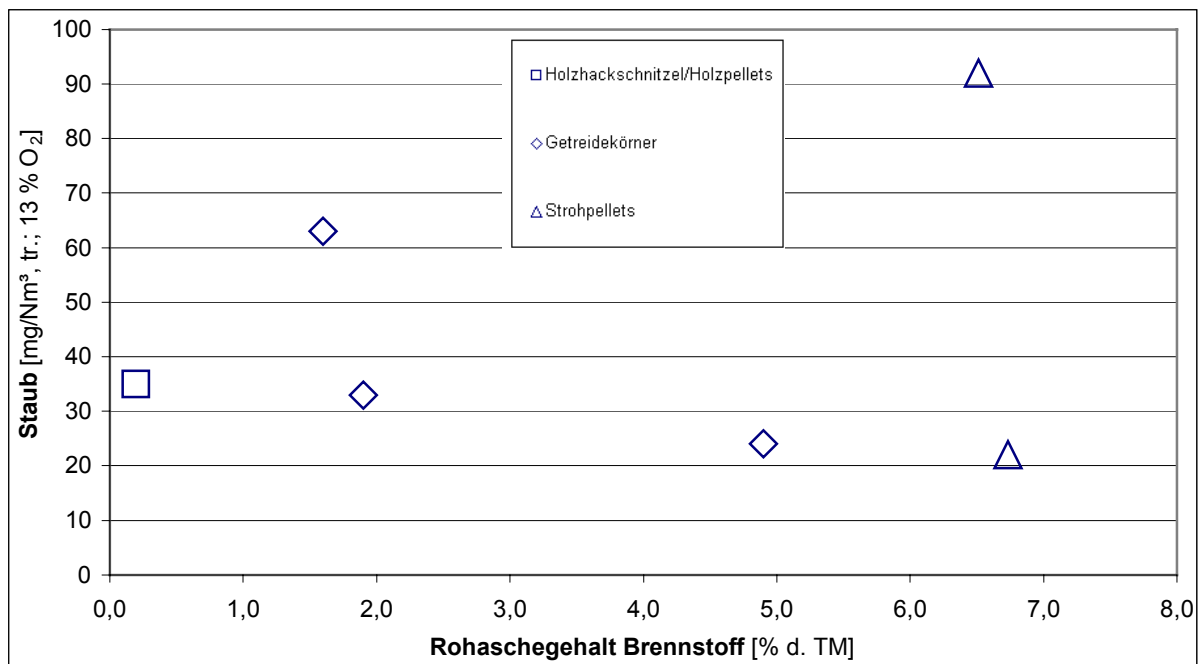


Abbildung 18: Abhängigkeit der Staubkonzentrationen vom Aschegehalt des Brennstoffs – Erhebung von Praxisdaten für Staub am AGRO 40, Fa. Agroflamm GmbH und Labordaten für den Aschegehalt – 2004/05; Staubwerte angegeben als Mittelwert der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Lösungsansätze einer Staubemissionsreduzierung

Trotz positiver Ergebnisse in Bezug auf die ermittelten Staubemissionen besteht im Hinblick auf eine sichere Einhaltung der in der 1. BImSchV bzw. der TA Luft (Anlagen nach 4. BImSchV) geforderten Grenzwerte teilweise die Notwendigkeit des Einsatzes von wirtschaftlich darstellbaren Staubabscheidetechnologien. Vor allem bei Feuerungsanlagen, welche nicht ausschließlich für den Einsatz von Getreide, Getreidereststoffen bzw. Halmgütern entwickelt wurden, erscheint dieser Einsatz in Praxisanlagen unabdingbar. Dabei besteht nach wie vor das Problem nicht am Markt verfügbarer, preiswerter Technologien. Mit konventionellen Abscheidetechniken (Zyklon, Gewebefilter, etc.) ist entweder keine ausreichende Abscheidewirkung erreichbar bzw. die Investitionskosten für die Staubabscheidung stehen in keinem Verhältnis zu den Gesamtinvestitionskosten für Kleinf Feuerungsanlagen.

Das aktuell von der TLL bearbeitete Projekt zum „Emissionsverhalten von getreide- und halmguttauglichen Feuerungsanlagen in der Praxis“ beinhaltet schwerpunktmäßig die Eruiierung, Entwicklung und Testung von Staubabscheidetechniken für den Kleinf Feuerungsanlagenbereich.

4.3 Stickoxide (NO_x) – Ergebnisse und Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt im Brennstoff

Die Stickoxidbildung bei der Verbrennung kann grundsätzlich auf drei verschiedenen Reaktionswegen erfolgen:

- NO_x-Bildung aus Brennstoffstickstoff
- Thermische NO_x-Bildung
- Prompte NO_x-Bildung

Für Biomassekleinfeuerungsanlagen ist aufgrund der erreichbaren Feuerraumtemperaturen von ca. 900-1.200 °C fast ausschließlich der Stickstoffgehalt im Brennstoff für die NO_x-Bildung verantwortlich [3/,/7/]. Die Ergebnisse der Messungen (Summenwert aus Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid) zeigen erwartungsgemäß über alle Anlagen und Brennstoffe hinweg einen direkten Zusammenhang zwischen den Brennstoffstickstoffgehalten und NO_x-Konzentrationen im Abgas. Generell kann dabei festgestellt werden, dass holzartige Brennstoffe neben sehr guten Abbrandergebnissen, die mit Abstand niedrigsten NO_x-Konzentrationen aufweisen, gefolgt von den Brennstoffmischungen. Halmgutpellets liegen auf einem mittleren Niveau, während die höchsten Werte bei den Körnerchargen gemessen wurden (s. Abb. 19 bis 22).

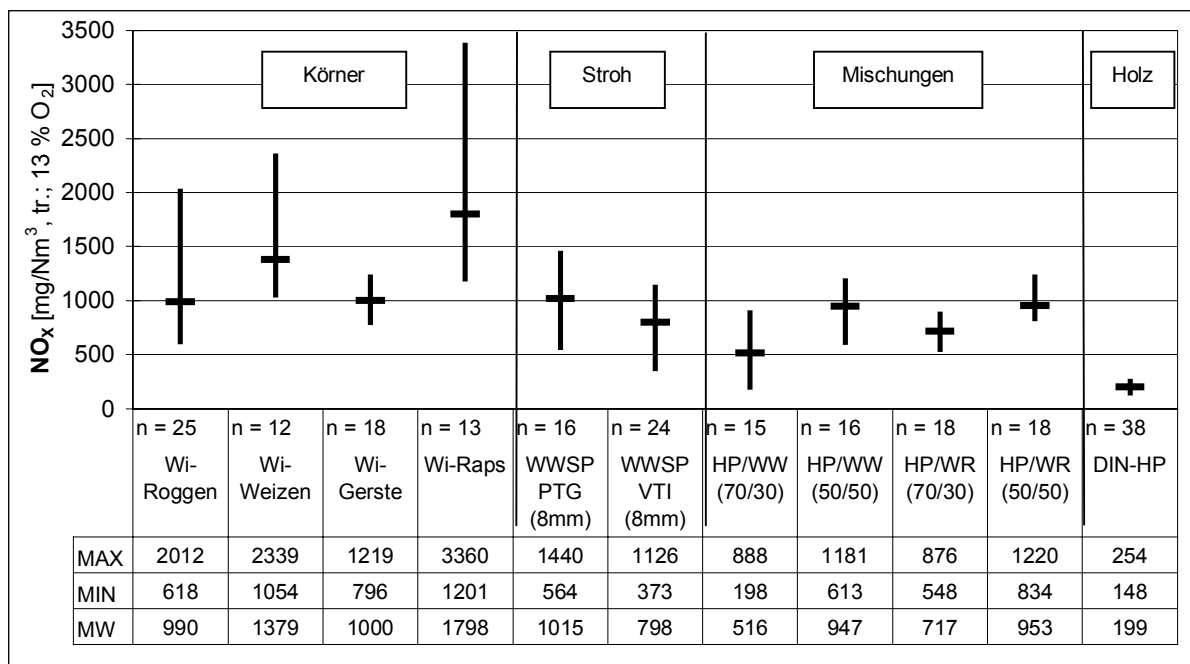


Abbildung 19: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH – 2003/04; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

