



**Felduntersuchung des „Biokompakt[®] - AWK 45 SI“
zum Nachweis der Genehmigungsfähigkeit im Bereich
dezentraler Wärmeerzeugungsanlagen < 1 MW_{th} am
Standort Bernburg**

Abschlussbericht

gefördert durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe

FKZ: 22019403

Projektlaufzeit 15.11.2004 bis 30.11.2006

Projektleitung und Bericht:

Dr. Ute Bauermeister

Forschungs- und Beratungszentrum für Maschinen- und Energiesysteme e.V.,
Arbeitskreis Ökologische Stoffverwertung (FBZ e.V., AK FÖST)
Weinbergweg 23, 04205 Halle, Tel./Fax: 0345-5583-705/-706
e-mail: Bauermeister-FBZ@t-online.de, www.FBZ-Merseburg.de

Projektpartner:

Anlagenstandort	Lehr- und Versuchsgut (LVG) der Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau (LLFG) des Landes Sachsen-Anhalt, Betreuer: Dr. Rumpler, 03471/334-241
Biomassekessel	Fa. Dieter Schulenburg (Lieferant) Sandau/Elbe Ernst Gerlinger (Entwickler und Hersteller), Waldhausen (A)
Messinstitut	Landesamt für Umweltschutz (LAU) des Landes Sachsen-Anhalt, Halle/S., Fachgebiet 33

Halle/Saale, 08.08.2007

Inhalt

1. ZIELSTELLUNG UND AUFGABEN DES VORHABENS	6
1.1 Zielstellung	6
1.2 Aufgaben	7
2. ERRICHTUNG UND INBETRIEBNAHME DES BIOMASSEKESSELS	8
2.1 Auswahl und Eignung des Biokompakt-Kessels	8
2.2 Standortvorbereitung	9
2.3 Genehmigungsrechtliche Vorbereitung	12
2.4 Installation und Inbetriebnahme des Kessels	12
3. DURCHFÜHRUNG DER FELDMESSUNGEN	16
3.1 Messprogramm	16
3.2 Betriebserfahrungen der ersten Messperiode (Wintergerste)	17
3.3 Betriebserfahrungen mit dem Vergleichsbrennstoff (Holzpellets)	20
3.4 Betriebserfahrungen der 2. Heizperiode mit Referenzbrennstoffen	22
4. ERGEBNISSE DER EMISSIONSMESSUNGEN IM VERGLEICH	26
4.1 Kontinuierlich erfasste gas- und dampfförmige Emissionen	26
4.2 Diskontinuierlich erfasste gas- und dampfförmige Emissionen	30
4.3 Partikelförmige Emissionen - Gesamtstaub	32
4.4 Staubinhaltsstoffe	33
4.5 Feinstaubverteilung	36
4.6 Hochtoxische Inhaltsstoffe	36
5. STOFF- UND ENERGIEBILANZEN	38
5.1 Brennstoff- und Ascheanalytik	38
5.2 Massenbilanz	41
5.3 Energiebilanzbilanz	46
6. WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG	47
6.1 Bedienungs- und Wartungsaufwand	47
6.2 Wirtschaftlichkeit für den Biokompakt® AWK 45 SI mit Getreide	53
7. ZUSAMMENFASSUNG	56

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Prüfergebnis des „Biokompakt [®] -AWK 20“ analog der Norm EN 303-5 mit Getreide ...	9
Tab. 2: Messkomponenten und Anzahl der Proben je Brennstoffsorte	16
Tab. 3: Metall- und Halbmetalle im Staub (bez. 11% O ₂)	34
Tab. 4: Korngrößenverteilung im Staub	36
Tab. 5: Analysen der verwendeten Brennstoffe	39
Tab. 6: Analysen der Aschenproben, bezogen auf die Trockensubstanz	40
Tab. 7: Brennstoff- und Aschebilanzen im Vergleich	42
Tab. 8: Kalziumbilanz für WGI, WGII und WW (ohne Staub)	42
Tab. 9: Kaliumbilanz für WGI, WGII und WW (ohne Staub)	43
Tab. 10: Verbleib des Brennstoffstickstoffs	43
Tab. 11: Verbleib des Brennstoffschwefels	43
Tab. 12: Verbleib des Brennstoffchlors	44
Tab. 13: Energiebilanz der Feldversuche mit Getreidekorn und Holzpellets	46
Tab. 14: Spezifische Brennstoffkosten im Vergleich	53
Tab. 15: Kostenbeispiel für den Biokompakt [®] AWK 45 SI bei Getreideinsatz	55

Abbildungen

Abb. 1: Außenansicht des Kesselstandortes (mit Messwagen im Vordergrund)	10
Abb. 2: Schichtenspeicher (145 l Wasserinhalt)	10
Abb. 3: Luftkühler	11
Abb. 4: Schornstein mit Messstutzen (Sonderanfertigung)	11
Abb. 5: Brennstoffzufuhr zum Kessel.....	13
Abb. 6: Schematische Schnittzeichnung des Biokompakt-Kessels	14
Abb. 7: Austrag der Asche über eine Schnecke (hier: ohne Aschekasten)	14
Abb. 8: Inbetriebnahme des Biokompaktkessels am 11.02.2005.....	15
Abb. 9: CO-Verlauf zu Beginn der Volllast-Messungen mit WG I.....	17
Abb. 10: CO-Verlauf am Ende der Volllast-Messungen mit WG I	18
Abb. 11: ¼-Stunden-Mittelwerte der Volllast-Messungen mit WG I.....	19
Abb. 12: ¼-Stunden-Mittelwerte der Teillast-Messungen mit WG I.....	19
Abb. 13: ¼-Stunden-Mittelwerte der Volllast-Messungen mit Holzpellets	21
Abb. 14: ¼-Stunden-Mittelwerte der Teillast-Messungen mit Holzpellets.....	21
Abb. 15: ¼-Stunden-Mittelwerte der Volllast-Messungen mit Wintergerste II.....	23
Abb. 16: ¼-Stunden-Mittelwerte der Volllast-Messungen mit Winterweizen.....	24
Abb. 17: ¼-Stunden-Mittelwerte der Teillast-Messungen mit Wintergerste II	24
Abb. 18: ¼-Stunden-Mittelwerte der Teillast-Messungen mit Winterweizen.....	25
Abb. 19: ¼-Stunden-Mittelwerte der Volllast-Messungen mit Roggen	25
Abb. 20: 15-min-Mittelwerte für CO (bez. 13% O ₂) im Vergleich	26
Abb. 21: 15-min-Mittelwerte für C _{ges} (bez. 13% O ₂) im Vergleich	27
Abb. 22: 15-min-Mittelwerte für NO _x (bez. 13% O ₂) im Vergleich.....	27
Abb. 23: 15-min-Mittelwerte für SO ₂ (bez. 13% O ₂) im Vergleich.....	28
Abb. 24: 30-min-Mittelwerte für CO (bez. 11% O ₂) im Vergleich	28
Abb. 25: 30-min-Mittelwerte für C _{ges} (bez. 11% O ₂) im Vergleich	29
Abb. 26: 30-min-Mittelwerte für NO _x (bez. 11% O ₂) im Vergleich.....	29
Abb. 27: 30-min-Mittelwerte für SO ₂ (bez. 11% O ₂) im Vergleich.....	30
Abb. 28: HCl-Emissionen (bez. 11% O ₂) im Vergleich	30
Abb. 29: BTX-Emissionen (bez. 11% O ₂) im Vergleich	31
Abb. 30: Benzol-Emissionen (bez. 11% O ₂) im Vergleich	31
Abb. 31: Staubemissionen (bez. 13% O ₂) im Vergleich	32
Abb. 32: Staubemissionen (bez. 11% O ₂) im Vergleich	33
Abb. 33: Ausgewählte Staubinhaltsstoffe (bez. 11% O ₂) im Vergleich	35
Abb. 34: Quecksilbergehalt im Staub (bez. 11% O ₂) im Vergleich	35
Abb. 35: Feinstaubverteilung (bez. 11% O ₂) im Vergleich.....	36

Abb. 36: Dioxine/Furane (bez. 11% O ₂) im Vergleich	37
Abb. 37: Polychlorierte Biphenyle (bez. 11% O ₂) im Vergleich	37
Abb. 38: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (bez. 11% O ₂) im Vergleich	38
Abb. 39: Ausgewählte Inhaltsstoffe der Brennstoffe im Vergleich	41
Abb. 40: Verbleib des Brennstoffstickstoffs.....	44
Abb. 41: Verbleib des Brennstoffschwefels.....	45
Abb. 42: Verbleib des Brennstoffchlors.....	45
Abb. 43: Wirbelbrennkammer mit Roggen bei Volllast, 45 kW	48
Abb. 44: Wirbelbrennkammer mit Wintergerste bei Teillast, 15 kW.....	48
Abb. 45: Asche von Wintergerste bei Volllast	49
Abb. 46: Asche von Holzpellets bei Volllast.....	49
Abb. 47: Asche von Winterweizen bei Teillast	50
Abb. 48: Blick von oben in die Heizregister vor und nach der Reinigung	51
Abb. 49: Abgelagerte Staubschicht an der Seitenwand des Feinstaubraumes vor	51
dem Abgasaustritt	51
Abb. 50: Blick von oben in die Brennraumschale mit Primärluftschlitzen, Zuführschnecke und Heißluftzündrohr	52
Abb. 51: Entfernte Schichtplatten am Boden des Feinstaubraumes	52
Abb. 52: Staub- und CO-Konzentrationen der Felduntersuchungen mit Getreide.....	56

Anlagen

Messberichte:	MB 01-2005 für Wintergerste I
	MB 02-2005 für Holzpellets
	MB 02-2006 für Wintergerste II
	MB 03-2006 für Winterweizen
	MB 04-2006 für Roggen

Ausnahmegenehmigung für den Kesselbetrieb mit Getreide

Verlängerung der Ausnahmegenehmigung

1. Zielstellung und Aufgaben des Vorhabens

1.1 Zielstellung

Angesichts steigender Energiepreise und tendenziell fallender Erzeugerpreise für Agrarprodukte gewinnt die Möglichkeit, den Energiebedarf der Landwirtschaft aus eigenen nachwachsenden Rohstoffen zu decken, immer stärker an Bedeutung.

Die thermische Verwertung von Getreidekorn wäre eine solche Möglichkeit, die jedoch wegen der fehlenden Zulassung als Regelbrennstoff im Rahmen der 1. BImSchV (< 100 kW) bislang nicht zulässig ist. Technische und emissionsrechtliche Probleme bei der Verbrennung führten zu einer solchen Einschränkung, die andererseits aber auch eine zielstrebige technische Weiterentwicklung bremste. Dennoch wurde beispielsweise mit dem automatisch betriebenen Biomassekessel Biokompakt der österreichischen Firma Gerlinger eine solche Weiterentwicklung mit positivem TÜV – Gutachten vollzogen.

Ziel des Vorhabens war daher, an einem beispielhaften Prüfobjekt, dem automatischen Biomassekessel Biokompakt® - AWK 45 SI, durch Felduntersuchungen über 2 Heizperioden mit Emissionsmessungen in Voll- und Teillastzuständen sowie mit verschiedenen Getreidesorten zur genehmigungsrechtlich sicheren Beurteilung von modernen Kleinfeuerungsanlagen im Betrieb mit Getreide als Brennstoff beizutragen.

Die Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt (LLFG) hatte sich bereit erklärt, am Standort Bernburg diesen Kessel aufzustellen und für die Langzeitprüfung unter verschiedenen Brennstoff- und Belastungsbedingungen zu betreuen. Als unabhängiges Messinstitut konnte außerdem das Landesamt für Umweltschutz (LAU) gewonnen werden, das ein umfangreiches Messprogramm zur Ermittlung des Emissionsverhaltens durchführte. Das Land Sachsen-Anhalt unterstützte dieses Vorhaben letztlich durch Bereitstellung der Betreuungs- und Messleistungen durch die o.g. Landeseinrichtungen.

Das Verbundvorhaben ist ein Projekt im Rahmen eines bundesweiten Förderschwerpunktes zur energetischen Nutzung von festen Bioenergieträgern, insbesondere von Getreide, Stroh und anderen nachwachsenden Rohstoffen außer Holz sowie Felduntersuchungen zum Nachweis der Genehmigungsfähigkeit im Bereich dezentraler Wärmeerzeugungsanlagen < 1 MW_{th} unter Leitung der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Gülzow (FNR). In mehreren Forschungsprojekten und Felduntersuchungen sollte untersucht werden, ob und wie die technischen und genehmigungsrechtlichen Hemmnisse überwunden werden können.

Damit die Ergebnisse der von unterschiedlichen Aufgabenstellungen und Herangehensweisen geprägten Projekte miteinander besser vergleichbar sind, wurden die Vorhaben in diesem Förderschwerpunkt von der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) koordiniert.

1.2 Aufgaben

Ausgehend von der o.g. Zielstellung zum Nachweis der Anwendungsreife und dauerhaften Genehmigungsfähigkeit eines automatisch beschickten Biomassekessels im kleinen Leistungsbereich, sollte das Betriebs- und Emissionsverhalten des Biomassekessels Biokompakt® AWK 45 SI mit Getreidekorn über 2 Heizperioden ermittelt werden.

Es wurden folgende Schwerpunkte gesetzt:

- Ermittlung des Emissionsverhaltens bei Voll- und Teillastbetrieb in einem umfangreichen Messprogramm über die Anforderungen der 1. BImSchV hinaus
- Erfassung relevanter Betriebsparameter
- Brennstoff- und Ascheuntersuchung
- Dokumentation des Kesselbetriebsverhaltens
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die wesentlichen Arbeitsschritte im Vorhaben waren:

- (1) Vorbereitung und Installation des Biomassekessels Biokompakt® - AWK 45 SI beim Lehr- und Versuchsgut (LVG) der LLFG parallel zur aktuell installierten Ölheizung (11/04 bis 1/05)
- (2) Regulärer Kesselbetrieb in der 1. Heizperiode mit einer ersten Messperiode für 2 Brennstoffarten mit Dokumentation und Begleitung (1 – 4/05)
- (3) Auswertung der Ergebnisse der 1. Heizperiode und Vorbereitung der Untersuchungen für die 2. Heizperiode (5 – 8/05)
- (4) Regulärer Kesselbetrieb in der 2. Heizperiode mit der zweiten Messperiode für 2 weitere Brennstoffarten mit Dokumentation und Begleitung (9/05 – 4/06)
- (5) Auswertung der Ergebnisse der 2. Heizperiode, Vergleiche und Gesamtbewertung (5 – 11/06)

Die verwendeten Getreidesorten sollten möglichst einen niedrigen Eiweiß- und damit auch niedrigen Stickstoffgehalt haben. Außerdem sollten Vergleiche mit den Emissionsmessungen an den anderen untersuchten Kesseln im FNR-Förderschwerpunkt und mit anderen Brennstoffen am gleichen Kessel möglich sein.

Es wurden daher folgende Brennstoffe eingesetzt:

1. Messperiode (2005)
 - Wintergerste I (Futterqualität, aus dem regionalen Anbau)
 - Holzpellets (als Vergleichsbrennstoff für den untersuchten Kessel)
2. Messperiode (2006)
 - Wintergerste II (als Referenzbrennstoff, bereitgestellt durch die TLL)
 - Winterweizen (als Referenzbrennstoff, bereitgestellt durch die TLL)
 - Roggen (aus regionalem Anbau)

2. Errichtung und Inbetriebnahme des Biomassekessels

2.1 Auswahl und Eignung des Biokompakt-Kessels

Zur Beurteilung des Verhaltens von Stroh oder Getreidekorn bei der Verbrennung sind die Brennstoffeigenschaften von wesentlicher Bedeutung, die sich wesentlich von Holz unterscheiden. Einige wesentliche Unterschiede sollen hier grob skizziert werden:

- Unterscheidung in Form, Festigkeit, Schüttdichte und Energiedichte mit Auswirkung auf Lagerung, Dosierung und Abbrandverhalten (Vorteile von Korn gegenüber Stroh- und Holzpellets)
- Erhöhter Aschegehalt von Stroh und Getreide gegenüber Holz; durch den hohen Mineraliengehalt, insbesondere an Alkalien, sinkt der Ascheerweichungspunkt auf 800 °C und darunter (Problem der Verschlackung)
- Erhöhter Gehalt an N, Cl, S, wodurch sich u.a. Probleme hinsichtlich Korrosion (Cl) und Emission (N-Oxide) ergeben (u.a. Vorteil von Korn gegenüber Stroh da niedrigere Cl-Werte, dagegen Nachteil von Korn gegenüber Stroh wegen höherem organisch gebundenem N)
- Deutlich höhere Staubemissionen bei der Stroh- und Getreideverbrennung, wobei vor allem weniger Grob- und mehr Feinstäube anfallen.

In intensiven Entwicklungsarbeiten haben einige Kesselhersteller inzwischen technische Lösungen erarbeitet, die zu deutlich verbesserten Abbrandbedingungen und damit geringeren Emissionen führen. Hierzu gehört der von der österreichischen Fa. Ernst Gerlinger entwickelte automatisch betriebene Biomasseheizkessel vom Typ „Biokompakt[®]-AWK 45 SI“, der gleichermaßen für Holzpellets, Holzhackschnitzel und Getreidekorn geeignet ist.

Technische Maßnahmen des Biokompakt-Kessels beim Einsatz von Getreidekorn:

- Beimischung eines Verbrennungsindikators auf Kalkbasis (dadurch Erhöhung des Ascheschmelzpunktes, Vermeidung von Verschlackung und Korrosion)
- Dadurch sind hohe Verbrennungstemperaturen (ca. 1150 °C) möglich, was wiederum die Probleme zu hoher Emissionswerte für CO und C_{org} verhindert.
- Optimale Prozessführung durch intelligente Regeltechnik (ständige Überwachung und Regelung des Brennvorganges und der Betriebsparameter mittels einer Mikroprozessorregelung, Lambda-Kontrolle, automatische Brennstoffanpassung)
- Verbesserung der Verbrennungsindikatoren und des Verbrennungsregimes in der Brennkammer insbesondere zur Absenkung der NO_x - und Staubemissionen.

Die vorliegenden Emissionswerte des bereits 2002 vom TÜV Bayern Landesgesellschaft Österreich getesteten „Biokompakt[®]-AWK 20“ (für 20 kW_{th}) zeigen, dass nicht nur bezüglich CO und C_{org} sehr gute Ergebnisse erzielt wurden sondern auch zunehmend niedrigere NO_x- und Staub-Werte erreicht werden können (s. Tabelle 1).

Tab. 1: Prüfergebnis des „Biokompakt[®]-AWK 20“ analog der Norm EN 303-5 mit Getreide

Messgröße	Einheit	Emissionswert ^{1 2}
CO	mg/Nm ³	20
C _{ges}	mg/Nm ³	3
NO _x	mg/Nm ³	585
Gesamtstaub	mg/Nm ³	78

¹ Werte lt. Prüfbericht Nr. 220378-1/02 vom 20.12.02, TÜV Bayern LGÖ

² Bezugs-O₂: 13 Vol.-%; Mittelwerte (Minimalwert/Maximalwert bei Halbstunden-Messungen)

Es war daher von besonderem Interesse, das tatsächliche Emissions- und Betriebsverhalten dieses Kesseltyps im Feldtest im regulären Anlagenbetrieb zu überprüfen. Dabei sollte der „Biokompakt[®]-AWK 45 SI“ (für 45 kW_{th}) als neueste Entwicklung der österreichischen Fa. Ernst Gerlinger eingesetzt werden.

2.2 Standortvorbereitung

Der Standort im Lehr- und Versuchsgut (LVG) der LLFG in Bernburg (s. Abb. 1) wurde aus sehr praktischen Überlegungen heraus gewählt. Das separate Verwaltungsgebäude des 600 ha Marktfruchtbetriebes hat 311 m² Büro- und Nutzfläche im reinen Winterbetrieb ohne Warmwasserbereitung zu beheizen. Hierfür werden durchschnittlich 9000 l Heizöl jährlich benötigt, was für das Jahr 2005 Kosten in Höhe von etwa 4.000,- € bedeutet. Mit dem theoretischen Ansatz von 2,5 kg Getreide als Ersatz für einen Liter Heizöl sollten diese Kosten bei einem Preis von etwa 10,- €/dt auf 2250,- € reduziert werden können, also auf etwa 56%. Die hierfür benötigten 22,5 t Getreide stellen dabei rund 0,9% der Jahreserntemenge des Lehr- und Versuchsgutes selbst dar. Eine Größenordnung, die erheblich unter den durchschnittlichen Ernteverlusten liegt.

Solche Gegebenheiten lassen sich für praktizierende Landwirte aber auch für zuständige Behörden oder politisch mit der Thematik Befasste gut und erlebbar zuordnen und helfen bei der Versachlichung der Diskussion. Deshalb wurde der Wahl dieses Standortes, der gleichzeitig auch ein zentraler Tagungs- und Weiterbildungsort der LLFG und des Landes ist, auch die entsprechende Bedeutung beigemessen. So soll die Anlage nach Projektabschluss auch weiterhin der praktischen Information und Schulung aller Interessierten dienen.



Abb. 1: Außenansicht des Kesselstandortes (mit Messwagen im Vordergrund)

In Vorbereitung der Installation des automatisch betriebenen Biomassekessels Bio-kompakt® - AWK 45 SI galt es, wichtige Abstimmungen vorzunehmen, damit der Kessel für die jeweils etwa 2-wöchigen Feldmessungen möglichst optimal in Volllast und Teillast gefahren werden kann. Am Standort wurden zunächst alle baulichen Voraussetzungen geschaffen, um den Biomassekessel mit einem Getreidebunker aufnehmen zu können. Die vorhandene Ölheizung wurde für den Notfallbetrieb einsatzbereit gehalten.

Der Heizkreislauf des Kessels ist in einen Schichtenspeicher eingebunden (Abb. 2), von dem aus die Beheizung des Gebäudes erfolgt. Die Erfassung der abgegebenen Wärme erfolgt durch Wärmemengenzähler im Vor- und Rücklauf des Kessels.



Abb. 2: Schichtenspeicher (145 l Wassereinhalten)

Damit die Wärmeabnahme auch bei schwankenden Witterungsverhältnissen konstant eingestellt werden kann, wurde neben dem Schichtenspeicher zusätzlich ein Luftkühler (Heizregister mit Gebläse, Abb. 3) installiert.



Abb. 3: Luftkühler

Die Einrichtung des Messplatzes sollte nach den Vorgaben der VDI 4200 erfolgen. Hierfür wurde eine detaillierte Planung des Messplatzes und die Festlegung der Messstrecke (Anbringung der Messstutzen) in Abstimmung mit den Anforderungen des LAU durchgeführt. Die Anordnung der Messstutzen gem. Abb. 4 ist in den Messberichten (als Anlagen beigefügt) genauer beschrieben. Es kam dann vor der 2. Messreihe nochmals zu einer Anpassung, da die Einlaufstrecke für die PCDD/F-Probenahme noch nicht den Anforderungen der VDI 4200 entsprach.



Abb. 4: Schornstein mit Messstutzen (Sonderanfertigung)

Um für die Mengenzbilanzierung eine möglichst genaue Erfassung der im Messzeitraum durchgesetzten Getreidemengen zu ermöglichen, musste eine Erweiterung der Kesselsteuerung u.a. zur Umstellung des Regelbetriebes (Getreidezufuhr aus Vorratsbunker) auf den Messbetrieb (exakt gewogene Getreidemengen aus dem Tagesbehälter) und zur staubarmen Reinigung (manuelle Regelung Gebläse) vorgesehen werden.

Damit ergaben sich zusätzliche Anforderungen an die Einrichtung des Messplatzes und an die Steuerungs- und Bedientechnik des Kessels sowie an eine konstante Wärmeabnahme im Vollast- und Teillastbetrieb, die im üblichen Kesselbetrieb nicht erforderlich sind.

