

ABSCHLUSSBERICHT

**Einfluss der Hackgutqualität auf die
Emissionen und den Wirkungsgrad von
automatisch beschickten
Biomassekleinfeuerungen**

Abschlussbericht zu den Forschungsprojekten

1) Einfluss der Hackgutqualität auf die Emissionen und den Wirkungsgrad von automatisch beschickten Biomassekleinfeuerungen in praxisnahen Lastzyklusversuchen

Projektkurztitel: „HG η Em-Praxisversuch“ Forschungsprojekt Nr. 101216 (BMLFUW 1.3.2/0026-PR/8/2017), Josephinum Research

2) Einfluss der Hackgutqualität auf die Emissionen und den Wirkungsgrad von automatisch beschickten Biomassekleinfeuerungen unter Prüfstandsbedingungen

Projektkurztitel: „HG η Em-Prüfstand“ Forschungsprojekt Nr. 101217/1, BLT Wieselburg

Impressum

Medieninhaber und Herausgeber:
HBLFA Francisco Josephinum Wieselburg
Schloss Weinzierl 1, 3250 Wieselburg
josephinum.at

Autorinnen und Autoren:
Mag.(FH) Dr. Lukas Sulzbacher, BEd
Ing. Harald Baumgartner
Dipl.-Ing. Dr. Josef Rathbauer

Fotonachweis: Quelle aller Bilder und Grafiken BLT Wieselburg
Wieselburg, 2020. Stand: 20. Oktober 2020

Copyright und Haftung:

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet, alle sonstigen Rechte sind ohne schriftliche Zustimmung des Medieninhabers unzulässig.

Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung des Bundeskanzleramtes und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Rechtausführungen stellen die unverbindliche Meinung der Autorin/des Autors dar und können der Rechtssprechung der unabhängigen Gerichte keinesfalls vorgreifen.

Rückmeldungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an
Lukas.sulzbacher@josephinum.at.

Inhalt

1 Einleitung	4
2 Zielsetzung	7
2.1 Zielsetzung HG η Em-Praxisversuch:.....	7
2.2 Zielsetzung HG η Em-Prüfstand:.....	8
3 Methodische Vorgangsweise	10
3.1 Versuchsaufbau	11
3.2 Versuchsablauf und Varianten	14
3.2.1 Ablauf Lastzyklus 1 (PrüfReal JR/BLT Wieselburg):	15
3.2.2 Ablauf Lastzyklus 2 (Jahresreferenzlastzyklus BEST/BE 2020+):	15
3.2.3 Ablauf Lastzyklus 3 (Referenzlastzyklus ohne Pufferspeicher):	16
3.2.4 Ablauf Lastzyklus 4 (Referenzlastzyklus mit Pufferspeicher):	17
3.3 Brennstoffanalysen.....	18
3.4 Feuerungsanlagen	20
3.5 Versuchsumfang.....	22
4 Versuchsbrennstoffe	23
5 Ergebnisse	29
5.1 Leistungsregelung im Zyklusbetrieb.....	29
5.2 Ergebnisse der Emissionsmessungen	33
5.2.1 CO-Emissionen	33
5.2.2 NO _x -Emissionen.....	40
5.2.3 Staub-Emissionen	45
5.2.4 Einfluss auf den Wirkungsgrad	55
6 Schlussfolgerungen und Diskussion	58
Tabellenverzeichnis	62
Abbildungsverzeichnis	63
Literaturverzeichnis	65

1 Einleitung

Die energetische Nutzung der Biomasse hat in Österreich eine lange Tradition. Die dramatisch steigenden Öl- und Gaspreise der vergangenen Jahre haben zu einer verstärkten Nachfrage nach Pellets-, Hackgut- aber auch Scheitholzfeuerungsanlagen geführt (Oberberger et al. 2009). Neben den steigenden Preisen fossiler Brennstoffe wurde das öffentliche Interesse auch durch politische Rahmenbedingungen und Instrumente auf nationaler sowie europäischer Ebene forciert.

Der technische Stand von Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen wurde in den letzten Jahren laufend verbessert. So stehen heute ausgereifte Systeme zur Verfügung, die durch hohe Bedienungsfreundlichkeit, hohe Wirkungsgrade sowie niedrige Emissionen gekennzeichnet sind. Jedoch nicht nur die Technik der Energieumwandlung sondern auch die dabei geltenden Umweltstandards und gesetzlich geforderten Auflagen hinsichtlich Emissionen befinden sich in ständiger Weiterentwicklung. Um dieser Entwicklung Rechnung zu tragen ist es erforderlich, dass auch die verwendeten Brennstoffe in möglichst hoher und einheitlicher Qualität bereitgestellt werden (Hartmann 2000).

Zu den wesentlichen lufthygienischen Emissionskenngrößen von Holzfeuerungen zählt der Partikelausstoß (PM-Emissionen oder Staub-Emissionen) (Kessler et al. 2000). Im Vergleich zu fossilen Energieträgern wie Heizöl oder Erdgas, weisen Holzbrennstoffe einen höheren Aschegehalt auf, wodurch in weiterer Folge auch höhere Staubemissionen entstehen. Staubemissionen sind definiert als eine disperse Verteilung von schwebenden Feststoffen im Abgas. Die Staubemissionen können eine Teilchengröße von 1 bis zu 200 μm aufweisen, wobei die Teilchen häufig nur so groß wie Molekülkomplexe sind. Staubemissionen, insbesondere jene anthropogenen Ursprungs aus Verbrennungs- und Industrieprozessen, können maßgebliche negative Auswirkungen auf Menschen und Tiere sowie Klima und Vegetation haben (Oberberger et al. 2005).

Aus diesem Grund sind die zulässigen Staubemissionen in gesetzlichen Emissionsvorschriften und Richtlinien limitiert. Staubemissionen können nach Art der Entstehung bzw. nach der Größe der Partikel unterteilt werden. Prinzipiell lassen sich Staubemissionen in zwei Kategorien, grobe Flugasche und Aerosole (Feinstäube) unterteilen. Grobe Flugasche entsteht durch Aufwirbelung von Asche- und Holzkohlepartikel, die in weiterer Folge mit dem Abgas aus dem Brennraum ausgetragen werden. Typische Partikelgrößen von grober Flugasche liegen zwischen 10 und 250 μm . Die zweite Fraktion stellen die sogenannten Aerosole dar. Ihre Bildungsmechanismen sind weitaus komplexer und sie sind durch

Partikeldurchmesser deutlich unter 1 µm gekennzeichnet. Aerosolemissionen können aus vollständiger oder unvollständiger Verbrennung resultieren (Lenz 2014).

Stickstoff im Brennstoff ist von großer Bedeutung, da dieser an der Bildung von Stickstoffoxiden beteiligt ist. Die Maßnahmen zur Reduktion der Schadstofffreisetzung werden in primäre und sekundäre Maßnahmen eingeteilt. Primärmaßnahmen können durch Optimierung der Betriebszustände der Feuerungsanlage erreicht werden. Die Bildung von Staub- und NO_x-Emissionen kann durch die Feuerraumgeometrie, die Verbrennungstemperatur und durch gezielte Verbrennungsführung, z.B. durch eine Luftstufung in getrennten Feuerraumbereichen, primär beeinflusst werden.

Sekundärmaßnahmen zur Reduktion von Partikelemissionen beruhen vorwiegend auf folgenden Methoden (Nussbaumer 2009):

- eine Schwerkraft- sowie Fliehkraftabscheidung
- eine Filtration mit Haftkräften durch Gitterwirkung
- eine Abscheidung durch elektrische Feldkräfte
- eine Nass-Entstaubung, bei der Grenzflächenkräfte wirken

Insbesondere die Sekundärmaßnahmen zur Reduktion der NO_x-Emissionen sind derzeit noch in Entwicklungs- bzw. Prototypstadium.

In Österreich sind die Anforderungen an Kleinfeuerungen für biogene Brennstoffe im Hausbrand durch die Vereinbarungen gemäß Art 15a B-VG geregelt. Für das Inverkehrbringen von Feuerungen für den Hausbrand war bis Ende 2019 der positive Abschluss der Typenprüfung durch eine akkreditierte Prüfstelle mit einem genormten Regelbrennstoff erforderlich. Durch das Inkrafttreten der EU-Rahmenrichtlinie über die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte (kurz: Ökodesign-Richtlinie) sollen für Produkte und deren umweltrelevanten Eigenschaften Mindestanforderungen festgelegt werden. Auch bei den Wärmeerzeugern verfolgt die Ökodesign-Richtlinie 2005/32/EG das Ziel, bei der Entwicklung und beim Design energiebetriebener Produkte ökologische Eigenschaften stärker zu berücksichtigen. Neben verschärften Mindestanforderungen für den Wirkungsgrad von Heizkesseln wurden seitens der Europäischen Kommission die Stickoxide NO_x, Kohlenmonoxid CO, unverbrannte Kohlenwasserstoffe und Staub als signifikant eingestuft. Die Industrie ist durch die ErP-Richtlinie mit neuen Herausforderungen konfrontiert - allerdings ist sie in diesem Kontext auch auf Marktüberwachungsmaßnahmen von Seiten der Europäischen Union bzw. des österreichischen Staates angewiesen.

Die Grenzwerte für organisch gebundenen Kohlenstoff und Staub wurden in Österreich seit dem 1. Jänner 2015 von 30 auf 20 bzw. von 60 auf 35 mg/MJ reduziert. Mit der neuerlichen Verschärfung durch die 2. Stufe der 1. BImSchV wurden in Deutschland die Grenzwerte für Kohlenmonoxid um etwa 17 Prozent und für Staub um rund 47 Prozent reduziert (Sulzbacher et al.2012).

In der Praxis kommt es bei wiederkehrenden Messungen vor Ort teilweise zu erheblichen Abweichungen zu Prüfstandsergebnissen. Die Abweichungen sind auf variierende Einflussgrößen wie Betriebs- und Wartungszustände der Heizkessel sowie eingesetzte Brennstoffqualitäten zurück zu führen. In dem Vorgängerprojekt PrüfReal, in dem verschiedene Holzpellets in Kleinfeuerungen eingesetzt wurden, konnte gezeigt werden, dass selbst geringe Änderungen der Brennstoffqualität deutliche Auswirkungen auf die Emissionsentstehung und den Betriebszustand der Anlagen über einen längeren Zeitraum haben können.

Mit dem Projekt „HGηEm“ sollen die gewonnenen Erkenntnisse auf den Brennstoff Holzhackgut ausgeweitet werden. Da Hackgut im Gegensatz zu Holzpellets dezentral aus sehr inhomogenen Rohstoffen produziert wird, resultiert eine größere Schwankungsbreite der Brennstoffqualität.

2 Zielsetzung

Zielsetzung des Projektes „HG η Em“ ist die Untersuchung der Auswirkungen der Hackgutqualität auf die Entstehung von Emissionen und den Wirkungsgrad in modernen Hackgutfeuerungsanlagen mit einer Wärmeleistung von 35-45 kW unter Prüfstandbedingungen und praxisnahen Bedingungen. Das Gesamtprojekt soll einen Beitrag dazu leisten, die komplexen Vorgänge der Emissionsbildung bei der Verbrennung von Holzbrennstoffen näher zu beleuchten und Optimierungsmaßnahmen zu identifizieren

Die Ergebnisse des Projekts sollen dazu beitragen, die spezifischen Anforderungen an Biomassebrennstoffe zu verdeutlichen. Durch die Zusammenstellung und Bewertung verschiedener Optimierungsmaßnahmen für Biomassebrennstoffe, kann die österreichische Land- und Forstwirtschaft, als Hauptrohstofflieferant von Biomassebrennstoffen, besser auf die Anforderungen der Verbrennungstechnik reagieren und auch die zukünftigen Absatzmärkte erhalten bzw. ausbauen.

2.1 Zielsetzung HG η Em-Praxisversuch:

Im Zuge des Projektes werden unterschiedliche Hackgutfeuerungsanlagen und unterschiedliche Holzhackgut-Qualitäten in praxisnahen Verbrennungsversuchen mit verschiedenen Lastzyklen betrieben und die Veränderung der Emissionen (in Abhängigkeit der Brennstoffqualität) sowie der Betriebszustand der Anlagen am Prüfstand messtechnisch ermittelt. Mit Hilfe der Projektergebnisse sollen signifikante Brennstoffeigenschaften identifiziert und etwaiger Verbesserungsbedarf der bestehenden Brennstoffspezifikationen aufgezeigt werden. Zudem sollen die Ergebnisse dazu beitragen, den Einfluss der Brennstoffqualität auf die Betriebsbedingungen und die Emissionsentstehung besser zu verstehen. In weiterer Folge sollen die Ergebnisse dazu verwendet werden, Anlagenbetreiber und Brennstoffproduzenten auf entscheidende Qualitätskriterien zu sensibilisieren und somit in der Praxis durch Knowhow-Transfer und bessere Brennstoffqualität niedrigere Emissionen zu erzielen.

Eine weitere Zielsetzung des Projektes ist die Analyse der Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Typenprüfung bei optimierten Anlageneinstellungen mit sehr hochwertigem Hackgut und einem praxisnahem Betrieb mit Lastwechsel. Die Erkenntnisse sollen als Diskussionsgrundlage für Gestaltung zukünftiger Prüfverfahren für automatisch beschickte Heizkessel dienen. Neben der Neuauflage der Prüfnorm EN 303-5 „Heizkessel für feste

Brennstoffe, manuell und automatisch beschickte Feuerungen, Nennwärmeleistung bis 500 kW - Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung“ im Jahr 2021 bestehen bereits Forderungen der Europäischen Kommission, das Prüfprozedere praxisnäher zu gestalten. Um den Ansprüchen praxisnaher Prüfverfahren und Emissionsmessungen gerecht zu werden, wird die Entwicklung von Lastzyklen anstelle der bisher definierten stationären und konstanten Prüfbedingungen diskutiert.

Zukünftige Verschärfungen der Emissionsgrenzwerte, insbesondere der Staub- und NO_x-Emissionen, zwingen die Biomassekesselhersteller ihre Technologien in Richtung Emissionsreduktion weiter voran zu treiben. Jedoch sind auch seitens der Brennstoffe gewisse Grenzen gesetzt. Die Ergebnisse sollen den aktuellen Stand der derzeit verfügbaren Verbrennungstechnik abbilden und als Grundlage für weitere Entwicklungen aber auch als Grundlage für zukünftige Emissionsgrenzwertdebatten dienen. Die Projektergebnisse sollen zeigen, ob die zukünftig geforderten Emissionsgrenzwerte mit modernster Feuerungstechnik nicht nur am Prüfstand sondern auch im Praxisbetrieb eingehalten werden können oder ob Sekundärmaßnahmen notwendig werden. Zudem soll geklärt werden, welche Anforderungen an Holzhackgut und deren Zusammensetzung gestellt werden müssen, um die Emissionsgrenzwerte einzuhalten. Die Projektergebnisse sollen Verbesserungspotentiale hinsichtlich Verbrennungsqualität und Emissionen aufzeigen und eventuell neue Qualitätsanforderungen an Holzbrennstoffe definieren.

Die Ergebnisse sollen einen Beitrag dazu leisten, die Auswirkungen von unterschiedlichen Hackgutqualitäten und Betriebsbedingungen, d.h. die Unterschiede zwischen Prüfstandsmessungen und Messungen in der Praxis im Rahmen von wiederkehrenden Überprüfungen zu erklären. Darüber hinaus sollen die Ergebnisse als Grundlage für weitere feuerungstechnische Verbesserungen dienen und detaillierte Spezifikationen des Brennstoffes liefern. Die umfangreichen physikalischen und chemischen Brennstoffanalysen (insbesondere der aschebildenden Komponenten) sollen zur Bewertung von Brennstoffqualitäten und der Brennstoffnormen bezüglich der Freisetzung von Staubemissionen dienen.

2.2 Zielsetzung HG_ηEm-Prüfstand:

Ziel des Projektes „HG_ηEm-Prüfstand“ ist die Untersuchung des Brennstoffeinflusses auf die Emissionen von Hackgut-Kleinfeuerungsanlagen unter stationären Prüfbedingungen am Prüfstand. Ergänzend zum Projekt „PrüfReal - bench tests“, bei dem der Schwerpunkt auf Brennstoffqualitäten von Holzpellets lag, soll im Zuge von „HG_ηEm-Prüfstand“ erhoben werden, welche Auswirkungen Änderungen der chemischen Zusammensetzung des

Brennstoffes Holzhackgut auf das Emissionsverhalten im Voll- und Teillastbetrieb haben. Zur Ermittlung der Daten sind Verbrennungsversuche am Kesselprüfstand der BLT Wieselburg mit unterschiedlichen Kesseltypen und unterschiedlichen Brennstoffqualitäten geplant. Die Variation der Brennstoffqualität bezieht sich im Wesentlichen auf die aerosolbildenden Bestandteile, den Aschegehalt aber auch auf den Wassergehalt und die Korngröße der Partikel.

Dazu werden Verbrennungsversuche mit unterschiedlichen Feuerungsanlagen und mehreren unterschiedlichen Brennstoffen am Prüfstand gemäß den Anforderungen der „ÖNORM EN 303-5:2012: Heizkessel - Teil 5: Heizkessel für feste Brennstoffe, manuell und automatisch beschickte Feuerungen, Nennwärmeleistung bis 500 kW - Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung“ durchgeführt.

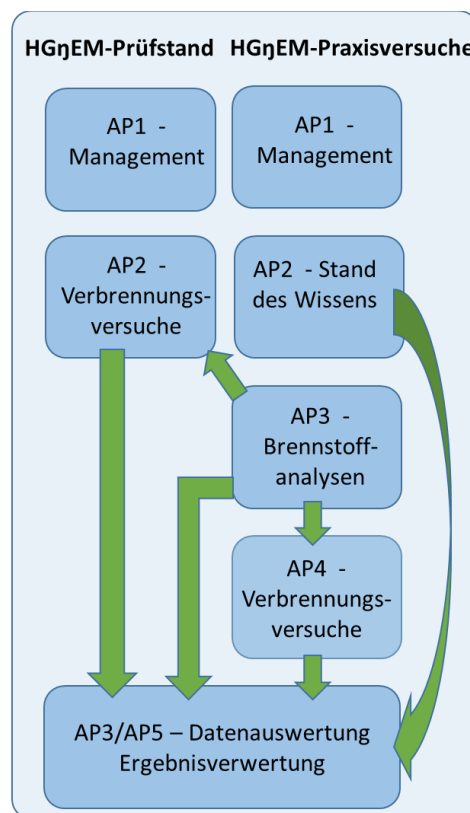
Neben dem Einfluss der Brennstoffqualität soll im Zuge des Projekts auch die Wirkung von Sekundärmaßnahmen zur Reduktion der Staubemissionen ermittelt werden. Dazu sind die verwendeten Feuerungsanlagen mit elektrostatischen Staubabscheidern ausgestattet. Deren Wirkung in Abhängigkeit der Brennstoffqualität sowie des Lastzustandes des Heizkessels wird messtechnisch erfasst.

3 Methodische Vorgangsweise

Das Konzept des Projektes „HG η Em“ basiert auf der Untersuchung von Auswirkungen der Hackgutqualität auf die Entstehung von Emissionen und den Wirkungsgrad in modernen Hackgutfeuerungsanlagen mit einer Wärmeleistung von 35-45 kW.

Zur übersichtlichen Gliederung der relevanten Tätigkeiten ist das Projekt in Arbeitspakete unterteilt, die unterschiedliche Methoden zur Erreichung der jeweiligen Zielsetzungen beinhalten.