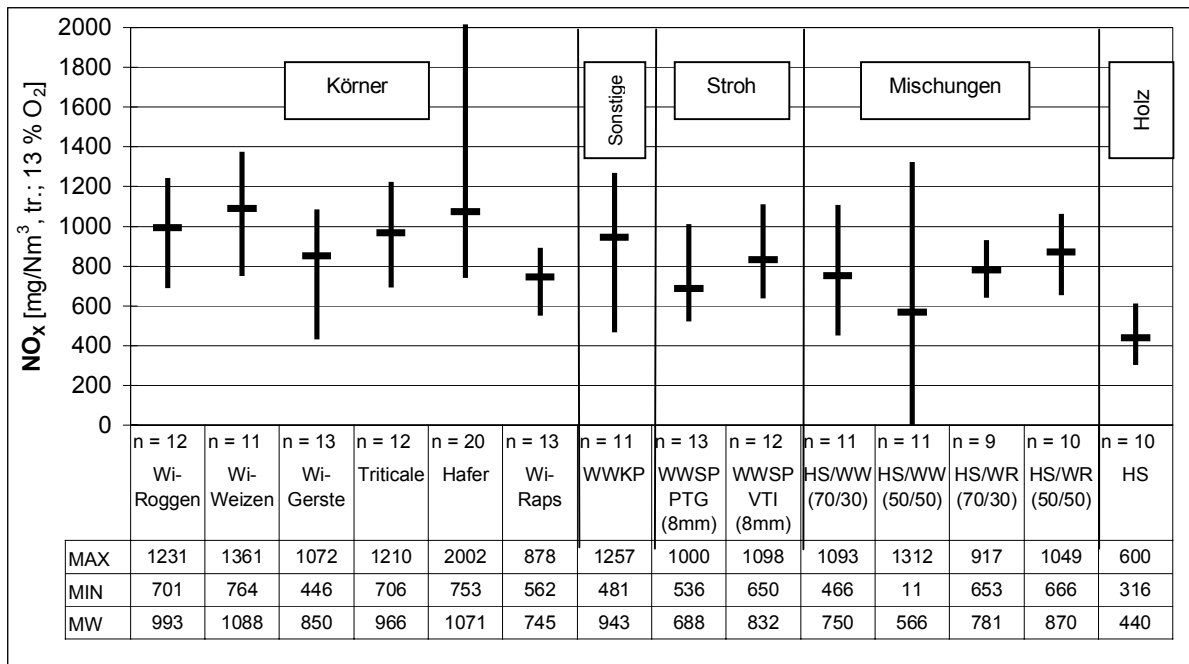


Abbildung 20: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2003/04; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

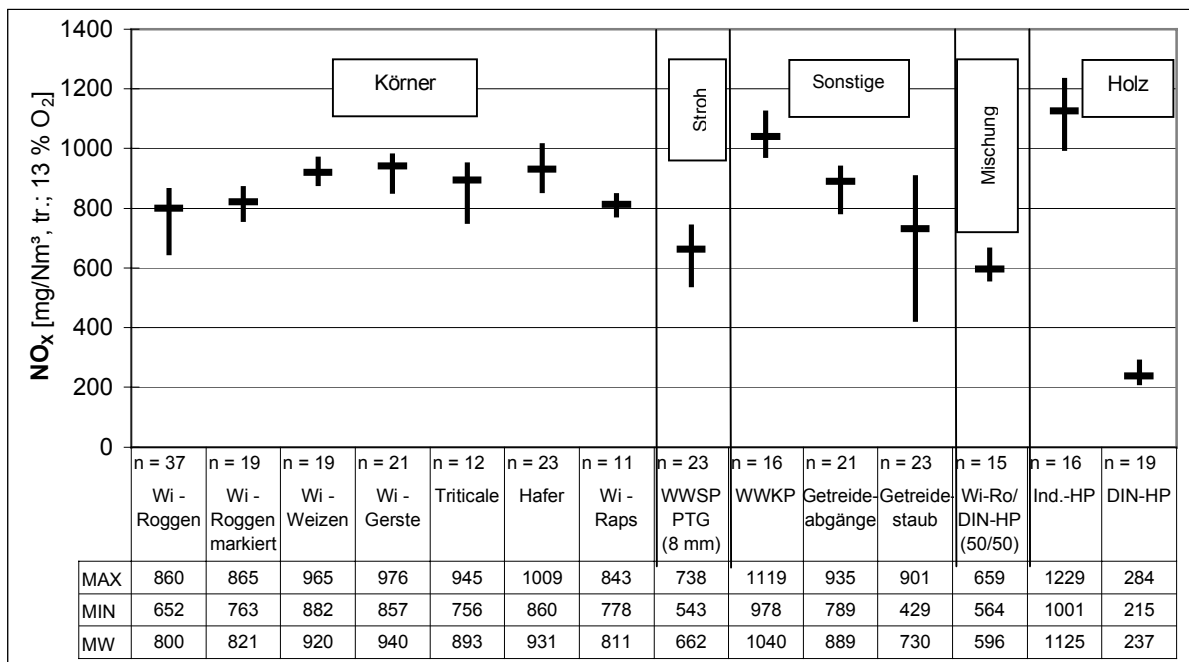


Abbildung 21: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT Modell 2,5; Fa. BAXI A/S – 2003/04; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

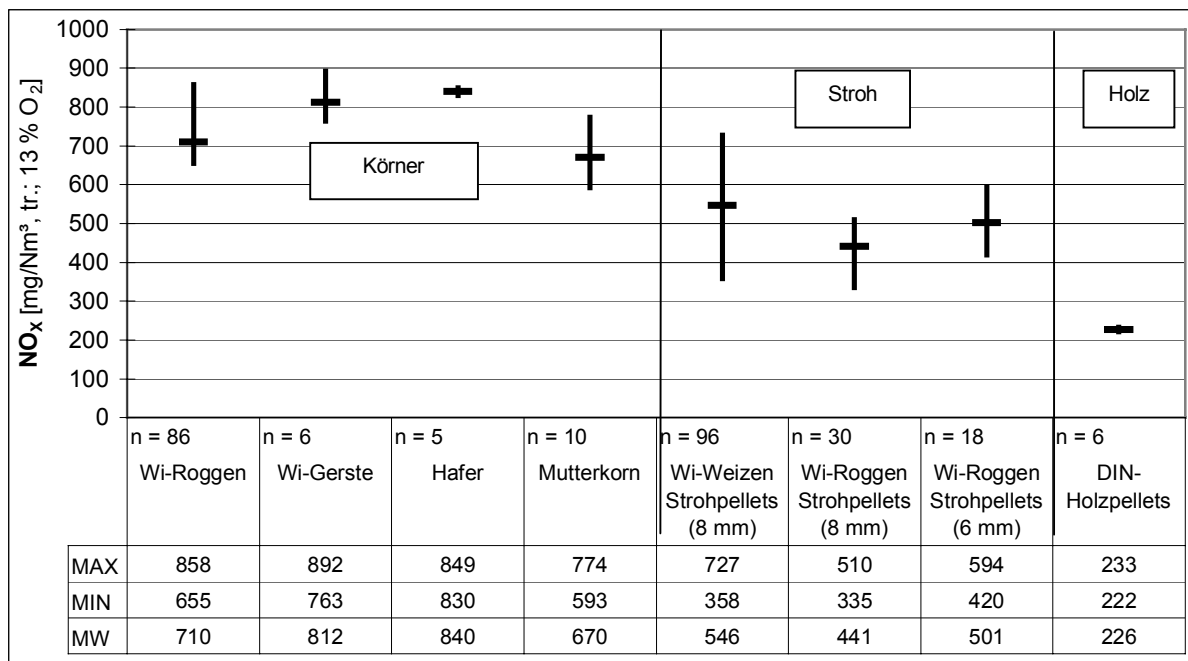


Abbildung 22: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflamm – 2004/05; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

Für den Einsatz von Mühlennebenprodukten wie z. B. Winterweizenkleiepellets und Industrieholzpellets sowie Rapskörnern, welche die höchsten Stickstoffgehalte der untersuchten Brennstoffe aufweisen, wurden auch die höchsten absoluten Emissionswerte festgestellt. Triticaleganzpflanzenpellets liegen brennstoff- als auch emissionsseitig erwartungsgemäß zwischen Stroh und Getreidekörnern. Der Vergleich der Getreidearten zeigt, dass Winterroggen und Wintergerste mit geringeren Stickstoffgehalten, aufgrund geringerer Rohproteingehalte, deutlich geringere Stickoxidemissionen verursachen als beispielsweise Weizen und Hafer.

Legt man für eine Bewertung der NO_x -Emissionskonzentrationen der halmgutartigen Brennstoffe die Anforderungen der 4. BImSchV und damit der TA Luft mit einem Grenzwert von $0,5 \text{ g/m}^3$ bezogen auf einen Restsauerstoffgehalt im Abgas von 11 % für Anlagen $< 1 \text{ MW}_{\text{th}}$ (Anlagen der Nummer 1.3) zu Grunde, wird deutlich, dass dieser für Getreide nicht eingehalten werden kann.

Eine strenge Korrelation der NO_x -Konzentrationen mit dem Brennstoffstickstoff verdeutlichen die Abbildungen 23 bis 26. Daraus folgt, dass lediglich bis zu einem Stickstoffgehalt im Brennstoff von ca. 0,3 % i. d. TM ein den Anforderungen der TA Luft entsprechender Betrieb ohne zusätzliche Maßnahmen an der Feuerungsanlage gewährleistet werden kann. Weitergehende Vorkehrungen zur Minimierung der NO_x -Emissionen sind somit unabdingbar. Die Senkung des Stickstoffgehaltes im Brennstoff durch Vorauswahl der Brennstoffarten bzw. Sorten reicht nicht aus, die o. g. Anforderungen sicher zu erfüllen (s. Abb. 27, 28) /8/.