2.3 Genehmigungsrechtliche Vorbereitung

Damit der Biomassekessel für die Feldversuche mit Getreidekorn gefahren werden kann, musste eine Ausnahmegenehmigung nach § 20 der 1. BImSchV beantragt werden. Um den engen zeitlichen Rahmen bis zur ersten Heizperiode einzuhalten, wurde nach Projektbeginn eine Beratung mit dem Landkreis und der örtlichen Genehmigungsbehörde und wichtigen Projektbeteiligten durchgeführt. Das persönliche Gespräch war sehr wichtig, um das Anliegen der Feldversuche mit Getreidekorn zu verdeutlichen und die vorhandenen, stark ausgeprägten Vorbehalte, die zu diesem Zeitpunkt noch bestanden, auszuräumen.

Die Ausnahmegenehmigung wurde am 27.01.2005 erteilt und war befristet für die Heizperioden 2005 (1. Halbjahr) und 2005/2006, wobei die Grenzwerte nach 1. BImSchV eingehalten werden müssen. Eine Verlängerung der Ausnahmegenehmigung wurde nach Vorlage der Messergebnisse bis zur Heizperiode 2007/2008 erteilt. Die Bescheide des Umwelt- und Straßenbauamtes des Landkreises Bernburg sind als Anlagen beigefügt.

Für die Genehmigung wurden ein Nachweis über die Getreideherkunft sowie eine Brennstoffanalyse gefordert, um belegen, dass sich das verwendete Getreide nicht mehr in der Nahrungskette befindet und unbelastet ist. Es war daher erforderlich, das erste zu untersuchende Getreide (Wintergerste, Futterqualität) zu beschaffen, noch bevor die erste koordinierende Beratung aller Projekte im Förderschwerpunkt stattfand. Daher konnte noch nicht auf die erst im Frühjahr 2005 erfolgte Abstimmung zur Verwendung einheitlicher Referenzbrennstoffe eingegangen werden.

2.4 Installation und Inbetriebnahme des Kessels

Der Ende Januar 2005 gelieferte Heizkessel „Biokompakt – AWK 45 SI“ ist für einen thermischen Leistungsbereich von 15 – 45 kW ausgelegt. Er ist gleichermaßen für Holzpellets, Hackschnitzel und Getreide geeignet und mit einer automatischen Brennstoffbeschickung und Entaschung ausgestattet. Die für den jeweiligen Brennstoff, d.h. auch für unterschiedliches Getreidekorn, erforderlichen Einstellungen des Kessels (Pausenzeite, Schubzeiten, etc.) werden zunächst manuell bzw. vom Hersteller voreingestellt. Die optimalen brennstoffspezifischen Betriebsparameter werden dann im Computer des Kessels gespeichert, um sie bei Wechsel des Brennstoffs wieder abrufen zu können. Die Anlage kann im Leistungsbereich zwischen 30% und 100% automatisch geregelt werden.

Für die Feldmessungen wurde das Getreide dem Kessel über eine Brennstoffschnecke aus dem Tagesbehälter zugeführt. In Abb. 5 ist sowohl die Zufuhrstrecke aus dem Vorratsbunker als auch der Tagesbehälter zu sehen.

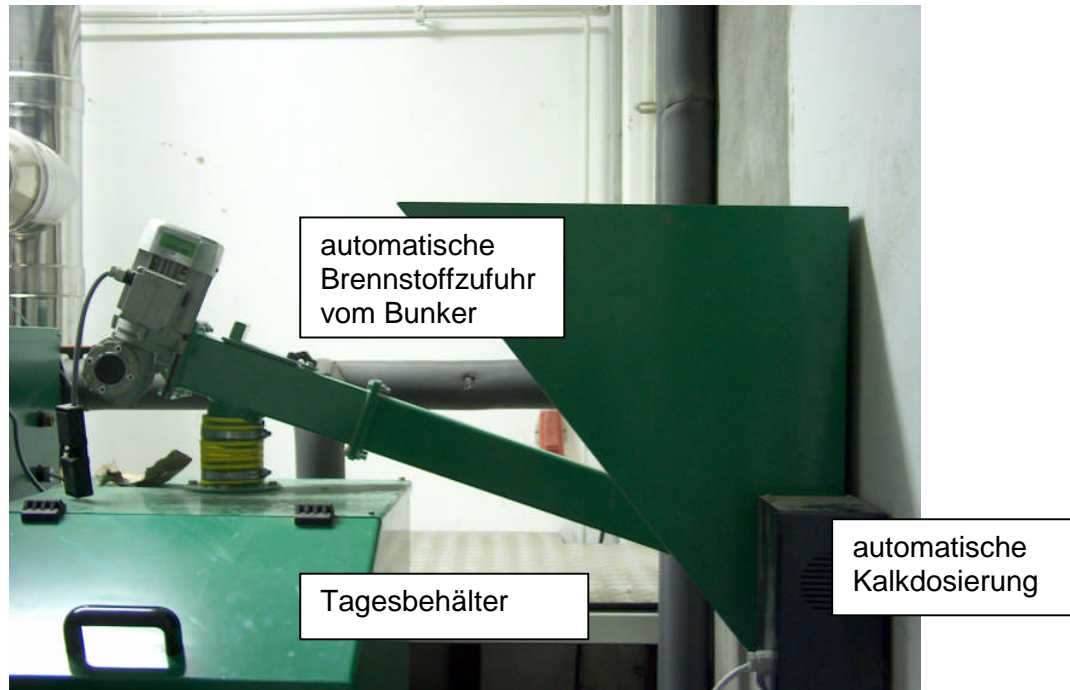


Abb. 5: Brennstoffzufuhr zum Kessel

Das Getreide gelangt in die heiße Brennkammer und verbrennt (verschwelt) dort. Ein geregelter Primärlüfter bläst durch Bohrungen in der Schamotteauskleidung vorgewärmte Verbrennungsluft in die Brennkammer. Oberhalb der Brennkammer befindet sich die Wirbelbrennkammer, in die vorgewärmte Verbrennungsluft über den geregelten Sekundärlüfter zur optimalen Verbrennung der Schwelgase eingeblasen wird (Abb. 6). Über die nachgeschalteten Heitzaschen wird die Wärme an das Heizungswasser übertragen.

Am Ende des Kessels befindet sich ein geregelter Abgaslüfter, der das Abgas in den Kamin fördert. Die Asche wird periodisch über ein Schnecke aus der Brennkammer in einen Aschebehälter ausgetragen (s. Abb. 7).

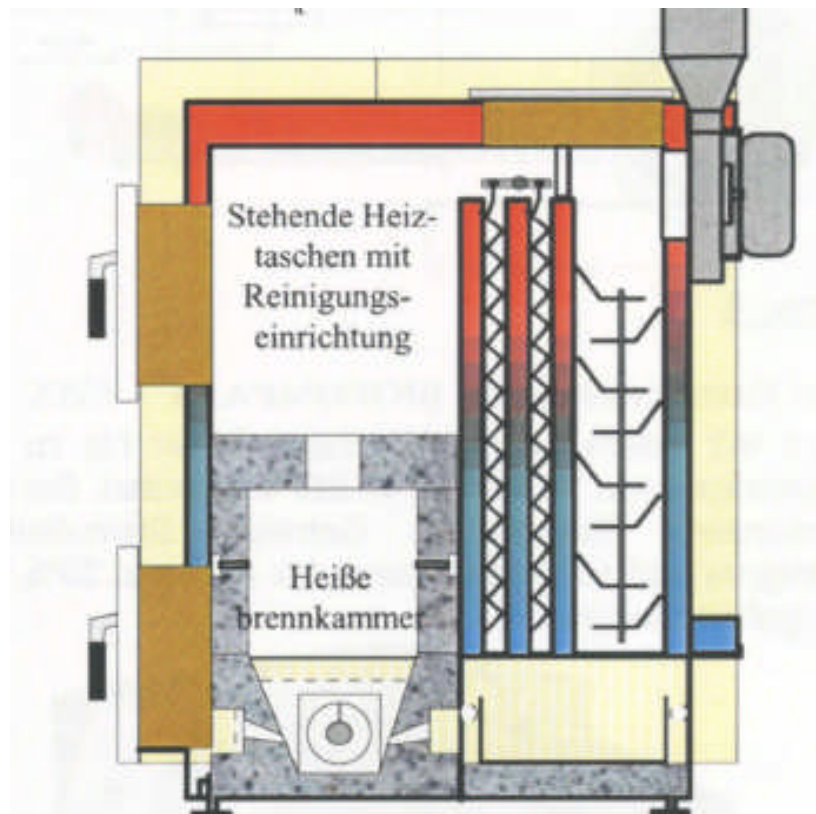


Abb. 6: Schematische Schnittzeichnung des Biokompakt-Kessels



Abb. 7: Austrag der Asche über eine Schnecke (hier: ohne Aschekasten)

Die Verbrennung wird über eine Mikroprozessorregelung in Verbindung mit einer Lambdasonde reguliert. Hierzu werden permanent die Parameter Sauerstoffgehalt, Abgastemperatur, Kesseltemperatur und Aufheizgeschwindigkeit ermittelt und für die Steuerung der Brennstoffzufuhr entsprechend der Leistungsabnahme verrechnet.

Dies trägt zu einer schadstoffarmen Verbrennung und einem sparsamen Heizbetrieb bei.

Durch die Beimischung eines kalkhaltigen Indikators zum Brennstoff Getreide soll bei einer Temperatur von etwa 1150 °C in der Brennkammer eine nachteilige Schlackebildung verhindert werden. Die Kalkdosierung erfolgt bei Brennstoffzufuhr aus dem Vorratsbunker durch den automatischen Kalkdosierer. Dies konnte für die Messungen selbst nicht genutzt werden. Der Kalk wurde entsprechend abgewogen (2%) und der Charge im Tagesbehälter untergemischt.

Nachdem der Kessel am 08.02.2005 in Betrieb genommen und durch den Hersteller Herrn Gerlinger auf den Brennstoff Getreide eingestellt wurde, erfolgte die offizielle Inbetriebnahme des Kessels am 11.02.2005, wobei das Getreide direkt aus dem Bunker in den Kessel gefördert wurde.



Abb. 8: Inbetriebnahme des Biokompaktkessels am 11.02.2005
(mit Herrn Gerlinger und Herrn Schulenburg im Vordergrund)

3. Durchführung der Feldmessungen

3.1 Messprogramm

Das vorgesehene Messprogramm sollte weit über die Anforderungen der 1. BImSchV hinausgehen und weitgehend den Anforderungen TA Luft entsprechen. Daher wurde folgendes Messprogramm für insgesamt 3 Getreidesorten und 1 Vergleichsbrennstoff (Holzpellets) bei Voll- und Teillast vereinbart:

Tab. 2: Messkomponenten und Anzahl der Proben je Brennstoffsorte

	Volllast	Teillast
CO, NO _x , SO ₂ , C _{ges} , O ₂ , CO ₂	kontinuierlich	kontinuierlich
Staub		3
Staub u. Staubinhaltsstoffe (K, Ca, Mg, As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Tl, V, Zn)	3	
Staub und Staubinhaltsstoffe (Hg)	3	
Feinstaub (PM _x -Werte)	3	3
HCl	3	3
Benzol (BTX)	3	3
PCDD/F, PAH und PCB	3	1

Die Durchführung der Emissionsmessungen erfolgte durch das Landesamt für Umweltschutz des Landes Sachsen-Anhalt (LAU). Weiterhin ermittelte das LAU die Abgasrandbedingungen (T, p, Φ, w) sowie weitere Betriebsparameter und führte die Brennstoff- und Ascheprobeahme durch.

Die gemessenen Schadstoffkonzentrationen wurden gemäß TA Luft auf 11 Vol.-% Sauerstoff bezogen. Um die Vergleichbarkeit der Messergebnisse mit den Emissionsgrenzwerten der 1. BImSchV zu gewährleisten, wurden für CO und Staub die Messwerte zusätzlich auf 13 Vol.-% Sauerstoff bezogen.

Die ausführliche Beschreibung der Mess- und Analysenverfahren, der Probenahme und Abgasrandbedingungen ist in den umfangreichen Messberichten MB 01-2005, MB 02-2005, MB 02-2006 und MB 03-2006, (s. Anlagen) nachzulesen.

Für das nachträglich und zusätzlich ins Messprogramm aufgenommene Roggenkorn wurde nur ein Kurzprogramm durchgeführt (Messbericht MB 04-2006).

3.2 Betriebserfahrungen der ersten Messperiode (Wintergerste)

Der Kessel sollte mindestens eine Woche mit der Wintergerste (WG I) eingefahren werden. Durch den ersten Getreidekorneintrag in den Vorratsbunker mittels Druckluft kam es zur teilweisen Zerschrotung der Körner, wodurch der Staubanteil erheblich anstieg. Das Material wurde daher wieder entfernt, der Kessel vor der ersten Messung gründlich gereinigt und 2 Tage vor Beginn der Messungen mit unzerstörten Körnern betrieben (Zuführung aus dem Tagesbehälter). Vor dem Messbeginn wurde am 21.02.05 der Kessel nochmals gereinigt.

Im Messbetrieb (22.02.05 bis 07.03.05) traten besonders anfangs bei den Volllastmessungen (22.02. bis 02.03.05) noch stärkere Schwankungen in den Kesseldaten (thermische Leistung, λ -Wert, Abgastemperatur, Lüfterbetrieb) auf, bedingt durch Änderungen im Fahrregime wie z.B. der Einstellung der Entschungszeiten und der Einschubzeiten des Brennstoffs. Während der Teillastmessungen vom 03.03.05 bis 07.03.05 konnten der Entschungsrythmus und die Schubzeiten für die Brennstoffzufuhr konstant gehalten werden.

Es zeigte sich weiterhin, dass die kontinuierliche Wärmeabnahme trotz des Wärmespeichers und des zusätzlichen Luftkühlers vor allem im Volllastbetrieb nicht immer gewährleistet werden konnte. Es wurde daher vorgesehen, für die nächste Messperiode noch einen wassergekühlten Plattenwärmetauscher einzusetzen.

Diese Anfangsschwierigkeiten führten auch zu einem etwas schlechteren Emissionsverhalten insbesondere bei Kohlenmonoxid. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den Verlauf der CO-Emissionen zu Beginn und am Ende der Volllast – Messungen.

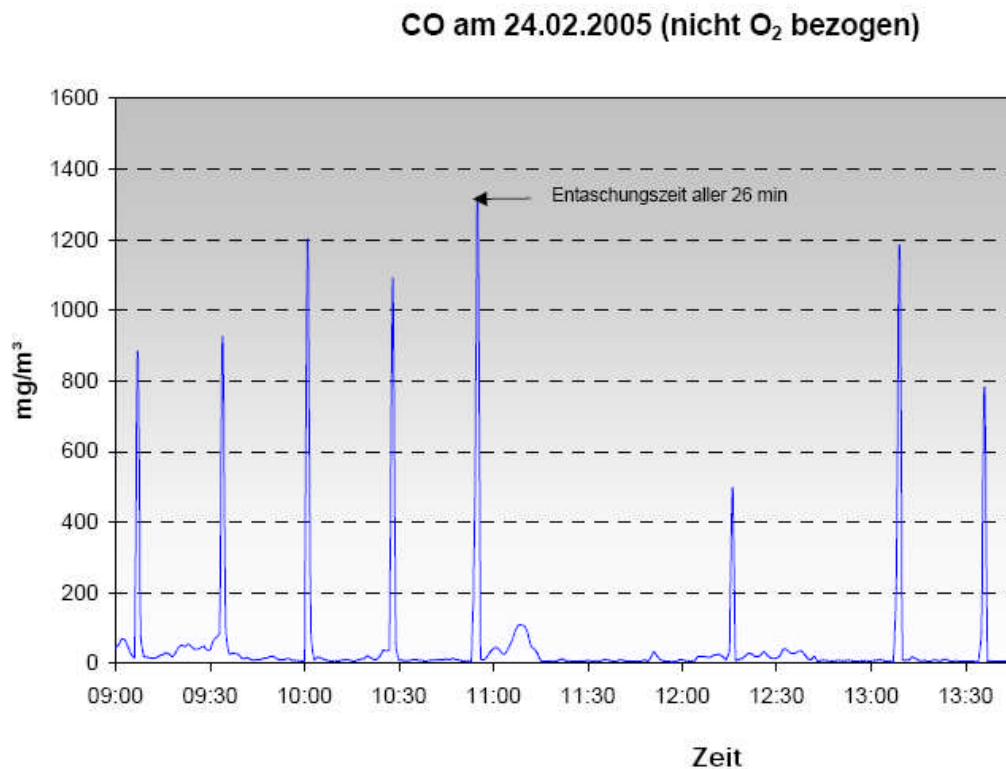


Abb. 9: CO-Verlauf zu Beginn der Volllast-Messungen mit WG I

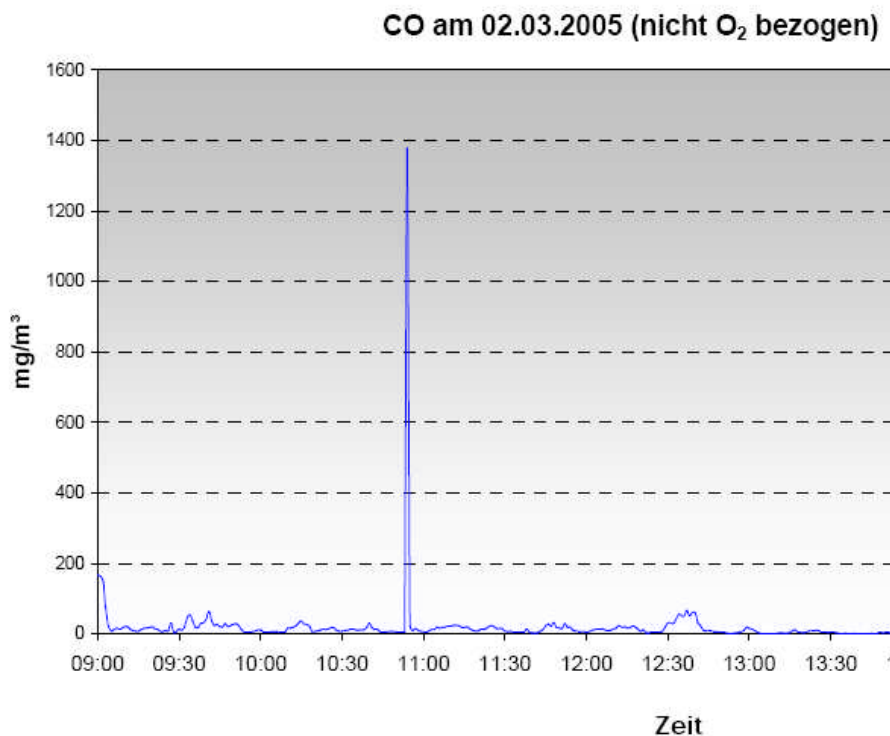


Abb. 10: CO-Verlauf am Ende der Volllast-Messungen mit WG I

Zu den CO-Spitzen kam es u.a. im Zuge der Entaschungszeiten durch einen Einbruch im Glutbett. Diese konnten durch verbesserte Kesseleinstellungen zum Ende der Messperiode deutlich vermindert werden.

Mit den CO-Spitzen sind auch etwas höhere Staubemissionen verbunden. Es wurden insgesamt 6 Staubmessungen durchgeführt. Nur der erste der 6 Messwerte (Halbstundenmittelwerte, Bezug 13 Vol.-% O₂) lag jedoch mit 0,165 g/m³ über dem Emissionsgrenzwert der 1.BImSchV. In allen weiteren Messungen mit diesem und weiterem Getreidekorn wurden niedrigere Werte meist unter 0,13 g/m³ gemessen.

Es zeigt sich damit, wie wichtig die optimale Kesseleinstellung für ein emissionsarmes Abbrandverhalten ist. Grundsätzlich kann jedoch trotz der Anfangsschwierigkeiten in der Einfahrphase die Eignung des Biokompaktkessels für Getreide mit guten Emissionswerten bestätigt werden. Durch die Kalkbeimischung konnte eine Schlackebildung weitgehend vermieden werden. Störungen durch Schlackebildung traten nicht auf.

Die nachstehenden Abbildungen zeigen die ¼-Stunden-Mittelwerte der kontinuierlich gemessenen Parameter während der Vollzeitmessungen vom 22.02. bis 02.03.05 bzw. während der Teillastmessungen vom 03.03.05 bis 07.03.05.

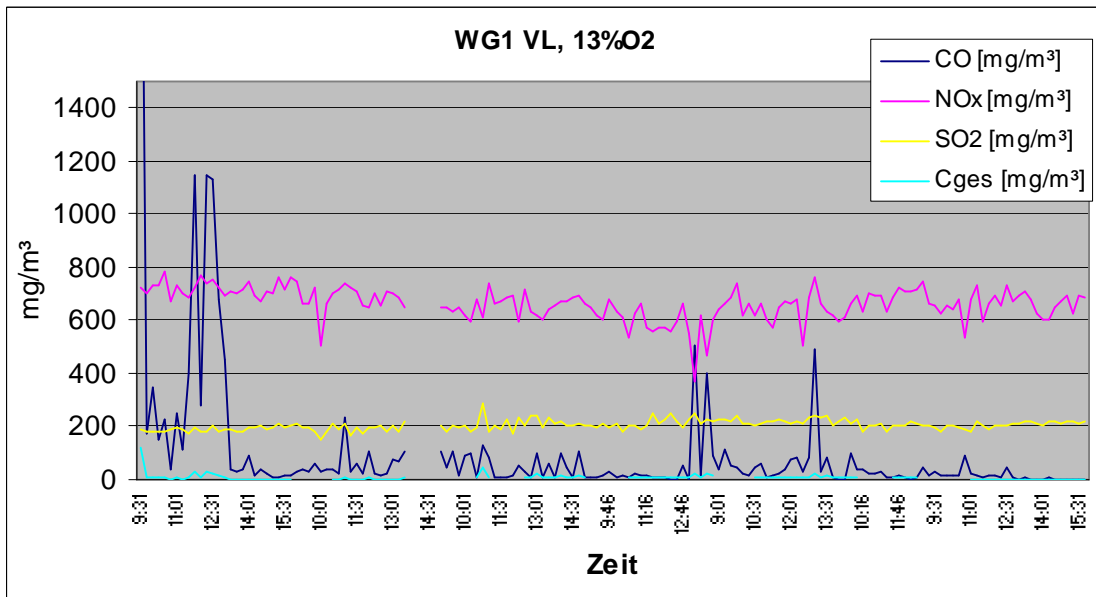


Abb. 11: ¼-Stunden-Mittelwerte der Volllast-Messungen mit WG I

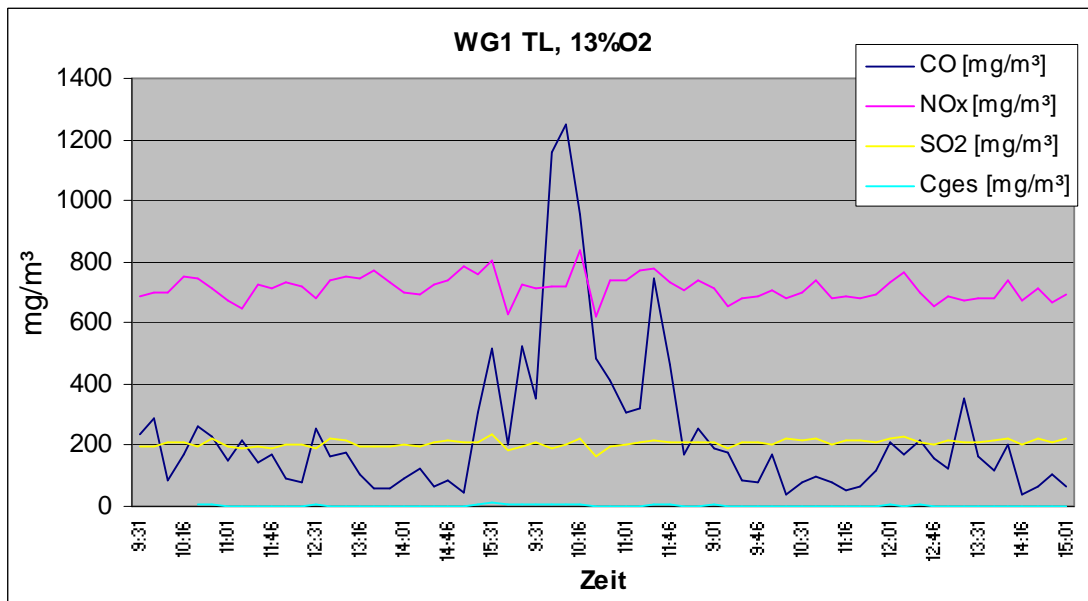


Abb. 12: ¼-Stunden-Mittelwerte der Teillast-Messungen mit WG I

Der Kessel wurde während der Volllastmessungen mit einer mittleren Leistung von 38 kW (84% der installierten Leistung) und während der Teillastmessungen mit einer mittleren Leistung von 21 kW (47% der installierten Leistung) betrieben, und entsprach somit dem Anforderungen im Projekt.