Abbildung 1: Projektstruktur – „HG η Em“



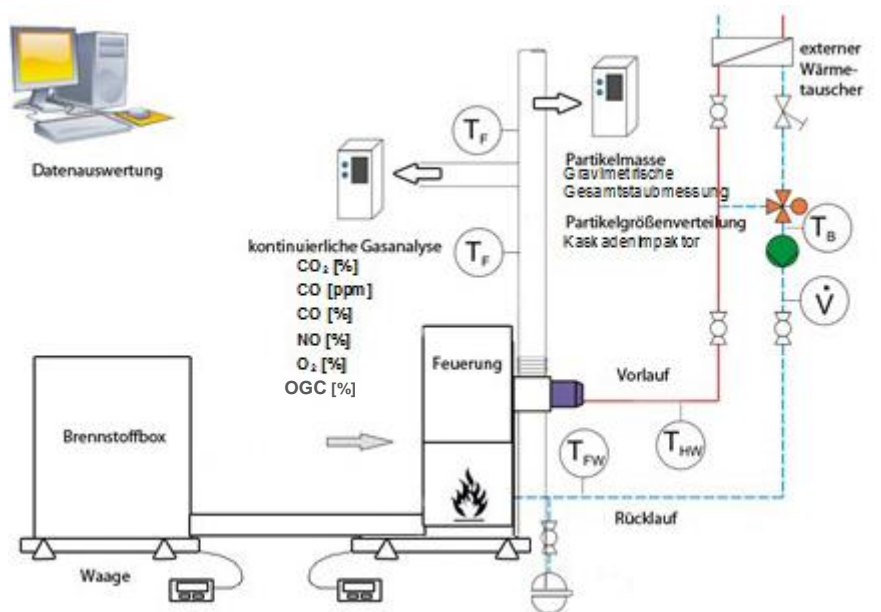
Neben der finanziellen Unterstützung des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus wurde das Projekt HG η Em von 2 österreichischen Kesselherstellern, in Form von In-kind-Leistungen unterstützt. Die für die Verbrennungsversuche benötigten Feuerungsanlagen, die Brennstoffe, sowie die personellen Ressourcen zur Installation, Wartung und für etwaige bauliche Veränderungen der Anlagen wurden von den Firmenpartnern zur Verfügung gestellt.

3.1 Versuchsaufbau

Die Verbrennungsversuche wurden auf dem Prüfstand der HBLFA Francisco Josephinum - BLT Wieselburg durchgeführt. Die BLT Wieselburg ist eine akkreditierte Prüfstelle mit der Identifikationsnummer 112 gemäß ÖVE/ÖNORM EN ISO /IEC 17025:2007, wo bereits seit 1979 Typenprüfungen an Biomassefeuerungen durchgeführt werden.

Abbildung 2 zeigt eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit den ermittelten Feuerungs- und Emissionsmessgrößen, die in der nachfolgenden Erläuterung in kontinuierliche und diskontinuierliche erfasste Messgrößen unterschieden werden.

Abbildung 2: schematische Darstellung der Versuchsaufbauten am Prüfstand



Die für die Verbrennungsversuche eingesetzten Messgeräte und –verfahren entsprechen den Anforderungen der international gültigen Normen EN 303-5:2012, EN 267:2011 und EN 304:2005.

Die Heizkessel wurden wasserseitig entsprechend den Anforderungen der EN 303-5 zur Ermittlung der Wärmeleistung an eine Messstrecke mit Kühlkreislauf angeschlossen. Somit kann die abgegebene Nutzwärmemenge über den Wasserdurchfluss und die Spreizung zwischen Vor- und Rücklaufftemperatur ermittelt werden. Die Wärmeleistungsmessung wird durch direkte Messung der im Kühlwasserkreislauf umgewälzten Wassermenge und deren

Temperaturerhöhung gemessen. Dazu verfügt die Wärmeleistungsmessstrecke des Prüfstandes über mehrere Coriolis-Massendurchflussmessgeräte der Serie PROMASS der Fa. Endress & Hauser zur Bestimmung des Massendurchflusses sowie paarweise kalibrierte Widerstandsthermometer Pt 100 am Kesselein- und –austritt zur Messung der Wassertemperatur.

Die Messdatenerfassung basiert auf dem Datenerfassungssystem TopMessage der Firma Delphin Technologie. Das Abfrageintervall betrug 1 Sekunde, wobei aus 10 Messwerten der Mittelwert gebildet wurde.

Die Abgasmessstrecke setzt sich aus einem Messstrecken-Teilstück zusammen, das mit Messstutzen zur Erfassung der Abgastemperatur ausgestattet ist. Die Abgastemperatur findet durch Netzmessung mit 5 Widerstandsthermometern Pt 100 statt. An die Abgasmessstrecke folgt ein Edelstahlkamin, über den das Abgas abgeführt wird.

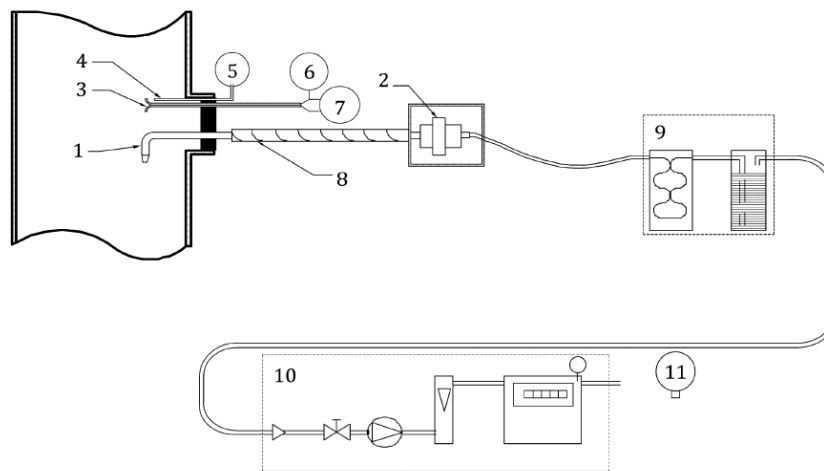
Neben der Wärmeleistungsmessung, der elektrischen Leistungsaufnahme des Heizkessels und der Abgastemperatur werden auch die gasförmigen Emissionen im Abgas kontinuierlich gemessen. Die Probenahme des zu analysierenden Abgasstromes wird bei der Abgasmessstrecke zentral über eine Pumpe und einen beheizten Filter für alle Messgrößen zentral entnommen und über eine beheizte Zuleitung und einer Messgasaufbereitung zu den einzelnen Analysatoren geleitet. Die Emissionswerte der einzelnen Messgrößen werden über die gesamte Laufzeit der Versuchsdurchführungen gemittelt.

Tabelle 1: Aufstellung der Messgeräte und Messbereiche für kontinuierlich erfasste Emissionen.

Messgröße	Messgerät/Hersteller	Messprinzip	Messbereich
CO-Low CO-High CO ₂ O ₂	NGA 2000 der Firma Emerson	NDIR (Nichtdispersiver-Infrarot) Gasanalysator	0-50 ppm, 0-2500 ppm 0-1,0 %, 0-10 % 0-5 %, 0-25 %
NO _x NO ₂ NO= NO _x -NO ₂	CLD 700 El-ht von ECO PHYSICS	Chemilumineszenz-analysator	0-10 / 0-100 / 0-1.000 / 0-10.000 ppm
OGC (org. gebundener Kohlenstoff)	Thermo-FID „ES“	Flammenionisations-detektor	0-100 / 100-1.000 / 1.000-10.000 ppm
Partikelgrößenverteilung	ELPI von Dekati	Kaskadenimpaktor	7 nm-10 µm

Die Bestimmung des Gesamtstaubes im Abgas wurde diskontinuierlich mit Hilfe einer gravimetrischen Messeinrichtung der Firma Paul Gothe GmbH mit einer Nennabsaugmenge von 6 m³/h ermittelt. Dabei wird ein Abgasstrom unmittelbar nach der Abgasmessstrecke mit einer Entnahmesonde isokinetisch entnommen und zur Staubabscheidung über einen Planfilter geführt. Die Staubbiladung wird im Anschluss an das Konditionieren des Filters mittels Analysenwaage ermittelt.

Abbildung 3: schematische Darstellung der gravimetrischen Staubbiladung (Quelle: ÖNORM EN 13284-1:2017)



Legende

- | | |
|---|---|
| 1 Entnahmesonde | 7 Gerät zur Messung des dynamischen Drucks |
| 2 Filtergehäuse | 8 Absaugrohr (Out-Stack-Filtergerät) |
| 3 Staudrucksonde | 9 Abkühl- und Trocknungseinrichtung |
| 4 Temperatursensor | 10 Absaugaggregat und Gasmesseinrichtung (siehe Bild 5) |
| 5 Temperaturanzeige | 11 Druckmessgerät |
| 6 Gerät zur Messung des statischen Drucks | |

Ergänzend zu den Standardemissionsgrößen wie CO, CO₂, OGC, NO_x und Gesamtstaub, wurden im Zuge der Verbrennungsversuche auch die Partikelgrößen sowie die Partikelgrößenverteilung ermittelt. Die Bestimmung erfolgte nach der in der VDI-Richtlinie 2066 (Blatt 5) beschriebenen Methode unter Verwendung eines Kaskadenimpaktors der Firma Dekati Typ ELPI. Bei diesem Messprinzip wird zur größenabhängigen Fraktionierung der Staubbiladung die spezifische Trägheit der Staubpartikel ausgenutzt. Dabei wird ein staubbeladener Teilgasstrom durch sequentiell angeordnete Düsen- und Impaktionsplatten geleitet, wodurch die Flugbahn der Teilchen in Richtung der Prallplatten abgelenkt und die Partikel ihrer Größe nach aufgetrennt werden. Durch die Ionisierung der Staubpartikel und die Strommessung an den Prallplatten, wird die direkte Erfassung der Partikel-Deposition ermöglicht (Loichinger 2005).

3.2 Versuchsablauf und Varianten

Die Arbeiten im Rahmen der Anlagenversuche umfassen 2 wesentliche Untersuchungsschwerpunkte:

- Verbrennungsversuche bei Nenn- und Teillast gemäß EN 303-5 zur Erhebung und Bewertung der Anlagenzustände bei 6 unterschiedlichen Brennstoffqualitäten sowie vor zwischen und nach dem Lastzyklus
- Versuche mit definierten Lastzyklen zur Erhebung der Auswirkung von Betriebszuständen und Lastwechseln auf das Emissionsverhalten mit unterschiedlichen Brennstoffqualitäten zur Simulation praxisnaher Betriebsbedingungen.

Der Versuchsplan wurde wie folgt umgesetzt:

1. Verbrennungsversuch gemäß EN 303-5 bei Nennlast
2. Verbrennungsversuch gemäß EN 303-5 bei Teillast (30% der Nennlast)
3. Lastzyklus 1 (Version PrüfReal BLT Wieselburg)
4. Lastzyklus 2 (Jahresreferenzlastzyklus BE 2020+)
5. Lastzyklus 3 (Entwurf ohne Pufferspeicher)
6. Lastzyklus 4 (Entwurf mit Pufferspeicher)

Jede Versuchsreihe mit einem Versuchsbrennstoff wurde mit einer Messung in Anlehnung an die Prüfanforderungen der EN 303-5 bei Nenn- und bei Teillast (30 % der Nennlast) gestartet. Die Versuchsdauer erstreckte sich nach Möglichkeit über mindestens 6 Stunden, abhängig von der Qualität der Verbrennung.

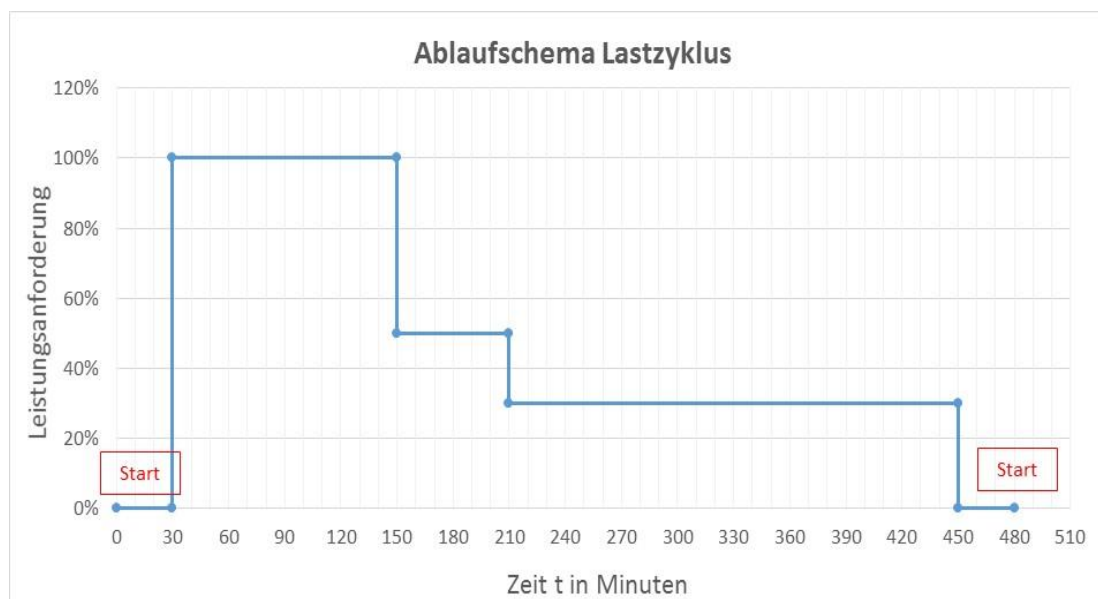
Im Anschluss an die Messungen bei Nenn- und Teillast, folgten die Verbrennungsversuche mit den definierten Lastzyklen. Im Gegensatz zu den Verbrennungsversuchen gemäß EN 303-5, wo die Messungen bei konstanten Betriebsbedingungen und Lastzuständen über die gesamte Messzeit durchgeführt werden, soll mit einem Lastzyklus durch Variation der abgenommenen Wärmeleistung ein praxisnaher Betrieb simuliert werden. Der Wechsel von Lastzuständen stellt sehr hohe Ansprüche an die Regelungstechnik der Feuerungsanlagen und lässt im Vergleich zur stationären Typenprüfung höhere Emissionen vermuten. Die Lastzyklen (Ablaufschema in Abbildung 4 bis Abbildung 7) beinhalten unterschiedliche Lastzustände, die innerhalb von 8 Stunden durchlaufen werden und sind im Folgenden kurz erläutert.

3.2.1 Ablauf Lastzyklus 1 (PrüfReal JR/BLT Wieselburg):

Um ein am Prüfstand sinnvoll anwendbares Profil zu erhalten, wurden beim PrüfReal-Zyklus der BLT Wieselburg die Leistungen auf einige definierte Laststufen verteilt. Die Zeitabschnitte, an denen eine Laststufe auftritt, werden zusammengefasst, wodurch sich ein stark vereinfachtes Profil mit wenigen Stufen ergibt. Dieses simplifizierte Lastprofil soll einen typischen Heiztag repräsentieren.

Nach dem Anlagenstart (0,5 h) werden die Anlagen für 2 Stunden bei 100 % Auslastung betrieben. 100% Kesselauslastung entsprechen dabei der vom Hersteller angegebenen Nennleistung des Kessels. Danach wird die Leistung der Feuerungen für 1 Stunde auf 50 % der Nennlast gesenkt. Als dritter Lastwechsel wird die Heizlast der Anlagen auf 30 % der Nennlast reduziert und für 4 Stunden gehalten. Im Anschluss an den Teillastbetrieb (30%) endet der Zyklus (Abbildung 4).

Abbildung 4: schematische Darstellung des Lastzyklus BLT Wieselburg (PrüfReal)



3.2.2 Ablauf Lastzyklus 2 (Jahresreferenzlastzyklus BEST/BE 2020+):

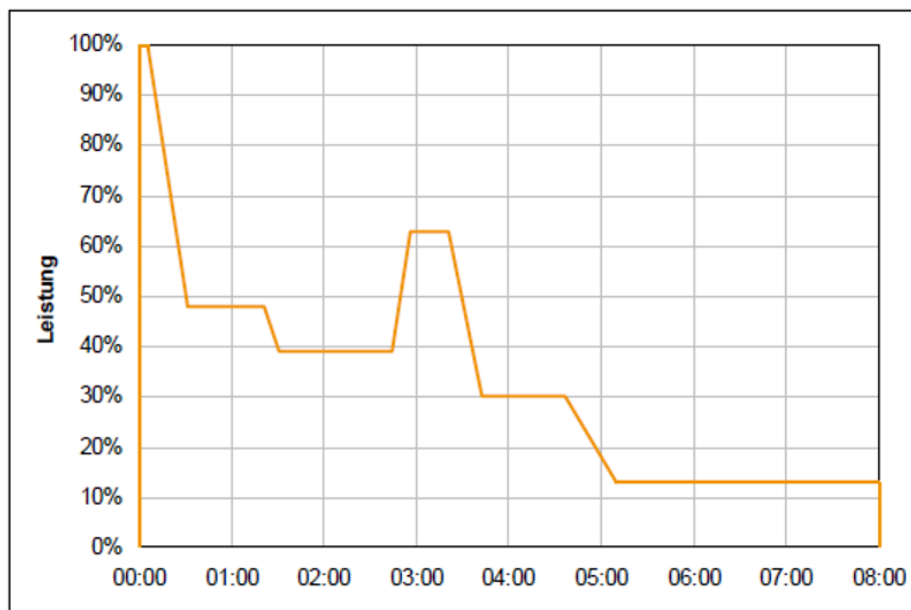
Der Jahresreferenzlastzyklus wurde entwickelt, um den typischen durchschnittlichen Lastverlauf einer Biomassekesselanlage über eine Heizungsperiode näherungsweise durch ein 8h-Lastprofil abzubilden. Jeder Lastwechsel im so erhaltenen 8-Stunden-Zyklus wird mit definierten Steigungen versehen, um einerseits Sprünge in der Wärmeabnahme zu vermeiden und andererseits die Feuerungen mit unterschiedlich raschen Lastwechseln zu

beanspruchen. Das so ermittelte Jahresreferenzlastprofil ist in Abbildung 5 dargestellt, die Zahlenwerte sind in der dazugehörigen Tabelle 2 zu finden.

Tabelle 2: Datentabelle zum Jahresreferenzlastzyklus für den Jahresnormnutzungsgrad, P_K ist die Kesselleistung in % der Nennleistung

P_K	0%	100%	48%	48%	39%	39%
Dauer	00:00:00	00:04:52	00:26:00	00:50:15	00:09:00	01:13:44
Zeit	00:00:00	00:04:52	00:30:52	01:21:07	01:30:07	02:43:51
P_K	63%	63%	30%	30%	13%	13%
Dauer	00:12:00	00:24:38	00:22:00	00:53:14	00:34:00	02:50:17
Zeit	02:55:51	03:20:29	03:42:29	04:35:43	04:09:43	08:00:00

Abbildung 5: schematische Darstellung des Jahresreferenzlastzyklus BEST/BE 2020+

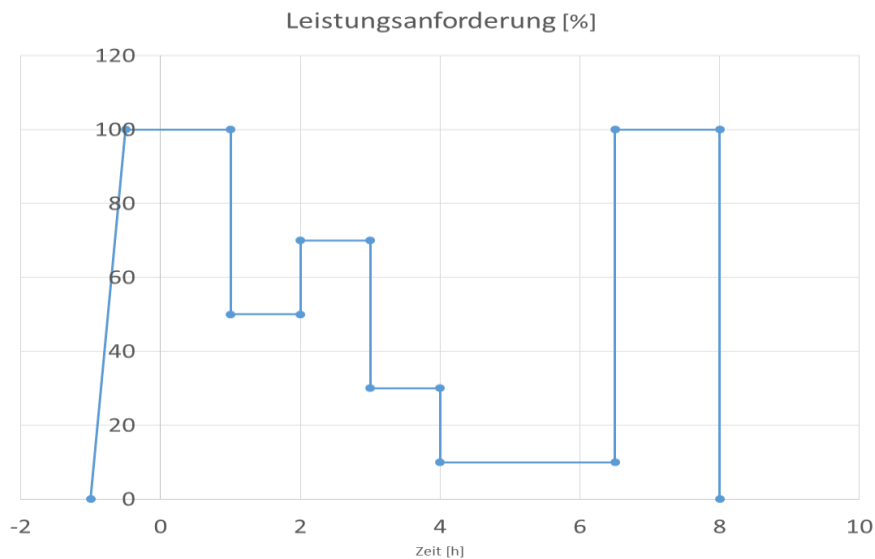


3.2.3 Ablauf Lastzyklus 3 (Referenzlastzyklus ohne Pufferspeicher):

Der Lastzyklus 3 unterscheidet sich zu den Lastzyklen 1 und 2 durch den vorgewärmten Kessel bei Versuchsstart. Im Vergleich zum „Zyklus 2 - Jahresreferenzlastzyklus“ weist er eine deutlich längere Betriebsdauer unter Nennlast auf. Die Begründung liegt darin, dass mit dem Lastzyklus auch nachgewiesen werden soll, dass geprüfte Feuerungsanlagen im Stande sind,

die vom Hersteller angegebene Nennwärmeleistung zu bringen. Somit soll eine Unterdimensionierung der Anlagen verhindert werden. Hierzu ist bei Versuchsstart und Versuchsende ein definierter Nennlastzustand vorgesehen.