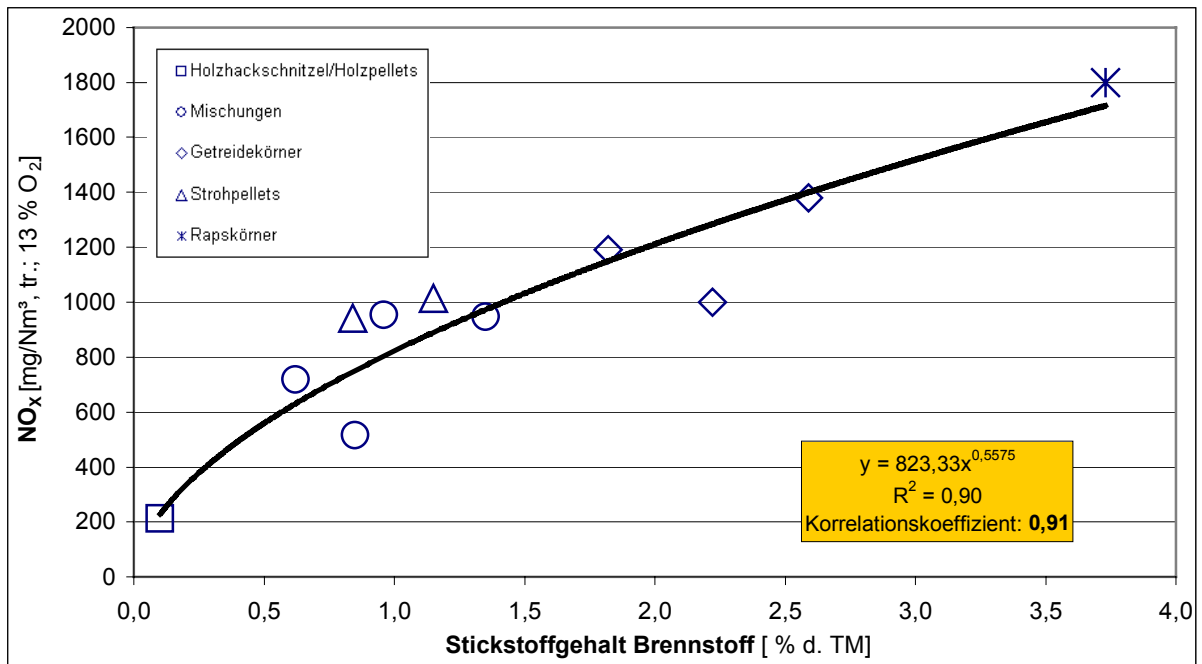


Abbildung 23: Abhängigkeit der Stickoxidkonzentrationen vom Stickstoffgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH und Labordaten für den Stickstoffgehalt – 2003/04; Stickoxidwerte angegeben als Mittelwert der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

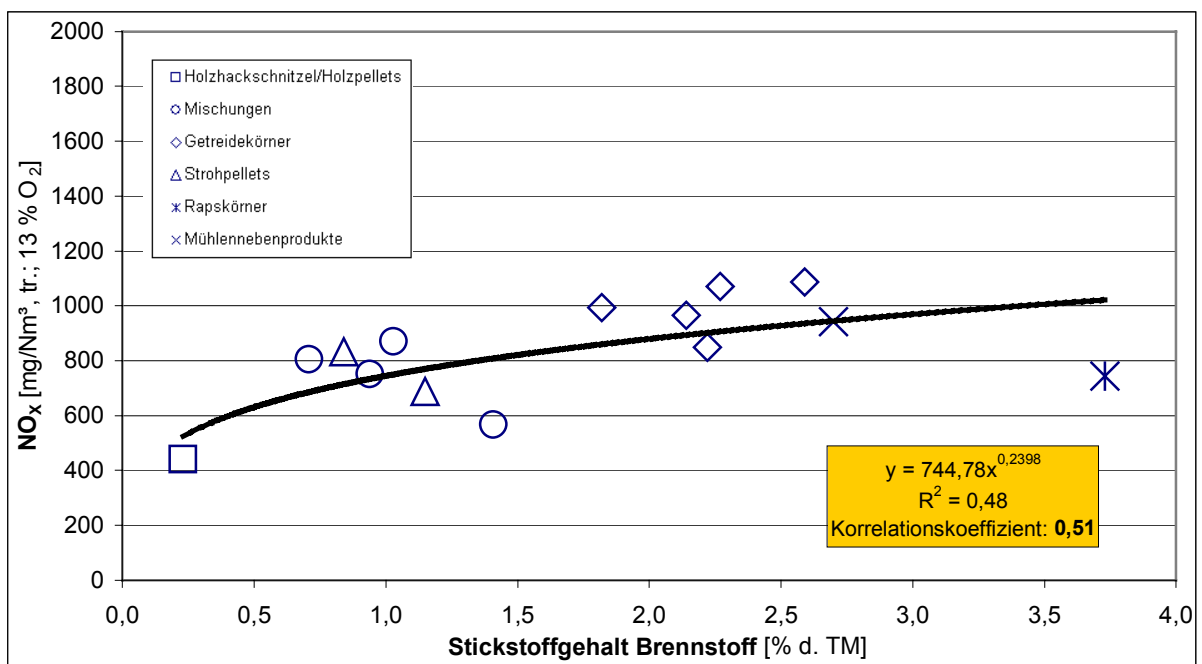


Abbildung 24: Abhängigkeit der Stickoxidkonzentrationen vom Stickstoffgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S und Labordaten für den Stickstoffgehalt – 2003/04; Stickoxidwerte angegeben als Mittelwert der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

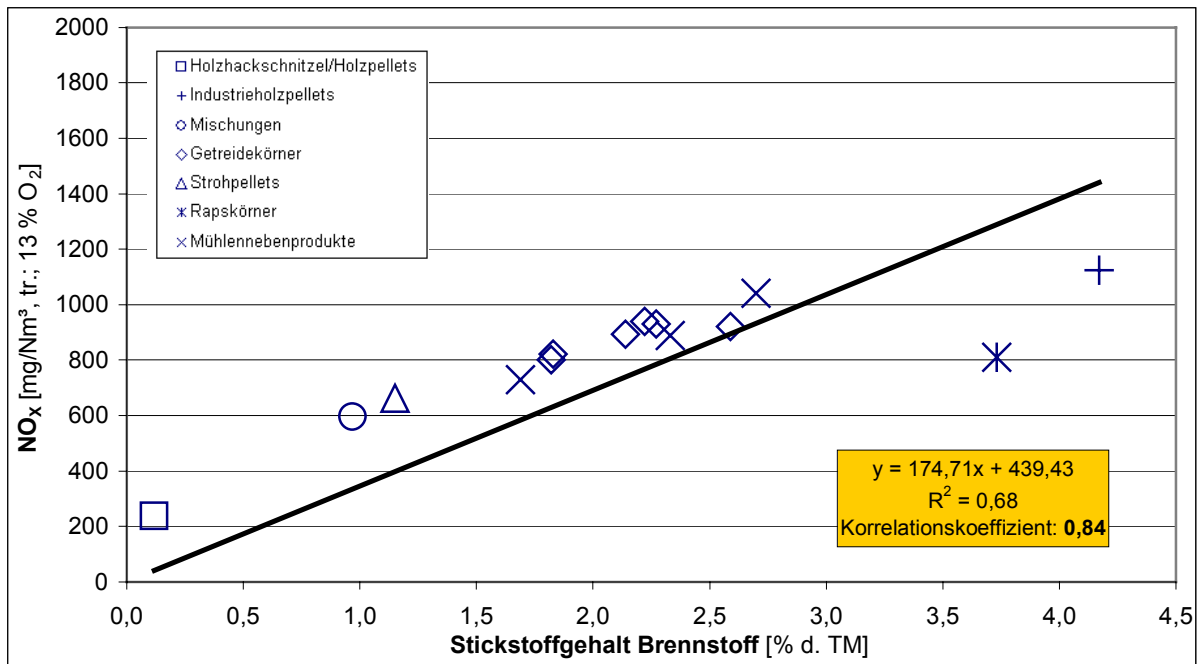


Abbildung 25: Abhängigkeit der Stickoxidkonzentrationen vom Stickstoffgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S und Labordaten für den Stickstoffgehalt – 2003/04; Stickoxidwerte angegeben als Mittelwert der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