Insgesamt wurden von der Inbetriebnahme am 08.02. (17.00 Uhr) bis 15.03.05 (8.40 Uhr) 5.191 kg Wintergerste im Kessel verbrannt. Zusätzlich wurde Kalk (CaO) mit 2% (104 kg) zudosiert, der gesamte Ascheanfall lag bei 176 kg (3,3% bezogen auf Brennstoff + Kalk).

Die bei den Volllastmessungen durchgesetzte Getreidemenge betrug im Mittel 11,2 kg/h, das entspricht 3,4 kWh/kg. Bei den Teillastmessungen wurde ein Brennstoffverbrauch von 6,6 kg/h ermittelt, was einer spezifischen Wärmeerzeugung von 3,18 kWh/kg entspricht (s. MB 01-2005).

Die exakte zeitliche Zuordnung der anfallenden Asche zu Volllast- und Teillastbetrieb war nicht möglich, da eine völlige Entaschung vor und nach jeder Messung nicht möglich ist (die Asche kommt verzögert im Aschekasten an) bzw. den Kesselbetrieb unzulässig stört (Zerstörung des Glutbettes).

Während der Messungen durch das LAU wurden Ascheproben für jeden Versuchstag aus dem Aschebehälter entnommen. Die Untersuchung einer Brennstoffprobe und einer Ascheprobe erfolgte jeweils im Prüflabor des DBI (Deutsches Brennstoffinstitut Freiberg) bzw. zusätzlich bezügl. der Dioxine und Furane im LAU.

3.3 Betriebserfahrungen mit dem Vergleichsbrennstoff (Holzpellets)

Da für die Feldmessungen im März /April 2005 bereits mit wärmeren Tagen und geringer Wärmeabnahme zu rechnen war, wurde in diesem Zeitraum vom Kessellieferanten / Hersteller ein Plattenwärmetauscher (Wasser als Kühlmedium) leihweise zur Verfügung gestellt, der bei Bedarf parallel zum Luftkühler betrieben werden konnte, um alle anfallende Wärme abführen zu können. Am 15.03.05 erfolgten nach Erlöschen des Getreidebrandes die Grundreinigung und das Kehren des Schornsteines. Danach wurde mit Holzpellets wieder angeheizt.

Im Messbetrieb (21.03.05 bis 13.04.05) mit Holzpellets waren die Schub- und Pausenzeiten für den Brennstoff niedriger eingestellt als bei dem Getreidekorn. Die automatische Entaschung wurde nach dem ersten Messtag ausgeschaltet, da der Aufbau des Glutstockes gestört wurde. Die Asche wurde nach den Messungen abends und morgens vor Beginn durch manuelle Betätigung ausgelesen. Dies erfolgte bis zum Anfall der ersten Glut im Aschekasten, was eine Ursache für den gemessenen höheren C-Gehalt sein kann.

Zur Absicherung der kontinuierlichen Wärmeabnahme insbesondere für die Volllastmessungen hat sich der zusätzliche Wärmetauscher bewährt.

Der Kessel wurde während der Volllastmessungen mit einer mittleren Leistung von 40 kW und während der Teillastmessungen mit einer mittleren Leistung von 22 kW betrieben.

Insgesamt wurden während des Betriebs des Kessels mit Holzpellets vom 15.03.05 (11.30 Uhr) bis 14.04.05 (10.30 Uhr) 2120 kg Holzpellets mit 7624 kWh im Kessel verbrannt. Der Ascheanfall betrug 9,12 kg (ca. 0,4%), der aber nur ungenau ermittelt werden konnte, da auch Unverbranntes mit der Schnecke ausgelesen wurde (C-Gehalt in der Asche 30%, s. Tab. 7, Kap. 5.2).

Die bei den Volllastmessungen durchgesetzte Holzmenge betrug im Mittel 10,4 kg/h, das entspricht 4 kWh/kg. Bei den Teillastmessungen wurde ein Brennstoffverbrauch von 5,7 kg/h ermittelt, was einer spezifischen Wärmeerzeugung von 3,9 kWh/kg entspricht (s. MB 02-2005).

Die exakte zeitliche Zuordnung der anfallenden Asche zu Volllast- und Teillastbetrieb war auch hier nicht möglich. Die Ascheproben im Messbetrieb wurden morgens vor

dem manuell gesteuerten Entaschen genommen, so dass die abgekühlte Asche des Vortages beprobt wurde.

Die Untersuchung einer Brennstoffprobe und einer Ascheprobe erfolge wiederum im Prüflabor des DBI (Deutsches Brennstoffinstitut Freiberg) bzw. zusätzlich bezügl. der Dioxine und Furane im LAU.

Die gemessenen CO- und Staub-Mittelwerte lagen zwar insgesamt deutlich unter den beim Getreide (WG I) gemessenen Werten, aber auch hier fallen einzelne, sogar deutlich höhere Spitzenwerte für CO und C_{ges} auf. Dies ist vor allem bei den Volllastmessungen zu sehen.

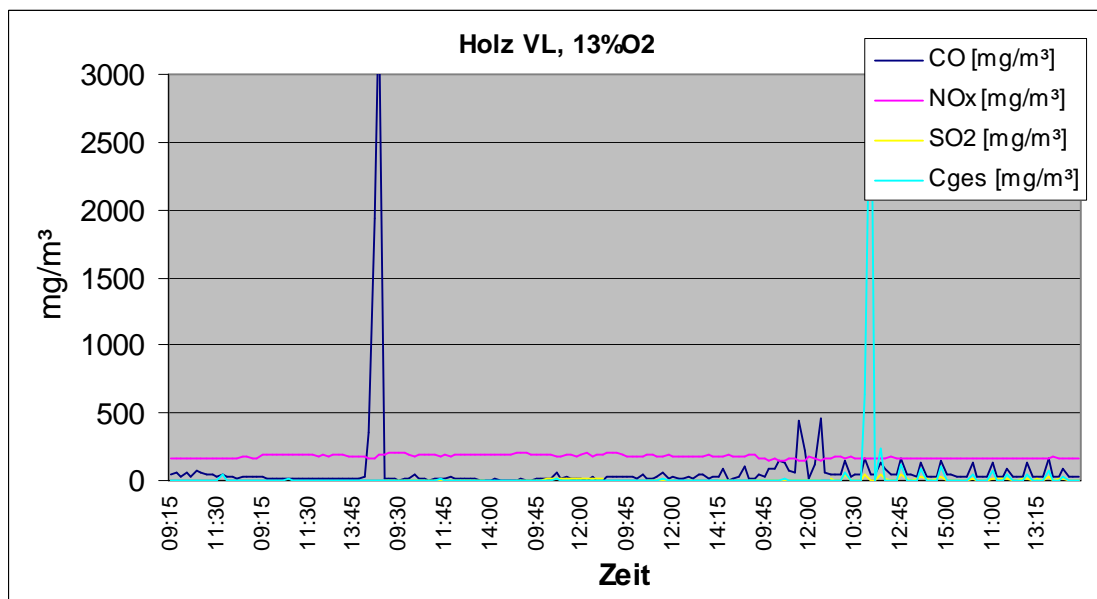


Abb. 13: ¼-Stunden-Mittelwerte der Volllast-Messungen mit Holzpellets

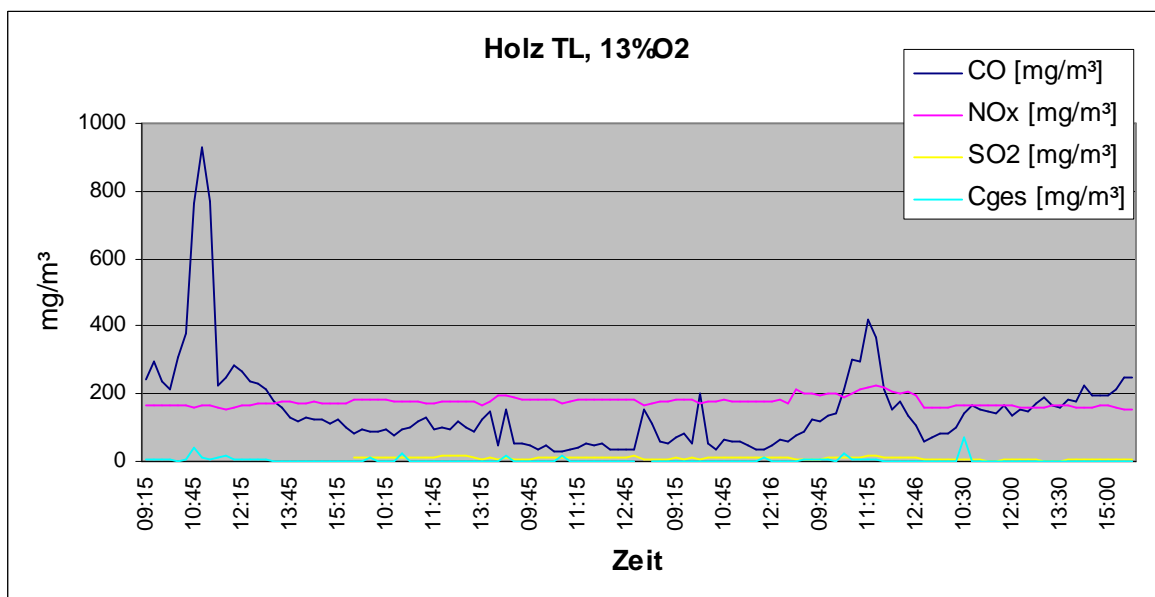


Abb. 14: ¼-Stunden-Mittelwerte der Teillast-Messungen mit Holzpellets

Auch hier handelt es sich letztlich um ungünstige Betriebszustände, die durch den Einbruch des Glutbettes während der Entaschungszyklen vereinzelt auftreten können. Sichtbar wird ein solcher Einbruch durch eine kurzzeitige Rauchentwicklung am Schornstein.

Hingegen wurden beim Betrieb des Kessels mit Getreide (WG I) sowohl im Teillast- als auch im Volllastbetrieb trotz häufiger Parameteranpassungen keine auffälligen Störungen im unmittelbaren Umfeld (Rauchentwicklung, Geruch) festgestellt. Bei guter Verbrennung sind die Abgase kaum sichtbar und gegenüber Holzpellets offensichtlich auch weniger rußend.

Aufgrund von Fehlern bei der Analyse bzw. unplausibler hoher Messwerte für BTX bzw. hochtoxische Inhaltsstoffe wurden hierfür Wiederholungsmessungen für 2006 vorgesehen. Die Ergebnisse sind im Messbericht MB 02-2005 mit aufgenommen und entsprechend datiert.

3.4 Betriebserfahrungen der 2. Heizperiode mit Referenzbrennstoffen

In der 2. Heizperiode sollten die inzwischen von der TTL bereitgestellten Getreide-Referenzbrennstoffe

- Wintergerste (WG II)
- Winterweizen (WW)

untersucht werden. Start der Feldmessungen sollte der 23.01.2006 sein.

Der Kessel wurde zuvor gründlich gereinigt und ca. 1 Woche mit dem Referenzbrennstoff eingefahren. Vor Messbeginn erfolgte die Umstellung vom Vorratsbunker und der automatischen Kalkdosierung auf den Tagesbehälter und die manuelle Kalkdosierung (Wägung).

Eine neue Ascheaustragsschnecke wurde installiert, um die CO-Spitzen bei der Entaschung zu vermeiden.

Eine bessere Wärmeabnahme wurde durch einen Plattenwärmetauscher gewährleistet, der bei Bedarf (hohe Außentemperaturen, geringe Wärmeabnahme) dazu geschaltet wurde.

Die Kennlinie für jeden Brennstoff (Einstellung der Kesseldaten, Brennstoffzufuhr, Entaschungszyklen) wurden vor der Messperiode getestet und fest eingestellt.

Durchführung:

- 1 Woche Einfahren mit WG II, Reinigung des Kessels
- Messprogramm für Referenzbrennstoff 1 (WG II) vom 23.01.06 bis 07.02.06
- 1 Woche Einfahren mit dem WW, Reinigung des Kessels
- Messprogramm für Referenzbrennstoff 2 (WW) vom 23.02.06 bis 07.03.06
- 1 Tag Einfahren mit Roggen, Reinigung des Kessels
- 1 Tag Online-Messungen mit Roggen (09.02.2006)

- Einfahren mit Holzpellets und Reinigung des Kessels
- Wiederholungsmessungen mit den Holzpellets vom 20. bis 22.03.06

Die Untersuchung einer Brennstoffprobe und einer Ascheprobe erfolge jeweils im Prüflabor des DBI (Deutsches Brennstoffinstitut Freiberg) bzw. zusätzlich bezügl. der Dioxine und Furane im LAU. Zusätzlich wurden Ascheproben zur Analyse an die TTL übergeben.

Für die Volllast- und Teillastmessungen wurden entsprechend den Anforderungen des Projektes mit folgenden mittleren Leistungen gefahren:

WG II:	38,5 kW (Volllast) und 20,7 kW (Teillast)
WW:	41 kW (Volllast) und 22 kW (Teillast)
Roggen:	43 kW (nur Volllast)

Am Beispiel der ¼-Stundenmittelwerte für CO im Volllastbetrieb bei WGII und WW wird deutlich, dass mit der individuellen Einstellung der Betriebsbedingungen für jeden Brennstoff auch optimale Abbrandbedingungen erreicht werden konnten. Es wurden keine Emissionsspitzen wie in der ersten Heizperiode gemessen.

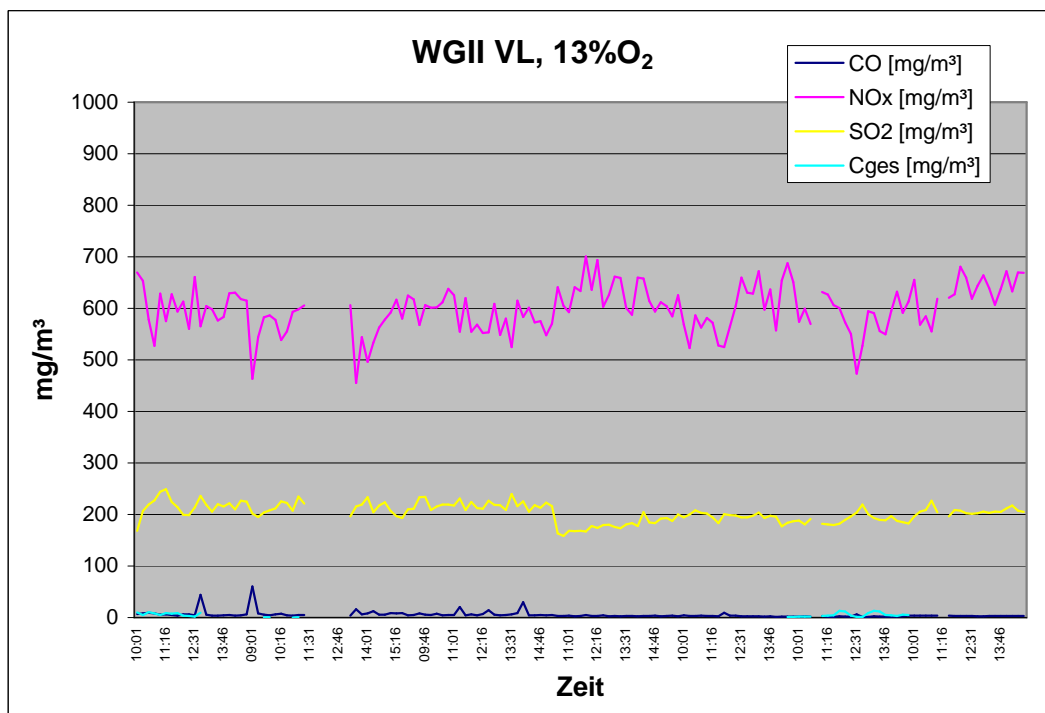


Abb. 15: ¼-Stunden-Mittelwerte der Volllast-Messungen mit Wintergerste II

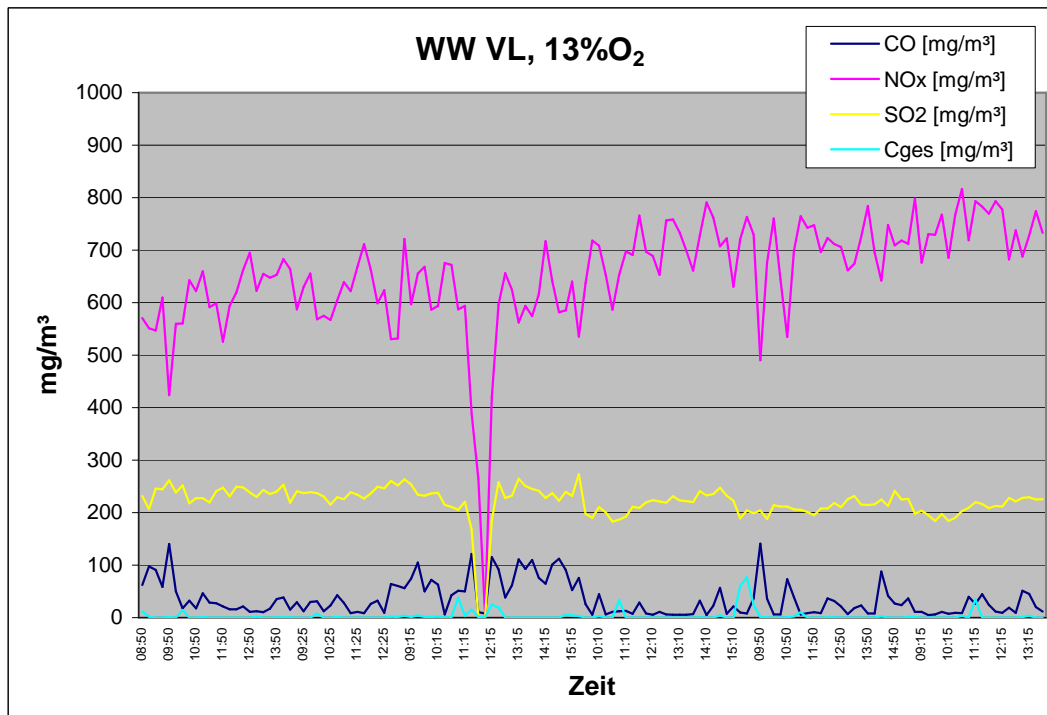


Abb. 16: ¼-Stunden-Mittelwerte der Volllast-Messungen mit Winterweizen

Im Teillastbetrieb sind die CO-Werte i.A. etwas schlechter, da die Abbrandbedingungen etwas ungünstiger sind. Es ist generell vorteilhaft, den Biomassekessel soweit wie möglich im Volllastbetrieb zu fahren, und bei geringer Wärmeabnahme unter Ausnutzung des Pufferspeichers z.B. nur eine Glutbeterhaltung zu realisieren.

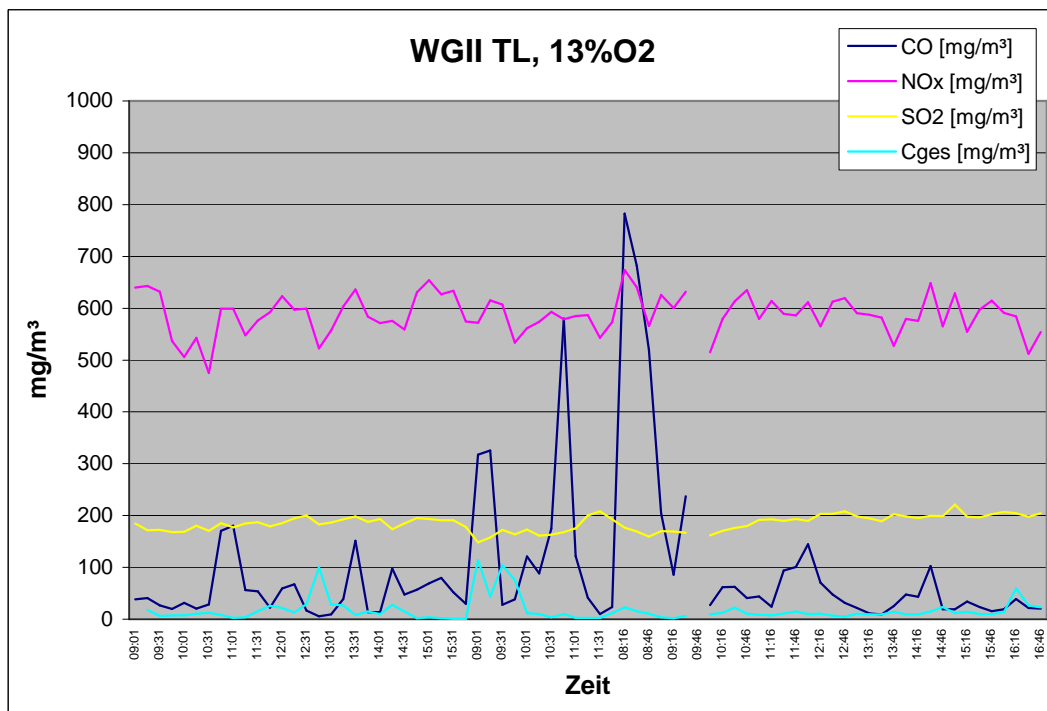


Abb. 17: ¼-Stunden-Mittelwerte der Teillast-Messungen mit Wintergerste II

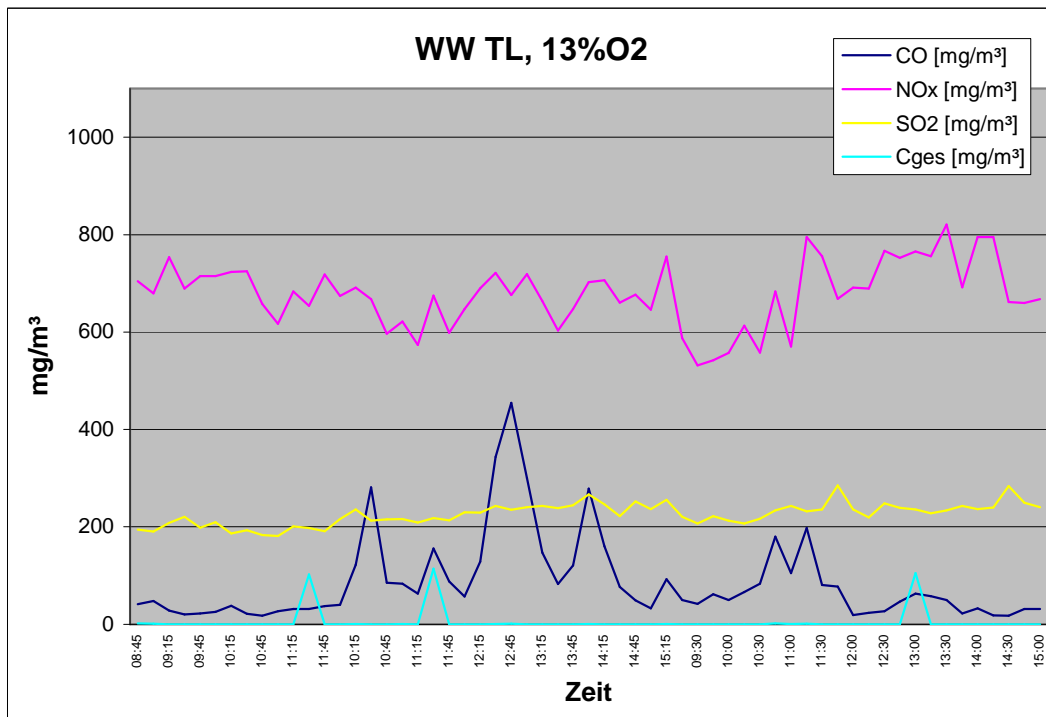


Abb. 18: ¼-Stunden-Mittelwerte der Teillast-Messungen mit Winterweizen

Für die Kurzmessung mit Roggen sind die Ergebnisse der ¼-Stundenmittelwerte im Volllastbetrieb in nachfolgender Abbildung zu sehen, wobei hier etwas höhere CO-Spitzen auftraten. Es wurden ein sehr schneller Abbrand und eine hohe thermische Leistung registriert, wobei möglicherweise die Kesseleinstellungen noch nicht optimal waren.