Abbildung 6: schematische Darstellung des Lastzyklus ohne Pufferspeicher

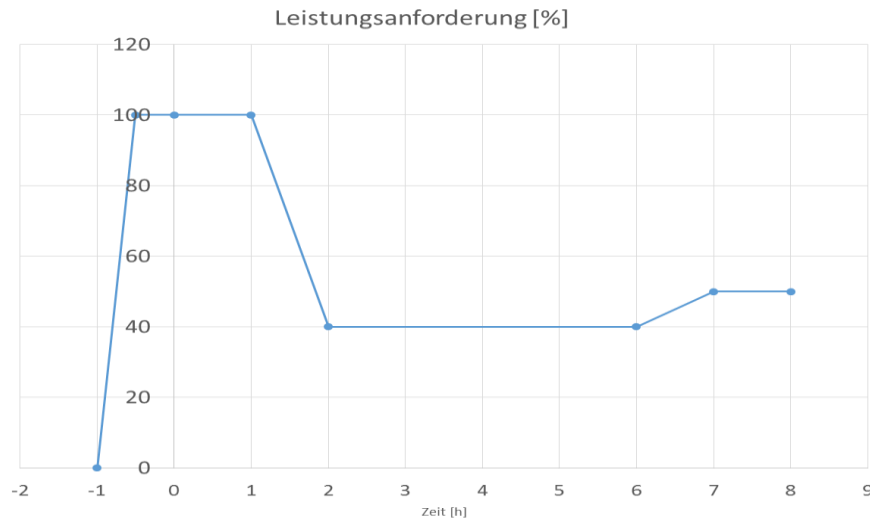


3.2.4 Ablauf Lastzyklus 4 (Referenzlastzyklus mit Pufferspeicher):

Da in der Praxis sehr viele Hackgutfeuerungsanlagen mit einem Pufferspeicher betrieben werden, wurde der Lastzyklus 4 mit einem Pufferladekonzept entwickelt. Das ermöglicht eine möglichst gute Modulation mit geringen Anlagenstarts und -stopps während des Versuchsablaufes. Der Pufferspeicher dient dazu, Differenzen zwischen der erzeugten und der verbrauchten Wärmeleistung auszugleichen und so die Wärmeerzeugung zeitlich vom Verbrauch entkoppeln zu können.

Auch bei dieser Variante wird der Versuch mit einem vorgewärmten Kessel gestartet. Die Gesamtenergiemenge entspricht jener bei Zyklus ohne Puffer. Diese Zyklusvariante simuliert einen gleitenden Betrieb auch mit Pufferspeicher mit dem Ziel, Start-Stopp-Phasen gänzlich zu vermeiden.

Abbildung 7: schematische Darstellung des Lastzyklus mit Pufferspeicher



Bei allen Zyklusvarianten wurden die Standardemissionsgrößen wie CO, CO₂, OGC, NO_x über die gesamte Laufzeit von 8 Stunden gemittelt. Zur Ermittlung der Staubemissionen werden bei Verbrennungsversuchen gemäß EN 303-5 die Absaugintervalle für mindestens 4 Staubfilter regelmäßig über die gesamten Versuchslaufzeit verteilt. Diese Messmethode muss entsprechend den geänderten Bedingungen für die Lastzyklusversuche adaptiert werden. So wurde für jede Laststufe ein Staubfilter eingesetzt und die Emissionen erhoben. Zur Ermittlung des Einflusses des Zeitpunkts der Staubmessung wurden in einer Versuchsreihe die Absaugintervalle sowohl zu Beginn jedes Lastwechsels als auch zu Ende jeder Laststufe, sprich vor jedem Lastwechsel, erhoben. Vergleichsweise wurden auch Lastzyklusversuche mit nur einem Staubfilter über die gesamte Versuchsdauer eingesetzt. In der Ergebnisdarstellung können somit die Staubemissionen als ein Mittelwert über den gesamten Lastzyklusverlauf verglichen und jede Laststufe einzeln ausgewertet werden und eventuelle Emissionsspitzen in Abhängigkeit der Leistungsstufe eruiert werden.

3.3 Brennstoffanalysen

Im Zuge des Projektes wurden umfangreiche physikalische und chemische Analysen der in den Versuchen eingesetzten Brennstoffe durchgeführt. Die Brennstoffanalysen wurden zum einen dazu verwendet, die Qualität der Brennstoffe zu bestimmen und die Brennstoffe entsprechend den definierten Anforderungen auszuwählen. Zum anderen bilden die Brennstoffanalysen die Basis für die Auswertung der Emissionsmessungen. Die Brennstoffanalysen umfassen die in der Brennstoffnorm ÖNORM EN ISO 17225 Teil 4: Klassifizierung von Holzhackschnitzeln geforderten normativen und informativen Parameter.

Zudem wurden die Standardparameter um einige Qualitätskenngrößen wie z.B. die gesamte Aufstellung der Haupt- und Spurenelemente ergänzt. Folgende Tabelle 3 zeigt eine Aufstellung der durchgeführten physikalisch-brenntechnischen und chemischen Analysen inkl. der zugrundeliegenden Messprinzipien und Bestimmungsnormen:

Tabelle 3: Umfang der physikalischen und chemischen Brennstoffanalysen

Parameter	Messprinzip	Methode
Physikalisch-brenntechnische Analysen		
Wassergehalt (roh)	Ofentrocknung: (105 °C)	ÖNORM EN ISO 18134-2:2017
Wassergehalt (analysenfeucht)	Ofentrocknung: (105 °C)	ÖNORM EN ISO 18134-3:2017
Heizwert	Bombenkalorimeter Ika C5000	ÖNORM EN ISO 18125:2017
Aschegehalt	Veraschung im Muffelofen (550 °C)	ÖNORM EN ISO 18122:2016
Flüchtige Bestandteile	Bestimmung im Muffelofen (900 °C)	ÖNORM EN 15148:2009
Schüttdichte	Definierte Volumens- und Massebestimmung mit Normbehälter	ÖNORM EN ISO 17818:2016
Partikelgrößenverteilung	Siebanalyse mit Plansiebmaschine und genormten Lochblechsieben	ÖNORM EN ISO 17827-1:2016
Chemische Analysen		
C,H,N	Elementaranalysator	ÖNORM EN 15104:2011
Hauptelemente: Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na, und Ti	ICP-OES, ICP-MS	ÖNORM EN ISO 16967:2015
Spurenelemente: As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, V, und Zn	ICP-OES, ICP-MS	ÖNORM EN ISO 16968:2015
S, Cl	Ionenchromatographie	ÖNORM EN ISO 16994:2016

3.4 Feuerungsanlagen

Für die Verbrennungsversuche wurden ausschließlich am Markt erhältliche, automatisch beschickte Hackgutfeuerungsanlagen verwendet. Die Installation der Kessel am Prüfstand wurde vor den Verbrennungsversuchen in Anwesenheit von technischem Personal der Produktionsfirmen vorgenommen.

Die eingesetzten Feuerungsanlagen wurden bei einer Nennwärmeleistung von 35 bis 45 kW betrieben. Zur Darstellung der Wirkung von Sekundärmaßnahmen wurden die Anlagen auch mit elektrostatischen Filteraggregaten zur Abgasreinigung ausgestattet. Das Abscheideprinzip eines Elektrofilters beruht auf einer negativen Aufladung der Staubteilchen und Nebeltröpfchen im Gas unter dem Einfluss eines starken elektrischen Feldes. Die negativ aufgeladenen Teilchen werden dann zu der positiv geladenen Niederschlags Elektrode transportiert und dort abgeschieden. Das Abscheideprinzip soll theoretisch keiner physikalischen Einschränkung hinsichtlich der Feinheit der abzuscheidenden Partikel unterliegen. Daher sollen auch für Feinstäube sehr hohe Abscheidegrade erzielt werden können. Untersucht wurden in diesem Zusammenhang auch die Abscheidegrade in Abhängigkeit der aerosolbildenden Eigenschaft der eingesetzten Versuchsbrennstoffe

Allgemeine Konstruktion:

Die Heizkessel bestehen aus einer Brennstofffördereinrichtung mit integrierter Zellradschleuse als rückbrandsichere Einrichtung, Zündeinrichtungen mit elektrischen Zündstäben, einem Kipprost, einem schamottierten Brennraum, einem Flammraum, einem nachgeordneten Wärmetauscher mit integrierten Wirbulatoren zur Wärmetauscherabreinigung, wo die Wärmeenergie an das Heizungswasser abgegeben wird.. Unter dem Kipprost und unter dem Wärmetauscher befinden sich die Ascheabsetzräume und die Ascheaustrageinrichtung. Die Feuerung sind mit Mikroprozessorregelung, einem drehzahlgeregelten Saugzuggebläse, Unterdruckregelung, Lambdasonde, Abgastemperatursensor, Primär-/ Sekundärluftschieber, Abgasrückführung sowie einer Touch-Screen-Bedieneinheit ausgestattet.

Brennstoffzufuhr:

Für die Versuche wurde ein Vorratsbehälter aus einer Holz- bzw. Metallkonstruktion mit aufgebauter Brennstoffzufuhreinrichtung eingesetzt. Mit einer unter dem Brennstoffzufuhrbehälter angeordneten Dosierschnecke wird der Brennstoff zur Zellradschleuse auf der Beschickungseinrichtung gefördert. Der Brennstoff wird von der

Stokerschnecke leistungsabhängig auf den Rost im Brennraum geschoben und automatisch entzündet.

Luftzufuhr / Verbrennungsgasweg:

Der geregelte Saugzugventilator erzeugt im Kessel einen Unterdruck. Die dadurch einströmende Primärluft wird optional mit einem Teil des Abgases der integrierten Abgasrückführung (wird abhängig von den Brennstoffeigenschaften aktiviert bzw. deaktiviert) vermischt und dem Brennstoff von unten durch den Rost zugeführt. Für einen emissionsarmen Ausbrand der Verbrennungsgase wird dem Glutbett über dem Rost die Sekundärluft zugeführt. Die Menge der Primärluft wird über den Saugzugventilator geregelt und die Abgasmenge durch den Luftschieber der Abgasrückführung. Die Abgasrückführung dient zur Regelung der Brennraumtemperatur. Durch die Beimischung des Abgases wird die Verbrennungstemperatur gesenkt und somit ein stabiles Temperaturfenster für die Verbrennung ermöglicht, um auch sehr trockene Brennstoffe verfeuern zu können. Nach der Verbrennung steigt das heiße Abgas in den oberen Bereich des Flammraums. Von dort strömt es in den mit Wirbulatoren bestückten Wärmetauscher.

3.5 Versuchsumfang

In Summe wurden im Zuge des Projektes 111 Verbrennungsversuche mit 6 verschiedenen Versuchsbrennstoffen in zwei automatisch beschickten Hackschnitzelkesseln durchgeführt.

In der folgenden Tabelle sind alle im Zuge des Projektes durchgeführten Verbrennungsversuche aufgelistet. Zu finden ist darin die Art der Messung, d.h. Verbrennungsversuche bei Nenn- und Teillast nach EN 303-5 bzw. Art des jeweiligen Lastzyklus sowie der verwendete Brennstoff.

Tabelle 4: Versuchsumfang nach Art der Messung und eingesetztem Versuchsbrennstoff.

	Nennlast	Teillast	Zyklus 1	Zyklus 2	Zyklus 3	Zyklus 4
Brennstoff 1	5	4	9	3	6	1
Brennstoff 2	5	5	1	3	3	1
Brennstoff 3	9	8	3	2	12	1
Brennstoff 4	3	2	1	2	2	0
Brennstoff 5	1	1	1	2	1	0
Brennstoff 6	7	1	0	0	5	1

4 Versuchsbrennstoffe

Für die Verbrennungsversuche wurden unterschiedliche Holzhackgut-Brennstoffe eingesetzt, die sich neben der Zusammensetzung der Holzart auch in der Aufbereitungsform und in der Qualität, wie zum Beispiel dem Rindenanteil und dem Grad der Verunreinigung unterschieden. Abbildung 8 bis Abbildung 10 zeigen die Versuchsbrennstoffe auf einem Fotoraster. Entgegen dem ursprünglichen Vorhaben im Projektantrag wurde das Brennstoffspektrum von geplanten 3 Versuchsbrennstoffen auf 6 ausgeweitet.

Zur Klassifizierung und Qualitätsbeurteilung sind die eingesetzten Brennstoffe hinsichtlich ihrer brennstoffspezifischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften umfassend analysiert worden. Die brennstofftechnischen Kenndaten der Versuchsbrennstoffe sind in Tabelle 5, Tabelle 6 und Tabelle 8 zusammengefasst

Abbildung 8: Versuchsbrennstoff 1 – Hartholz-Hackgut und Versuchsbrennstoff 2 - Hobelspäne



Als Versuchsbrennstoff 1 wurde Hartholz-Hackgut mit einem geringen Rindenanteil ausgewählt. Das Material wurde nach dem Hacken auf einen Wassergehalt von <math><15\%</math> technisch getrocknet. Der Brennstoff war durch einen geringen Feinanteil (P315) und einem geringen Anteil an Verunreinigungen gekennzeichnet.

Versuchsbrennstoff 2 – Hobelspäne wiesen eine vergleichsweise geringe Schüttdichte mit lediglich 90 kg/m^3 auf. Eine repräsentative Siebanalyse war auf Grund des hohen Anteils an Feinanteilen und Staub sowie der Form der Partikeln (Neigung zum Verhaken) nicht möglich.

Die Hobelspäne wurden von einem Leimbinderwerk bezogen und wiesen daher produktionsbedingt eine geringe Menge an Leimanteil und einen Wassergehalt von rund 8 % auf.

Abbildung 9: Versuchsbrennstoff 3 – Waldhackgut (hohe Qualität) und Versuchsbrennstoff 4 – Waldhackgut (Schlechte Qualität)



Versuchsbrennstoff 3 und 4 waren typische Waldhackgut-Praxisproben, die aus Rückständen der Waldbewirtschaftung und im Wesentlichen aus Weichholz erzeugt wurden. Während Versuchsbrennstoff 3 durch einen sehr geringen Anteil an Rinde und sonstigen Verunreinigungen bzw. Nadeln gekennzeichnet war, wies Versuchsbrennstoff 4 eine deutlich schlechtere Qualität auf. Erhöhter Rinden- und Feinanteil sowie Nadeln und sonstige Verunreinigungen und Störstoffe waren die Auswahlkriterien für diesen Brennstoff.

Abbildung 10: Versuchsbrennstoff 5 – Industriehackgut (ohne Rinde) und Versuchsbrennstoff 6 – Hackschnitzel frisch (hoher Wassergehalt)



Versuchsbrennstoff 5 war rindenfreies Industriehackgut mit einem Wassergehalt von rund 16 %. Diese Brennstoffqualität, bestehend aus reinem Fichtenholz, wird typischerweise als Prüfbrennstoff im Rahmen einer heiztechnischen Prüfung (Typenprüfung) verwendet. Als Versuchsbrennstoff 6 kam frisches Hackgut mit einem Wassergehalt von 44 % zum Einsatz. Dieses Material wurde von einem Sägewerk bezogen und wurde mit unterschiedlichen Wassergehalten (44 %, rund 30 % und mit rund 20 %) eingesetzt, um den Einfluss des Wassergehaltes auf den Betrieb und die Emissionen zu erheben.

In Tabelle 5 sind die Ergebnisse der physikalischen-brennstofftechnischen Analysen zusammengefasst. Der Wassergehalt der eingesetzten Brennstoffe erstreckte sich von rund 8 % bei den Hobelspänen bis hin zu 44 % beim Hackgut frisch aus dem Sägewerk. Der niedrigste Aschegehalt von 0,3 % wurde beim rindenfreien Industriehackgut, der höchste bei den Hartholz-Hackschnitzel mit 1,7 % gemessen. Der Brennwert auf Trockenmassebasis wies keine großen Unterschiede zwischen den eingesetzten Brennstoffen auf und schwankte von 19,7 MJ/kg bis 20,4 MJ/kg. Größere Schwankungsbreiten hingegen wurden bei der Schüttdichte festgestellt. Hier reichen die Ergebnisse von 90 kg/m³ bei den Hobelspänen bis hin zu 230 kg/m³ bei dem frischen Hackgut.

Tabelle 5: Ergebnisse der physikalisch-brennstofftechnischen Untersuchungsparameter

BrennstoffNr.	1	2	3	4	5	6
Beschreibung	Hartholz-Hackgut rindenarm getrocknet	Hobelspäne (mit Leimanteil)	Waldhackgut Praxisprobe (Qualität 1)	Waldhackgut Praxisprobe (Qualität 2)	Industrie-hackgut (rindenfrei - getrocknet)	Hackgut – frisch (var. Wassergehalt)
Wassergehalt roh [%]	12,8	7,9	19,2	20,0	15,5	44-12
Aschegehalt wf (550°C) [%]	1,71	0,54	0,79	1,25	0,27	0,36
Brennwert wf [MJ/kg]	19,92	19,92	20,29	19,69	20,29	20,36
Heizwert wf [MJ/kg]	18,63	18,60	18,99	18,38	18,99	19,03
Schüttdichte roh [kg/m³]	210	90	210	220	210	230
Siebanalyse	P31S	n.b.	P31S	P31	P16S	P31S

wf = wasserfreie Bezugsbasis | roh = im Anlieferungszustand | n.b. = nicht bestimmbar

Hinsichtlich der Elementarzusammensetzung der Brennstoffe (C, H, N und S) wurden nennenswerte Unterschiede beim Stickstoff- (N) und beim Schwefelgehalt ermittelt. Der Brennstoffstickstoff schwankte von 0,07 % beim rindenfreien Industriebrennstoff bis hin zu 0,21 % beim Brennstoff 4 - Waldhackgut mit schlechter Qualität. Auch hinsichtlich des Schwefelgehalts wurden die geringsten Konzentrationen von 0,006 % beim reinen Fichtenholz Brennstoff 5 gemessen. Brennstoff 2 – Hobelspäne wies den höchsten Schwefelgehalt mit rund 0,04 % auf.

Tabelle 6: Ergebnisse der Kohlenstoff- (C), Wasserstoff- (H), Stickstoff- (N) und Schwefelgehalte (S).

BrennstoffNr.	1	2	3	4	5	6
Beschreibung	Hartholz-Hackgut rindenarm getrocknet	Hobelspäne (mit Leimanteil)	Waldhackgut Praxisprobe (Qualität 1)	Waldhackgut Praxisprobe (Qualität 2)	Industriebrennstoff (rindenfrei - getrocknet)	Hackgut – frisch (var. Wassergehalt)
C [%]	48,42	47,93	48,71	47,14	49,00	47,82
H [%]	6,02	6,37	6,31	6,47	6,33	5,90
N [%]	0,174	0,173	0,170	0,213	0,070	0,080
S [%]	0,020	0,038	0,010	0,020	0,006	0,02

In Tabelle 7 sind die für die Aerosolbildung relevanten Elemente Schwefel (S), Kalium (K), Natrium (Na), Zink (Zn) und Blei (Pb) angeführt. Aktuelle Studien haben gezeigt, dass die Summe dieser Elemente als Indikator für Staubemissionen herangezogen werden kann. D.h. je höher die Summe dieser Elemente, desto höher die Staubemissionen. Darüber hinaus wird in diesem Zusammenhang auch dem molaren Si/K-Verhältnis eine Bedeutung zugeschrieben. Je kleiner das Si/K-Verhältnis ist, desto weniger Kalium wird in die Rostasche in Form von Kaliumsilikaten eingebunden und desto mehr geht in die Gasphase über. Die höchste Summe der aerosolbildenden Elemente wurden beim Waldhackgut Nr. 4 und bei den Hartholz-Hackschnitzel gemessen. Diese beiden Brennstoffe wiesen auch das geringste Si/K-Verhältnis (1,4 - 1,7) auf.

Tabelle 7: Gehalt an aerosolbildenden Elementen Schwefel (S), Kalium (K), Natrium (Na), Zink (Zn) und Blei (Pb) der verwendeten Versuchsbrennstoffe

BrennstoffNr.	1	2	3	4	5	6
Beschreibung	Hartholz-Hackgut rindenarm getrocknet	Hobelspäne (mit Leimanteil)	Waldhackgut Praxisprobe (Qualität 1)	Waldhackgut Praxisprobe (Qualität 2)	Industrie-Hackgut (rindenfrei - getrocknet)	Hackgut – frisch (var. Wassergehalt)
S [mg/kg]	213,6	380,0	114,4	242,5	200,0	200,0
K [mg/kg]	1.587,6	391,1	663,8	1.730,0	354,0	372,0
Na [mg/kg]	98,4	17,4	12,3	61,0	77,0	71,0
Zn [mg/kg]	15,2	7,2	28,3	8,3	10,0	8,5
Pb [mg/kg]	1,2	n.n.	0,1	<1,2	<0,5	<0,5
Summe [mg/kg]	1.916,0	795,7	818,9	2.043,0	641,5	652,0

In Tabelle 8 sind weitere ausgewählte Elementkonzentrationen der eingesetzten Versuchsbrennstoffe ausgewiesen. Auch hier weisen die Brennstoffe Nummer 1 Hartholz-Hackschnitzel und Brennstoff 4 Waldhackgut mit schlechter Qualität durchwegs deutlich höhere Konzentrationen auf. Insbesondere bei den Elementen Aluminium (Al), Kalzium (Ca), Eisen (Fe), Magnesium (Mg), Mangan (Mn), Silizium (Si), Titan (Ti) und Kupfer (Cu).