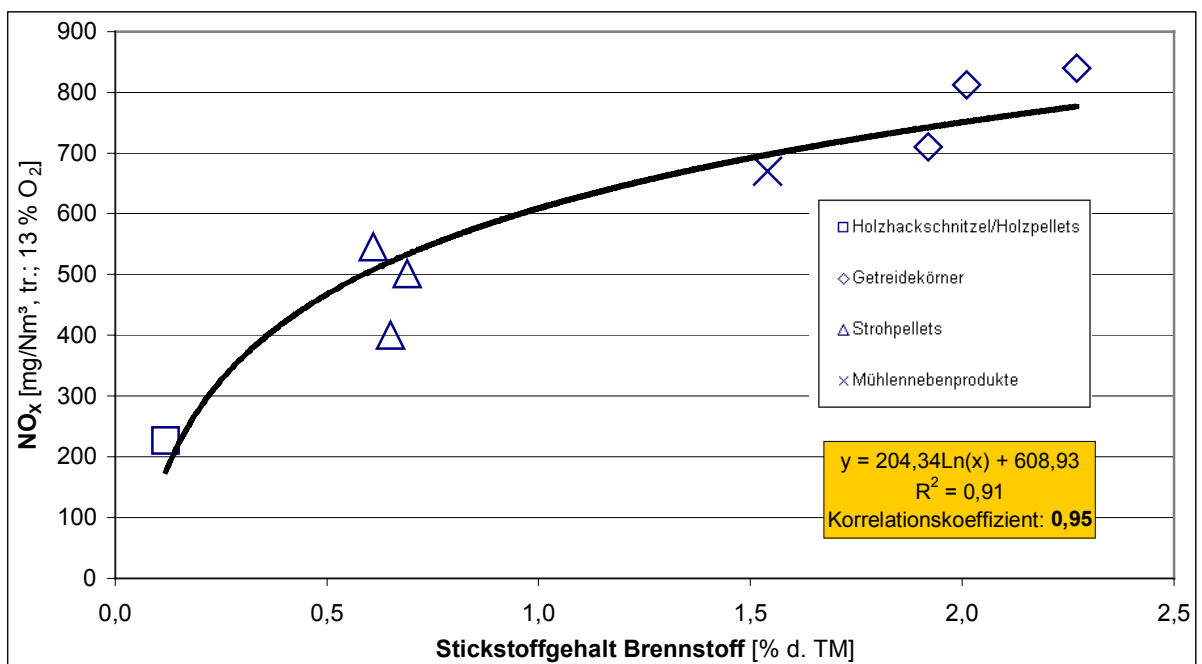


Abbildung 26: Abhängigkeit der Stickoxidkonzentrationen vom Stickstoffgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflamm GmbH und Labordaten für den Stickstoffgehalt – 2004/05; Stickoxidwerte angegeben als Mittelwert der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

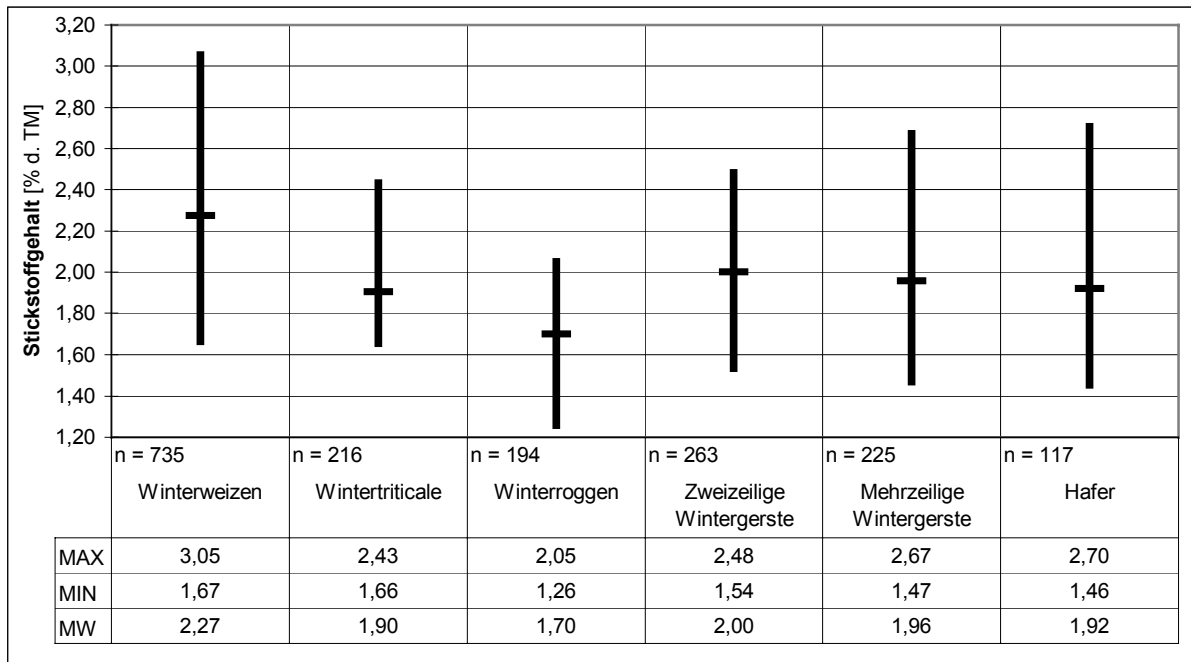


Abbildung 27: Vergleich der Schwankungsbreiten der Stickstoffgehalte von Getreidearten [Quellen: /9/, /10/, /11/, /12/, /13/, /14/]

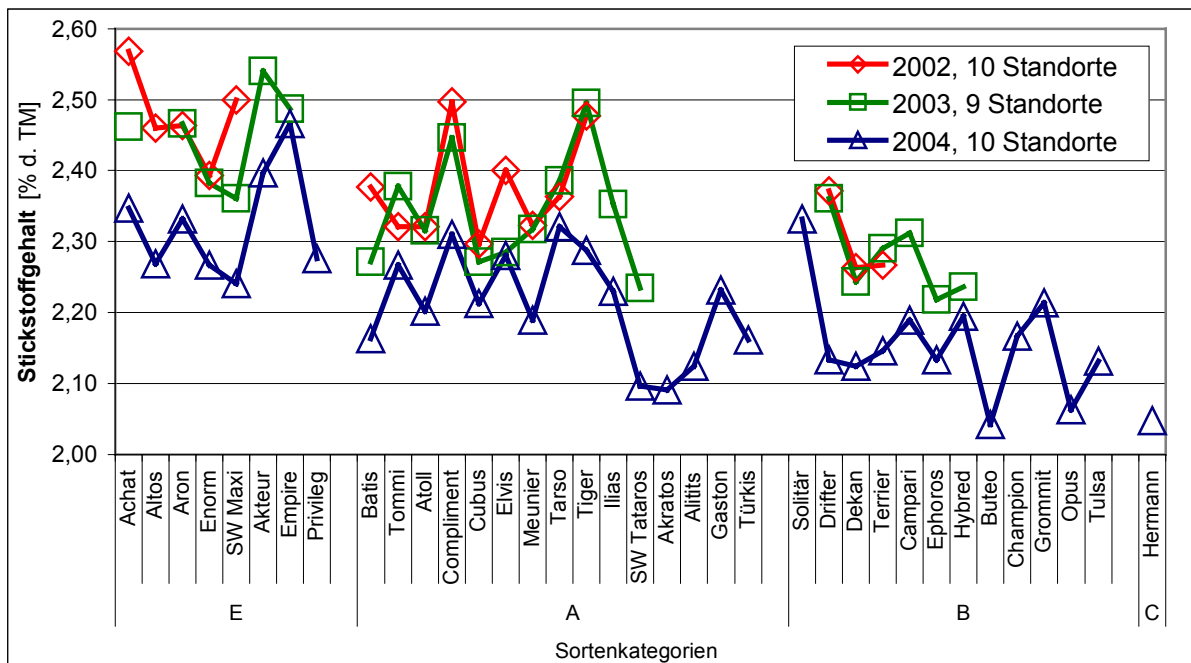


Abbildung 28: Vergleich der Stickstoffgehalte verschiedener Winterweizensorten auf Löss- bzw. Verwitterungsböden [Quelle: /9/]

Lösungsansätze einer Stickoxidemissionsminderung

Prinzipiell können verschiedene Maßnahmen im Bereich der Feuerung vorgenommen werden, unterschieden in Primär- und Sekundärmaßnahmen. Primärmaßnahmen wie die Luftstufung oder die Abgasrückführung greifen direkt in den Verbrennungsablauf ein, um die Bildung von

Stickoxiden zu unterbinden. Bei der Luftbegrenzung zur Unterdrückung der NO_x -Bildung ist darauf zu achten, dass sich dadurch nicht zu hohe CO-Werte ergeben. Die Abgasrückführung zielt auf die Senkung der Flammentemperatur durch die kühlende Wirkung der Abgase und somit die Vermeidung von thermischen Stickoxiden ab. Weiterhin erfolgt eine Verdünnung, die zu verminderten Sauerstoffpartialdrücken führt. Somit werden die Reaktionsbedingungen für thermische Stickoxide verschlechtert. Der apparative Aufwand für die Luftführung ist jedoch hoch und erscheint für Kleinkesselanlagen bisher unrealistisch. Darüber hinaus spielt die thermische NO_x -Bildung bei Kleinfeuerungsanlagen nur eine untergeordnete Rolle.

Sekundärmaßnahmen zur Stickstoffminderung beruhen auf der Zugabe eines stickstoffhaltigen Reduktionsmittels, um bereits gebildete Stickoxide zu molekularem Stickstoff (N_2) reagieren zu lassen. Gebildete Stickoxide können durch selektive nicht katalytische Reduktion (SNCR) oder selektive katalytische Reduktion (SCR) aus dem Abgas entfernt werden. Die Anwendbarkeit und Wirtschaftlichkeit für kleine Biomassefeuerungsanlagen konnte bislang noch nicht nachgewiesen werden.