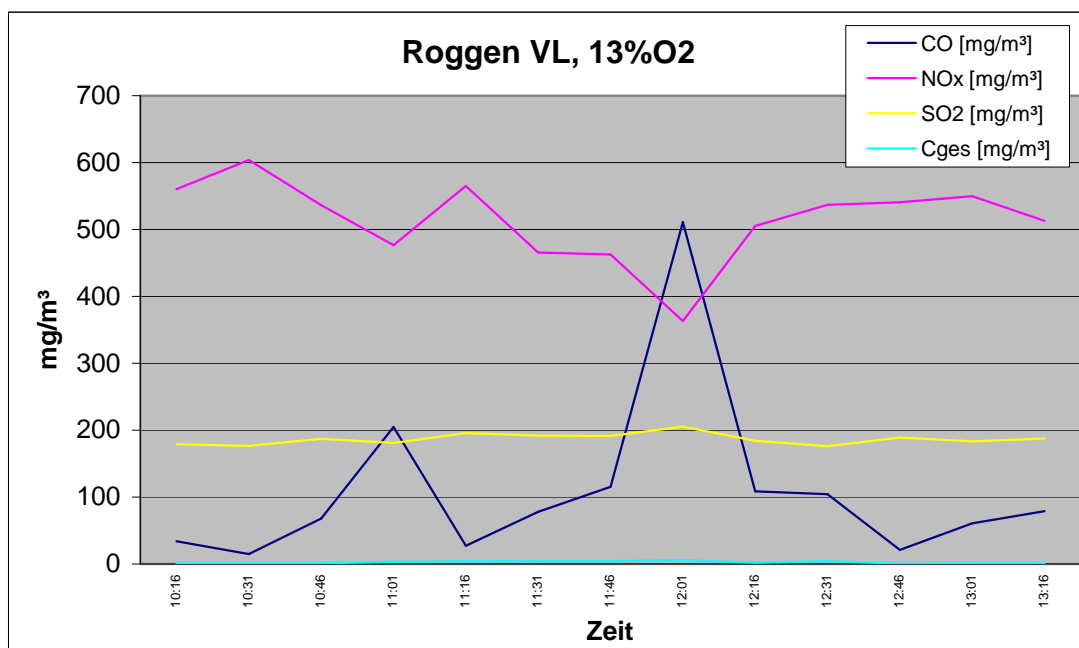


Abb. 19: ¼-Stunden-Mittelwerte der Volllast-Messungen mit Roggen

4. Ergebnisse der Emissionsmessungen im Vergleich

4.1 Kontinuierlich erfasste gas- und dampfförmige Emissionen

Die kontinuierlichen Emissionsmessungen der gas- und dampfförmigen Stoffe wurden sowohl gemäß 1. BImSchV als 15-min-Mittelwerte mit 13% Bezugssauerstoff als auch gemäß TA Luft als 30-min-Mittelwerte mit 11% Bezugssauerstoff berechnet. In den nachfolgenden Abbildungen sind die Mittelwerte, Maximal- und Minimalwerte sowie die Anzahl der Messungen (hier: Berechnung als 15-min- oder 30-Min-Mittelwert) dargestellt bzw. angegeben. Die Einzelwerte sind auch in den Messberichten nachzulesen. Für die Mittelwertbildung wurden für die nachfolgenden Abbildungen alle Emissionsspitzen mit einbezogen.

Vergleich der 15-min-Mittelwerte mit 13% Bezugssauerstoff:

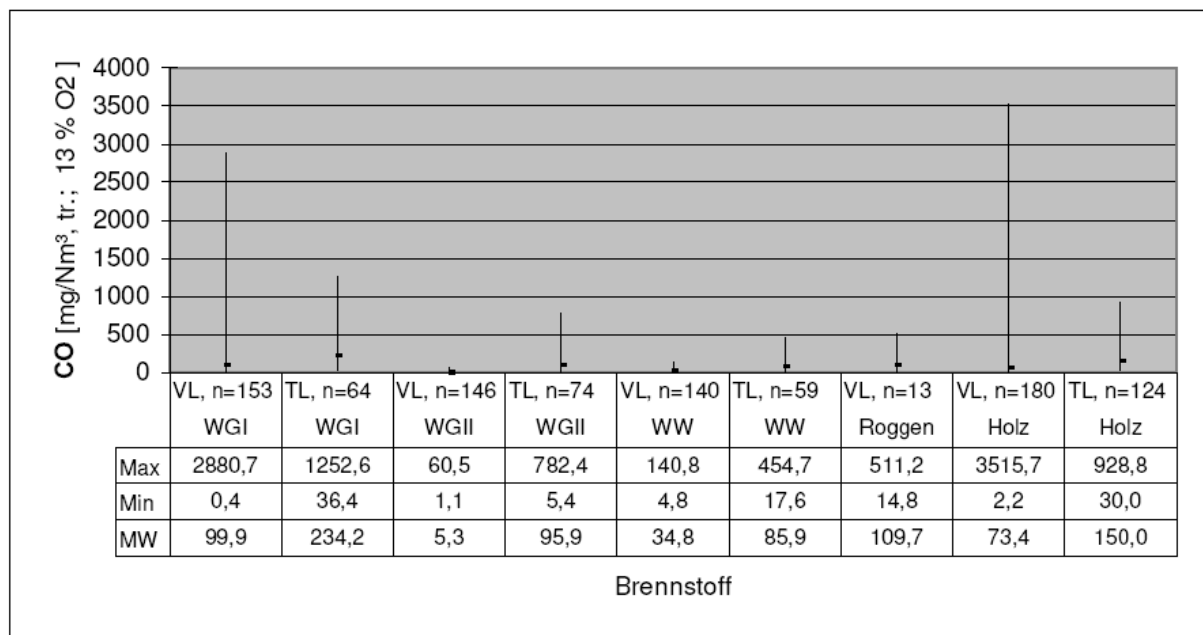


Abb. 20: 15-min-Mittelwerte für CO (bez. 13% O₂) im Vergleich

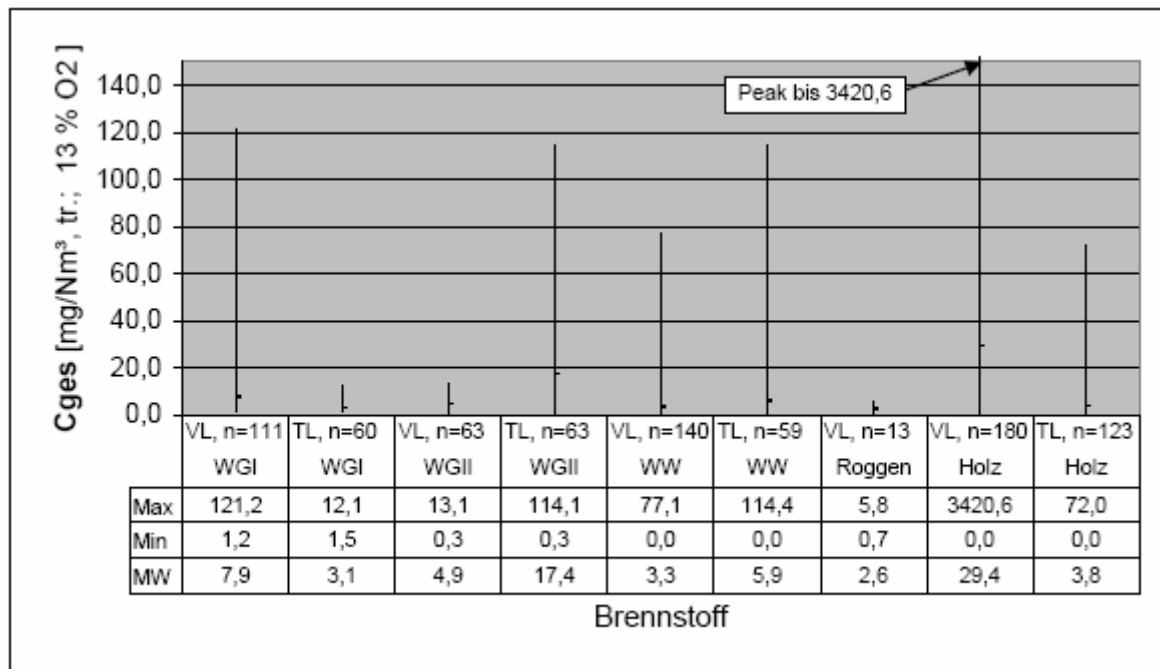


Abb. 21: 15-min-Mittelwerte für C_{ges} (bez. 13% O_2) im Vergleich

Trotz einzelner Spitzen liegen die Mittelwerte der CO - und C_{ges} - Emissionen auf einem sehr niedrigen Niveau, das deutlich unter dem bisher gültigen Grenzwert von 4 g/m^3 der 1. BImSchV liegt. Spitzenwerte (15-min-Mittelwerte) von 2 g/m^3 sollten bei optimalen Kesseleinstellungen vermeidbar sein.

Mit Getreidekorn können demzufolge mindestens genau so gute Abbrandbedingungen wie mit Holzpellets erreicht werden.

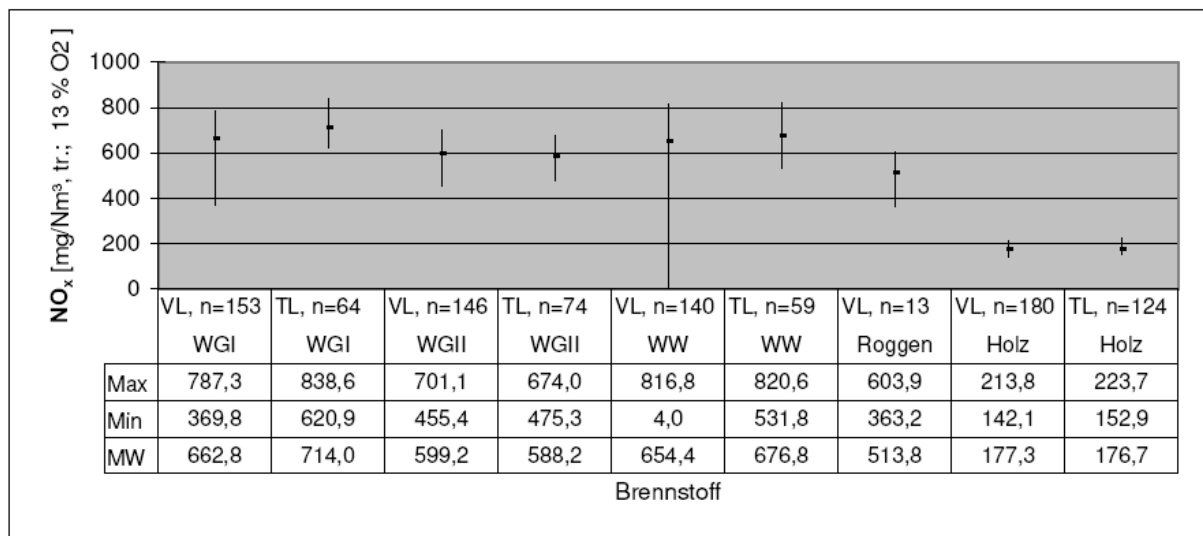


Abb. 22: 15-min-Mittelwerte für NO_x (bez. 13% O_2) im Vergleich

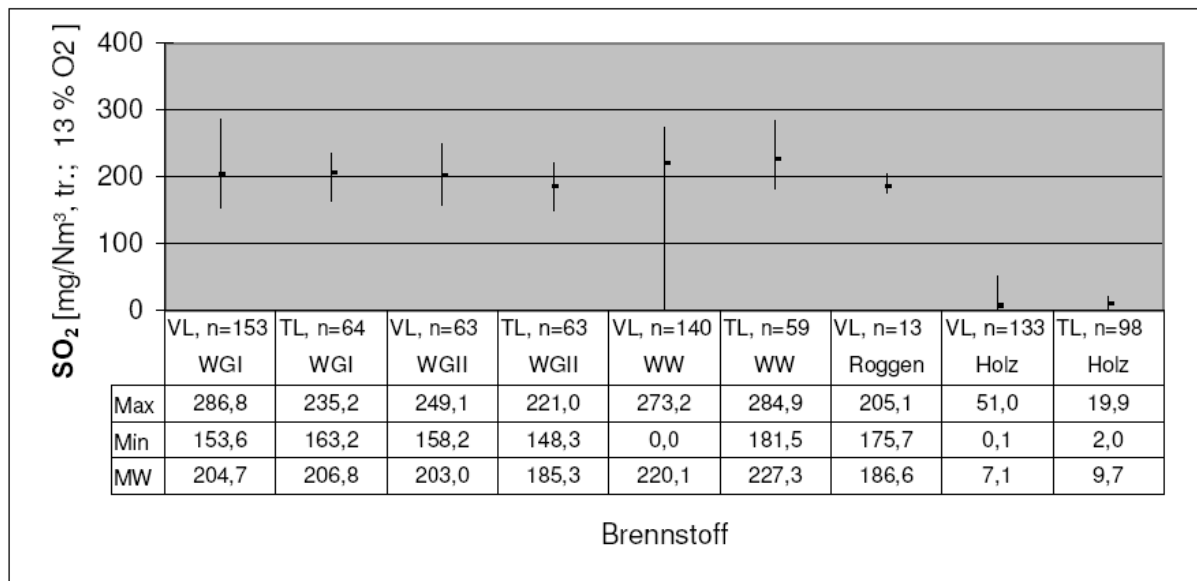


Abb. 23: 15-min-Mittelwerte für SO₂ (bez. 13% O₂) im Vergleich

Das Niveau der NO_x- und SO₂-Emissionen liegt aufgrund der höheren N- und S-Gehalte im Getreide erwartungsgemäß deutlich über dem von Holz. Die mittleren NO_x-Konzentrationen liegen bei den verwendeten Getreidesorten bei ca. 630 mg/m³, die mittleren SO₂-Konzentrationen bei ca. 205 mg/m³.

Vergleich der 30-min-Mittelwerte mit 11% Bezugssauerstoff:

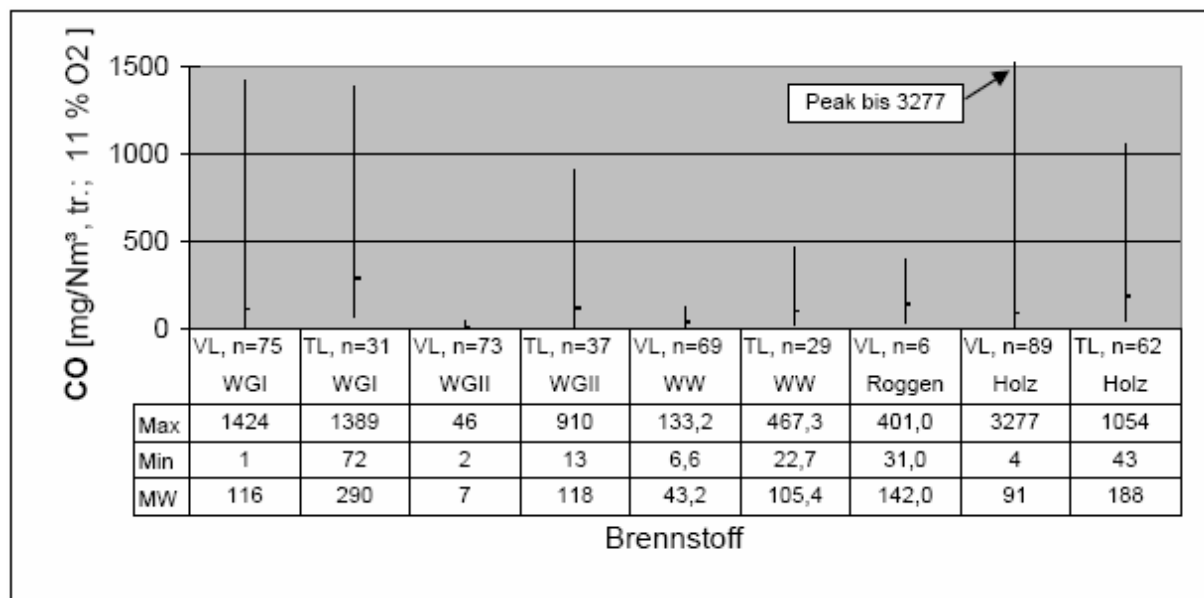


Abb. 24: 30-min-Mittelwerte für CO (bez. 11% O₂) im Vergleich

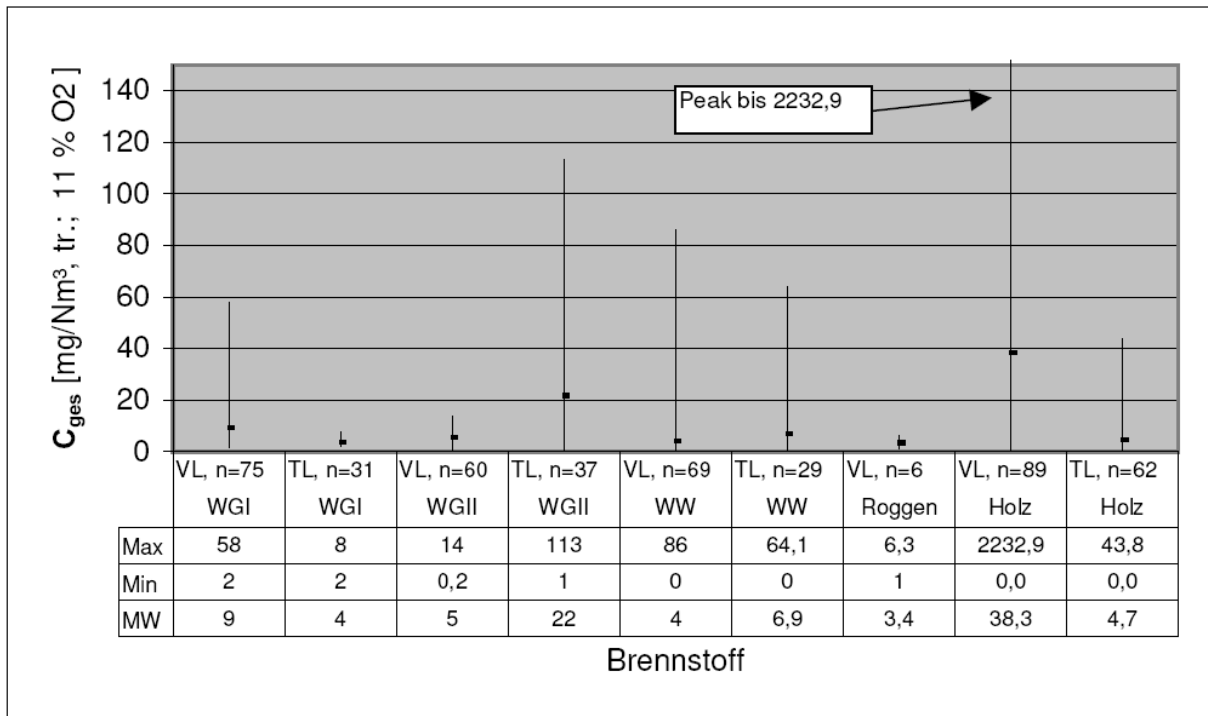


Abb. 25: 30-min-Mittelwerte für C_{ges} (bez. 11% O_2) im Vergleich

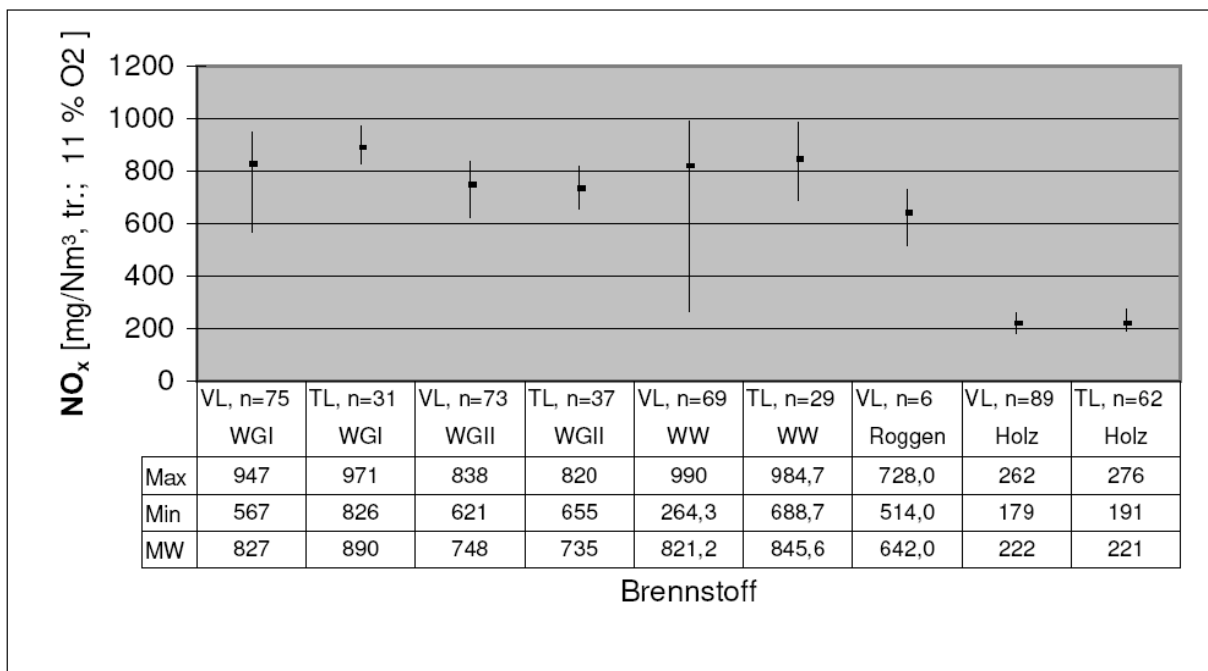


Abb. 26: 30-min-Mittelwerte für NO_x (bez. 11% O_2) im Vergleich

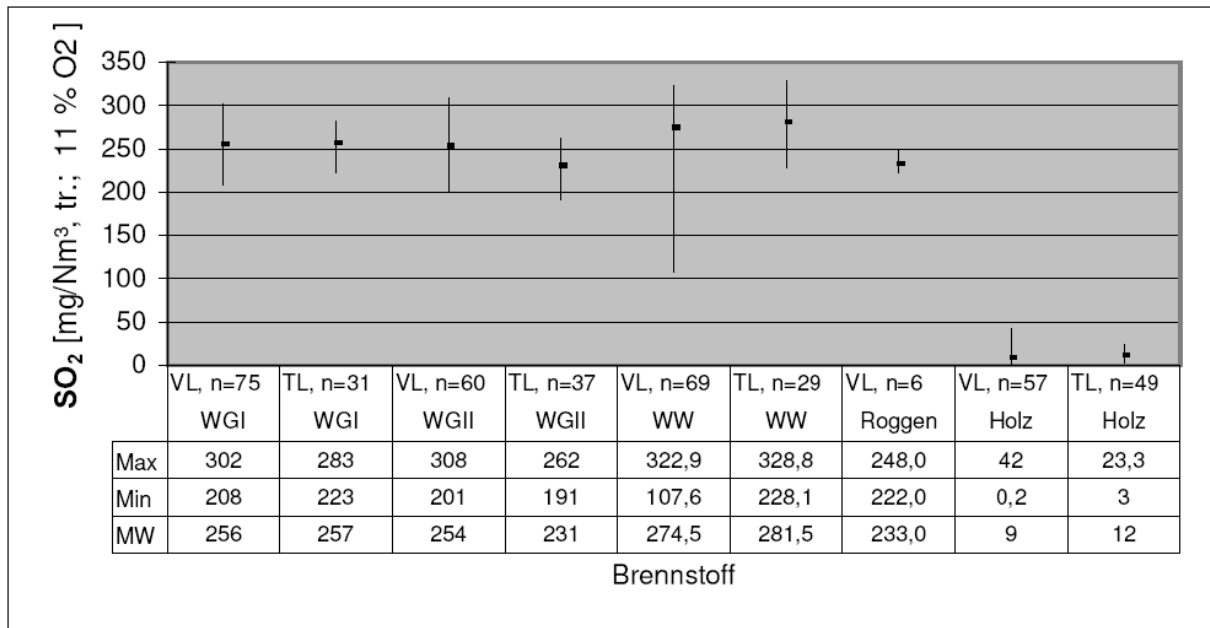


Abb. 27: 30-min-Mittelwerte für SO₂ (bez. 11% O₂) im Vergleich

4.2 Diskontinuierlich erfasste gas- und dampfförmige Emissionen

Die diskontinuierlich erfassten gasförmigen Emissionen von HCl und BTX-Aromaten wurden als Halbstundenmittelwerte bezogen auf 11 Vol.-% Sauerstoff erfasst. Damit kann ein Vergleich mit den allgemeinen Grenzwerten der TA Luft vorgenommen werden. Die Ergebnisse sind nachfolgend graphisch aufgetragen.