Tabelle 8: Ergebnisse ausgewählter Elementkonzentrationen.

BrennstoffNr.	1	2	3	4	5	6
Beschreibung	Hartholz-Hackgut rindenarm getrocknet	Hobelspäne (mit Leimanteil)	Waldhackgut Praxisprobe (Qualität 1)	Waldhackgut Praxisprobe (Qualität 2)	Industrie-Hackgut (rindenfrei - getrocknet)	Hackgut – frisch (var. Wassergehalt)
Al [mg/kg]	248,6	45,2	24,1	213,5	19,0	12,0
Ca [mg/kg]	5.984,0	1.828,9	2.141,8	2.928,7	611,0	613,0
Fe [mg/kg]	213,6	47,7	42,0	138,2	6,9	4,0
Mg [mg/kg]	738,6	119,0	269,8	471,3	109,0	102,0
Mn [mg/kg]	116,8	118,3	196,6	187,6	71,0	67,0

BrennstoffNr.	1	2	3	4	5	6
P [mg/kg]	166,9	28,5	111,8	334,7	14,0	41,0
Si [mg/kg]	2.802,1	1.538,1	1.502,1	2.386,4	597,0	460,0
Ti [mg/kg]	14,7	1,6	0,8	18,7	3,3	2,6
Cr [mg/kg]	7,4	4,5	3,3	6,5	<1,0	<1,0
Cu [mg/kg]	1,4	0,2	0,4	1,4	2,6	2,4
Ni [mg/kg]	3,9	1,6	1,2	3,5	<1,0	<1,0
Sb [mg/kg]	5,0	3,3	2,4	3,3	n.n.	n.n.
Sn [mg/kg]	1,2	0,9	1,1	1,1	n.n.	n.n.
V [mg/kg]	<0,4	n.n.	<0,08	<0,2	<0,1	<0,1

n.n. = nicht nachweisbar

5 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Verbrennungsversuche mit den beiden Feuerungsanlagen und den sechs ausgewählten Versuchsbrennstoffen präsentiert. Es werden die Einflüsse der unterschiedlichen Versuchsbrennstoffe, deren Qualität und Beschaffenheit auf das Emissionsverhalten der Feuerungsanlagen dargestellt. Darüber hinaus werden auch die Effizienz und Abscheidewirkung von zwei elektrostatischen Filtern in Abhängigkeit der Brennstoffqualität beleuchtet.

Die Versuche wurden, sofern möglich, bei jeder Feuerungsanlage und mit jedem Brennstoff mit den standardmäßigen Werkseinstellungen durchgeführt. Im Falle von kritischen bzw. untypischen Betriebs- und Leistungszuständen wurden geringfügige brennstoffspezifische Anpassungen an den Anlageneinstellungen in Absprache mit den Herstellern durchgeführt.

5.1 Leistungsregelung im Zyklusbetrieb

Je nach Gestaltung der zugrundeliegenden Lastzyklen werden unterschiedliche Ansprüche an die Regelungstechnik der Feuerungsanlagen gestellt. Während bei einem Verbrennungsversuch gemäß EN 303-5 die Leistungsregelung konstant bei Nennlast bzw. Teillast über eine Dauer von mindestens 6 Stunden gehalten wird, muss die Leistungsregelung während der Lastzyklusversuche auf die geänderte Wärmeanforderung des Prüfstandes reagieren. Die folgenden Abbildungen zeigen die Wärmevorgabe des Prüfstandes (blaue Linie) sowie die tatsächlich Wärmeleistung der Feuerungsanlagen.

Abbildung 11: Ablauf und Leistungsregelung der eingesetzten Feuerungsanlagen im Lastzyklus 1 am Beispiel von Brennstoff-Nr. 1 Hartholz Hackgut.

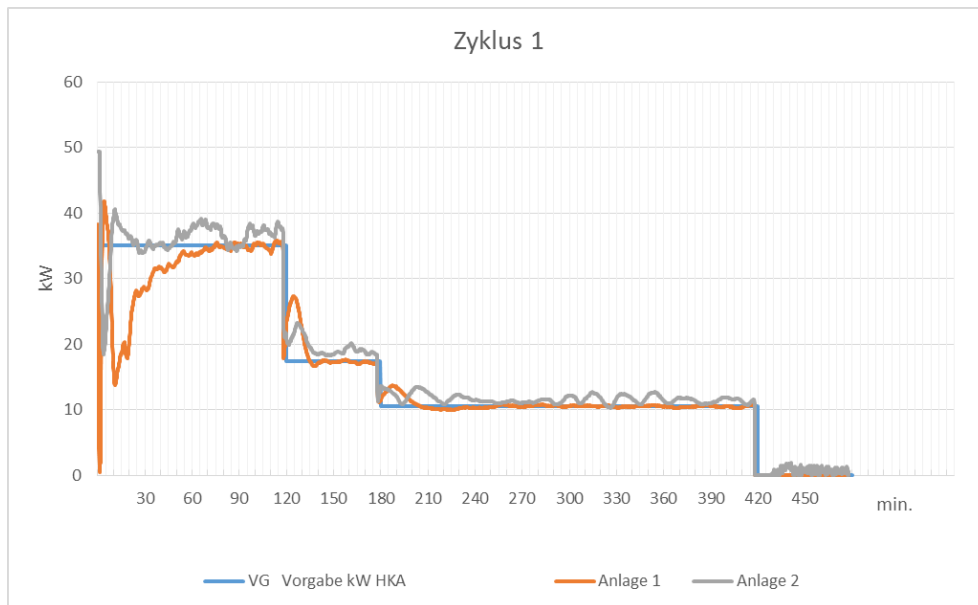
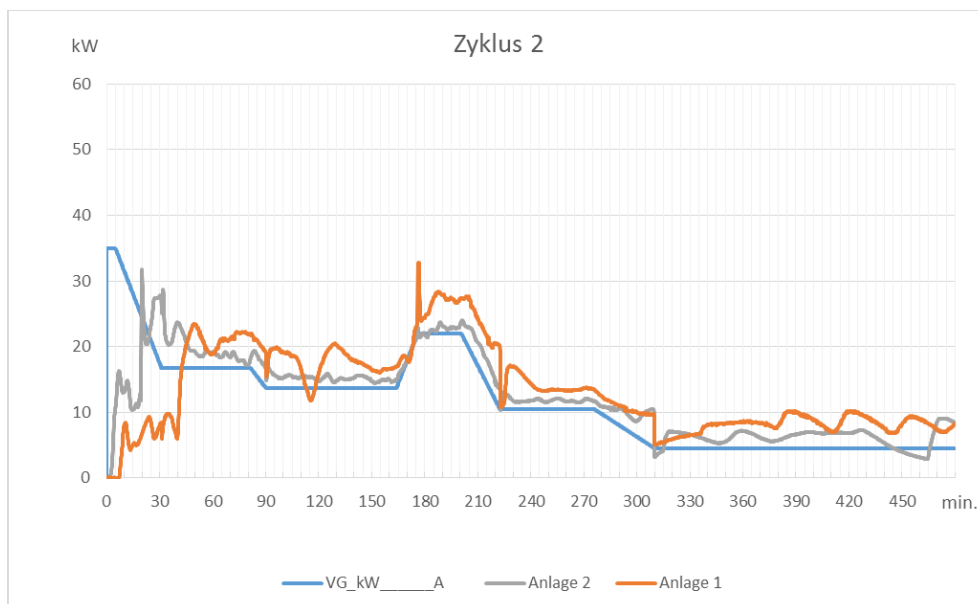


Abbildung 12: Ablauf und Leistungsregelung der eingesetzten Feuerungsanlagen im Lastzyklus 2 am Beispiel von Brennstoff-Nr. 1 Hartholz Hackgut.



Wie in den Abbildungen ersichtlich sind die Feuerungsanlagen auf Grund moderner Regelungstechnik sehr gut in der Lage, auf die Änderungen der Leistungsvorgaben zu reagieren. Insbesondere bei den Lastzyklen 1 und 4, die durch sehr moderate Lastwechsel gekennzeichnet sind, haben sich die tatsächlichen Wärmeleistungen nach kurzem

Überschießen bzw. Pendeln der Leistung sehr schnell an die vorgegebene Wärmeabnahme angepasst. Bei Zyklus 2 und Zyklus 3 sind die Lastwechsel hingegen ausgeprägter, weshalb auch hier größere Abweichungen zwischen Vorgabe und tatsächlicher Wärmeleistung beobachtet wurden. Beide Zyklusvarianten haben eine längere Phase mit 13 % bzw. 10 % der Nennwärmeleistung. Diese geringen Leistungsvorgaben stellen eine Herausforderung für die Regelungen der Feuerungsanlagen dar und in nahezu allen Versuchen wurden in diesen Phasen Start-Stopp-Betriebszustände mit Gluterhaltung festgestellt.

Bei Zyklus 2 ist zu Beginn eine sehr kurze Nennlastphase von rund 4 Minuten vorgesehen. Da der Zyklus im kalten Anlagenzustand gestartet wird, wird die Nennlast in der kurzen Zeit nicht erreicht. Je nach System und Brennraumgeometrie sind die Anlagen unterschiedlich schnell im Startvorgang. Zum Nachweis, ob die Feuerungsanlage auch die tatsächlich angegebene Wärmeleistung erbringen kann, ist eine deutlich längere Nennlastphase (wie in Zyklus 1) bzw. ein Warmstart (wie in Zyklus 3 bzw. Zyklus 4) erforderlich.

Abbildung 13: Ablauf und Leistungsregelung der eingesetzten Feuerungsanlagen im Lastzyklus 3 am Beispiel von Brennstoff-Nr. 1 Hartholz Hackgut.

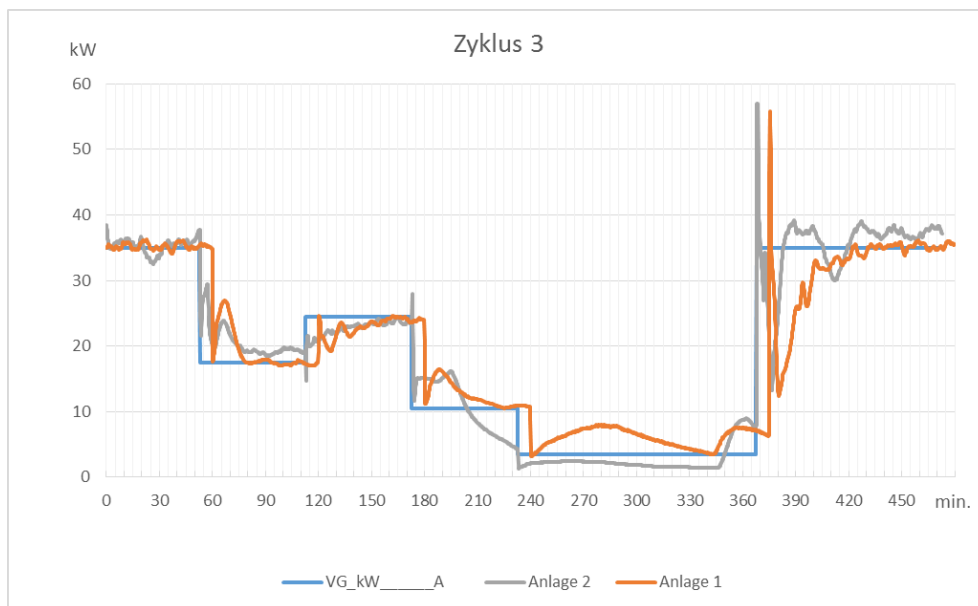
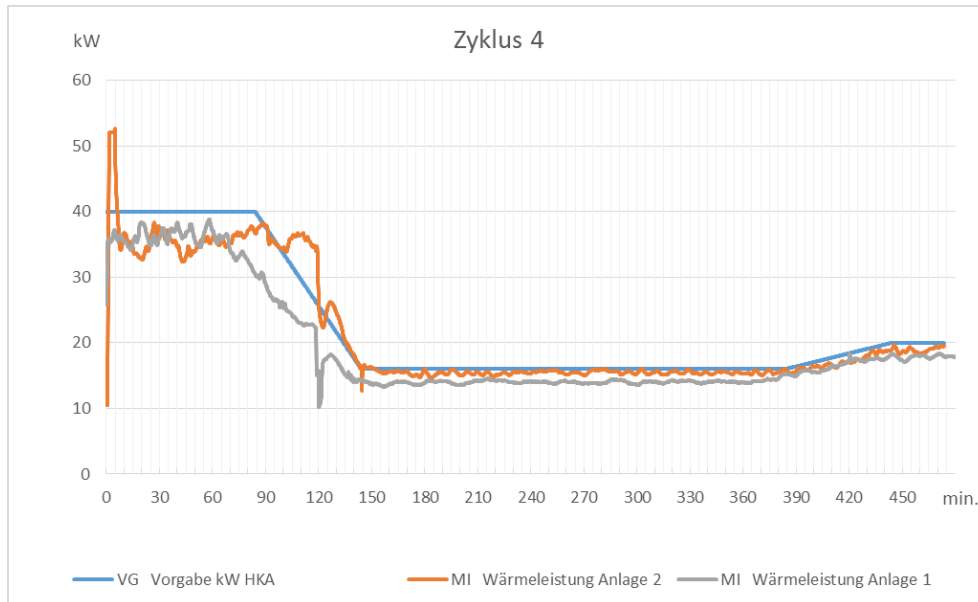
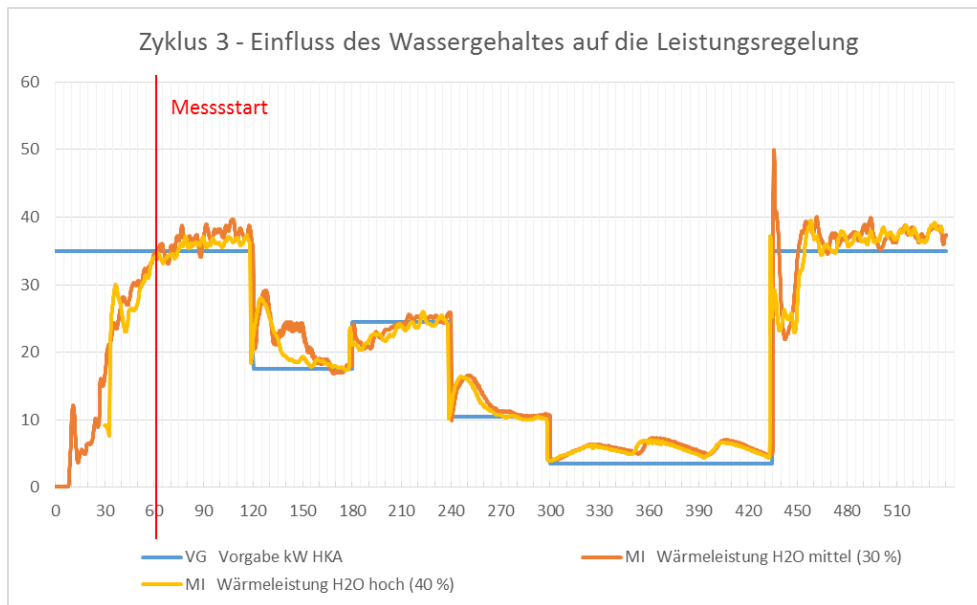


Abbildung 14: Ablauf und Leistungsregelung der eingesetzten Feuerungsanlagen im Lastzyklus 4 am Beispiel von Brennstoff-Nr. 1 Hartholz Hackgut.



In Abbildung 15 ist die Auswirkung des Wassergehaltes auf die Leistungsregelung am Beispiel einer Anlage mit Versuchs Brennstoff 6 und Lastzyklus 3 dargestellt. Die blaue Linie zeigt wieder die Vorgabe des Prüfstandes. Die rote vertikale Linie zeigt den Messstart nach 60 min Vorheizen auf Nennwärmeleistung. Bei dieser Versuchsreihe wurde derselbe Brennstoff mit unterschiedlichen Wassergehalten eingesetzt. Die orange Linie zeigt das Ergebnis bei mittlerem Wassergehalt (30 %) und die gelbe Linie bei hohem Brennstoffwassergehalt (~40 %). Wie in der Abbildung ersichtlich hat die Erhöhung des Brennstoffwassergehaltes insbesondere von rund 30 % auf 40 % keine nennenswerte Auswirkung gezeigt. In den Versuchen mit mittlerem und hohem Wassergehalt zeigten die Wärmeleistungen einen nahezu identischen Verlauf. Eine Verifizierung dieser Ergebnisse sollte in weiterführenden Versuchsanstellungen außerhalb dieses Projektes noch abgeklärt werden.

Abbildung 15: Auswirkung des Wassergehaltes auf die Leistungsregelung der eingesetzten Feuerungsanlage im Lastzyklus 3 am Beispiel von Brennstoff-Nr. 6.



5.2 Ergebnisse der Emissionsmessungen

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Verbrennungsversuche für die emissionsspezifischen Kenngrößen CO, OGC, NO_x, Staub und teilweise die Partikelgrößenverteilung des Staubes dargestellt. Zusätzlich wird mit Korrelationsanalysen versucht, kausale Zusammenhänge zwischen Emissionskenngrößen und brennstoffseitigen Einflussgrößen abzuleiten. Für die Ergebnisdarstellung wird der jeweilige Mittelwert über die gesamte Versuchslaufzeit herangezogen.

5.2.1 CO-Emissionen

Die Emissionen von CO und gasförmigen Kohlenwasserstoffen dienen üblicherweise als Kriterium zur Beurteilung der Verbrennungsqualität von Feuerungsanlagen. Bei der primären Schadstoffbildung rühren die CO Emissionen aus der unvollständigen Oxidation, die neben der Konzentration an CO, H₂O und O₂ auch maßgeblich von der Temperatur während der Verbrennung abhängig sind. Eine rasche und möglichst vollständige Umsetzung des Kohlenstoffmonoxids erfolgt bei Temperaturen von mehr als 800 °C, entsprechenden Verweilzeiten sowie ausreichendem Sauerstoffanteil und Durchmischung. Insbesondere das richtige Maß an Luftüberschusszahl und Güte der Durchmischung mit der Verbrennungsluft sind von besonderer Relevanz. Obwohl bei hohem Luftüberschuss zwar genug Sauerstoff zur Verfügung steht, kann dadurch auch die Flamme zu sehr gekühlt werden, um eine

vollständige Oxidation von CO zu ermöglichen. Zu geringer Luftüberschuss führt jedoch zur Reduktion des Sauerstoffangebotes in der Verbrennungsluft, wodurch die Emissionen von nicht oxidierten Kohlenwasserstoffen und CO deutlich zunehmen. Da der oxidative Abbau der Kohlenwasserstoffe wesentlich schneller als die Weiteroxidation des Kohlenmonoxids abläuft, sind die Kohlenmonoxid-Emissionen in der Regel eine Größenordnung höher als die Kohlenwasserstoff-Emissionen (Nussbaumer 2009).

Der Brennstoffeinfluss auf die CO Emissionen bei Nenn- und Teillastversuchen ist in Abbildung 16 und Abbildung 17 dargestellt. Die Grafiken zeigen die Bandbreite der Ergebnisse, die in Abhängigkeit der eingesetzten Technologien und Brennstoffe im Zuge der Verbrennungsversuche in Anlehnung an die Anforderungen der EN 303-5 gemessen wurden. Dabei wurden die Feuerungsanlagen unter konstanten Bedingungen über eine Messzeit von mindestens 6 Stunden betrieben. Die rote Linie markiert ein typisches Ergebnis einer Typenprüfung von einer Anlage im gleichen Leistungsbereich und soll als Referenzwert dienen. Das Ergebnis wurde am Prüfstand unter bestmöglichen Einstellungswerten und mit bester Brennstoffqualität erzielt. Die höchsten CO Emissionen und auch die größte Spreizung der Ergebnisse wurden sowohl bei Nennlast als auch bei Teillast mit Brennstoff 2 – Hobelspäne ermittelt. Hier wurden Maximalwerte von 670 mg/Nm³ auf 10 % O₂ Bezugsbasis bei Nennlast und rund 870 mg/Nm³ bei kleinster Leistung gemessen. Diese hohen Werte sind nicht auf die chemische Zusammensetzung sondern auf die Struktur und Beschaffenheit des Brennstoffes zurück zu führen. Auf Grund der geringen Schüttdichte und dem hohen Feinanteil und Staub, war ein ordnungsgemäßer Anlagenbetrieb nicht möglich und hohe CO Emissionen resultierten. Durch geringfügige Änderungen der Einstellungsparameter (z.B. Lufteinstellungen, Brennstoffzufuhr und Taktung,...) konnte die CO Emissionen auf Werte unter 100 mg/m³ verringert werden. Zudem wurde ein signifikanter Einfluss der Brennraumgeometrie festgestellt.