Die zwischenzeitlich entwickelten Porenbrenner (z. B. FLOX Brenner) reduzieren die Bildung von Stickoxiden, indem die Verbrennungsreaktion flammenlos abläuft. Die technische Machbarkeit für diese Konzepte für Biomassefeuerungen werden gegenwärtig von mehreren Instituten (IVD/TFZ; FH Bingen) und Firmen (Fa. Mothermik, Fa. WS Feuerungstechnik) in verschiedenen FNR-Projekten getestet.

4.4 Schwefeldioxid – Messergebnisse und Abhängigkeit vom Schwefelgehalt im Brennstoff

Es wird deutlich, dass beim Einsatz sämtlicher untersuchter Brennstoffe und Anlagen, mit Ausnahme von Rapskörnern, mittlere Emissionswerte von maximal 450 mg/m³ erreicht werden (s. Abb. 29 bis 32). Vergleicht man die Brennstoffe untereinander, so kann festgestellt werden, dass analog zu den Stickoxidemissionen auch in Bezug auf die Mittelwerte der Schwefeldioxidemissionen mit deutlich unter 50 mg/m³ die geringsten Emissionsniveaus bei den holzartigen Brennstoffen nachzuweisen sind. Mittlere Emissionsniveaus von 50 bis 300 mg/m³ erreicht man mit Brennstoffmischungen bzw. Strohpellets. Bei Getreidekörnern liegt dieses Niveau mit 150 bis 450 mg/m³ etwas höher, wobei die höchsten Werte in allen Anlagen bei Winterweizen und Hafer festgestellt wurden. Winterroggen, Wintergerste und Wintertriticale verursachen etwas niedrigere Schwefeldioxidemissionen. Eine Ausnahme bildet der Winterraps. Hier zeigt sich, dass die hohen Schwefelanteile der Rapskörner auch zu deutlich erhöhten Schwefeldioxidemissionen führen. Die ermittelten Zusammenhänge zwischen den Schwefelgehalten der Brennstoffe und den SO₂-Emissionen zeigen für alle untersuchten Anlagen signifikante, positive Korrelationen (s. Abb. 33 bis 36). Schwefeldioxide werden im Rahmen des Geltungsbereiches der 1. BImSchV nicht reglementiert. Zieht man für eine Bewertung jedoch die höheren Anforderungen der TA Luft heran, kann beim Einsatz von naturbelassenen Brennstoffen mit Schwefelgehalten bis etwa 0,2 % in der TM von einer sicheren Einhaltung der mit 0,35 g/m³ (11 % O₂-Bezug) aufgeführten Emissionsgrenzwerten ausgegangen werden. Neben Raps kann es auch bei Getreidekörnern, sowie Mühlennebenprodukten zu Überschreitungen des TA Luft Grenzwertes kommen.

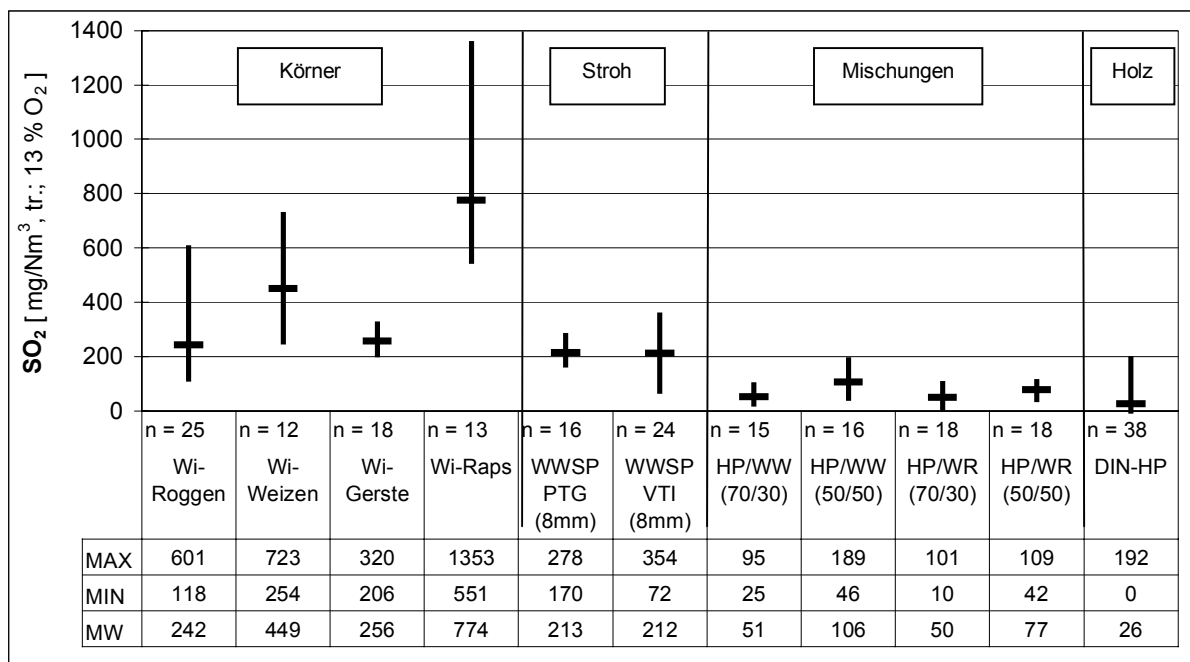


Abbildung 29: Vergleich der Schwefeldioxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH – 2003/04; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

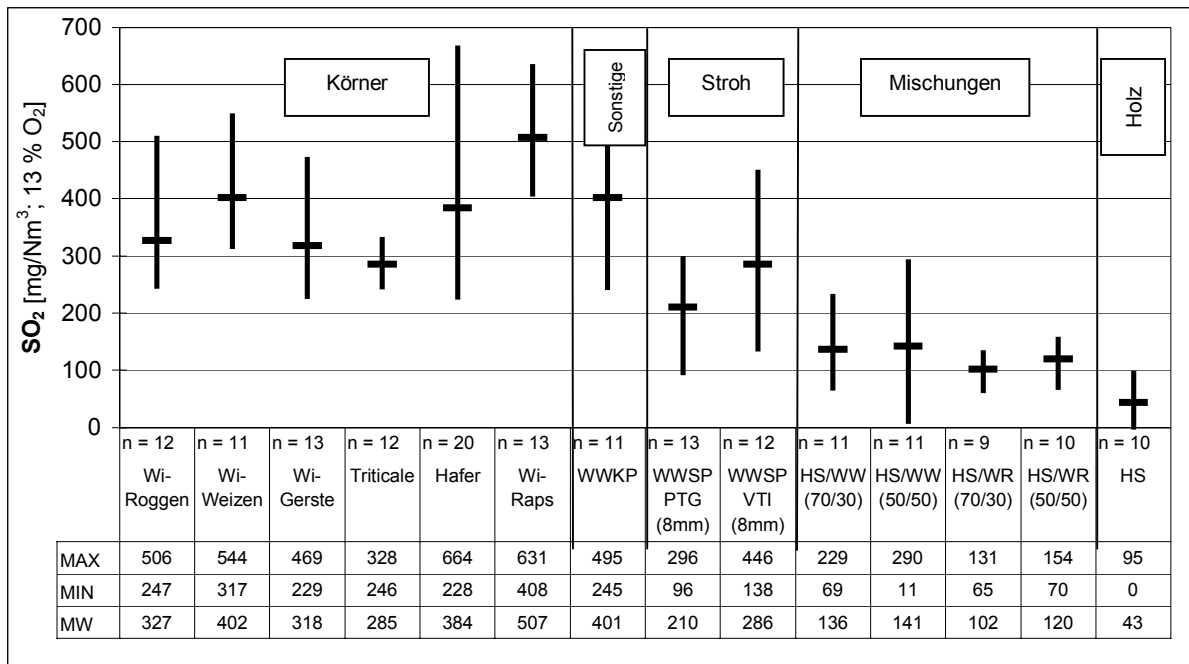


Abbildung 30: Vergleich der Schwefeldioxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S – 2003/04; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