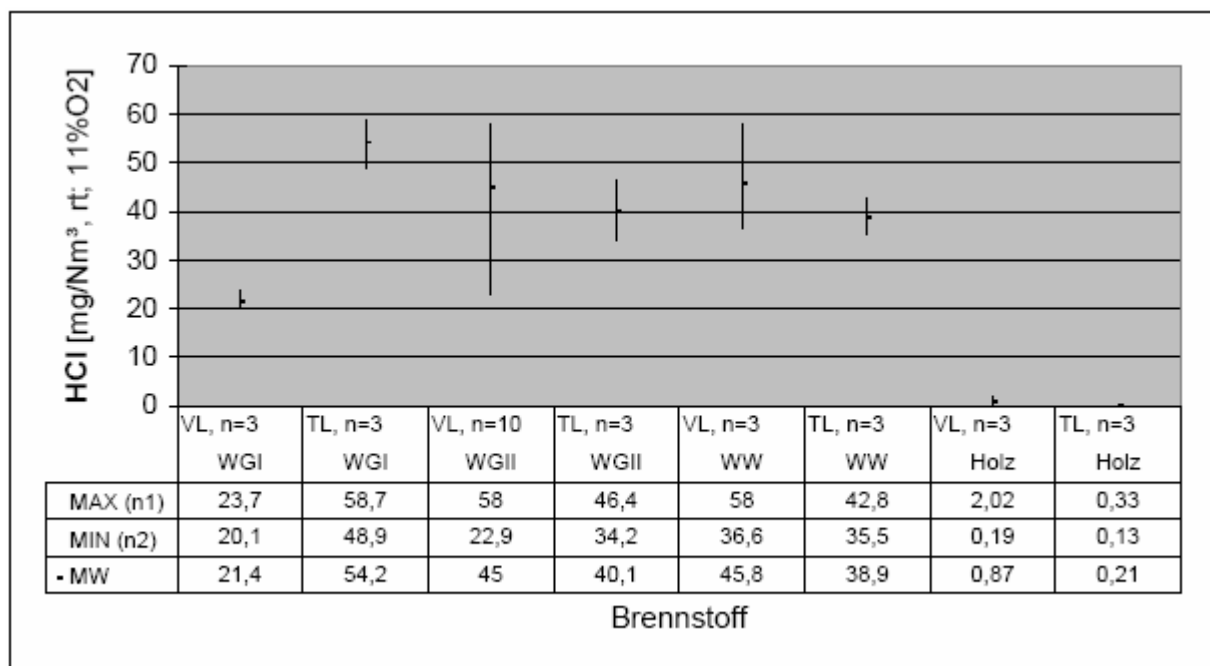
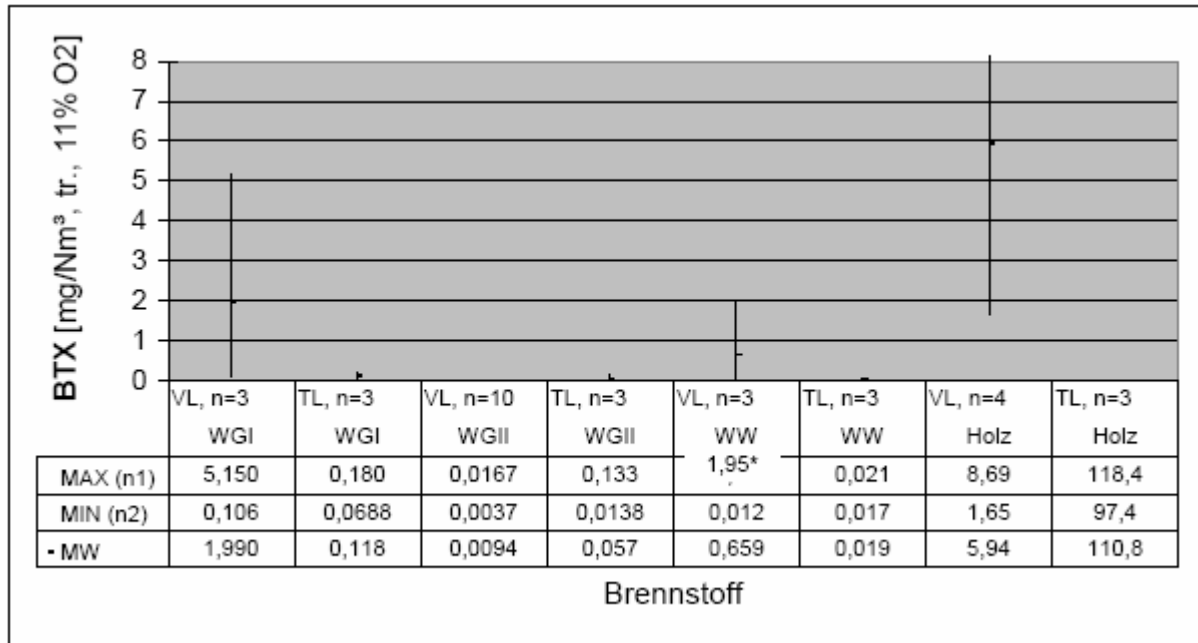


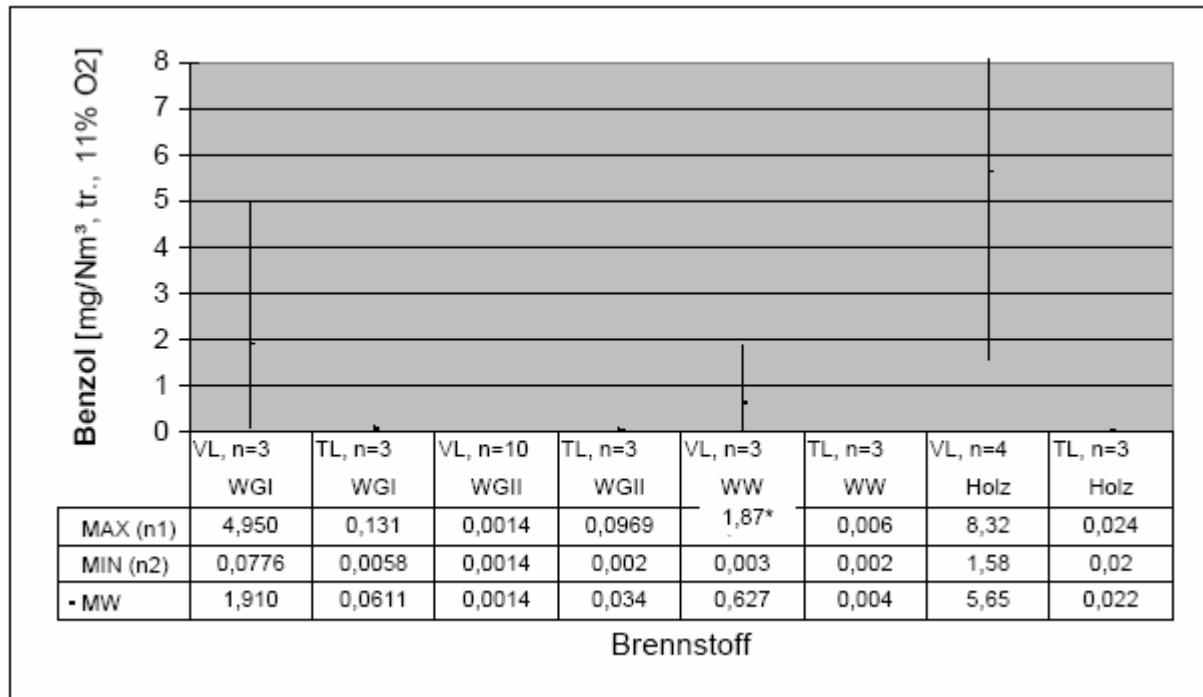
Abb. 28: HCl-Emissionen (bez. 11% O₂) im Vergleich

Es wird auch hier deutlich, dass brennstoffbedingt höhere anorganische Inhaltsstoffe (Chlor) auch zu erhöhten gasförmigen, anorganischen Emissionen (hier HCl) führen. Sie liegen im Mittel mit ca. 40 mg/m³ etwas über dem Grenzwert von 30 mg/m³ nach 5.2 der TA Luft (wobei jedoch die dort benannten Massenströme von 0,15 kg/h mit dem Kessel um fast 2 Zehnerpotenzen unterschritten sind).



* Ausreißerwert, mit einbezogen

Abb. 29: BTX-Emissionen (bez. 11% O₂) im Vergleich



* Ausreißerwert, mit einbezogen

Abb. 30: Benzol-Emissionen (bez. 11% O₂) im Vergleich

Hinsichtlich der BTX-Aromaten können mit Getreide sehr niedrige Emissionen unter $1\text{mg}/\text{m}^3$ gemessen werden. Bei WGI und Holz wurden jedoch erhöhte Werte gefunden, wobei die Werte von Holz bereits aus der 2. Messperiode stammen. Auch hier ist eine optimale Kesseleinstellung bei Getreide gleichermaßen wie bei Holz die Voraussetzung für niedrige Emissionen.

4.3 Partikelförmige Emissionen - Gesamtstaub

Die Staubmessungen erfolgten jeweils über 1 h Messzeit entsprechend dem unter 3.1 benannten Messprogramm. In den nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse aller Staubmessungen bezogen auf 13% Sauerstoff und 11% Sauerstoff gegenübergestellt.

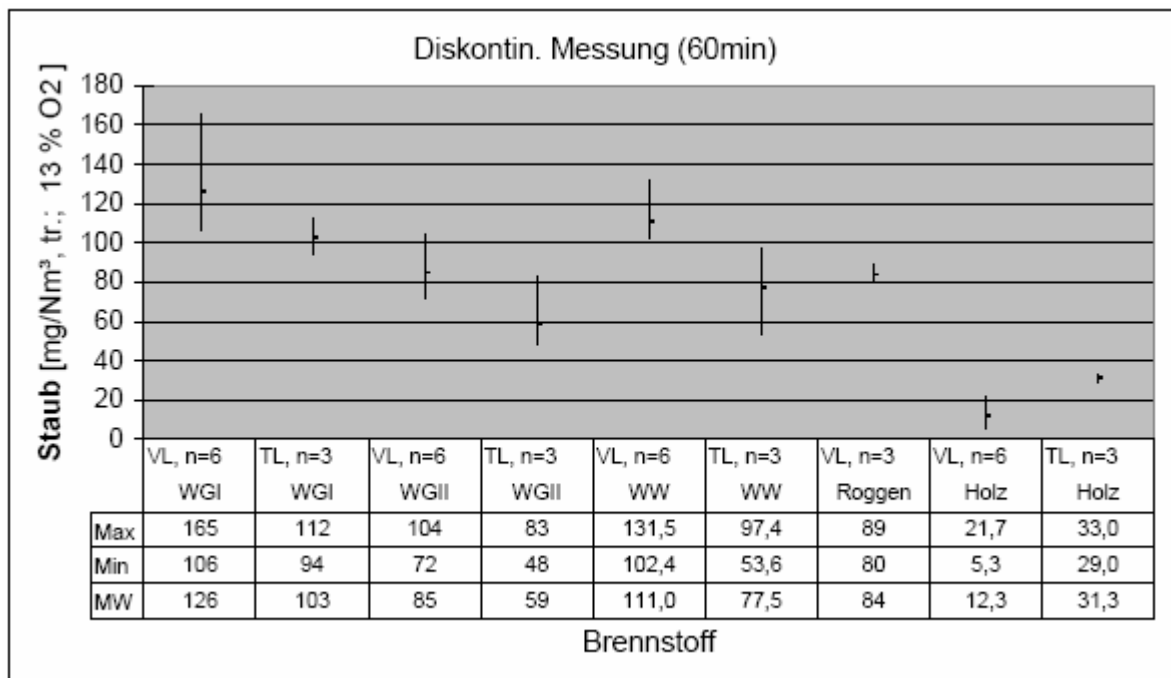


Abb. 31: Staubemissionen (bez. 13% O₂) im Vergleich

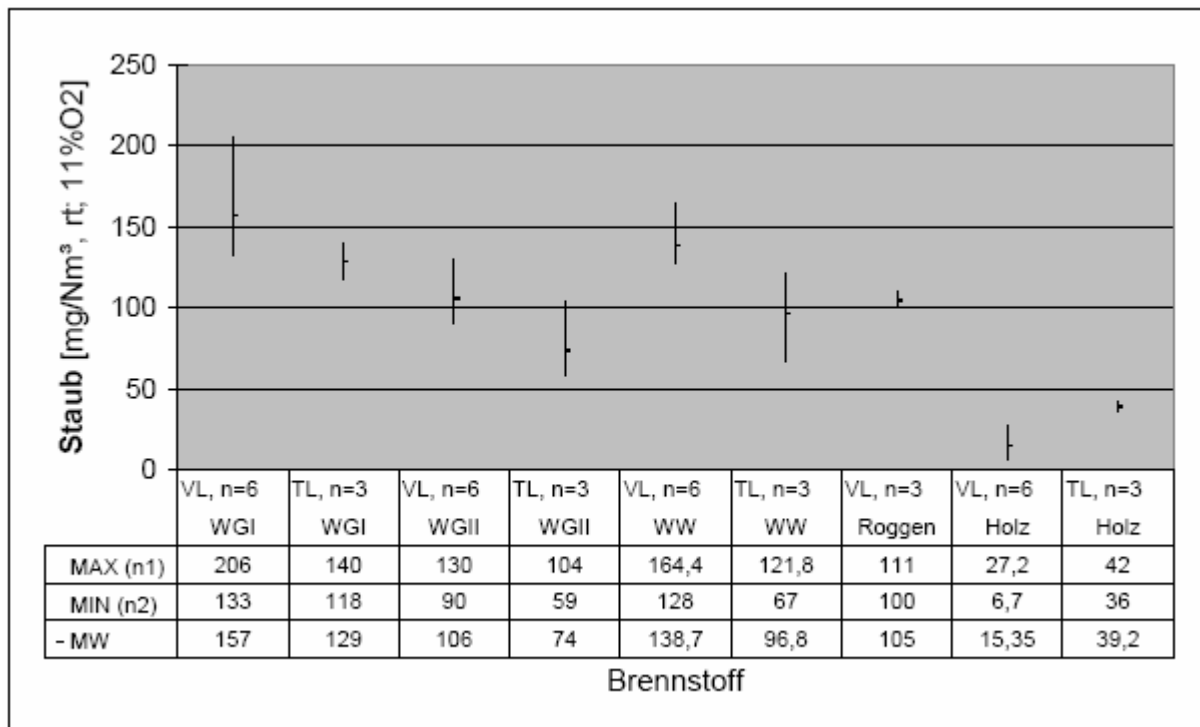


Abb. 32: Staubemissionen (bez. 11% O₂) im Vergleich

Insgesamt liegen die Staubemissionen für Getreide deutlich über denen von Holz. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass der aktuelle Grenzwert der 1. BImSchV bei optimalen Kesseleinstellungen auch ohne nachgeschaltete Abscheidersysteme sicher unterschritten werden kann. Eine Grenzwertabsenkung auf 130 mg/m³ wäre mit dem Biokompakt-Kessel beim Einsatz von Getreide aktuell gut erreichbar.

4.4 Staubinhaltsstoffe

Als Staubinhaltsstoffe wurden bei den Volllastmessungen jeweils die Metalle und Halbmetalle bzw. Quecksilber bestimmt. Hauptinhaltsstoff ist Kalium, gefolgt vom Kalzium (s. Abb. 33). Mit deutlich geringeren Konzentrationen folgen Zink und Magnesium. Während beim Getreide signifikant höhere Kaliumgehalte gegenüber Holz gemessen wurden, werden bei Ca und Mg kaum Unterschiede deutlich. Die Staubemissionen von Getreide gegenüber Holz können daher offenbar nicht mit dem Kalkzusatz in Verbindung gebracht werden, wogegen der Kaliumgehalt im Getreide mit einer Größenordnung von ca. 10 bis 50 mg/m³ zu den Staubemissionen beiträgt.

Bei den Schwermetallen liegen die Konzentrationen bzw. Massenströme für Holzpellets auf dem gleichen Niveau wie von Getreide bzw. teils auch darüber (s. Tabelle 3). Durch den Einsatz von Getreide ist demzufolge keine erhöhte Schwermetallbelastung im Staub zu erwarten. Das trifft ebenso für Quecksilber zu (s. Abb. 34).

Tab. 3: Metall- und Halbmetalle im Staub (bez. 11% O₂)

		WGI	WGII	WW	Holz
Ca	µg/m ³ Max	1920	2480	2482	3034
	µg/m ³ MW	1440	2160	1954	2730
	mg/h	110	200	200	275
K	µg/m ³ Max	14100	38400	52904	7603
	µg/m ³ MW	12300	36000	50129	5792
	mg/h	940	3400	5167	584
Mg	µg/m ³ Max	472	213	231	474
	µg/m ³ MW	414	193	195	424
	mg/h	32	18	20	43
As	µg/m ³ Max	7,72	3,62	3,12	17,26
	µg/m ³ MW	6,16	3,05	2,6	12,62
	mg/h	0,46	0,29	0,27	1,28
Cd	µg/m ³ Max	1,25	0,53	0,75	1,75
	µg/m ³ MW	1,01	0,491	0,73	1,67
	mg/h	0,077	0,046	0,075	0,168
Co	µg/m ³ Max	0,377	0,215	0,348	0,779
	µg/m ³ MW	0,236	0,206	0,215	0,514
	mg/h	0,018	0,019	0,022	0,052
Cr	µg/m ³ Max	5,11	8	24,91	38,2
	µg/m ³ MW	4,35	6,65	13,96	22,48
	mg/h	0,33	0,63	1,41	2,25
Cu	µg/m ³ Max	23,9	40,4	44,9	13,4
	µg/m ³ MW	21,5	36,5	39,8	11,7
	mg/h	1,7	3,4	4,1	1,2
Mn	µg/m ³ Max	43,9	9,51	11	76
	µg/m ³ MW	35,2	7,31	8	65
	mg/h	2,7	0,68	1	7
Ni	µg/m ³ Max	10,1	10,6	33,2	45,9
	µg/m ³ MW	8,93	10,4	16,8	34,55
	mg/h	0,68	0,97	1,68	3,45
Pb	µg/m ³ Max	23,7	12,2	9,4	20,6
	µg/m ³ MW	23,1	10,8	9	19,8
	mg/h	1,8	1	0,9	2
Sb	µg/m ³ Max	2,29	4,47	1,34	1,15
	µg/m ³ MW	1,45	4,02	1,14	0,96
	mg/h	0,11	0,38	0,12	0,1
Se	µg/m ³ Max	5,18	1,32	0,37	3,87
	µg/m ³ MW	4,39	1,24	0,3	3,14
	mg/h	0,33	0,12	0,03	0,32
Sn	µg/m ³ Max	27,5	14,2	10,7	70,7
	µg/m ³ MW	10,8	7,75	7,6	51,9
	mg/h	0,77	0,71	0,8	5,3
Tl	µg/m ³ Max	0,084	0,203	0,106	0,968
	µg/m ³ MW	0,054	0,14	0,087	0,876
	mg/h	0,004	0,013	0,009	0,088
V	µg/m ³ Max	10,3	6,77	5	14,3
	µg/m ³ MW	8,2	6,38	4,4	13,3
	mg/h	0,62	0,6	0,45	1,34
Zn	µg/m ³ Max	623	767	979	193
	µg/m ³ MW	541	744	886	186
	mg/h	42	70	91	19