Abbildung 16: Brennstoffeinfluss auf die CO Emissionen bei Nennlast.

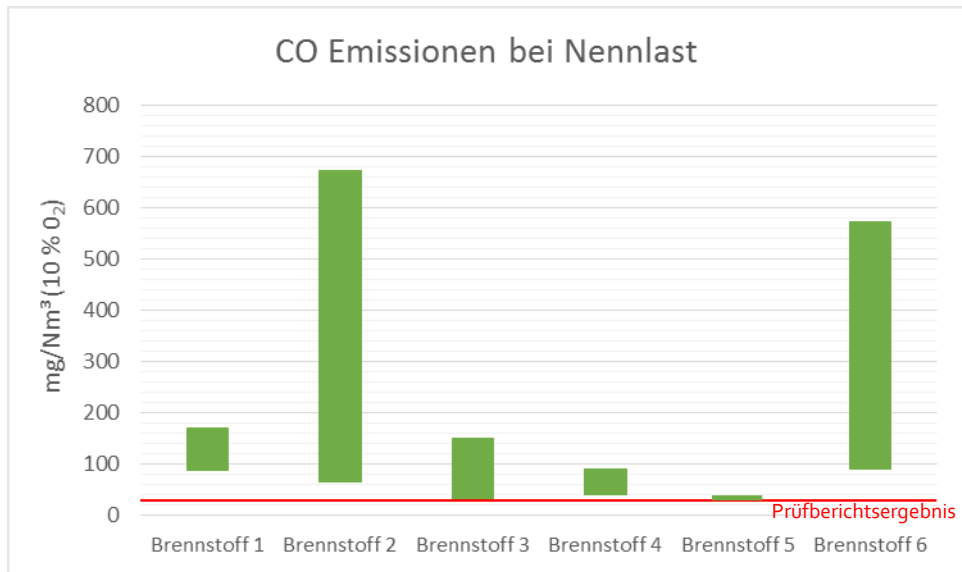
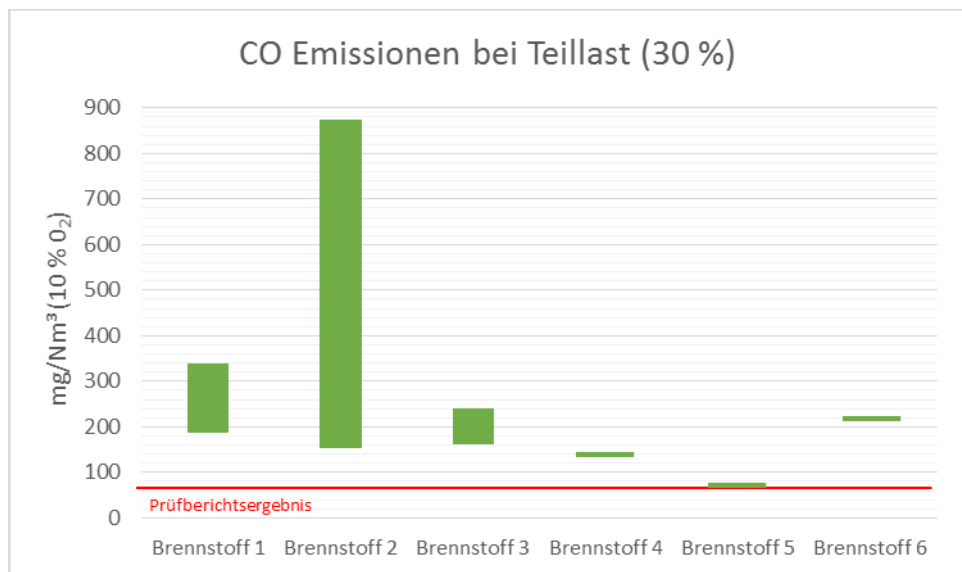


Abbildung 17: Brennstoffeinfluss auf die CO Emissionen bei Teillast



Mit Brennstoff 5, dem rindenfreien Industriehackgut, konnten selbst mit Werkseinstellungen der Feuerungsanlagen, die Ergebnisse der Typenprüfung mit optimierten Einstellungen, nahezu erreicht werden.

Die Versuchsreihen mit Brennstoff 6 zeigen den Einfluss des Wassergehaltes von rund 40 %, 30 % und 20 %. Während bei den Nennlastversuchen der Wassergehalt einen vergleichsweise geringen Einfluss gezeigt hat, wurde bei den Teillastversuchen eine deutliche Streuung in

Abhängigkeit des Wassergehaltes festgestellt. Durch Änderung des Wassergehaltes von rund 20 % auf rund 40 % wurde ein Anstieg der CO Emissionen um den Faktor 7,4 (von 77 auf 575 mg/Nm³) ermittelt. Dieser Anstieg der Emissionen ist auf die Veränderung der Verbrennungstemperatur zurück zu führen. Der hohe Wassergehalt verringert die Brennraumtemperatur und dadurch steigen die CO Emissionen.

In Abbildung 18 sind die CO Emissionen der Versuchsreihen mit Lastzyklen und jener der Nennlastversuche gegenübergestellt. Die blauen Balken zeigen die Ergebnisse der Nennlastversuche, die grünen Balken jene der Zyklusversuche. Wie in der Abbildung ersichtlich sind die Emissionen der Lastzyklusversuche um ein Vielfaches höher als die Versuche mit Nennlast. Der höchste Anstieg der CO-Emissionen wurde mit allen Brennstoffen bei Zyklus 2 ermittelt. Hier stiegen die CO-Emissionen um den Faktor 7,5 bis 14 je nach eingesetztem Brennstoff.

Die Erhöhung der CO-Emissionen ist auf die geänderten Brennraumbedingungen im Zuge der Lastwechsel zurück zu führen. Die Regelungstechnik der Anlagen muss möglichst rasch auf die Änderungen der Wärmeabnahme reagieren. So kommt es zwischenzeitlich zu ungünstigen Verbrennungsbedingungen im Brennraum. Diese resultieren in starken Anstiegen der CO-Emissionen im Vergleich zu den Nennlastversuchen, wo die Verbrennung über die gesamte Versuchsdauer konstant und stationär gehalten wird und keine Änderungen der Verbrennungszustände auftreten.

Abbildung 18: Gegenüberstellung der Kohlenmonoxid (CO) Emissionen der Lastzyklusversuche und der Nennlastversuche gemäß EN 303-5.

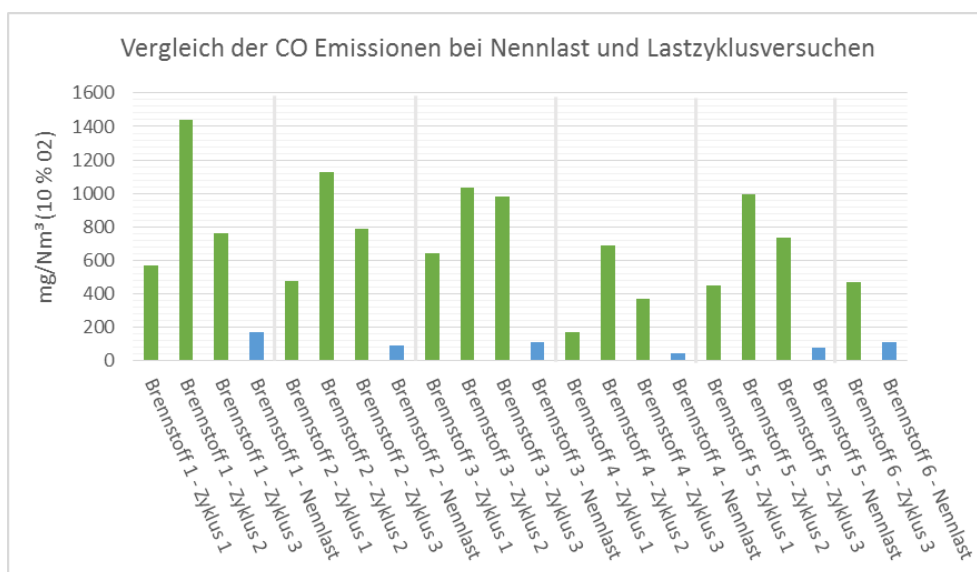
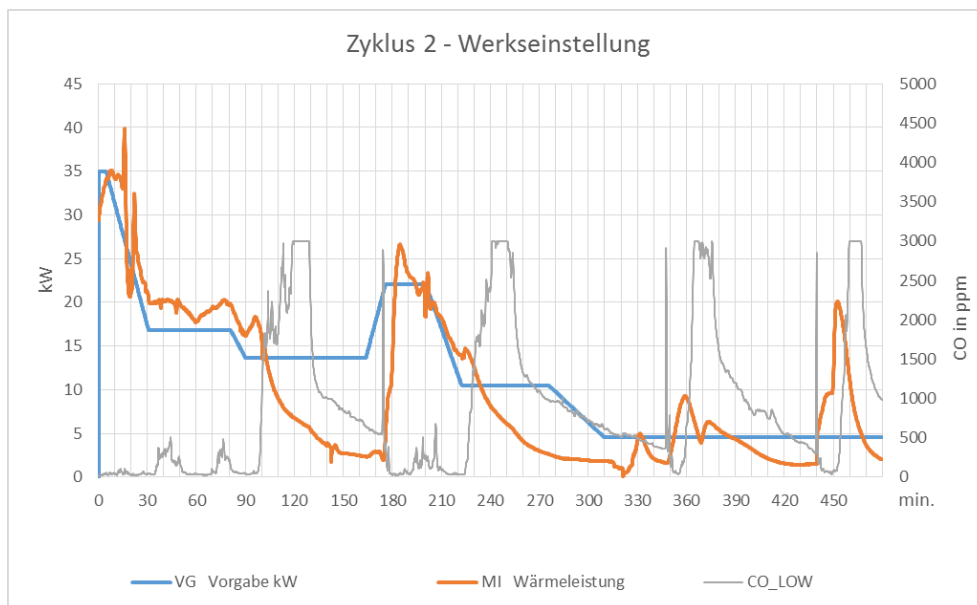


Abbildung 19 zeigt den Ablauf einer Versuchsreihe mit Zyklus 2 und einer Feuerungsanlage, deren Werkseinstellung die minimale Wärmeleistungsgrenze auf 50 % der Nennwärmeleistung limitierte. Die blaue Linie markiert die vom Prüfstand vorgegebene Wärmeabnahme, die orange Linie zeigt die tatsächlich vom Kessel abgegebene Wärmeleistung und die graue Linie die CO-Emissionen. Sank die durch den Prüfstand abgenommene Wärmeleistung unter 50 % stellte die Anlage auf Grund der Wärmeüberproduktion und des daraus resultierenden Temperaturanstiegs im Kesselwasser über den Regelbereich hinaus ab und ging auf Gluterhaltung. Jeder Stopp der Anlage und das Herunterfahren der Leistung resultierte in hohen CO-Emissionen von über 3000 ppm.

Abbildung 19: Ablauf von Zyklus 2 mit spezifischer Werkseinstellung



In Abbildung 20 sieht man den Ablauf eines Zyklusversuches mit demselben Brennstoff und derselben Anlage ohne der Begrenzung der Wärmeleistung. Die Leistungsregelung der Feuerungsanlage folgt den Anforderungen des Prüfstandes sehr gut und die CO-Emissionen konnten auf Grund der geringen Anzahl an Stopp- und Startvorgängen deutlich reduziert werden. In der Schlussphase, bei der die Wärmeleistung über rund 3 Stunden auf 13 % reduziert ist, trat auf Grund der geringen Wärmeabnahme ein Start-Stopp-Betrieb und somit wieder ein starker Anstieg der CO-Emissionen auf. Insbesondere wurde ein starker CO-Anstieg nach dem Stopp der Feuerungsanlage bis zur Gluterhaltung festgestellt. In diesen Phasen übersteigen die Emissionen 3000 ppm deutlich.

Abbildung 20: Ablauf von Zyklus 2 ohne spezifischer Werkseinstellung

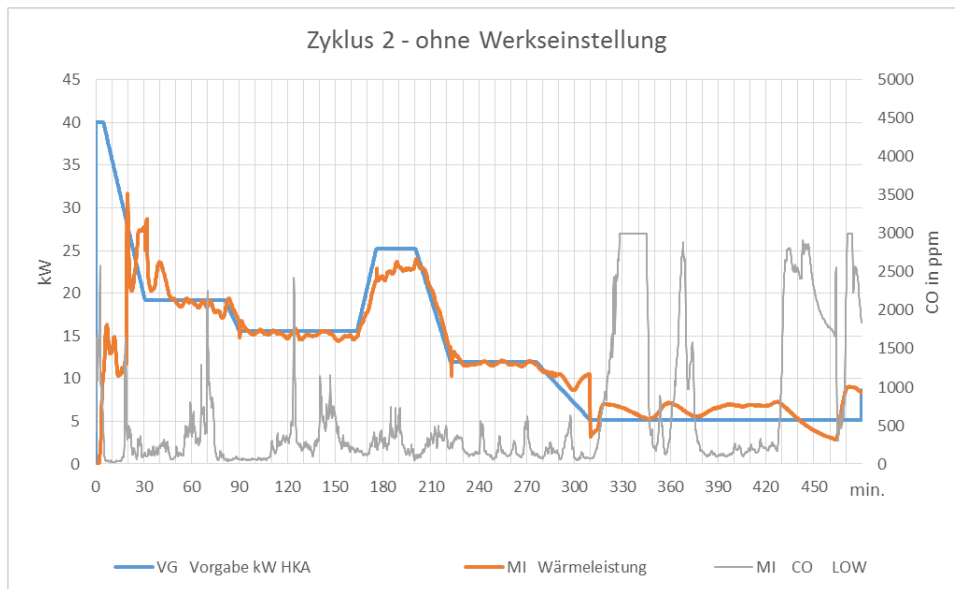
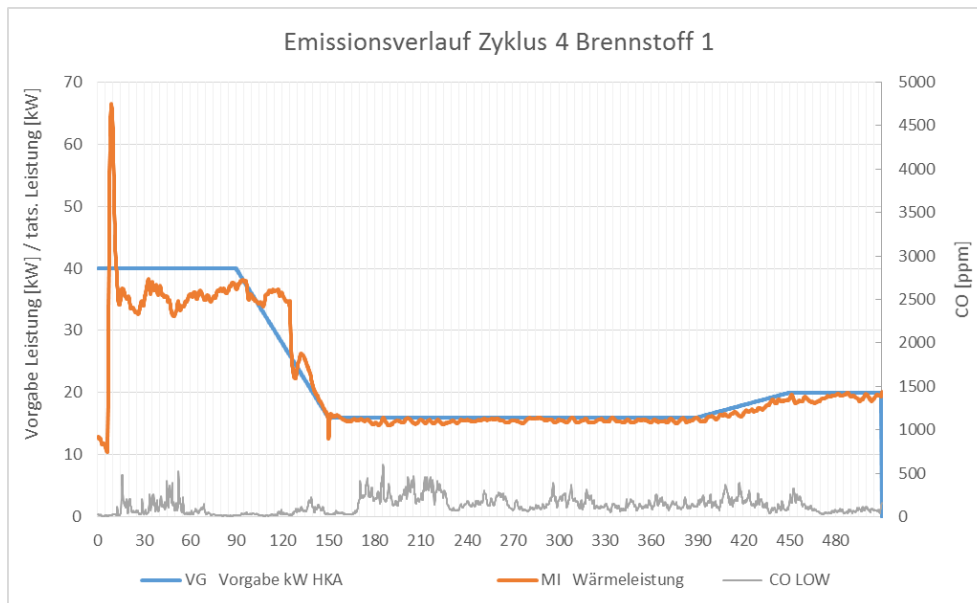


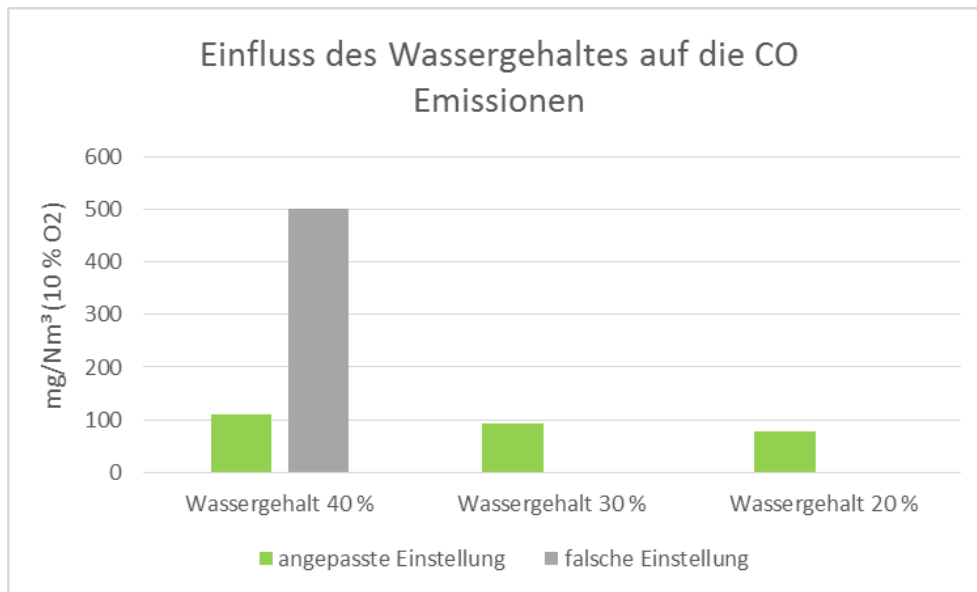
Abbildung 21 zeigt den Verlauf der CO-Emissionen während eines Versuches mit Zyklus 4, bei dem der Einsatz eines Lastausgleichssystems (Pufferspeicher) simuliert wird. Der Zyklus ist durch sehr moderate und kontinuierliche Lastwechsel in Form von Rampen charakterisiert. Im Vergleich zu den anderen Lastzyklen treten hier keine abrupten Lastwechsel auf, wodurch die Leistungsregelung der Anlage kontinuierlich auf die moderaten Änderungen der Leistungsabnahme reagieren konnte. Die CO-Emissionen (graue Linie) konnten in weiten Teilen des Versuches unter 100 ppm gehalten werden.

Abbildung 21: Ablauf von Zyklus 4 bei dem die Verwendung eines Pufferspeichersystems simuliert wird.



In einer Versuchsanstellung im Zuge des Projektes wurde auch der Einfluss des Brennstoffwassergehaltes untersucht. Abbildung 22 zeigt die CO-Emissionen mit demselben Brennstoff (Versuchsbrennstoff 6 – Industriehackgut) bei 3 unterschiedlichen Wassergehalten – 40 %, 30 % und 20 %. Der Anlagenbetreiber hat, bei der für das Projekt gewählten Anlagen, die Möglichkeit in der Steuerungssoftware der Feuerungsanlage den Wassergehalt entsprechend dem eingesetzten Brennstoffes einzustellen, meist in den drei groben Kategorien hoch, mittel und niedrig. Die Auswahl ändert spezifische Parameter der Feuerungsregelung und soll somit die Einstellungen auf die geänderten Brennstoffanforderungen anpassen. Diese Einstellungen sollten von jedem Anlagenbetreiber entsprechend dem eingesetzten Material auch vorgenommen werden. Die Abbildung zeigt die Ergebnisse der CO-Messung mit einer dem Brennstoffwassergehalt angepassten Anlageneinstellung (grüne Balken). Hier ist ersichtlich, dass der Wassergehalt mit ordnungsgemäßer Einstellung nur sehr geringe Auswirkung auf die Entstehung der CO-Emissionen hat. Der graue Balken markiert die CO-Emissionen, wenn die spezifische Einstellung des richtigen Wassergehaltes nicht getroffen wird. Wie die Abbildung veranschaulicht, können durch falsche bzw. unangepasste Einstellungen der Anlage die CO-Emissionen deutlich steigen, in diesem Fall um den Faktor 5.