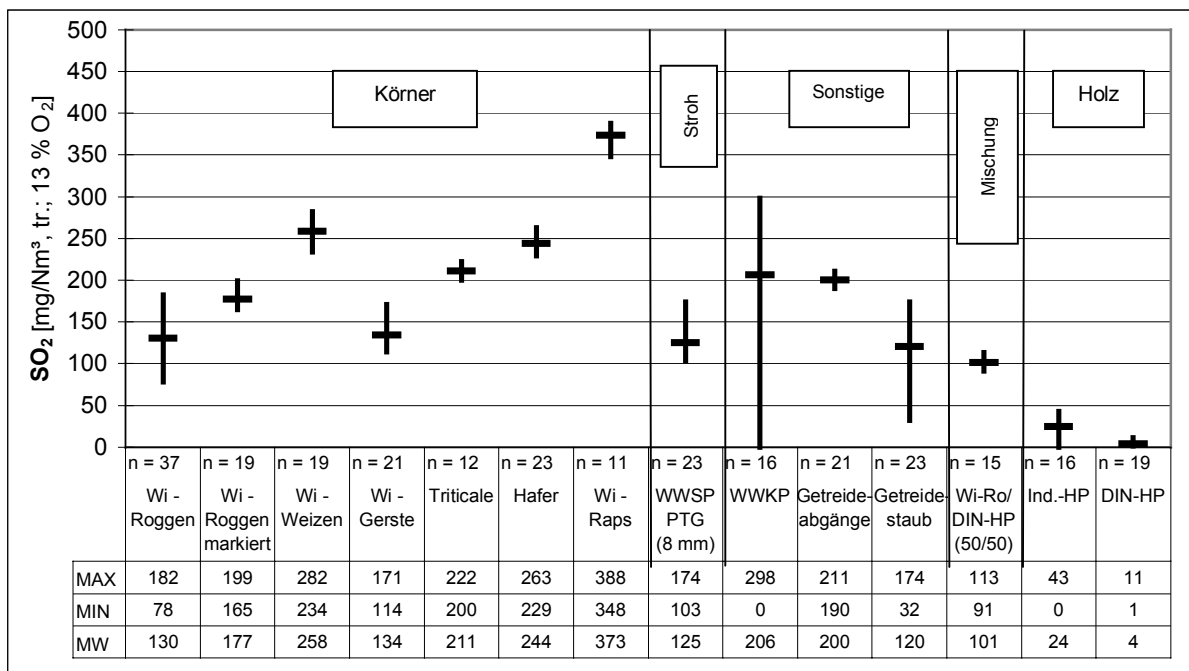


Abbildung 31: Vergleich der Schwefeldioxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S – 2003/04; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

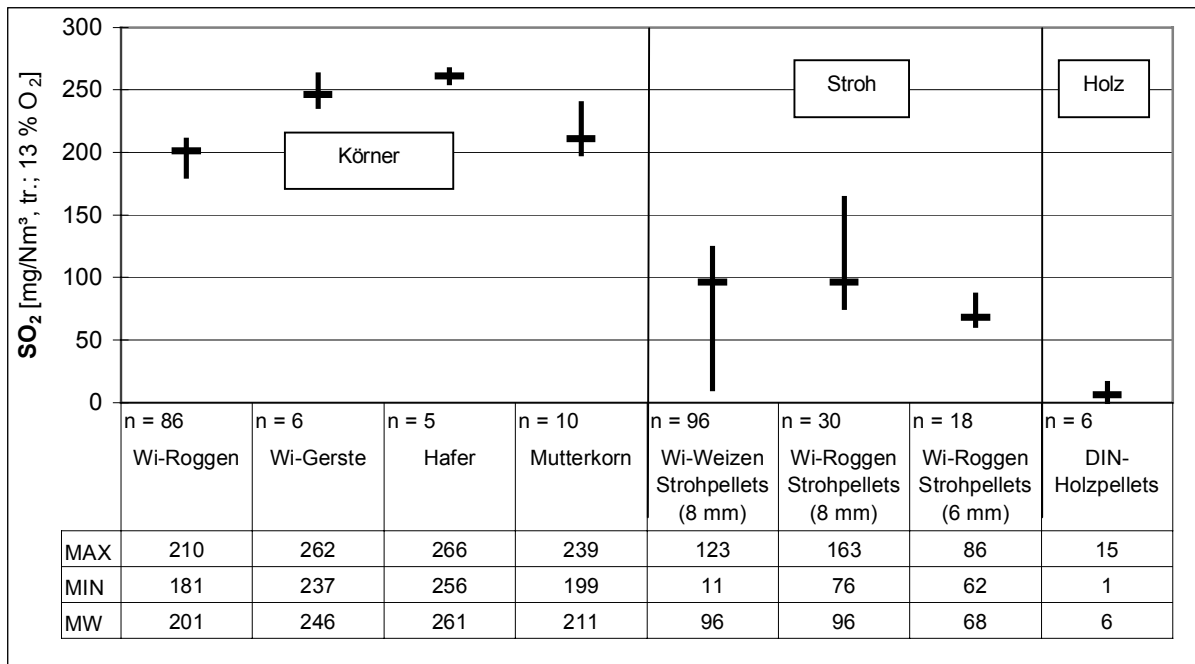


Abbildung 32: Vergleich der Schwefeldioxidkonzentrationen verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflamm GmbH – 2004/05; angegeben als Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

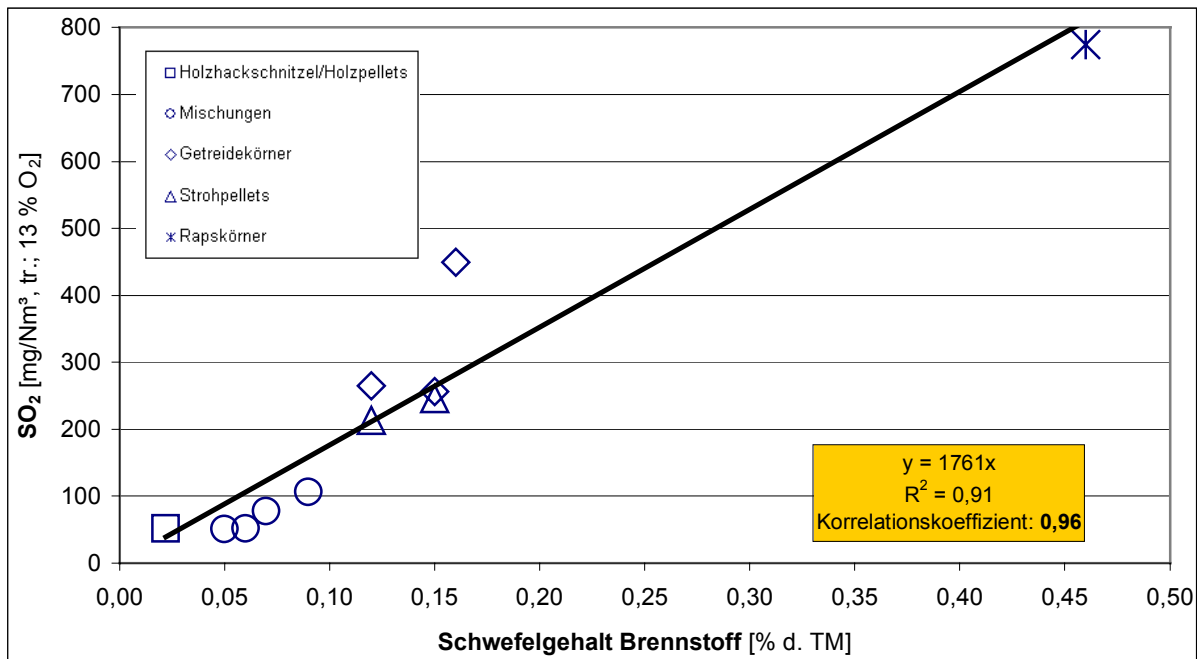


Abbildung 33: Abhängigkeit der Schwefeldioxidkonzentrationen vom Schwefelgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am BIOMAT FB 23L, Fa. FERRO GmbH und Labordaten für den Schwefelgehalt – 2003/04; Schwefeldioxidwerte angegeben als Mittelwert der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

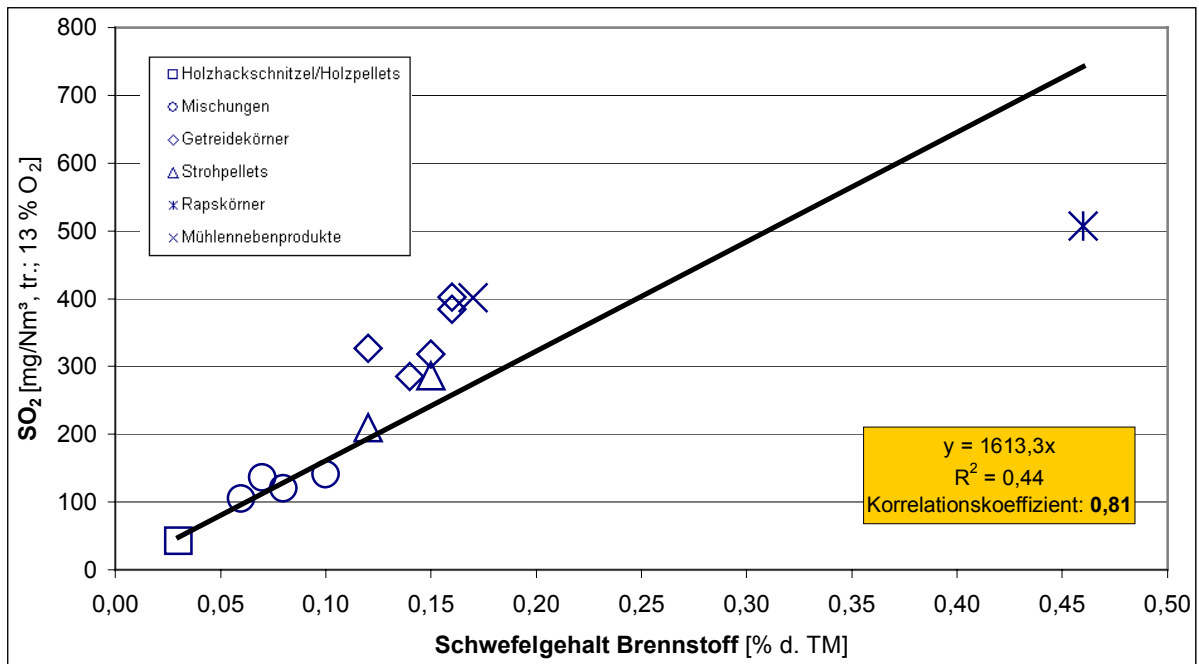


Abbildung 34: Abhängigkeit der Schwefeldioxidkonzentrationen vom Schwefelgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Prüfstandsdaten am HKRST-FSK 20, Fa. REKA A/S und Labordaten für den Schwefelgehalt – 2003/04; Schwefeldioxidwerte angegeben als Mittelwert der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