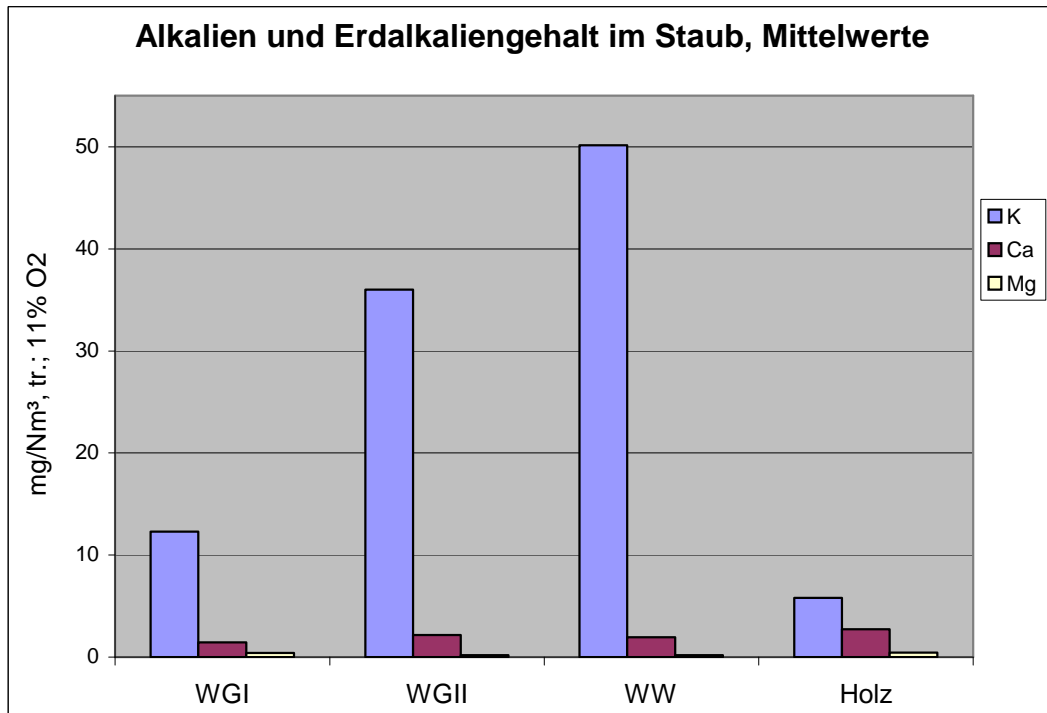


Abb. 33: Ausgewählte Staubinhaltsstoffe (bez. 11% O₂) im Vergleich

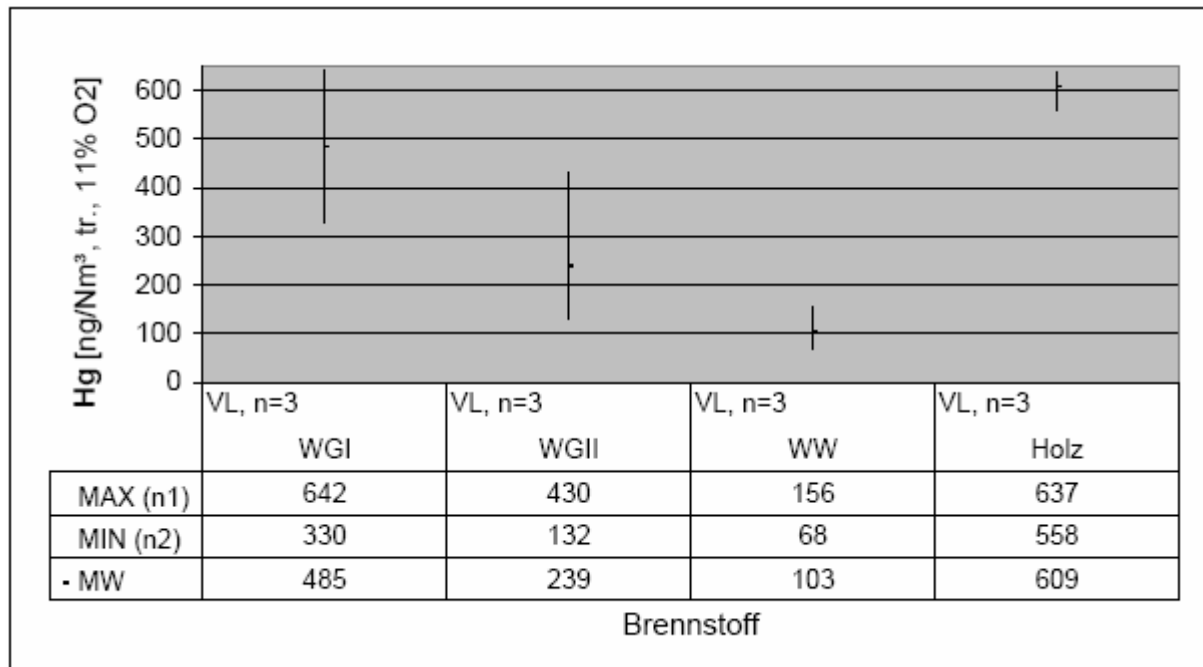


Abb. 34: Quecksilbergehalt im Staub (bez. 11% O₂) im Vergleich

4.5 Feinstaubverteilung

Die ermittelte Feinstaubverteilung ist in nachfolgender Tabelle und Abbildung zusammenfassend dargestellt. Der Anteil an Feinstaub mit 2,5 µm Korndurchmesser (PM_{2,5}) liegt bei durchschnittlich 90% vom gemessenen Gesamtstaub. Die innerhalb der beiden Lastzustände gemessenen Schwankungen in der Feinstaubverteilung bei Getreide und Holz sind jedoch insgesamt gering. Die Feinstaubverteilung beim Einsatz von Getreide ist daher vergleichbar mit der von Holz.

Tab. 4: Korngrößenverteilung im Staub

PM _x [%]	Mittelwerte von 3 Halbstundenwerten							
	WGI VL	WGI TL	WGII VL	WGII TL	WW VL	WW TL	Holz VL	Holz TL
PM ₁₀	97,9	97,7	98,09	98,01	97,77	97,94	97,5	93,7
PM ₄	94,1	92,5	94,17	93,18	93,06	92,37	91,5	87,4
PM _{2,5}	92,5	90,4	91,86	89,14	90,24	88,31	89,3	85,6
PM ₁	81,8	77,5	74,97	69,7	79,44	73,64	83,2	81,4

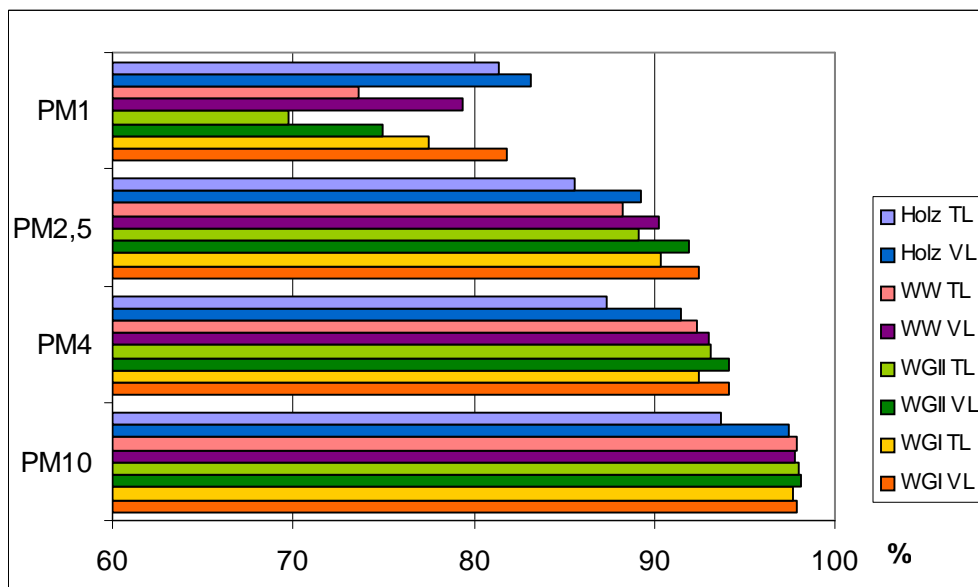


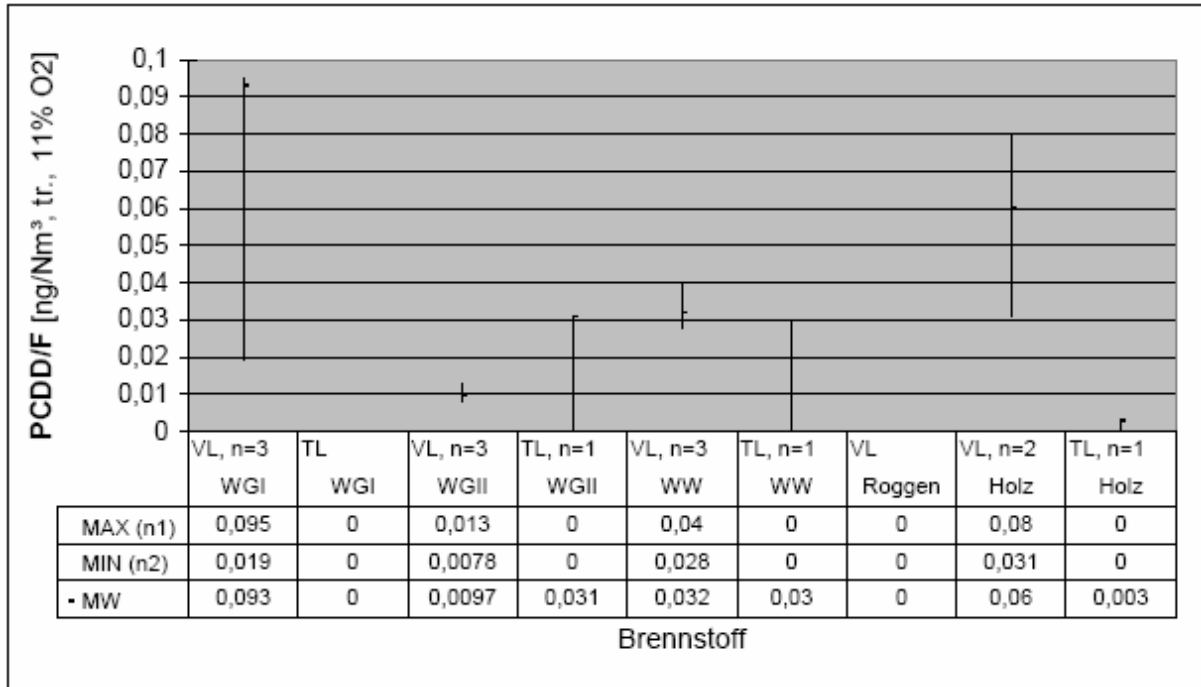
Abb. 35: Feinstaubverteilung (bez. 11% O₂) im Vergleich

4.6 Hochtoxische Inhaltsstoffe

Die hochtoxischen Inhaltsstoffe wie Dioxine/Furane, polychlorierte Biphenyle und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe weisen, bis auf die PAH bei Holz¹, keine Auffälligkeiten auf. Bei den Messungen bei WGI unter Vollast in der 1. Messperiode (Einfahrphase) liegen etwas höhere Werte als bei WW und WGII vor. Der TA-Luft-Grenzwert von 0,1 ng /m³ bei Dioxinen/Furanen wurde in keinem Fall überschritten. Ein Zusammenhang mit dem höheren Chlorgehalt im Getreide kann nicht hergestellt werden. Durch den Einsatz von Getreide ist demzufolge keine erhöhte

¹ Alle Werte der Wiederholungsmessung 2006

Belastung an hochtoxischen Inhaltsstoffen im Abgas zu erwarten. Die Gegenüberstellung der Messergebnisse ist den folgenden Abbildungen zu entnehmen.



Nullwerte = nicht gemessen

Abb. 36: Dioxine/Furane (bez. 11% O₂) im Vergleich

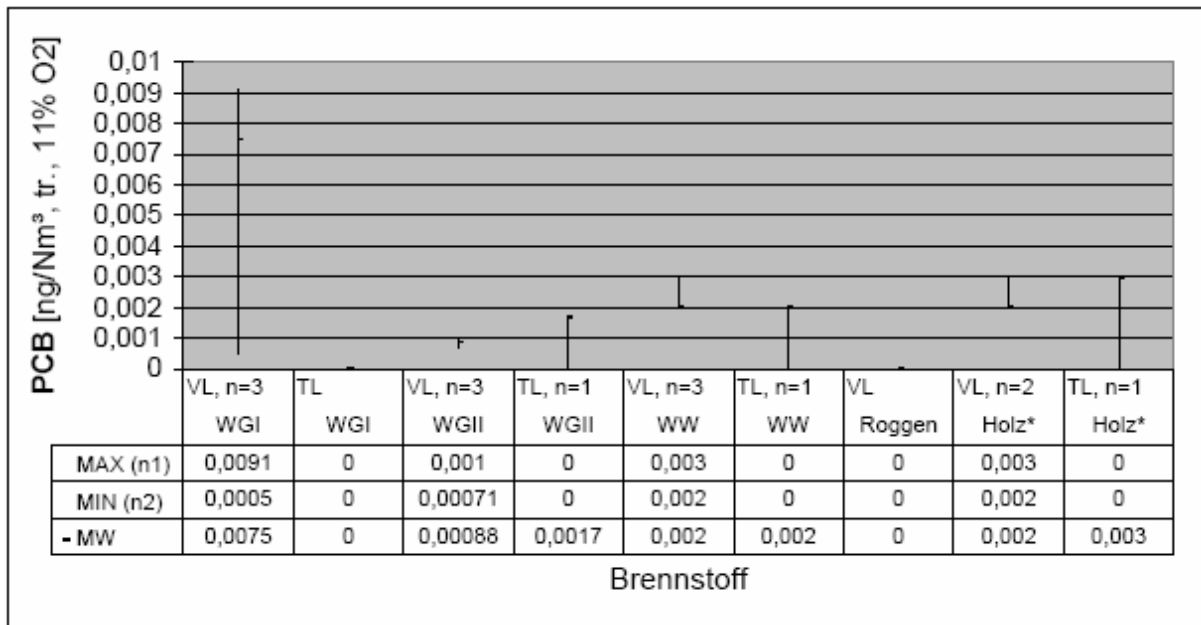


Abb. 37: Polychlorierte Biphenyle (bez. 11% O₂) im Vergleich

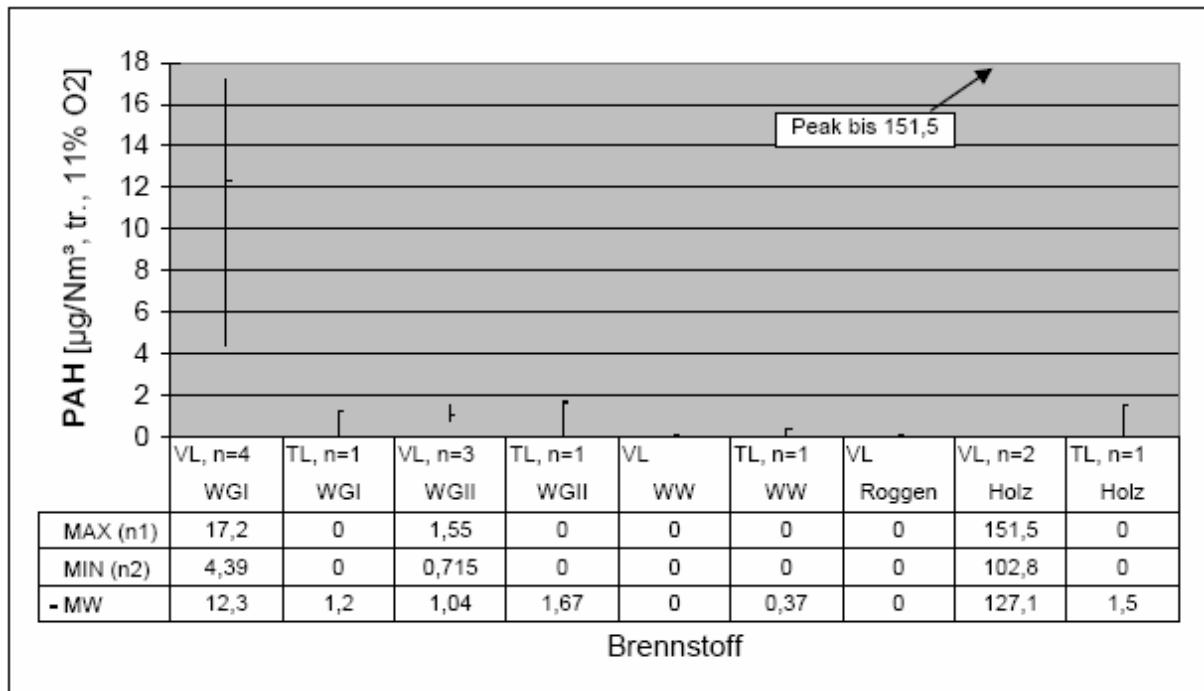


Abb. 38: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (bez. 11% O₂) im Vergleich

Alle weiteren Details können in den ausführlichen Messberichten (s. Anlagen) nachgelesen werden.

5. Stoff- und Energiebilanzen

5.1 Brennstoff- und Ascheanalytik

Die Analyse der Brennstoffe und Aschen erfolgte (bis auf Roggen) durch das Deutsche Brennstoffinstitut Freiberg (DBI). Die Analysen für Roggen wurden durch die LLFG (Standort Halle) bzw. an der FH Merseburg (nur Heizwert) vorgenommen. Parallel wurden für die 4 Hauptbrennstoffe WGI, Holz, WGII und WW Ascheproben an die TLL übergeben. Auch von den Brennstoffen der ersten Messperiode gingen Proben zur Analyse an die TLL. In Tabelle 5 sind die Inhaltsstoffe der verwendeten Brennstoffe zusammengestellt, in Tabelle 6 die entsprechenden Ascheanalysen.

Die Abbildung 39 zeigt wichtige Nährstoffe und emissionsrelevante Inhaltsstoffe der verwendeten Brennstoffe sowie zusätzlich der Strohpellet-Referenzbrennstoffe. Der Gehalt an Stickstoff im Getreide kann mit 1,5 bis 2,5 % von TS als typisch für Futtergetreide angesehen werden. Die Abweichungen zu den N- oder Cl-Gehalten der Strohpellets sind nicht gravierend.

Tab. 5: Analysen der verwendeten Brennstoffe

Komponente	Einheit	WG I	WG II	WW	Roggen	Holz
Wasser gesamt	Ma.-%	11,9	11,9	12,6	11,7	6,7
Asche 815 °C	Ma.-% v. TS	2,3	2,4	1,5	1,74	0,4
Ascheschwefel	Ma.-% v. TS	0,01	< 0,01	< 0,01	-	0,01
Brennwert (Ho)	kJ/kg	16.293	15.893	15.990	15.530 ¹	18.886
unterer Heizwert (Hu)	kJ/kg	14.806	14.342	14.413	14.090 ¹	17.471
Elementaranalyse						
Kohlenstoff	Ma.-% v. TS	44,8	48,6	49,1	-	51,3
Wasserstoff	Ma.-% v. TS	6,5	6,6	6,7	-	6,2
Schwefel	Ma.-% v. TS	0,26	0,16	0,26	-	< 0,05
Stickstoff	Ma.-% v. TS	2	1,7	2,5	1,63	0,28
Phosphor	mg/kg v. TS	3340	4350	3360	3529	50
Silizium	mg/kg v. TS	1600	1210	122	108	84
Halogene						
Brom gesamt	mg/kg v. TS	< 70	47	114	-	< 40
Chlor gesamt	mg/kg v. TS	42	905	454	-	< 20
Metalle						
Aluminium	mg/kg v. TS	34	41	24	4	85
Arsen	mg/kg v. TS	< 0,2	< 0,5	< 0,5	-	< 1
Blei	mg/kg v. TS	0,3	< 1	< 1	< 0,1	< 1
Cadmium	mg/kg v. TS	< 0,04	< 0,6	< 0,6	< 0,05	< 0,6
Chrom	mg/kg v. TS	0,8	1	1	0,2	2
Eisen	mg/kg v. TS	82	39	50	29	54
Kupfer	mg/kg v. TS	6	5	3	5	2
Nickel	mg/kg v. TS	0,6	< 1	< 1	1	1
Quecksilber	mg/kg v. TS	< 0,05	< 0,07	< 0,07	-	0,18
Strontium	mg/kg v. TS	5	5	1	2	3
Thallium	mg/kg v. TS	< 0,2	< 0,5	< 0,5	< 0,05	< 1
Mangan	mg/kg v. TS	26	14	21	44	116
Vanadium	mg/kg v. TS	0,6	< 1	< 1	< 0,05	< 1
Zink	mg/kg v. TS	39	40	23	36	12
Alkali/Erdalkali						
Natrium	mg/kg v. TS	142	56	14	15	41
Kalium	mg/kg v. TS	4700	4640	3540	5172	504
Calcium	mg/kg v. TS	651	617	379	561	964
Magnesium	mg/kg v. TS	1360	1340	1300	1117	215

¹ Der im Messbericht (Anlage) angegebene Heizwert musste aufgrund eines Fehlers im Auswerteprotokolls der Heizwertmessung korrigiert werden.

Tab. 6: Analysen der Aschenproben, bezogen auf die Trockensubstanz

Komponente	Einheit	WG I	WG II	WW	Holz
Wasser gesamt	Ma.-%	0,1	0,5	0,5	0,8
Elementaranalyse					
Kohlenstoff	Ma.-% v. TS	3,4	10	12,2	30,1
Schwefel	Ma.-% v. TS	0,05	0,14	0,41	0,09
Stickstoff	Ma.-% v. TS	0,3	0,4	0,6	0,3
Phosphor	mg/kg v. TS	86400	64400	72300	11600
Silizium	mg/kg v. TS	54500	102000	29600	46800
Halogene					
Chlor gesamt	mg/kg v. TS	< 20	463	4000	< 20
Metalle/Schwermetalle					
Aluminium	mg/kg v. TS	6770	11860	9040	7760
Arsen	mg/kg v. TS	< 1	8	4	< 1
Blei	mg/kg v. TS	< 1	< 1	2	1
Cadmium	mg/kg v. TS	< 0,6	1,8	2	< 0,6
Chrom	mg/kg v. TS	29	31	70	2060
Eisen	mg/kg v. TS	4850	6270	6390	11200
Kupfer	mg/kg v. TS	113	65	79	146
Nickel	mg/kg v. TS	19	11	34	2720
Quecksilber	mg/kg v. TS	< 0,07	< 0,07	< 0,07	0,37
Strontium	mg/kg v. TS	734	884	854	602
Thallium	mg/kg v. TS	< 1	< 0,5	< 0,5	< 1
Mangan	mg/kg v. TS	471	310	541	13900
Vanadium	mg/kg v. TS	10	23	22	8
Zink	mg/kg v. TS	186	141	362	102
Alkali/Erdalkalimetalle					
Natrium	mg/kg v. TS	2440	1270	791	2320
Kalium	mg/kg v. TS	76400	76400	85400	82000
Calcium	mg/kg v. TS	246200	286000	295000	148200
Magnesium	mg/kg v. TS	33000	26200	34200	33900

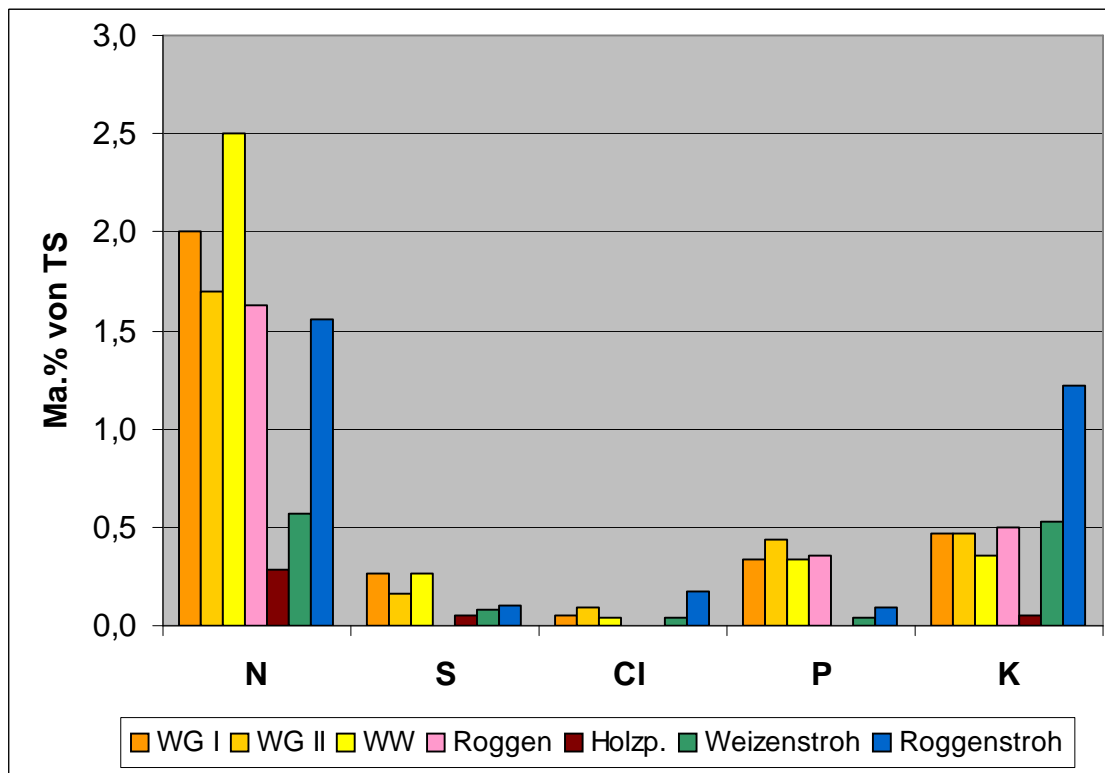


Abb. 39: Ausgewählte Inhaltsstoffe der Brennstoffe im Vergleich

5.2 Massenbilanz

Während des Messbetriebes wurden für jeden Brennstoff die Gesamtmenge an eingesetztem Brennstoff und die erzeugte Aschemenge erfasst. Der Anteil an Kalkzusatz (CaO) betrug bei WG I, WG II und WW 2 Ma-%. Für den einen Messtag mit Roggen wurde kein Kalk zugesetzt.