Abbildung 22: Einfluss des Wassergehaltes auf die CO-Emissionen mit dem Brennstoffwassergehalt angepassten und nicht angepassten Anlageneinstellungen.



5.2.2 NO_x-Emissionen

Stickoxid ist der Sammelbegriff für die beiden Oxide des Stickstoffs, Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂), die bei der Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen gebildet werden. Obwohl quantitativ die Emission von NO überwiegt, dieses jedoch in der Atmosphäre rasch zu NO₂ umgewandelt wird, werden die NO_x-Emissionen in NO₂-Äquivalenten angegeben. Das heißt, bei Konzentrationsangaben wird unabhängig von der tatsächlichen Zusammensetzung des Abgases, Stickoxid als Stickstoffdioxid berechnet.

Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigen den Brennstoffeinfluss auf die NO_x-Emission bei Nenn- und Teillast. Im Vergleich zu CO ist die Streubreite der Ergebnisse bei den NO_x-Emissionen innerhalb eines Brennstoffes deutlich geringer, was auf einen deutlich geringeren Einfluss der Anlagentechnologie schließen lässt. Die höchsten Emissionen wurden mit Brennstoff 4 gemessen. Diese reichten bei Nennlast bis 380 mg/Nm³(10 % O₂) und bei Teillast bis 290 mg/Nm³(10 % O₂). Die rote Linie markiert ein typisches Ergebnis einer Typenprüfung mit einer Anlage in derselben Leistungsgröße. Hierbei fällt auf, dass mit sehr guter Brennstoffqualität auch mit Werkseinstellungen die Ergebnisse der Typenprüfung erreicht bzw. unterschritten werden kann. Jedoch mit schlechterer Qualität können die Emissionen um das Doppelte bzw. Dreifache steigen. Zudem lässt sich feststellen, dass die NO_x-Emissionen im Mittel bei Teillast um 40 – 90 mg/Nm³ gegenüber der Nennlast reduziert sind.

Abbildung 23: Ergebnisse der NO_x-Emissionsmessung bei Nennlast

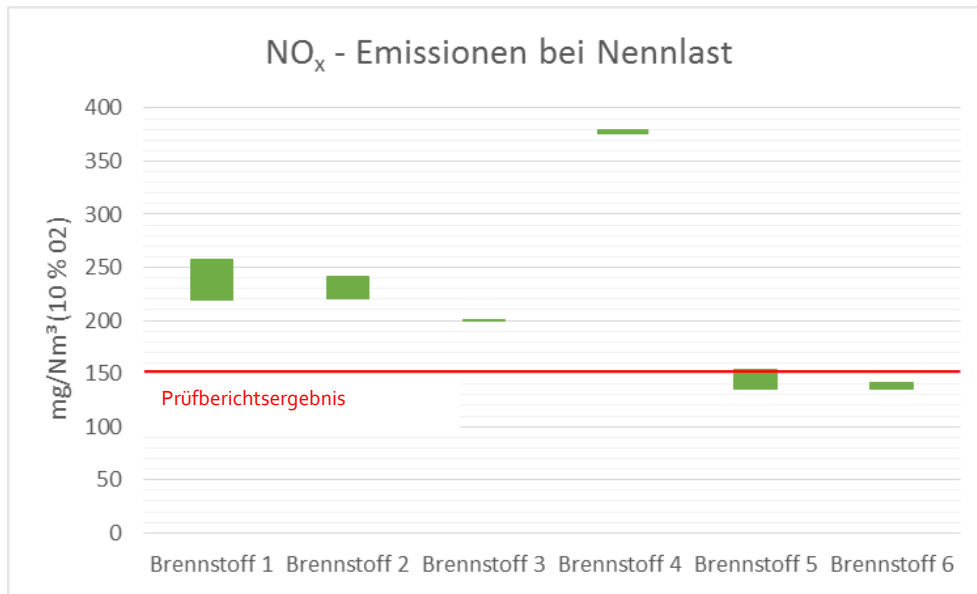
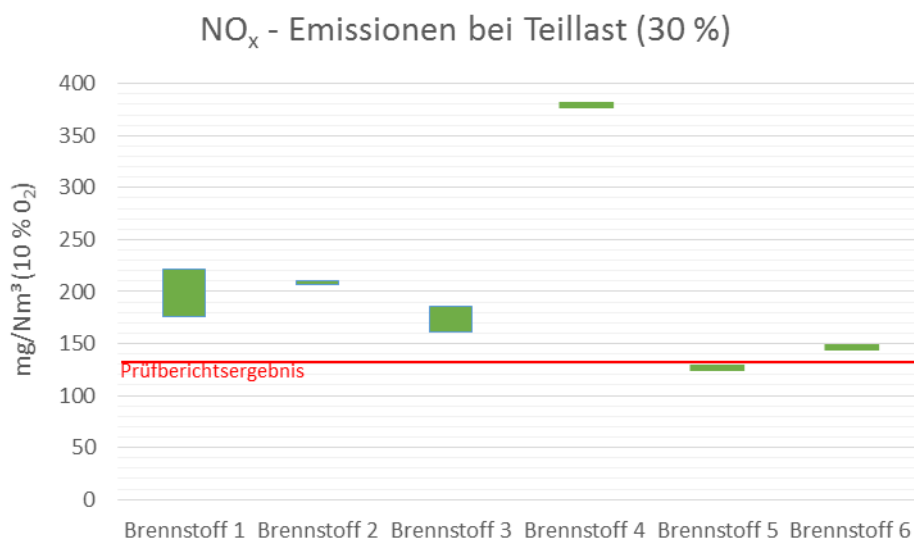


Abbildung 24: Ergebnisse der NO_x-Emissionsmessung bei Teillast



In Abbildung 25 und Abbildung 26 ist der Zusammenhang zwischen NO_x-Emissionen und Stickstoffgehalt im Brennstoff dargestellt. Abbildung 25 zeigt die Ergebnisse der Zyklusversuche mit den jeweiligen Brennstoffen. Die rote Linie markiert den Gehalt an Stickstoff im Brennstoff. Wie die Grafik zeigt, sind die NO_x-Emissionen der Zyklusversuche innerhalb eines Versuchsbrennstoffes nahezu gleich. Im Brennstoffvergleich sind auf Grund der unterschiedlichen Brennstoffstickstoffgehalte deutliche Unterschiede erkennbar. Brennstoff 4 – Waldhackgut mit schlechter Qualität, hatte mit 0,2 % den höchsten

Stickstoffgehalt aller verwendeten Versuchsbrennstoffe. In weiterer Folge wurden auch bei den Verbrennungsversuchen mit Brennstoff 4 die höchsten NO_x-Emissionen gemessen. Brennstoff 5 und Brennstoff 6 wiesen lediglich Stickstoffgehalte von 0,07 bzw. 0,08 % auf.

Abbildung 25: Zusammenhang zwischen NO_x-Emissionen und Stickstoffgehalt im Brennstoff

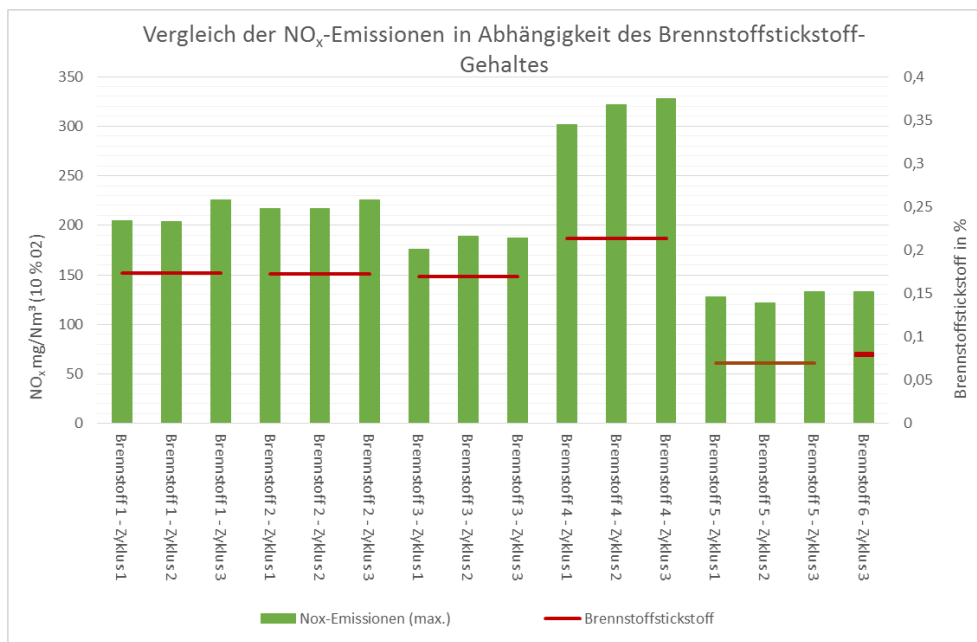
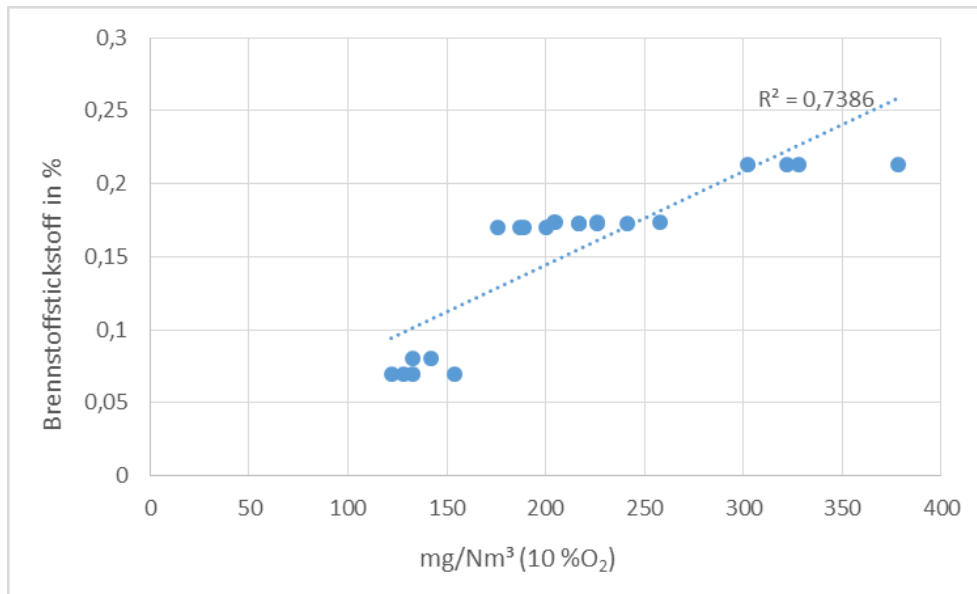


Abbildung 26 zeigt die Korrelation des Brennstoffstickstoffs und der NO_x-Emissionen. Mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,74 weisen die beiden Faktoren Stickstoffgehalt im Brennstoff und NO_x-Emissionen eine sehr hohe Korrelation und somit einen starken Zusammenhang auf. Unter normalen Betriebsbedingungen sind die Verbrennungstemperaturen in der Feuerungsanlage unter 1300 °C, weshalb die freigesetzten NO_x-Emissionen im Wesentlichen auf den im Brennstoff enthaltenen Stickstoff zurückzuführen sind.

Abbildung 26: Korrelation zwischen NO_x-Emissionen und Stickstoffgehalt im Brennstoff



Neben dem Stickstoffgehalt im Brennstoff ließ sich auch ein Zusammenhang zwischen NO_x-Emissionen und Wärmeleistung bzw. Kesselauslastung feststellen. In Abbildung 25 ist dieser Sachverhalt grafisch dargestellt. Die Abbildung zeigt die Ergebnisse der Emissionsmessungen der Zyklusversuche (in den grünen Balken dargestellt) und jene der Nennlastversuche (blaue Balken). Die rote Linie markiert die jeweilige mittlere Wärmeleistung.

Wie ersichtlich stiegen mit höherer Wärmeleistung auch die NO_x-Emissionen. Dem zur Folge wurden die höchsten NO_x-Emissionen im Zuge der Nennlastversuche gemessen. Betrachtet man die Zyklusversuche, so kann festgestellt werden, dass auch hier ein direkter Einfluss der Wärmeleistung auf die NO_x-Emissionen besteht. Zyklus 3 hat mit einer mittleren Wärmeleistung von 53 % der Nennlast (~ 21 kW) die höchste Kesselauslastung und in weiterer Folge wurden in diesen Versuchsreihen auch bei jedem Brennstoff die höchsten NO_x-Emissionen ermittelt.

Abbildung 27: Zusammenhang zwischen NO_x-Emissionen und Wärmeleistung bzw. Kesselauslastung

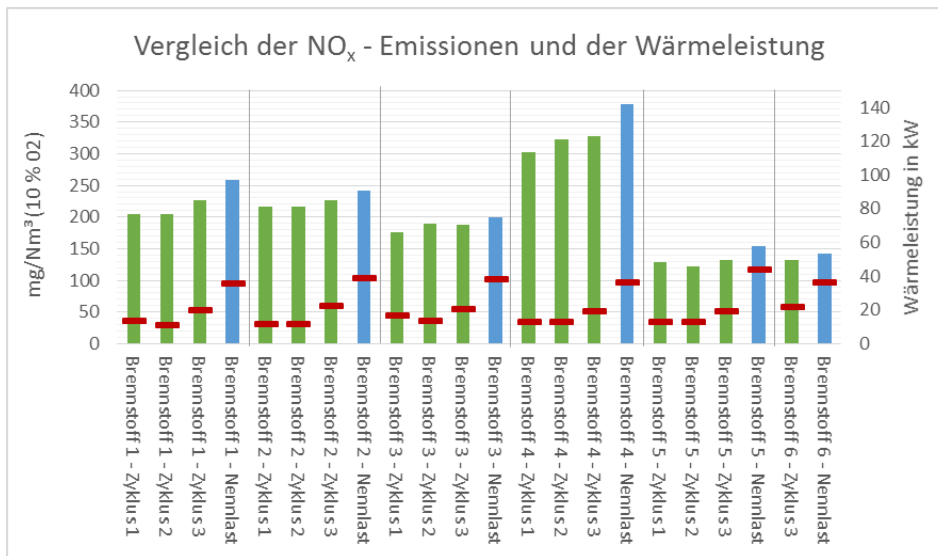
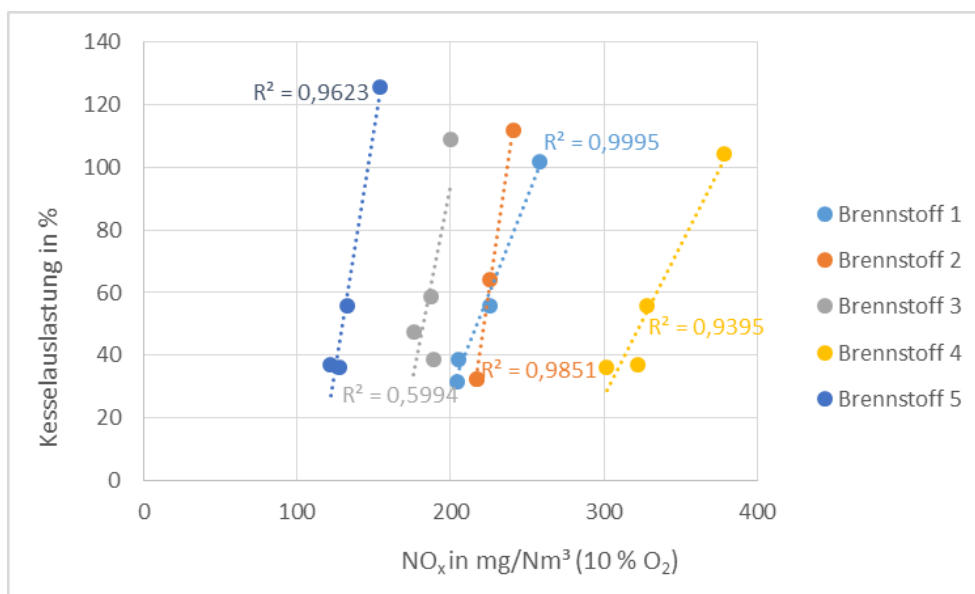


Abbildung 28 zeigt die Korrelationsanalysen von Kesselauslastung und NO_x-Emissionen des jeweiligen Brennstoffes. Mit Ausnahme von Brennstoff 3, sind alle Korrelationskoeffizienten größer 0,9 und somit ist ein signifikanter Zusammenhang gegeben.

Abbildung 28: Zusammenhang zwischen NO_x-Emissionen und Wärmeleistung bzw. Kesselauslastung



5.2.3 Staub-Emissionen

Unter Staubemissionen versteht man meist feste Partikel und Partikelansammlungen von unterschiedlicher Größe, die im Wesentlichen in zwei Kategorien eingeteilt werden. Die Fraktion der groben Partikel (Flugasche) mit einem Durchmesser von 1 bis 200 μm und der Feinstaub (Aerosol) mit Partikelgrößen von kleiner 1 μm . Staubemissionen können aus vollständiger bzw. unvollständiger Verbrennung entstehen und können daher auch in anorganische und organische Aerosole eingeteilt werden. Die bei vollständiger Verbrennung entstehenden Staubemissionen setzen sich aus Aschebestandteilen und Fremdstoffen des Brennstoffes zusammen. Die wichtigsten Prozesse hierbei umfassen nach der Aufschließung und Verdampfung der Brennstoffpartikel die Nukleation, die Kondensation sowie die anschließende Anlagerung. Die sogenannten anorganischen Aerosole der vollständigen Verbrennung entstehen aus den flüchtigen Aschebildnern K, Na, S, Zn und Pb.

Mit Hilfe von adäquater Anlagentechnologie und Regelungstechnik können gute Verbrennungszustände erzielt und somit die Bildung beeinflusst werden. Das bedeutet, je vollständiger die Verbrennung der Gasausbrandphase, desto geringer ist die Anzahl an Kohlenstoffverbindungen, die beim Abkühlen des Rauchgases zu Staubpartikeln kondensieren können. Auf anorganische Aerosole kann in einem wesentlich geringerem Ausmaß Einfluss genommen werden. Hier sind die chemische Zusammensetzung des Brennstoffes sowie das Freisetzungsverhalten der Aerosolbildner die bestimmenden Einflussfaktoren für die Bildung von Staubemissionen.

In Abbildung 29 und Abbildung 30 sind die Ergebnisse der Staubmessungen im Zuge der Nenn- und Teillastversuche mit den jeweiligen Versuchsbrennstoffen dargestellt. Die grünen Balken markieren die Streubreite der Ergebnisse. Die rote Linie zeigt ein typisches Prüfberichtsergebnis einer Anlage in derselben Leistungsklasse.

Es ist ersichtlich, dass bei Nennlast die höchsten Staubemissionen mit Brennstoff 1 – dem Hartholzhackgut ermittelt wurden. Gefolgt von Brennstoff 2 – den Hobelspänen, die bei Nenn- als auch bei Teillast die höchste Streubreite der Ergebnisse aufweisen. Insbesondere bei den Verbrennungsversuchen im Teillastbereich wurden mit Brennstoff 2 sehr stark divergierende Ergebnisse in den Staubemissionen gemessen. Diese sind allerdings nicht auf die chemische Zusammensetzung, sprich den Gehalt an aerosolbildenden Elementen, sondern auf die Struktur und Partikeldichte des Brennstoffes zurück zu führen. Die Hobelspäne waren durch eine sehr geringe Schüttdichte von 90 kg/m^3 und einem sehr hohen Anteil an Feinpartikel charakterisiert. Diese brennstoffspezifischen Eigenschaften führten in Abhängigkeit der Brennraumgeometrie, insbesondere im Teillastbereich, zu einem starken Anstieg der Staubemissionen. Hier konnte ein starker Einfluss der zugrundeliegenden Feuerungstechnologie und der Brennraumgestaltung festgestellt werden. Durch

geringfügige Änderungen der Einstellungsparameter (Brennstoffzufuhr, Verbrennungsluft,...) konnten die Emissionen jedoch beispielsweise von 250 mg/Nm³ auf rund 65 mg/Nm³ reduziert werden.