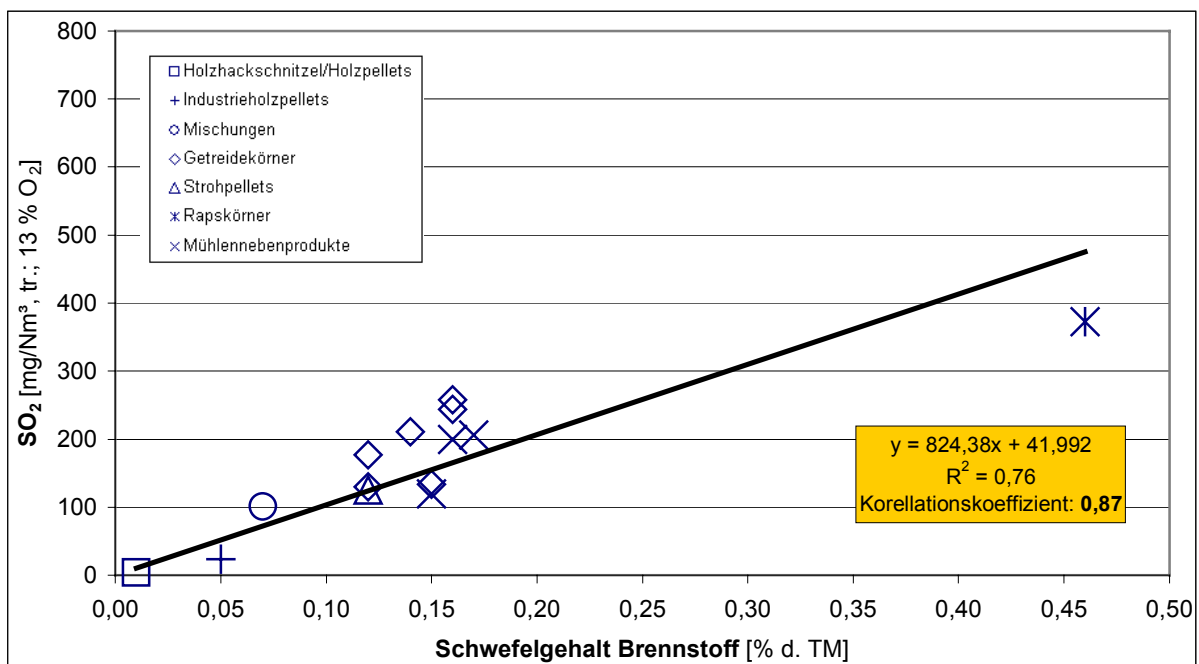


Abbildung 35: Abhängigkeit der Schwefeldioxidkonzentrationen vom Schwefelgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am MULTI HEAT 2,5, Fa. BAXI A/S und Labordaten für den Schwefelgehalt – 2003/04; Schwefeldioxidwerte angegeben als Mittelwert der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

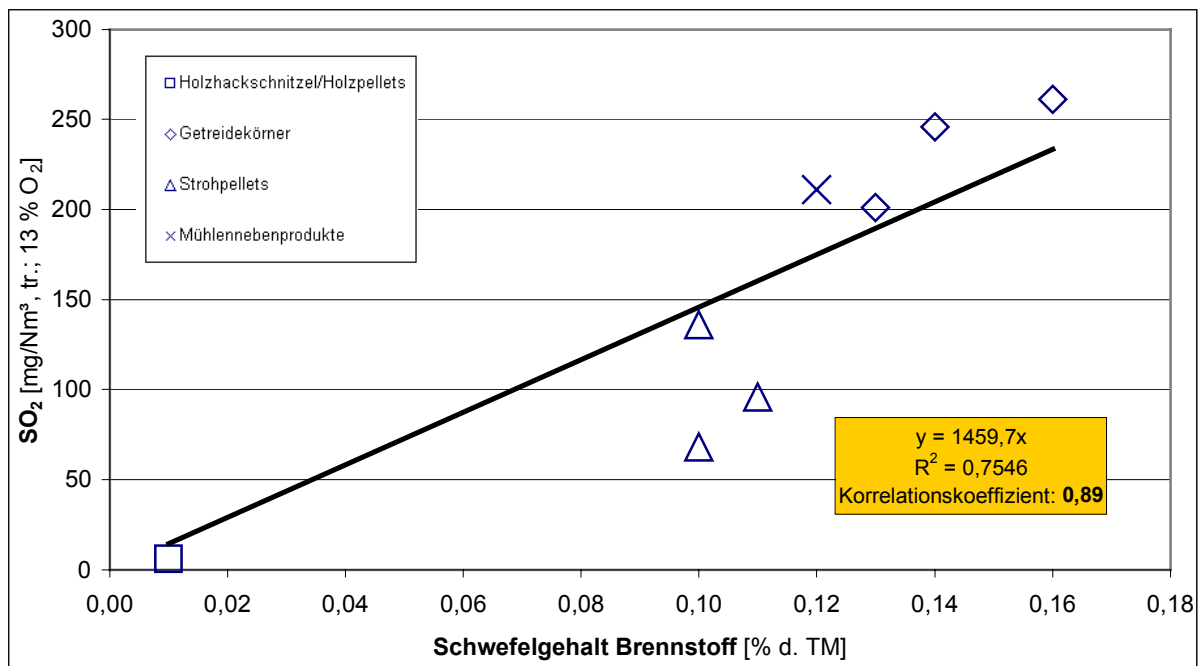


Abbildung 36: Abhängigkeit der Schwefeldioxidkonzentrationen vom Schwefelgehalt im Brennstoff verschiedener holz- und halmgutartiger Biomassen – Erhebung von Praxisdaten am AGRO 40, Fa. Agroflammb GmbH und Labordaten für den Schwefelgehalt – 2004/05; Schwefeldioxidwerte angegeben als Mittelwert der Viertelstundenmittelwerte bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt im trockenem Abgas unter Normbedingungen

5. Zusammenfassung

Im Rahmen des FNR-Projektes „Energetische Verwertung von Getreide und Halmgutpellets“ lag neben der Eruiierung möglicher Zuschlagstoffe zur Verbesserung der Brennstoffeigenschaften halmgutartiger Biomassen sowie der ökonomischen und ökologischen Bewertung der thermischen Verwertung landwirtschaftlicher Biomassen, der Schwerpunkt der Arbeiten bei der Feststellung des Standes der Verbrennungstechnik. Dabei wurden umfangreiche Untersuchungen zum Emissionsverhalten von Körnerchargen, Halmgutpellets, Mischungen mit holzartigen Brennstoffen und Referenzbrennstoffen (Holzhackschnitzel und DIN-Holzpellets) durchgeführt.

Hinsichtlich des Standes der Technik der thermischen Verwertung von Getreide und Halmgutpellets in Kleinfeuerungsanlagen muss generell in konventionelle und neuartige Anlagentechnik unterschieden werden. Die speziell für holzartige Brennstoffe entwickelte konventionelle Verbrennungstechnik weist deutliche Unterschiede in Bezug auf die Funktionssicherheit und das Emissionsverhalten auf. Neben teilweise sehr guten Ausbrandergebnissen konnte keiner der konventionellen Kessel für halmgutartige Brennstoffe sicher die Staubgrenzwerte nach 1. BImSchV einhalten. Hier ist der Einsatz von Sekundärmaßnahmen unabdingbar.

Demgegenüber ist bei speziell für die Verbrennung von Getreide entwickelten neuartigen Techniken die Einhaltung eines Staubwertes von 100 mg/Nm^3 , bezogen auf 13 % Sauerstoff, möglich. Dies entspricht einer Unterschreitung des Grenzwertes der 1. BImSchV von über 30 %. Noch deutlicher werden die Verbesserungen hinsichtlich der Kohlenmonoxidemissionen. Hier sind Werte kleiner 50 mg/Nm^3 nachweisbar. Dies entspricht einer Unterschreitung des Grenzwertes um ca. 99 %. Für Halmgutpellets sind die Schwankungsbreiten größer und die ermittelten Emissionsniveaus geringfügig höher.