Während der Messungen konnten nicht immer repräsentative Aschemengen ermittelt werden. Außerdem erwies sich eine exakte zeitliche Zuordnung schwierig (s. Kap. 3). Die Aschemengen können daher im Einzelnen mehr oder weniger stark fehlerbehaftet sein. Zur Bilanzierung wurden daher die in den einzelnen Messberichten bereits erfassten Brennstoff- und Aschemengen durch die Aufzeichnungen des Kesselbetreibers (LLFG) ergänzt (Tabelle 7). Zur Plausibilitätsprüfung wurden die Ergebnisse der Massenbilanzierung mit Analysendaten (s. Punkt 5.1) verglichen.

Tab. 7: Brennstoff- und Aschebilanzen im Vergleich

Mittelwerte pro Messtag bzw. pro -Stunde	WGI VL	WGI TL	WGII VL	WGII TL	WW VL	WW TL	Roggen VL	Holz VL	Holz TL
Brennstoffmenge [kg/d]	87,2	48,2	87,2	54,9	85,5	45,2	100,2	72,7	39,8
Brennstoffverbrauch [kg/h]	11,2	6,6	11,3	6,7	12,5	6,7	13,5	10,3	5,9
Betriebsdauer [h/d]	7,8	7,3	7,7	8,2	6,8	6,7	7,4	7,1	6,7
Aschemenge [kg/d]	2,4	0,8	2,9	1,9	3,3	1,0	1,2		
Aschemenge [kg/h]	0,30	0,11	0,37	0,23	0,48	0,15	0,16		
Aschenanfall [% Brennst.]	2,7	1,7	3,3	3,5	3,9	2,3	1,2		
Gesamtbilanz	WGI		WGII		WW		Roggen	Holz	
Brennstoffmenge ges. [kg]	5191						102	2120	
2% Kalkzugabe ges. [kg]	104						0	0	
Aschemenge ges. [kg]	176						1,2	9,12	
Aschenanfall [% Input]	3,32		3,39		3,07		1,2	0,43	
Aschegehalt nach Brennstoff- analyse [%]	2,0		2,1		1,3		1,5	0,4	
Differenz als Kalk [%]	1,3		1,3		1,8		-0,4	0,0	
<i>Wiederfindung des Kalkzusatzes in der Asche [%]</i>	66		64		88				
Anteil C in Asche [Ma-%]	3,4		9,9		12,1		n.b.	30,1	

Der Ascheanfall liegt bei den mit Kalk versetzten Getreidesorten im Durchschnitt bei 3,3% des Brennstoffs inkl. Kalk. Bei Roggen (ohne Kalkzusatz) sind es nur 1,2%, bei den Holzpellets beträgt der Ascheanfall nur ca. 0,4% (trotz des hohen Wertes für den Restkohlenstoff in der Asche).

Die Differenz des gemessenen Ascheanfalls zum Aschegehalt nach der Brennstoffanalyse für WGI, WGII und WW beläuft sich auf 1,3 bis 1,8%, die demzufolge vom zugesetzten Kalk stammen müssen. Bei Roggen und Holz stimmen die Werte zwischen gemessener Aschemenge und Analysenwert hingegen etwa überein. Damit wurden zw. 64 und 88% des eingesetzten Kalks in der Asche wieder gefunden. Berücksichtigt man ferner den Kalziumgehalt im Brennstoff, so liegt die Wiederfindung von Ca in der Asche 45 bis 78 % (s. Tabelle 8).

Der Kalziumgehalt im Staub kann mit ca. 200 mg/h nicht wesentlich zum Verbleib des Kalkes beitragen (vgl. Tabelle 3). Daher ist zu vermuten, dass der Kalk merklich mit zu den Ablagerungen im Kessel beiträgt (s. Punkt 6.1).

Tab. 8: Kalziumbilanz für WGI, WGII und WW (ohne Staub)

		WGI	WGII	WW
zugeführter Kalk als CaO	g/h	224	226	250
Berechnet als Ca	g/h	160	162	179
Ca aus dem	g/h	7,3	7,0	4,7
Summe Ca	g/h	167	168	183
Ca in der Asche	g/h	75	107	142
<i>Wiederfindung in der Asche</i>	%	45	63	78

Da Kalium deutlich mehr zu den Staubemissionen beiträgt als Kalzium, wurde eine analoge Bilanz auch für Kalium aufgestellt. Es ergibt sich ein ähnliches Bild wie beim Ca, beim WW geht jedoch die Bilanz mit dem Anteil im Staub fast auf.

Tab. 9: Kaliumbilanz für WGI, WGII und WW (ohne Staub)

		WGI	WGII	WW
K-Gehalt im Brennstoff	g/kg	4,7	4,64	3,54
K-Gehalt in der Asche	g/kg	76,4	76,4	85,4
K-Zufuhr mit dem Brennstoff	g/h	52,6	52,4	44,3
K-Verbleib in der Asche	g/h	23,1	28,6	41,2
<i>Wiederfindung in der Asche</i>	%	<i>44,0</i>	<i>54,5</i>	<i>93,1</i>
K, gemessen im Staub	g/h	0,94	3,4	5,17

Bezüglich des Verbleibs von N, S und Cl aus dem Brennstoff wurden die Konzentrationen und Massenströme von N, S und Cl im Brennstoff mit den korrespondierenden Emissionen von NO_x, SO₂ und HCl im Abgas verglichen. Das Ergebnis ist in nachfolgenden Tabellen und Abbildungen dargestellt.

Tab. 10: Verbleib des Brennstoffstickstoffs

N-Bilanz	WGI	WGI	WGII	WGII	WW	WW	Roggen	Holz	Holz
	VL	TL	VL	TL	VL	TL	VL	VL	TL
N im Brennstoff (Ma.-%)	1,8	1,8	1,5	1,5	2,2	2,2	1,63	0,26	0,26
Brennstoff (kg/h)	11,2	6,6	11,3	6,7	12,5	5,7	13,5	10,3	5,9
N _B (g/h)	202	119	170	101	275	125	220	27	15
NO _x emittiert (g/h)	69	47	73	45	82	51,5	75	22	15
N emittiert (g/h)	21,0	14,3	22,2	13,7	25,0	15,7	22,8	6,7	4,6
<i>N emittiert (% von N_B)</i>	<i>10,4</i>	<i>12,0</i>	<i>13,1</i>	<i>13,6</i>	<i>9,1</i>	<i>12,5</i>	<i>10,4</i>	<i>25,0</i>	<i>29,8</i>
N in Asche (g/h)	0,91	0,34	1,50	0,93	2,90	0,91		0,13	0,08
<i>N in Asche (% von N_B)</i>	<i>0,45</i>	<i>0,29</i>	<i>0,88</i>	<i>0,92</i>	<i>1,05</i>	<i>0,73</i>		<i>0,06</i>	<i>0,28</i>

Tab. 11: Verbleib des Brennstoffschwefels

S-Bilanz	WGI	WGI	WGII	WGII	WW	WW	Holz	Holz
	VL	TL	VL	TL	VL	TL	VL	TL
S im Brennstoff (Ma.-%)	0,23	0,23	0,14	0,14	0,23	0,23	0,05	0,05
Brennstoff (kg/h)	11,2	6,6	11,3	6,7	12,5	5,7	10,3	5,9
S _B (g/h)	26	15	16	9	29	13	5	3
SO ₂ emittiert (g/h)	21	14	25	14	27,4	17	0,9	0,9
S emittiert (g/h)	10,5	7,0	12,5	7,0	13,7	8,5	0,5	0,5
<i>S emittiert (% von S_B)</i>	<i>40,8</i>	<i>46,2</i>	<i>79,1</i>	<i>74,7</i>	<i>47,7</i>	<i>64,9</i>	<i>8,7</i>	<i>15,3</i>
S in Asche (g/h)	0,15	0,06	0,52	0,32	1,98	0,62	0,04	0,02
<i>S in Asche (% von S_B)</i>	<i>0,59</i>	<i>0,38</i>	<i>3,31</i>	<i>3,46</i>	<i>6,88</i>	<i>4,76</i>	<i>0,77</i>	<i>0,77</i>

Tab. 12: Verbleib des Brennstoffchlors

Cl-Bilanz	WGI		WGII		WW		Holz	
	VL	TL	VL	TL	VL	TL	VL	TL
Cl im Brennstoff (Ma.-%)	0,0490 ¹	0,0490 ¹	0,0797	0,0797	0,0397	0,0397	0,002	0,002
Brennstoff (kg/h)	11,2	6,6	11,3	6,7	12,5	5,7	10,3	5,9
Cl _B (g/h)	5,490	3,235	9,006	5,340	4,963	2,263	0,206	0,118
HCl emittiert (g/h)	1,5	2,9	4,3	2,3	4,3	2,3	0,07	0,01
Cl emittiert (g/h)	1,46	2,82	4,18	2,24	4,18	2,24	0,07	0,01
Cl emittiert (% von Cl _B)	26,6	87,2	46,4	41,9	84,3	98,9	33,0	8,2

¹ Die Analysenwerte des DBI (Tab. 5) sind so niedrig, dass die HCl-Emissionen um den Faktor 300 bis 1000 darüber liegen würden. Es wurde daher für die Bilanzierung der Mittelwert des Cl-Wertes der DBI-Analyse und der Analyse der TLL zugrunde gelegt.

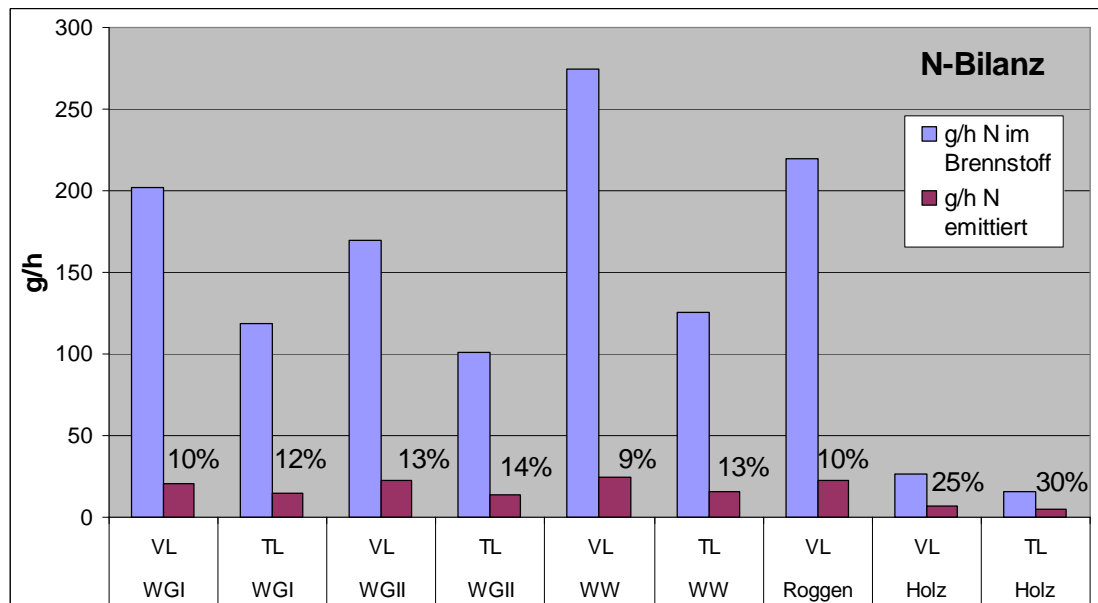


Abb. 40: Verbleib des Brennstoffstickstoffs

Es wird gut sichtbar, dass sich der ca. 5-fach höhere N-Gehalt des Getreides gegenüber Holz nicht in einem linearen Anstieg der NO_x-Emissionen niederschlägt. Die Wiederfindung des Brennstoffstickstoffs als NO_x-Emissionen beträgt relativ einheitlich bei Getreide 10 bis 13%, hingegen bei Holz 25 bis 30%. Dies ist auf die gestufte Verbrennung zurückzuführen, wobei die in Bereichen mit reduzierenden Bedingungen gebildeten Verbindungen (z.B. NH₃) mit dem NO_x der Wirbelbrennkammer zu Luftstickstoff reagieren können.

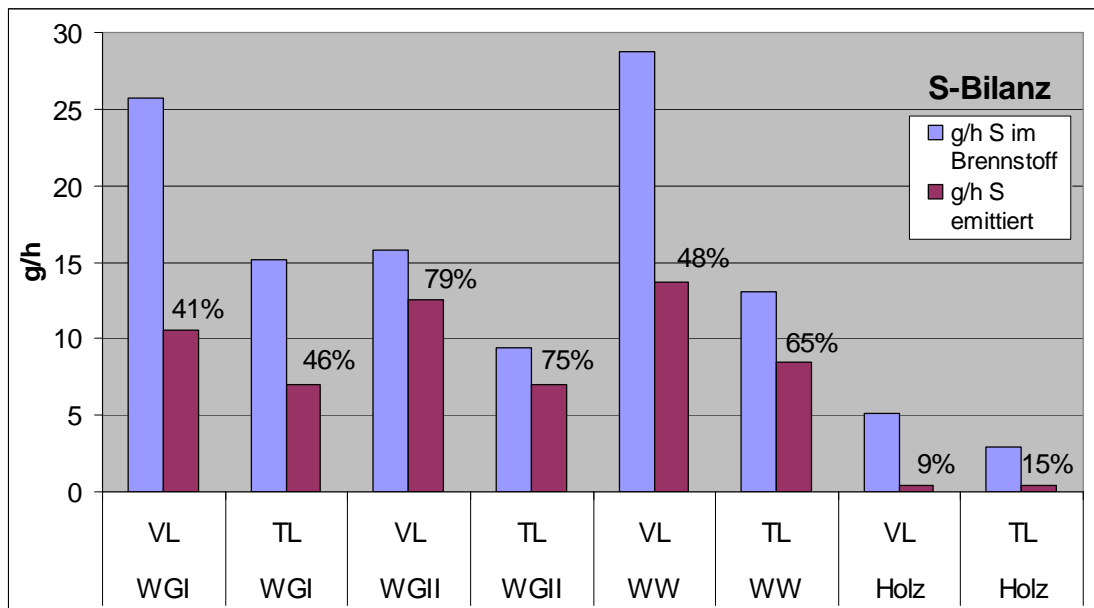


Abb. 41: Verbleib des Brennstoffschwefels

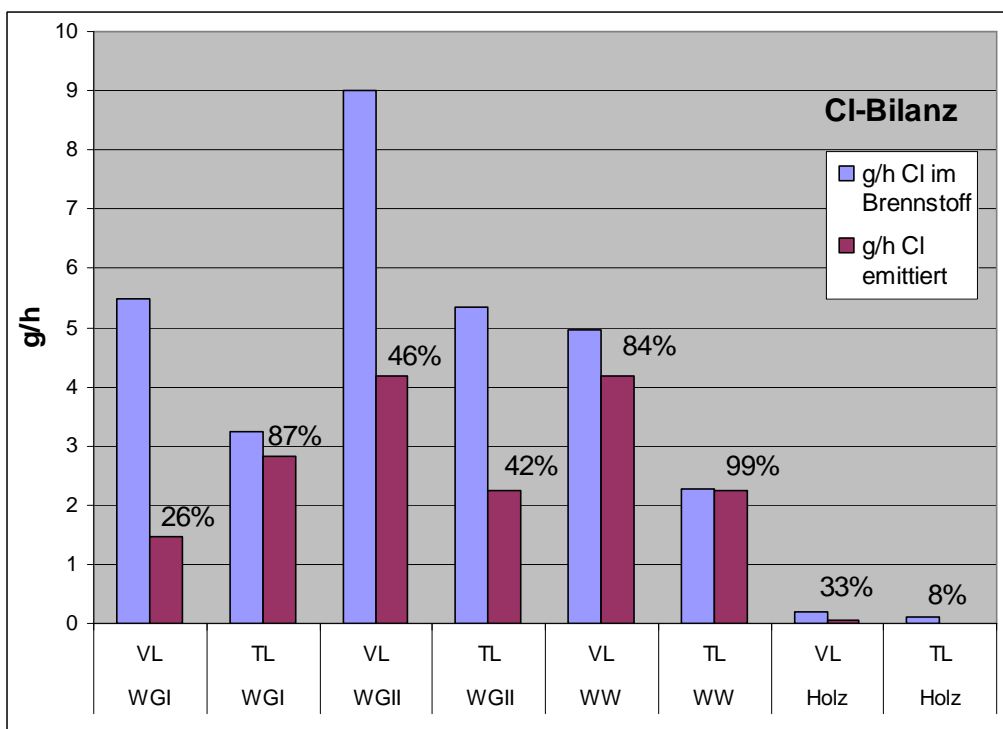


Abb. 42: Verbleib des Brennstoffchlors

Bei Schwefel und Chlor sind bei Getreidekorn höhere Wiederfindungsraten in Form der gemessenen Emissionen SO_2 und HCl gegenüber Holz festzustellen, wobei die Werte sehr stark schwanken.

Der Anteil der Elemente N, S und Cl in der Asche ist erwartungsgemäß fast vernachlässigbar.

Abschließend ist zu bemerken, dass die vorgenommenen Bilanzierungsversuche durchaus fehlerbehaftet sind, z.B. durch die Art, Ort und Zeitpunkt der Probenahme der Brennstoffe und Aschen oder durch die Art der Reinigungsvorgänge des Kessels. Aber auch die Analysenergebnisse der beauftragten Prüfinstitute weisen teilweise größere Abweichungen auf, wie ein interner Vergleich der durch die TLL analysierten Rückstellproben zeigte. Die vorgenannten Berechnungen geben jedoch wichtige Anhaltspunkte für den Verbleib von Mineralstoffen und anorganischen Komponenten aus dem Getreidekorn.

5.3 Energiebilanz

Zur Ermittlung der energetischen Effizienz des Getreidekorns und der Holzpellets beim Einsatz im Biokompakt-Kessel AWK 45 SI wurde eine Energiebilanz erstellt. Unter Berücksichtigung der zuvor ermittelten Heizwerte (Tabelle 5) und der Kesselleistungen für die jeweiligen Lastmessungen (s. Anlagen Messberichte) wurden die spezifische Wärmeerzeugung pro kg Brennstoff, der tatsächlich erreichte thermische Wirkungsgrad und der spezifische Brennstoffverbrauch pro kWh erzeugte Wärme ermittelt. Die Ergebnisse sind in nachfolgender Tabelle zusammengestellt.

Tab. 13: Energiebilanz der Feldversuche mit Getreidekorn und Holzpellets

		WG1 VL	WG1 TL	WG2 VL	WG2 TL	WW VL	WW TL	Roggen VL	Holz VL	Öl ¹
Mittlere Leistung	kW	38	21	38,5	20,7	41,4	22,1	43	40,3	
Brennstoffverbrauch	kg/h	11,2	6,6	11,3	6,7	12,5	6,7	13,5	10,3	
spezifische Wärmeerzeugung	kWh/kg	3,4	3,2	3,4	3,1	3,3	3,3	3,2	3,9	9,0 ²
Heizwert des Brennstoffs	kWh/kg	4,1	4,1	4,0	4,0	4,0	4,0	3,9	4,9	10 ²
<i>thermischer Wirkungsgrad</i>	%	82	77	86	78	83	82	81	81	90
spezifischer Brennstoffverbrauch	kg/kWh	0,29	0,31	0,29	0,32	0,30	0,30	0,31	0,26	
Brennstoffverbrauch bezügl. 1 Liter Öl	kg/l Öl	2,7	2,8	2,6	2,9	2,7	2,7	2,8	2,3	1

¹ Literaturangaben

² in kWh/l

Der tatsächliche thermische Wirkungsgrad des Kessels liegt sowohl mit Getreidekorn als auch mit Holzpellets bei durchschnittlich 81%. Vergleicht man die Bilanzdaten mit den Standardangaben eines Ölkessels (grau unterlegte Spalte, Annahme für den Kesselwirkungsgrad: 90%), so liegt der tatsächliche Verbrauch bei durchschnittlich 2,76 kg Getreidekorn, um einen Liter Heizöl zu ersetzen. Das ist etwas ungünstiger als der übliche Ansatz, bei dem von 2,5 kg Getreide für 1 l Öl ausgegangen wird (s. Punkt 2.2).

In der nachfolgenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden die in den Felduntersuchungen ermittelten Durchschnittswerte als Berechnungsbasis angesetzt.

6. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

6.1 Bedienungs- und Wartungsaufwand

Betreuungsaufwand:

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass der Einsatz von Getreidekorn anstelle von Holzpellets im automatischen Biomassekessel Biokompakt AWK 45 SI genauso sicher und ohne Betriebsunterbrechungen und Störungen hinsichtlich automatischer Brennstoffzufuhr, Kalkdosierung und Entaschung sowie automatischer Regelung je nach Wärmebedarf möglich ist. Mit einem ausreichenden Wärmespeicher fährt der Kessel bei geringer Wärmeabnahme (z.B. Nachtabenkung) automatisch in Glutbeterhaltung, bzw. schaltet sich komplett aus, wodurch Teillastzustände mit ungünstigem Emissionsverhalten vermieden werden. Das Glutbett kann auch bei Abschaltung noch 6 bis 8 h erhalten werden, so dass ein schneller Start möglich ist.

Voraussetzung ist in jedem Falle eine optimale Voreinstellung des Kessels, individuell für jeden Brennstoff, und Abspeicherung aller Daten in der Kesselsteuerung. Damit ist es auch gut möglich, kurzfristig zwischen den Brennstoffen zu wechseln.

Der tägliche Betreuungsaufwand beschränkt sich aufgrund des automatischen Betriebs auf eine 2 x tägliche Inspektion des Glutbettes, wobei erforderlichenfalls Schlackebrocken zu entfernen sind. Mit der täglichen Inspektion verbunden ist auch eine manuelle Leerung des Aschekastens (ca. 2 bis 3 x pro Woche) und eine Kontrolle und ggf. Nachfüllung des Kalkvorrats im Dosierbehälter. Der tägliche Betreuungsaufwand liegt mit ca. 20 bis 30 min in einem akzeptablen Bereich.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen Fotos von verschiedenen Betriebszuständen sowie Aschequalitäten.