Im Zuge der Verbrennungsversuche wurden auch zwei unterschiedliche Sekundärmaßnahmen zur Partikelreduktion in Form von elektrostatischen Staubabscheidern eingesetzt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in der Abbildung durch die dunkelroten Linien bei den Brennstoffen 1 bis 4 dargestellt. Je nach eingesetzter Technologie und Brennstoff wurden Abscheideraten von 75 % bis 97 % ermittelt. Für Probleme vor allem im Teillastbereich sorgte Brennstoff 2 – Hobelspäne. Durch die geringe Schütt- und Partikeldichte kam es insbesondere im Teillastbetrieb zur Emission von unverbrannten, kohlenstoffhaltigen Staubpartikel, die aufgrund ihrer Leitfähigkeit beim Ablagern im E-Filter zu Überschlügen führten. Diese Überschlüge führten in Abhängigkeit der Häufigkeit ihres Auftretens zu Störungen bzw. Teilausfällen des E-Filters und somit zur Verschlechterung der Abscheideleistung. Bei entsprechender Brennstoffqualität konnten mit Hilfe der E-Filter die Staubemissionen bis zur Nachweisgrenze des Messsystems reduziert werden.

Abbildung 29: Brennstoffeinfluss auf die Staubemissionen bei Nennlast.

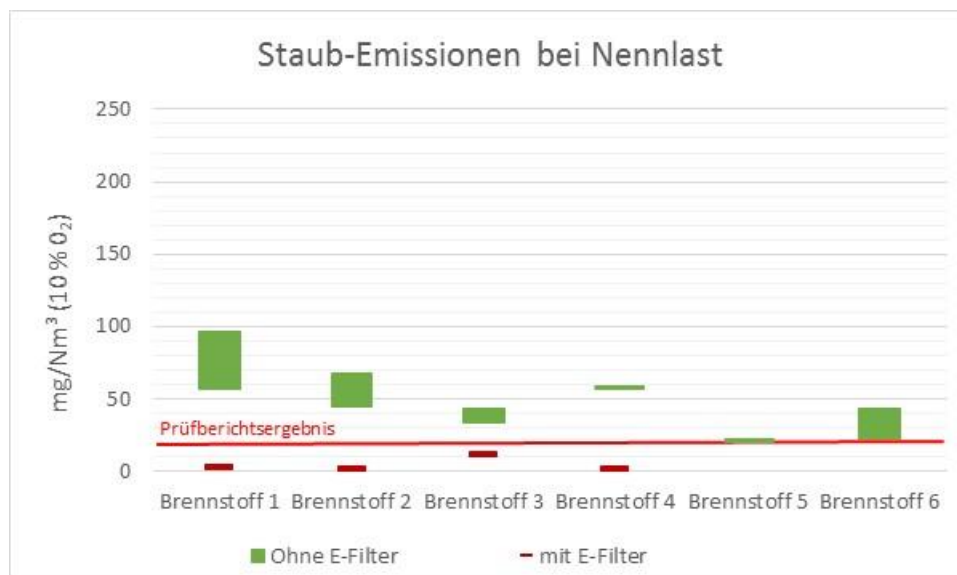
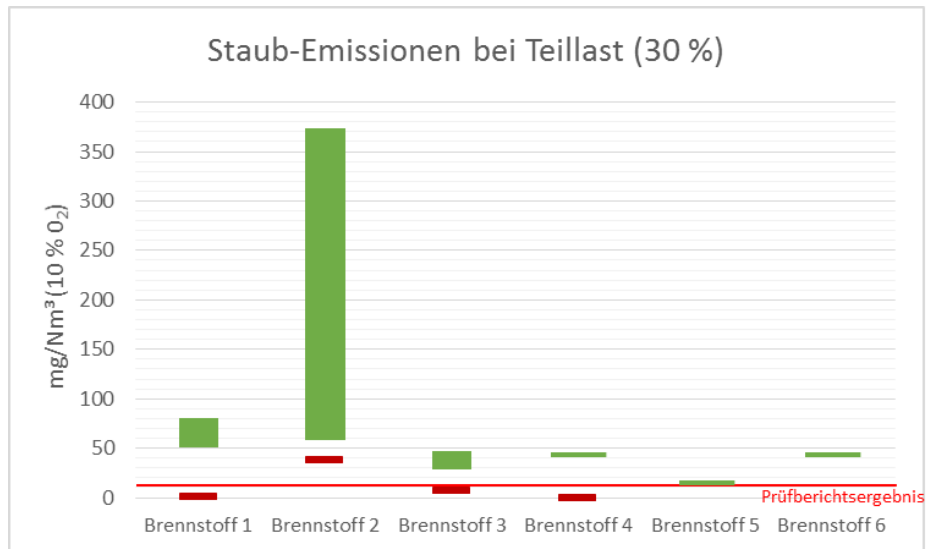


Abbildung 30: Brennstoffeinfluss auf die Staubemissionen bei Teillast.



Die Korrelationsanalysen in Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen den Zusammenhang zwischen den Gehalten an aerosolbildenden Elementen und den Staubemissionen im Zuge der Nennlastversuche gemäß EN 303-5. Prinzipiell liegt ein kausaler Zusammenhang zwischen der Höhe der Staubemissionen und der Höhe der Aerosolbildner im Brennstoff zu Grunde. Jedoch lässt sich auch ein signifikanter Einfluss der eingesetzten Verbrennungstechnologie feststellen. Je nach Größe und Gestaltung des Brennraumes bzw. dessen Geometrie können die jeweiligen Brennstoffqualitäten unterschiedlich gut in den jeweiligen Feuerungsanlagen eingesetzt werden.

Aus diesem Grund ist die Darstellung der Korrelation zwischen den beiden Variablen Staubemissionen und der Summe der aerosolbildenden Elementen in Abbildung 31 etwas verzerrt. Auch die Analysen des Einflusses einzelner Elemente (Kalium, Natrium, Schwefel und Zink) in Abbildung 32 ergab keinen eindeutigen signifikanten Zusammenhang.

Abbildung 31: Zusammenhang zwischen Staubemissionen und der Gehalte an aerosolbildenden Elementen

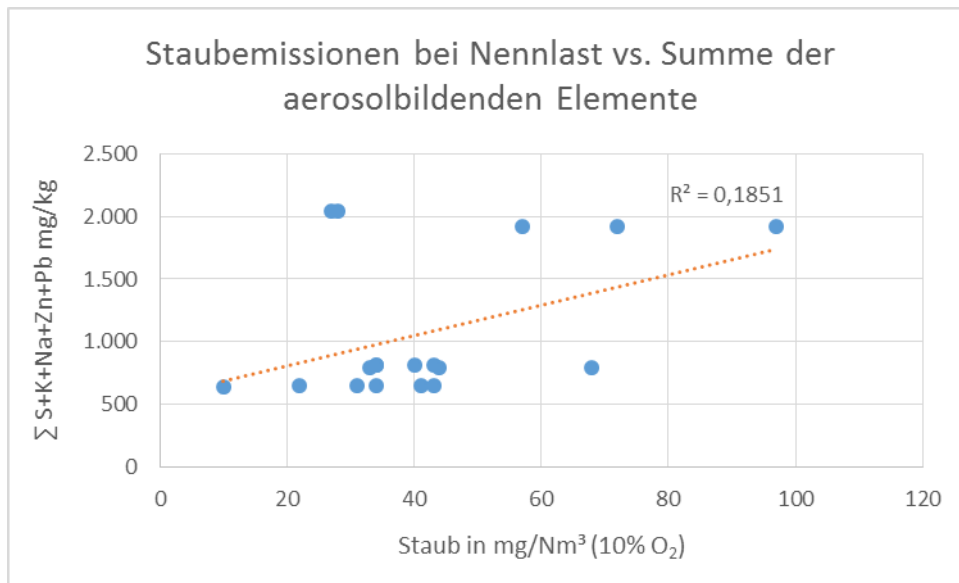
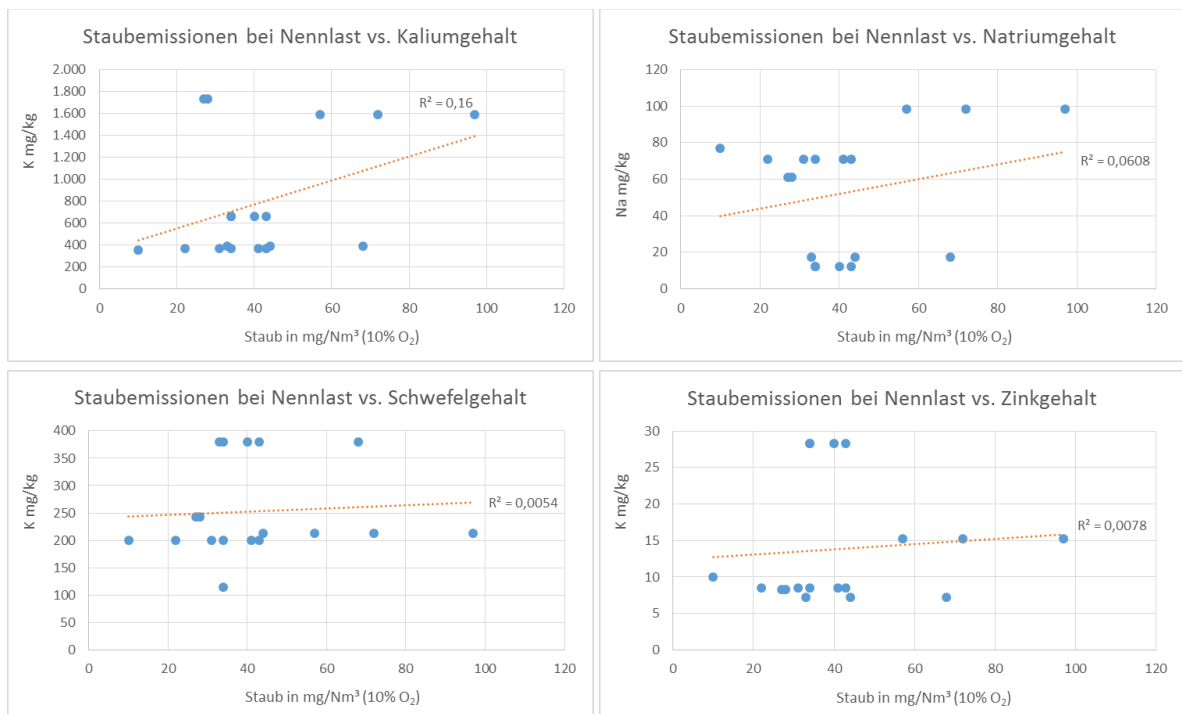


Abbildung 32: Zusammenhang zwischen Staubemissionen und der Gehalte an Kalium, Natrium, Schwefel und Zink.

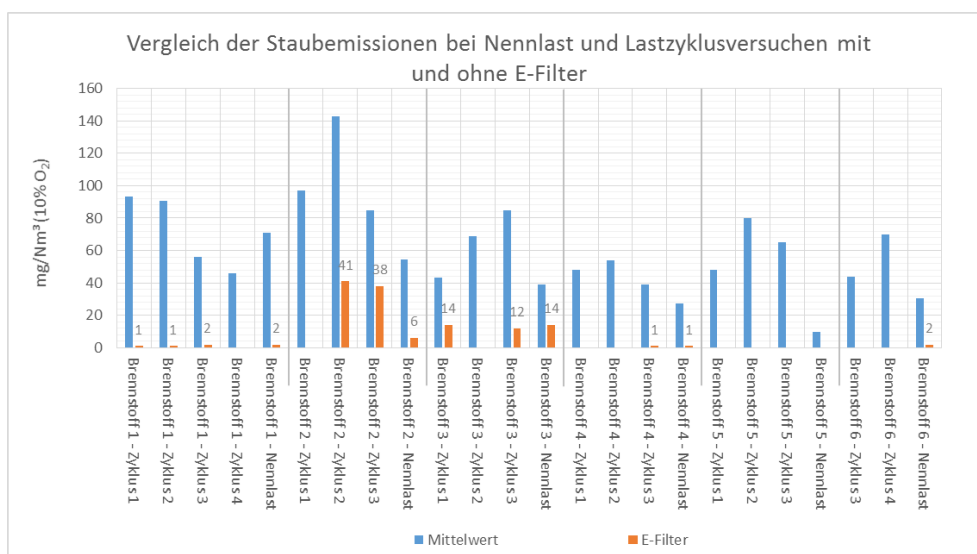


In Abbildung 33 sind die Ergebnisse der Staubemissionsmessungen im Zuge der Nennlast- und Lastzyklusversuchen gegenübergestellt. Die grünen Balken zeigen die Ergebnisse der

Zyklusversuche und die blauen Balken jene der Nennlastversuche mit den jeweils eingesetzten Versuchsbrennstoffen. Es lässt sich feststellen, dass die Lastzyklusversuche mit Ausnahme von Brennstoff 1, tendenziell höhere Staubemissionen zeigten. Die höchste Konzentration an Staub im Abgas wurde im Zuge der Versuche mit Zyklus 2 und Brennstoff 2 – Hobelspäne ermittelt. Der Grund für die massive Zunahme der Emissionen wurde bereits im Zusammenhang mit den Ergebnissen der Teillastversuche erörtert. Die niedrige mittlere Wärmeleistung von rund 25,3 % der Nennwärmeleistung, sorgt im Zusammenhang mit der geringen Partikeldichte auch hier zu einem starken Anstieg der Staubemissionen.

Wie bei den CO-Emissionen, jedoch im geringeren Ausmaß, führen die Lastwechsel und die geänderten Verbrennungsbedingungen über die Laufzeit der Zyklusversuche zu erhöhten Staubemissionen. Auch im Zuge der Lastzyklusversuche wurden einzelne Versuchsreihen mit E-Filter durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 33 durch die orangefarbenen Balken gekennzeichnet. Eine deutliche Beeinträchtigung der Abscheideleistung wurde in den Versuchen mit Brennstoff 2 und Zyklus 3 beobachtet. In den anderen Fällen zeigte sich keine Einflussnahme der Leistungszustände der Anlagen auf die Funktion und Abscheideleistung der Filtersysteme. Die Lastwechsel und die damit verbundene Verschlechterung der Verbrennungsqualität zeigten keinen Einfluss auf das Ergebnis der E-Filter. Schwankungen in der Abscheideleistungen zwischen den eingesetzten E-Filtern wurden zwar beobachtet, diese decken sich allerdings mit den Ergebnissen der Nenn- und Teillastversuche und sind von den Lastwechseln und Lastzuständen der Feuerungsanlagen unabhängig.

Abbildung 33: Vergleich der Staubemissionen bei Nennlast und Lastzyklusversuchen sowie die Reduktion durch elektrostatische Staubabscheider.

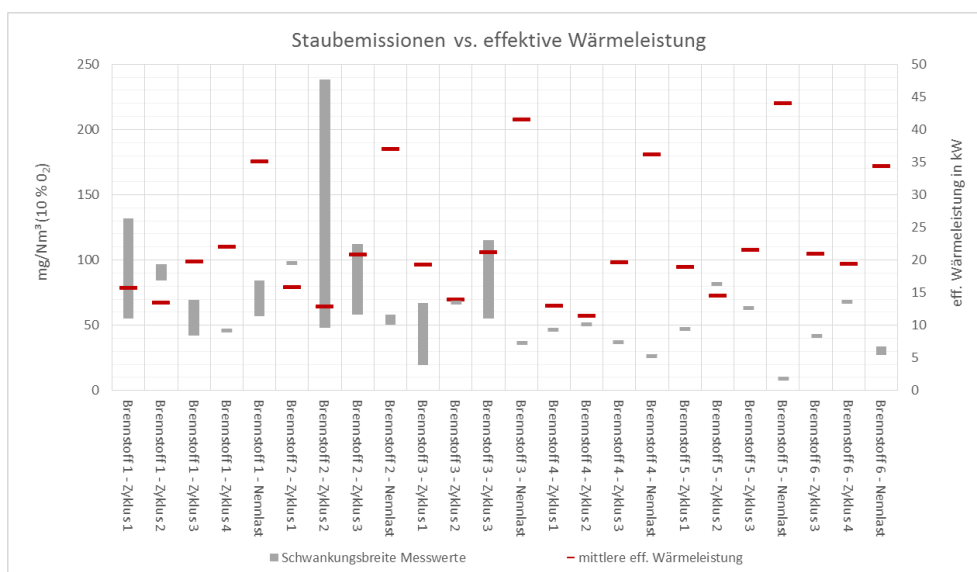


Die ermittelten Abscheideleistungen in Abhängigkeit der eingesetzten Brennstoffqualität und der Versuchsart sind in Tabelle 9 zusammengefasst. Je nach Art der Versuchsreihe und Brennstoffqualität wurden Abscheideleistungen von 67 % bis 100 % ermittelt. Die niedrigsten Abscheidegrade wurden mit Brennstoff 2 beobachtet. Durch die spezifische Beschaffenheit der Hobelspäne, die geringe Schüttdichte und den hohen Anteil an Feinanteil, war die Abscheideleistung beider E-Filterssysteme deutlich reduziert.

Tabelle 9: Abscheideleistungen der eingesetzten E-Filter nach Art der Messung und eingesetztem Versuchsbrennstoff.

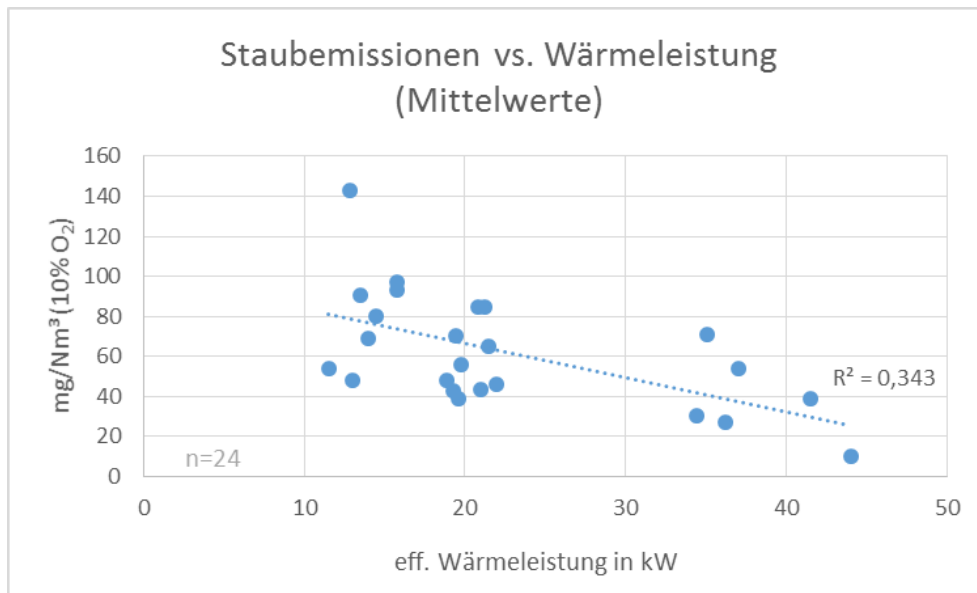
	Nennlast	Teillast	Zyklus 1	Zyklus 2	Zyklus 3
Brennstoff 1	95 %	100 %	98-99 %	-	-
Brennstoff 2	84 – 95 %	90 %	-	83 %	67 %
Brennstoff 3	74 %	85 – 94 %	94 %	-	78 %
Brennstoff 4	96 %	100 %	-	-	97 %
Brennstoff 6	93 %	-	-	-	-

Abbildung 34: Vergleich der Staubemissionen bei Nennlast und Lastzyklusversuchen sowie der zugrunde liegenden effektiven Wärmeleistung.



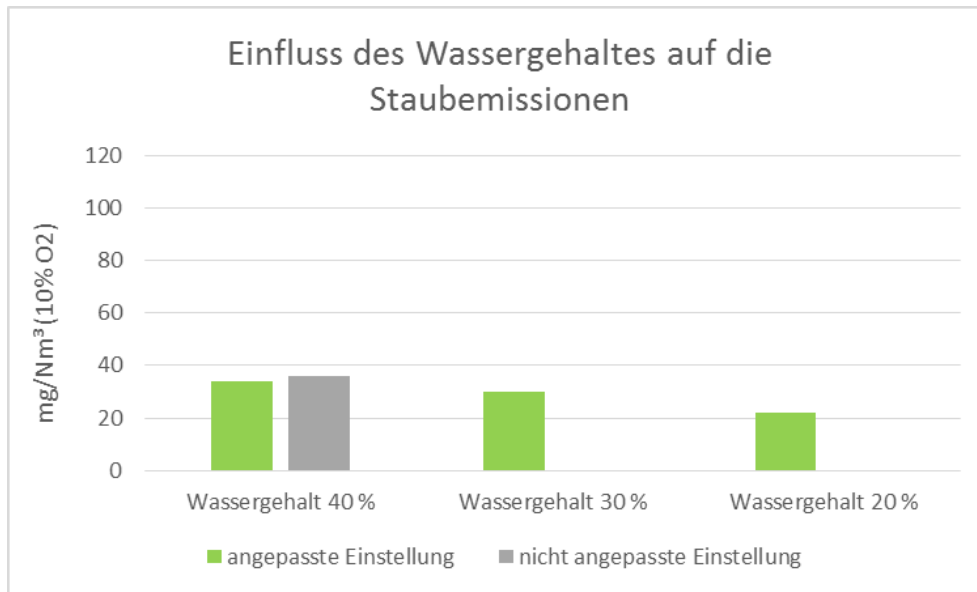
In Abbildung 34 und Abbildung 35 ist der Einfluss der effektiven Wärmeleistung auf die Staubemissionen dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß zeigt mit 34 % nur einen geringen signifikanten Zusammenhang.