Erste Ergebnisse der nach TA Luft geforderten Emissionsparameter zeigen erhöhte Konzentrationen, insbesondere bei den ermittelten Stickoxidemissionen. Neben einer Grenzwertbetrachtung sollte hier aber immer auch eine Massenstrombetrachtung erfolgen.

Die Ergebnisse bilden die Grundlage für das aktuell laufende und von der FNR geförderte Verbundprojekt. Diese Projekte sollen für eine Erweiterung der Datenbasis als Grundlage für eine mögliche rechtliche Einordnung von Getreidekörnern als Regelbrennstoff der 1. BImSchV dienen.

6. Messverfahren und Versuchsaufbau der Felduntersuchungen TLL / TLUG

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-, CO₂-, NO-, N₂O- und SO₂- Konzentrationen eingesetzt. Es kamen Messgeräte der Firma Maihak AG zum Einsatz.

Regelmäßig erfolgte die Kalibrierung der Messgeräte mit folgenden zertifizierten Prüfgasen:

CO	834	mg/m ³	Messgerät: UNOR 6N
CO ₂	18,1	Vol.-%	Messgerät: UNOR 610
NO	805	mg/m ³	Messgerät: UNOR 610
SO ₂	798	mg/m ³	Messgerät: UNOR 610
N ₂ O	52,5	mg/m ³	Messgerät: UNOR 6N
O ₂	25	Vol.-%	Messgerät: UNOR 610

Berechnung der NO₂-Konzentration

Für diese Aufgabe wird ein NO₂/NO- Konverter INOX-CV der Firma INSAT AG eingesetzt. Das im Messgas enthaltene NO₂ 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 NO₂ 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 O₂-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 (Eksikator) der Filter, anschließende Auswage

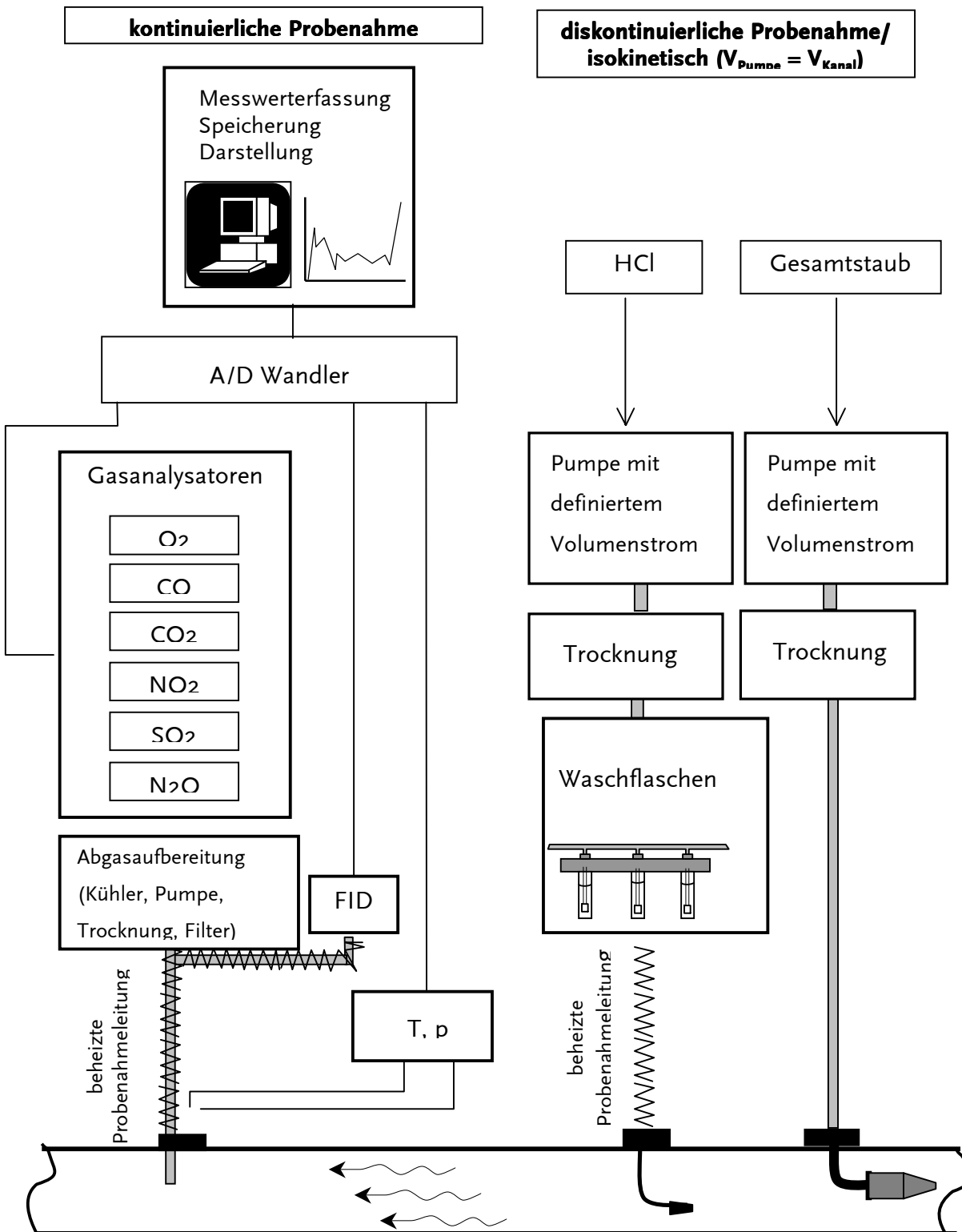
Messgeräte: DMS-Waage, MC BB 100 der Satorius AG

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 (Eksikator) der Filter, anschließende Auswage

Messgeräte: DMS-Waage, MC BB 100 der Satorius AG



7. Literaturverzeichnis

- /1/ Hering, Th.; Peisker, D.; Vetter, A. (2005): Energetische Verwertung von Getreide und Halmgutpellets. Abschlußbericht zum FNR-Projekt. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Eigenverlag, Jena, 78 S.
- /2/ Stöcklein, F. (2003): Messprogramm zur Begleitung des vorübergehenden Getreideeinsatzes in Feuerungsanlagen. Bericht Nr. 54537/1, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Eigenverlag, 69 S.
- /3/ Hartmann, H. (2003): Verbrennungsverhalten und Emissionen bei der Nutzung von Getreidekörnern und Strohpellets als Brennstoff in Kleinfeuerungen. In: KTBL Schrift 417, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.), Landwirtschaftsverlag Münster, S. 57-65
- /4/ Heidenreich, R.; List, M. (2003): Emissionen und Emissionsminderungsmaßnahmen bei der Verbrennung von Pellets aus halmartigen Biomassen.; 6 Kolloquium zur Reinhaltung der Luft: Neue Entwicklungen zur Technik der Luftreinhaltung, Dresden
- /5/ Heidenreich, R.; List, M. (2003): Verbrennung von Strohpellets und Getreidekörnern in kleinen Kesseln. In: KTBL Schrift 417, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.), Landwirtschaftsverlag Münster, S 66-74
- /6/ Beer, S. (2004): Entwicklung und Test einer Elektrofilteranlage für kleine Biomasseheizkessel. In: Tagungsband zum 13. Symposium „Energie aus Biomasse – Biogas, Flüssigkraftstoffe, Festbrennstoffe“, 25.-26.11., Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (Hrsg.), Eigenverlag, S. 283-285
- /7/ Diverse (2001): Leitfaden Bioenergie. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), S. 92-94
- /8/ Vetter, A.; Hering, Th.; Lewandowski, I.; Kauter, D (2002): Einflussmöglichkeiten auf Biomasseertrag und Brennstoffparameter. In: Standardisierung biogener Festbrennstoffe – Materialband zum Endbericht. Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (Hrsg.), Eigenverlag, Stuttgart, 451 S.
- /9/ Guddat, C.; Schreiber, E. (2004): Landessortenversuche in Thüringen 2002 bis 2004 – Winterweizen. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Eigenverlag, Jena, 42 S.
- /10/ Guddat, C.; Schreiber, E. (2004): Landessortenversuche in Thüringen 2002 bis 2004 – Wintergerste (mehrzeilig). Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Eigenverlag, Jena, 42 S.
- /11/ Guddat, C.; Schreiber, E. (2004): Landessortenversuche in Thüringen 2002 bis 2004 – Wintergerste (zweizeilig). Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Eigenverlag, Jena, 42 S.
- /12/ Guddat, C.; Schreiber, E. (2004): Landessortenversuche in Thüringen 2002 bis 2004 – Wintertriticale. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Eigenverlag, Jena, 42 S.
- /13/ Guddat, C.; Schreiber, E. (2004): Landessortenversuche in Thüringen 2002 bis 2004 – Sommerhafer. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Eigenverlag, Jena, 42 S.
- /14/ Guddat, C.; Schreiber, E. (2004): Landessortenversuche in Thüringen 2002 bis 2004 – Winterroggen. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Eigenverlag, Jena, 42 S.