Abb. 43: Wirbelbrennkammer mit Roggen bei Volllast, 45 kW

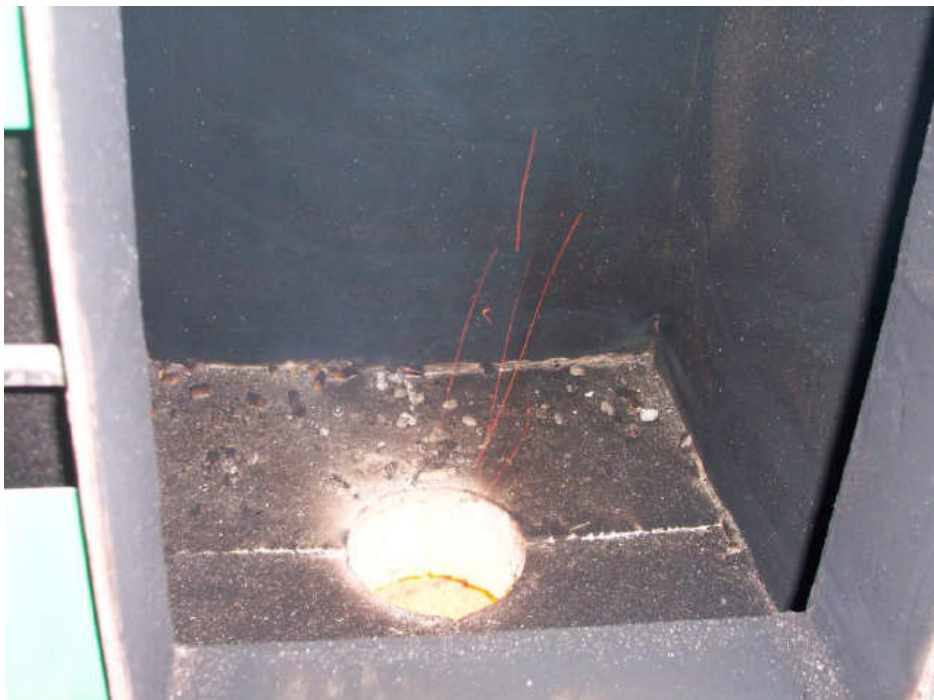


Abb. 44: Wirbelbrennkammer mit Wintergerste bei Teillast, 15 kW

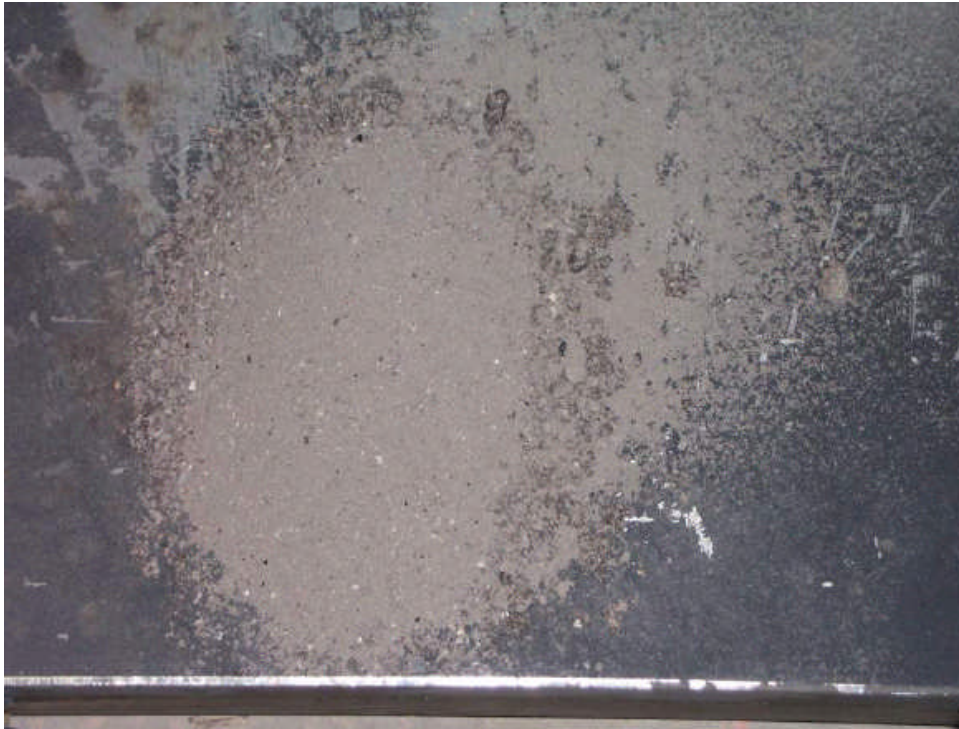


Abb. 45: Asche von Wintergerste bei Volllast

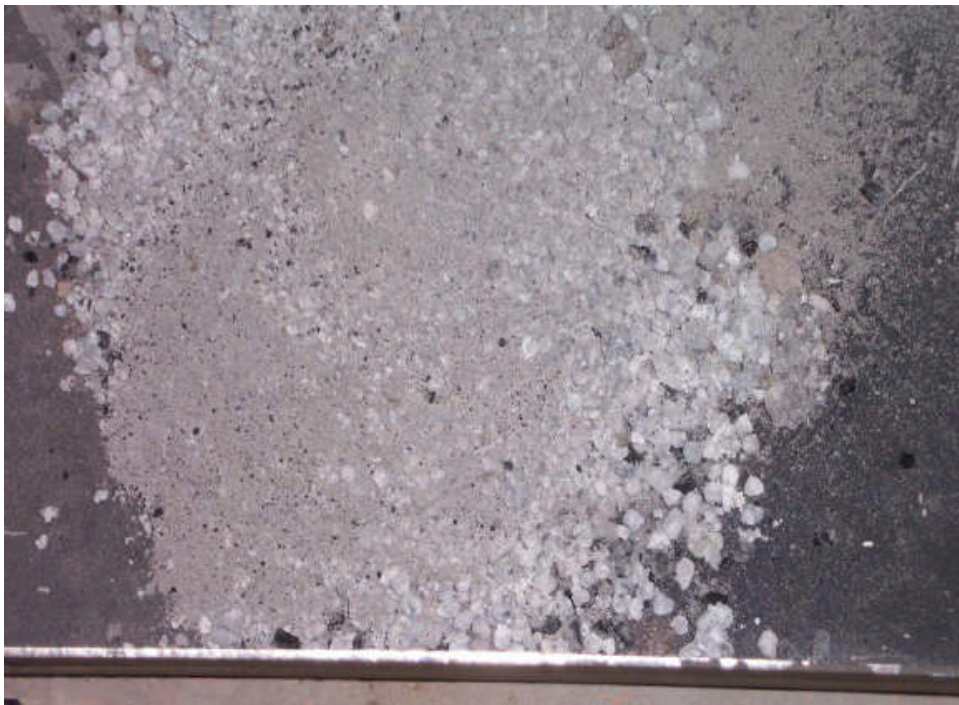


Abb. 46: Asche von Holzpellets bei Volllast



Abb. 47: Asche von Winterweizen bei Teillast

Reinigungsaufwand:

Nach Herstelleraussage ist der Betreuungs- und Reinigungsaufwand beim Einsatz von Getreidekorn ca. 4 x höher als für Holzpellets bzw. 2 x höher als für Holzhack-schnitzel. Bedingt durch den höheren Gehalt an Mineralien kommt es zu mehr Ablagerungen im Kessel und an den Wärmetauscherflächen.

Beim Einsatz von Getreide ist eine gründliche Reinigung des Kessels und der Wärmetauscherflächen mindestens alle 4 Wochen erforderlich. Dabei sollten auch die Lambdasonde und der Abgasventilator nicht vergessen werden. Insbesondere bei ungünstigen Betriebszuständen (Schwelbrand) oder hohem Staub- und Partikeleintrag mit dem Brennstoff ist zusätzlich eine Zwischenreinigung nach 14 Tagen zu empfehlen, wobei insbesondere die Wärmetauscherflächen gereinigt werden sollten. In Abb. 48 sind die Ablagerungen nach 14 Tagen Kesselbetrieb mit Getreide im Teil-lastbereich mit 15 kW zu sehen.

Mit zunehmenden Ablagerungen auf den Heizregistern verschlechtert sich die Wärmeübertragung und damit der tatsächliche Kesselwirkungsgrad. Eine zu häufige Reinigung ist jedoch nicht sinnvoll, da sonst unnötig Staub aufgewirbelt wird.

Die nachfolgenden Fotos dokumentieren die Ablagerungen an verschiedenen Stellen und den Zustand des Kessels nach 2 Heizperioden.



Abb. 48: Blick von oben in die Heizregister vor und nach der Reinigung



Abb. 49: Abgelagerte Staubschicht an der Seitenwand des Feinstaubraumes vor dem Abgasaustritt



Abb. 50: Blick von oben in die Brennraumschale mit Primärluftschlitzen, Zuführschnecke und Heißluftzündrohr



Abb. 51: Entfernte Schichtplatten am Boden des Feinstaubraumes

Getreidebereitstellung und periphere Einrichtungen:

Wir bereits im Punkt 3.2 ausgeführt, muss die Zufuhr von Getreidekorn so geregelt sein, dass die Körner nicht zerkleinert werden. Das Einblasen der Getreidekörner in den Vorratsbunker mittels Druckluft hat sich hierbei nicht bewährt. Für eine qualitätsgerechte Eintragung von Getreidekorn in den Vorratsbunker mit geringer Staubentwicklung wurde daher im Projekt ein langsamlaufender Getreideschneckenförderer eingesetzt. Es ist demzufolge nötig, für den Kesselbetrieb geeignete Lösungen für die Brennstoffzuführung in den Bunker zu finden. Dieser Aufwand ist ggf. bei den Betriebskosten mit zu berücksichtigen.

Es sollten auch möglichst kein Ausputz mit hohen Staubfrachten verwendet werden, da sonst erhöhte Staubemissionen und Ablagerungen im Kessel die Folge sind.

6.2 Wirtschaftlichkeit für den Biokompakt® AWK 45 SI mit Getreide

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für den Standort des Lehr- und Versuchsgutes der LLFG in Bernburg wurde anhand der tatsächlichen Verbrauchsdaten mit Getreide und unter Berücksichtigung der aktuellen Preisentwicklung überprüft.

Der jährliche Heizölbedarf betrug ca. 9000 l pro Jahr. Mit der spezifischen Wärmeerzeugung von 9 kWh/l Heizöl gemäß Tab. 13 ergibt sich eine jährliche Wärmeerzeugung von 81.000 kWh. Bei Einsatz von Getreidekorn mit einem spezifischen Brennstoffverbrauch von 0,3 kg/kWh (gem. Tab. 13) sind 24,8 t Getreide pro Jahr erforderlich. Mit den Öl- und Getreidepreisen von 2004/2005 war eine deutliche Einsparung an Heizkosten erzielbar. Aufgrund des aktuell erheblichen Preisanstiegs bei Getreide hat sich dieser Kostenvorteil trotz steigender Heizölpreise deutlich verringert. Beim Getreide wie bei anderen Biomassen wurde ein drastischer Preisanstieg mit der steigenden Nachfrage im Energiesektor (u.a. Bioethanolproduktion) mit teils überzogenen Erwartungen und Preisverwerfungen ausgelöst. Prognosen sind hier momentan nicht sinnvoll. Der Heizölpreis steigt tendenziell weiter an. Nachfolgende Tabelle zeigt die Auswirkungen der unterschiedlichen Preise auf die Brennstoffkosten für die Wärmeerzeugung.

Tab. 14: Spezifische Brennstoffkosten im Vergleich

Brennstoff	Heizöl	Futtergetreide
erforderliche Nutzenergie	81.000 kWh	81.000 kWh
Anlagenwirkungsgrad	90 %	81 %
Energiegehalt	10,0 kWh/l	4,0 kWh/kg
Brennstoffmenge	9.000 l/a	24,8 t/a
Brennstoffkosten 2004/5	0,44 €/l	100 €/t
Jahresbrennstoffkosten	4.000 €/a	2.479 €/a
spez. Brennstoffkosten	4,94 ct/kWh	3,06 ct/kWh
Brennstoffkosten Juli 2007	0,50 €/l	150 €/t
Jahresbrennstoffkosten	4.500 €/a	3.719 €/a
spez. Brennstoffkosten	5,56 ct/kWh	4,59 ct/kWh

Der Bedarf an 81.000 kWh Wärme würde bei Berücksichtigung der Heizperiode von Oktober bis April zu einer erforderlichen mittleren thermischen Leistung von 16 kW führen. Mit der Annahme, dass für ca. 50% der Zeit Volllastbetrieb erforderlich ist, liegt die erforderliche mittlere thermische Leistung bei 22 kW. Der installierte Biokompakt® AWK 45 SI hat daher für den Anlagenstandort nicht die optimale Größe, so dass eine Berücksichtigung der Investitionen dieses Kessels hierfür nicht sinnvoll ist.

Für die weitere Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde daher von einem landwirtschaftlichen Betrieb mit einer max. thermischen Leistung von 40 kW ausgegangen. Es wird vorausgesetzt, dass Infrastruktur wie Heizungsraum, Schornstein, Wärmeversorgungsleitungen und Vorratsbunker vorhanden sind. Der Biomassekessel soll sowohl mit Getreide als auch Holzpellets oder Holzhackschnitzel betrieben werden können, damit die Brennstoffnutzung flexibel nach aktueller Preisentwicklung und Verfügbarkeit im Betrieb erfolgen kann. Dann sind folgende Investitionen für den Biomassekessel zu berücksichtigen:

Biokompakt® AWK 45 SI, komplett	20.000,- €
Montage	1.800,- €
Pufferspeicher	1.400,- €
Gesamtinvestitionen (netto)	23.200,- €

Als Abschreibungszeitraum wurden 15 Jahre angesetzt. Geht man von einer Finanzierung aus, sind noch Zinsen zu berücksichtigen, beispielhaft mit 6% veranschlagt.

Betriebszeit ist die Heizperiode von Oktober bis April, die mittlere thermische Leistung beträgt ca. 30 kW. Damit ergibt sich eine jährlich erzeugte thermische Nutzenergie von 151.200 kWh.

Die Betriebskosten sind auf der Basis der Erfahrungswerte im Projekt mit folgenden Positionen berücksichtigt:

- Personalaufwand für die Kessel-Betreuung und -Reinigung sowie den Getreideeintrag in den Vorratsbunker mit 15 €/t Getreide
- Stromverbrauch mit 1% der Wärmeleistung mit Kosten von 0,15 €/kWh_{el}
- Getreidekosten mit 150 €/t (erste Notierung von Futtergerste der Ernte 2007 an der Wiener Produktbörse)
- Gesonderte Wartungs- und Instandhaltungskosten pauschal mit 150 €/a (Emissionsmessung, Schornsteinfeger)

Mit diesen Randbedingungen ergibt sich die nachfolgend aufgeführte Kostenstruktur.

Tab. 15: Kostenbeispiel für den Biokompakt® AWK 45 SI bei Getreideeinsatz

Energieerzeugung		
erforderliche Nutzenergie		151.200 kWh
Anlagenwirkungsgrad		81 %
Energiegehalt		4,0 kWh/kg
Brennstoffmenge		46,3 t/a
Brennstoffkosten		150 €/t
Brennstoffkosten pro Jahr		6.942 €/a
Anlageninvestition		23.200 €
Kapitalkosten	15 Jahre Nutzungsdauer, 6% Zinsen	2.389 €/a
Betriebskosten		
Personal (15 €/t)	15 €/t Getreide	694 €/a
Strom	1% der th. Leistung mit 0,15 €/kWh	227 €/a
sonstige Kosten		150 €/a
Summe feste Betriebskosten		3.460 €/a

Mit einer Inanspruchnahme von Fördermitteln für die Investitionskosten des Biomassekessels können die Betriebskosten gesenkt werden. Durch flexible Reaktion auf aktuelle Preise und preisgünstig verfügbare Chargen können auch die Brennstoffkosten positiv beeinflusst werden.

Die beispielhafte Wirtschaftlichkeitsrechnung macht deutlich, dass bei Zulassung von Getreide als Regelbrennstoff ein massenhafter Anstieg an Getreidefeuerungsanlagen nicht zu erwarten ist. Die wirtschaftlichen Hürden würden bei einer deutlichen Absenkung der Staubgrenzwerte im Zuge der Novellierung der 1. BImSchV durch die Notwendigkeit einer Abgasnachbehandlung noch steigen.

7. Zusammenfassung

Mit den Felduntersuchungen am „Biokompakt® - AWK 45 SI“ zum Nachweis der Genehmigungsfähigkeit eines automatisch betriebenen Biomassekessels < 50 kW_{th} mit Getreide am Standort des Lehr- und Versuchsgutes der Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau in Bernburg liegt umfangreiches Datenmaterial zur Bewertung des Betriebsverhaltens und zu den Emissionen beim Einsatz von Getreidekorn vor.

Es konnte nachgewiesen werden, dass moderne Getreidekessel inzwischen auch im kleinen Leistungsbereich in der Lage sind, Getreidekorn ohne technische Probleme und Störungen zu verbrennen. Dank der intensiven Entwicklungsarbeiten in den vergangenen Jahren können moderne Biomassekessel wie der „Biokompakt® - AWK 45 SI“ die heutigen Emissionsgrenzwerte der 1. BImSchV auch ohne aufwändige Abgasnachbehandlung einhalten, wie nachfolgende Abbildung zeigt.

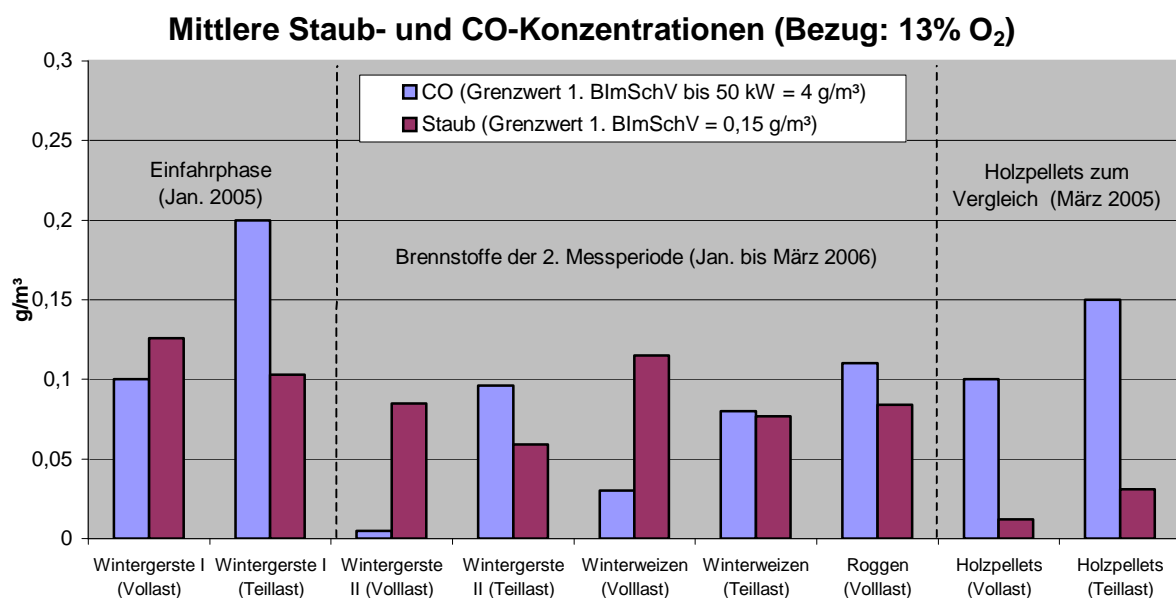


Abb. 52: Staub- und CO-Konzentrationen der Felduntersuchungen mit Getreide

Bei der Beurteilung der Emissionswerte wurde deutlich, dass die optimale und stabile Einstellung der Primär- und Sekundärluftzufuhr, der automatischen Brennstoffzufuhr und Entaschung für jedes Getreidekorn ebenso wie für Holzpellets eine wichtige Voraussetzung zur Vermeidung von Emissionsspitzen ist.

Die Schlackebildung im Getreideglutbett ließ sich durch den Indikator Kalk gut vermeiden. Wie die Massenbilanzen zeigen, macht sich der Kalkzusatz bei den Staubemissionen kaum bemerkbar, hingegen trägt z.B. der hohe Kaliumgehalt im Getreide mit einer Größenordnung von 10 bis 50 mg/m³ zu den Staubemissionen bei. Der zugesetzte Kalk findet sich zu 50 bis 80% in der Asche wieder und trägt darüber hinaus zu den mineralischen Staubablagerungen im Kessel bei.

Bedingt durch die Inhaltsstoffe des Brennstoffes liegen die Emissionen an NO_x, SO₂ und HCl beim Getreidekorn deutlich über denen von Holz. Für die Einhaltung niedriger NO_x-Emissionen sollte der Brennstoff daher unbedingt einen niedrigen N-Gehalt aufweisen. Als vorteilhaft erweist sich diesbezüglich ebenfalls die in modernen Bio-

massekesseln typische gestufte Verbrennung, wodurch die chemische Reaktion von gasförmigen N-Verbindungen zu Luftstickstoff begünstigt wird. Für die eingesetzten Getreidesorten wurden nur ca. 12% des Brennstoffstickstoffs als NO_x-Emissionen wiedergefunden.

Die zusätzlichen, durch das Landesamt für Umweltschutz des Landes Sachsen-Anhalt durchgeführten, Emissionsmessungen von hochtoxischen Inhaltsstoffen nach TA Luft machen deutlich, dass es keinen brennstoffspezifischen Zusammenhang zwischen Brennstoffinhaltsstoffen wie Chlor und Emissionen wie Dioxinen/Furanen oder PCB gibt. Entscheidend für niedrige Emissionswerte sind optimale Abbrandbedingungen. Die Konzentrationsgrenzwerte der TA Luft für Dioxine waren in allen Fällen unterschritten.

Der Anteil an Feinstaub mit 2,5 µm Korndurchmesser (PM_{2,5}) beträgt bei Getreide durchschnittlich 90% vom Gesamtstaub. Im Rahmen der Zielstellung einer Feinstaubreduzierung bleiben die unterschiedlichen ökologischen und toxischen Wirkungen von Staubinhaltsstoffen bisher noch unberücksichtigt. Setzt man eine vollständige Verbrennung und niedrige CO-Emissionen voraus, so sind die gegenüber Holzpellets höheren Staubemissionen bei Getreide zu einem nicht unwesentlichen Teil durch mineralische Stoffe bedingt. Die vorliegenden Analysen von Staubinhaltsstoffen belegen dies. Sind diese mineralischen Stäube außerdem schwerer als z.B. Russpartikel, lagern sie sich eher ab, günstigerweise bereits vor oder unmittelbar nach Austritt aus dem Schornstein, so dass sie weniger zu einer Immissionsbelastung beitragen können. Diese Aspekte sollten künftig stärker untersucht werden.

Die Betriebserfahrungen zeigen, dass der Einsatz von Getreidekorn anstelle von Holzpellets im automatischen Biomassekessel Biokompakt AWK 45 SI genauso sicher und ohne Betriebsunterbrechungen und Störungen möglich ist. Der Bedienungsaufwand ist aufgrund der empfohlenen Verkürzung der Reinigungszyklen jedoch ca. 4 x so hoch wie bei Holzpellets. Für die Einhaltung niedriger Staubemissionen sollte der Brennstoff vor allem einen hohen Reinheitsgrad aufweisen. Feinbestandteile wie Spelzen, Abrieb, Staub und Mehl führen nicht nur zu schlechteren Abgaswerten sondern auch zu sehr hohen Staubablagerungen im Kessel selbst.

Der durchschnittliche Heizwert des Getreidekorns wurde mit etwa 4,0 kWh/kg ermittelt, bei den Holzpellets waren es 4,9 kWh/kg. Mit dem im Projekt ermittelten Kesselwirkungsgrad von durchschnittlich 81% kann im Vergleich zu einem Ölkessel mit 90% Kesselwirkungsgrad 1 Liter Heizöl durch 2,76 kg Getreide ersetzt werden. Damit bestätigt sich, dass die Grundkalkulation für den Standort des Lehr- und Versuchsgutes erreichbar ist. In einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden abschließend die Einflüsse durch steigende Brennstoffpreise und Investitionskosten untersucht. Der Betrieb eines Biomassekessels, der auch für Getreidekorn geeignet und zugelassen ist, erlaubt dem Landwirtschaftsbetrieb die Sicherung des Wärmebedarfs unter Nutzung eines geringen Teils des vorhandenen Potenzials an Getreide, dessen energetische Nutzung sich an der Preislage und Verfügbarkeit orientieren wird.