Abbildung 35: Einfluss der mittleren effektiven Wärmeleistung auf die Entstehung von Staubemissionen.



Zudem wurde auch der Einfluss des Brennstoffwassergehaltes auf die Entstehung der Staubemissionen untersucht. Abbildung 36 zeigt die Ergebnisse der Staubemissionen bei drei unterschiedlichen Wassergehalten – 40 %, 30 % und 20% in den grünen Balken. Wie auch schon bei den CO-Emissionen zeigt der graue Balken die Staubemissionen einer Versuchsdurchführung, bei der die Anlageneinstellung nicht an den tatsächlichen Brennstoffwassergehalt angepasst wurde. Während sich die CO-Emissionen durch falsche Anlageneinstellung bei einem Wassergehalt von 40 % nahezu vervierfachen haben, konnte bei den Staubemissionen keine wesentliche Veränderung festgestellt werden. Wie die Abbildung veranschaulicht, verringerten sich die Staubemissionen um 35 % von 34 mg/Nm³ auf 22mg/Nm³ (10 % O₂) mit Änderung des Wassergehaltes von 40 % auf 20 % bzw. um rund 27 % bei einer Verringerung des Wassergehaltes von 30 % auf 20 %.

Abbildung 36: Einfluss der Brennstoffwassergehalte auf die Entstehung von Staubemissionen



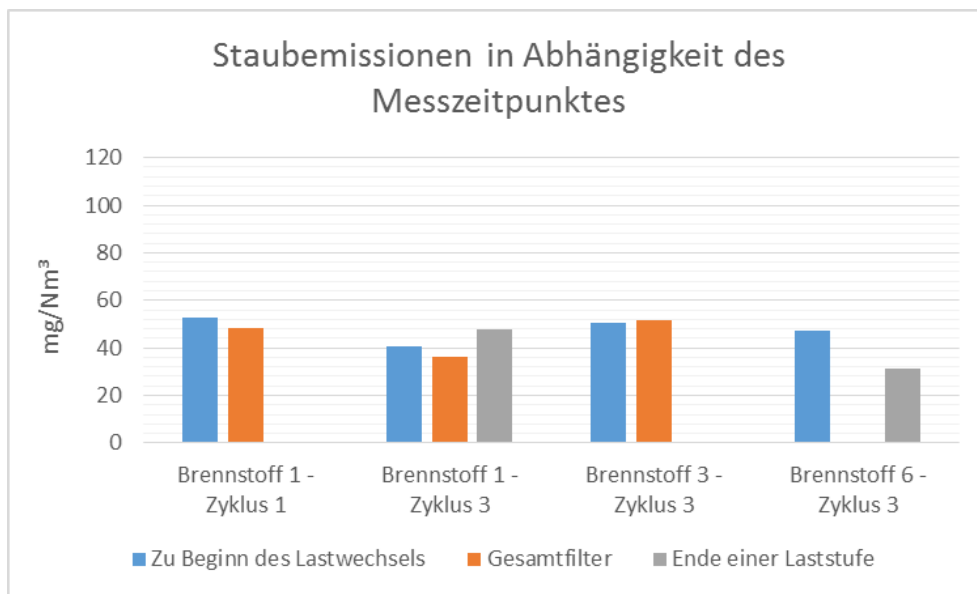
Während die Staubmessung in Versuchsdurchführungen gemäß der EN 303-5 bzw. den zugrundeliegenden Messvorschriften eine gleichmäßige Verteilung der mind. 4 Absaugintervalle über die gesamte Messdauer von mind. 6 Stunden vorsieht, muss diese Messmethodik für den Einsatz in Lastzyklusversuchen adaptiert bzw. neu bewertet werden. Erste methodische Untersuchungen wurden im Rahmen des Projektes bereits begonnen.

Da eine regelmäßige Verteilung von mind. 4 Planfilter über den gesamten Messzyklus nicht zielführend erschien, wurden die Absaugintervalle der Staubmessung zu Beginn jedes Lastwechsels gewählt. Je nach Anzahl der Lastwechsel bzw. Laststufen im Zyklus wurde somit auch eine unterschiedliche Anzahl an Einzelmessungen in Form von Planfilter ermittelt. Da die Verbrennungsbedingungen und somit die Emissionen innerhalb eines Lastwechsels bzw. einer Laststufe nicht konstant sind, wurden in ausgewählten Versuchsreihen die Zeitpunkte der 30 minütigen Absaugintervalle variiert. In Abbildung 37 sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Messzeitpunkte, sprich zu Beginn eines Lastwechsels, vor Ende einer Laststufe und somit vor einem Lastwechsel, dargestellt. Als Referenz wurden die Staubemissionen in 3 Versuchen mittels eines Gesamtfilters über die gesamte Laufzeit eines Versuchszyklus gemessen.

Wie in Abbildung 37 ersichtlich konnte keine systematische Korrelation zwischen Messzeitpunkt und Höhe der Staubemissionen festgestellt werden. Weder zwischen den Versuchen mit demselben Brennstoff und unterschiedlichen Zyklusvarianten, noch innerhalb derselben Zyklusvariante mit unterschiedlichen Brennstoffen waren Zusammenhänge feststellbar. Sollte in zukünftigen Messmethoden eine Lastzyklusvariante vorgesehen sein,

muss die Staubmessmethodik in weiterführenden Projekten noch genauer analysiert und adaptiert werden.

Abbildung 37: Einfluss des Messzeitpunktes während der Lastzyklusversuche auf die Ergebnisse der Staubemissionen.



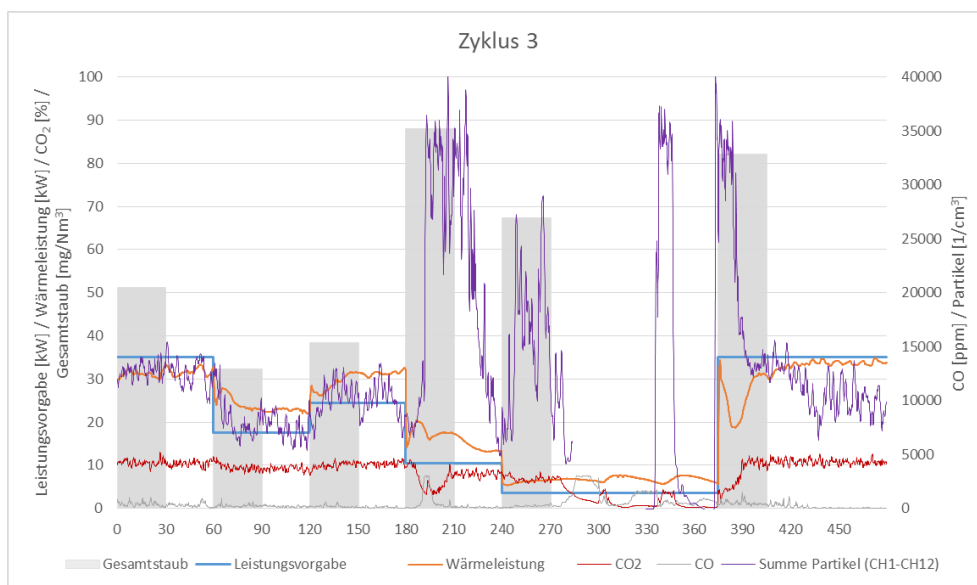
Gründe hierfür sind im Wesentlichen auf die unterschiedlichen Brennraumbedingungen während der Lastwechsel und auf die Regelungskonzepte der Feuerungsanlagen zurück zu führen. Während bei den Nenn- und Teillastmessungen gemäß EN 303-5 konstante Bedingungen herrschen, laufen bei Lastwechsel eine Reihe von Prozessen in der Brennkammer ab, auf die die Regelungstechnik reagieren muss. Diese Bedingungen und der dazugehörige Regelungsaufwand sind nicht immer identisch. Darüber hinaus haben auch die Regelungskonzepte der Prüfstände, insbesondere der Wärmeabnahmeregelung, bei Zyklusvarianten einen maßgeblichen Einfluss. Daher können auch bei Versuchswiederholungen unterschiedliche Ergebnisse erzielt werden.

Abbildung 38 zeigt neben dem zeitlichen Verlauf der Leistungsvorgabe und der tatsächlichen Wärmeleistung auch die dazugehörigen CO-, Gesamtstaub- und Feinstaubemissionen. Die grauen Balken markieren die einzelnen Staubfilter der Gesamtstaubmessung. Die violette Linie zeigt die Summe der Feinstaubfraktionen, welche mit dem Kaskadenimpaktor (ELPI) ermittelt wurden. Betrachtet man die Ergebnisse der Gesamtstaubmessung (graue Balken) so zeigt sich, dass die hohen Staubemissionen zumeist mit Lastwechsel auf niedrige Laststufen, wie beispielsweise 30 % bzw. 10 %, einhergehen. Auch das Wiederauffahren der

Anlage aus der Gluterhaltung in den Leistungsbrand ist mit deutlichem Anstieg der Staubemissionen verbunden.

Die violette Linie zeigt ebenso die Staubemissionen allerdings nicht als Gesamtstaub sondern als Summe der Feinstaubfraktionen. Diese sind in der Endsumme nicht deckungsgleich mit den Gesamtstaubemissionen, jedoch ermöglichen sie unter anderen eine Analyse des Auftretens der hohen Staubfraktionen. Die Ergebnisse zeigen, dass in der Phase mit 10 % Wärmeleistung die Anlage in die Gluterhaltung geht und in dieser Zeit unregelmäßig verteilt Start- und Stoppvorgänge ablaufen, die mit hohen Staubemissionen einhergehen. Eine Ermittlung der unregelmäßig auftretenden Staubsitzen ist mit Einzelfiltern nicht möglich. Aus diesem Grund sollte zukünftig der Einsatz eines Gesamtfilters über die gesamte Versuchslaufzeit angedacht werden.

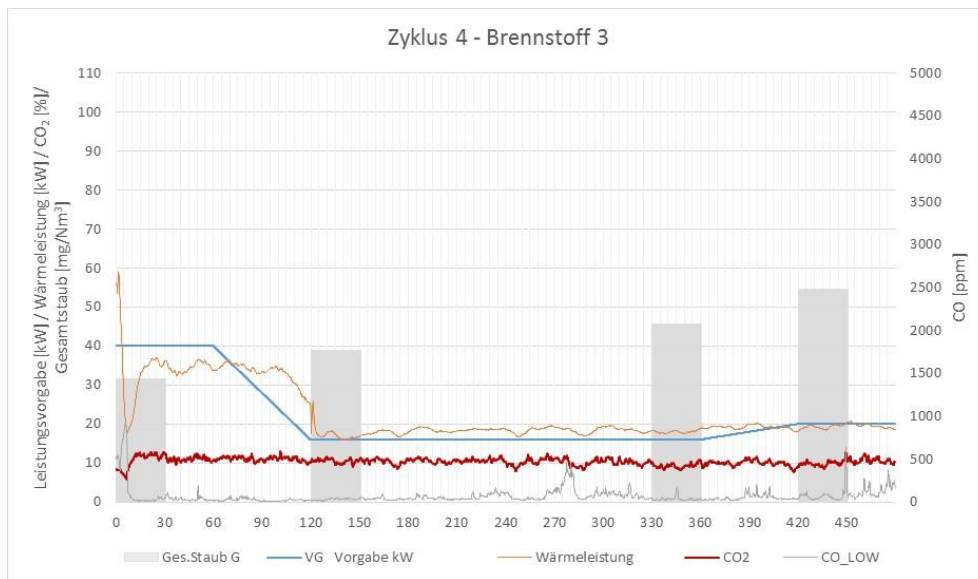
Abbildung 38: Zeitlicher Verlauf der Leistungsvorgabe, Wärmeleistung, CO-Emissionen, Gesamtstaub- und Feinstaubemissionen am Beispiel von Zyklus 3.



Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 39 den zeitlichen Verlauf der Wärmeleistung und die dazugehörigen Emissionen CO und Gesamtstaub am Beispiel von Zyklus 4, der die Verwendung eines Lastausgleichsystems simuliert und daher nur geringe und sehr moderate Lastwechsel beinhaltet. Dementsprechend zeigt das Ergebnis der Staubbemessung auch deutlich niedrigere Emissionen. Während bei Zyklus 3 (Abbildung 38) die Staubemissionen mit Spitzen bis rund 89 mg/Nm³ (10 % O₂) gemessen wurden, waren die Staubemissionen bei Zyklus 4 deutlich geringer mit maximalen Konzentrationen von bis zu 54 mg/Nm³ und 46 mg/Nm³ im Mittel über die gesamte Messzeit. Wie die CO-Emissionen zeigen auch die

Staubemissionen einen deutlichen Zusammenhang zwischen Lastzustand bzw. Lastwechsel und Höhe der Emissionen.

Abbildung 39: Zeitlicher Verlauf der Leistungsvorgabe, Wärmeleistung, CO-Emissionen und Gesamtstaubemissionen am Beispiel von Zyklus 4.



5.2.4 Einfluss auf den Wirkungsgrad

Zur Bewertung der Wirkungsgrade der durchgeführten Verbrennungsversuche wird nachfolgend der direkt ermittelte Wirkungsgrad (zugeführte Energie zur abgeführten Energie) betrachtet.

In Abbildung 40 und Abbildung 41 sind die mittleren Wirkungsgrade der Nenn- und Teillastversuche mit den jeweils eingesetzten Brennstoffen dargestellt. Wie in der Grafik ersichtlich bewegten sich alle gemessenen Wirkungsgrade im Bereich von 93 % bis 96 %. Die chemische Zusammensetzung der Brennstoffe hat somit keinen nennenswerten Einfluss auf die Wirkungsgrade, weder bei Nennlast noch bei Teillast. Bei Versuchen mit variierenden Wassergehalten innerhalb einer Brennstoffqualität (Versuchsbrennstoff 6) wird der Einfluss des Wassergehaltes auf den effektiven Wirkungsgrad verdeutlicht. Wie die Abbildung 42 zeigt, steigt der Wirkungsgrad mit abnehmendem Wassergehalt. In dieser Versuchsreihe wurde eine Brennstoffqualität bei 40 %, 30 % und 20 % Wassergehalt eingesetzt. Der

Wirkungsgrad konnte durch Reduzierung des Wassergehaltes von 40 % auf 30 % um 2,4 %, von 30 % auf 20 % um 0,7 % und von 40 % auf 20 % um 3,1 % gesteigert werden.

Abbildung 40: Mittlere Wirkungsgrade bei den Nennlastversuchen in Abhängigkeit der Brennstoffqualität

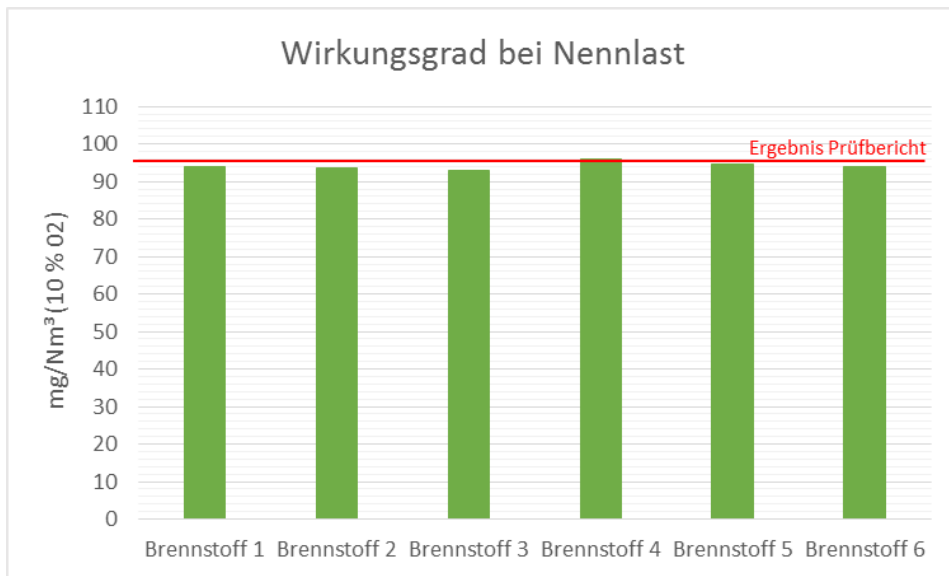


Abbildung 41: Mittlere Wirkungsgrade bei den Teillastversuchen in Abhängigkeit der Brennstoffqualität

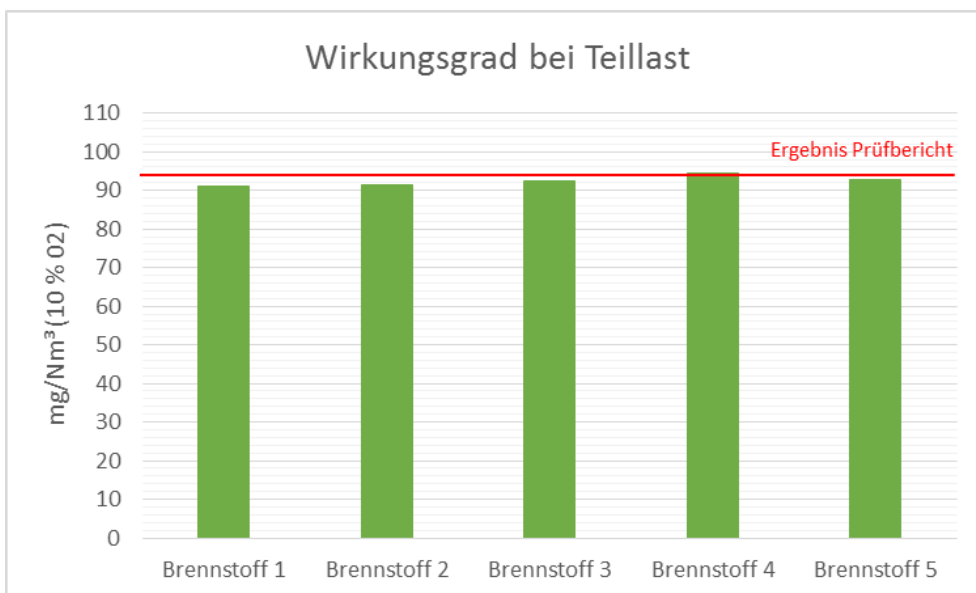
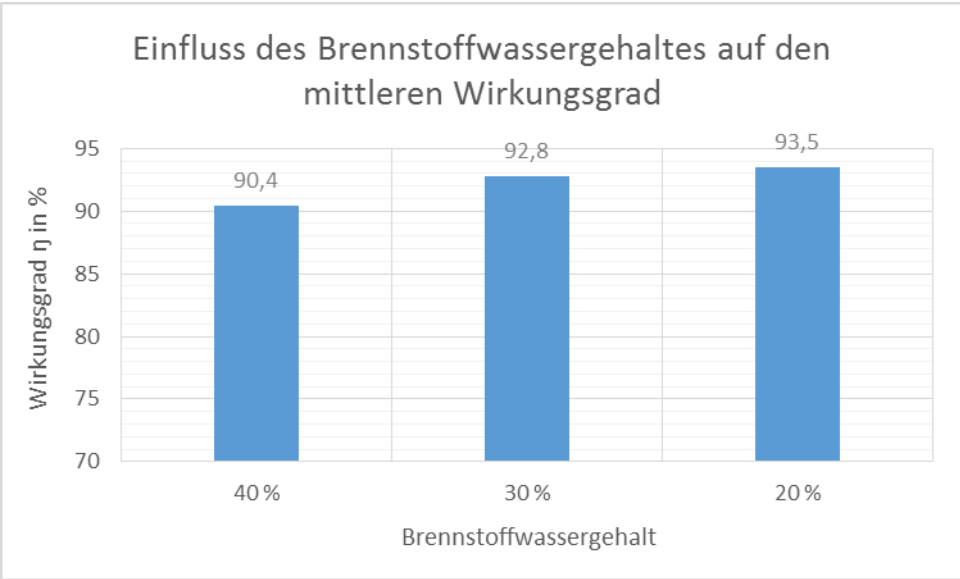


Abbildung 42: Einfluss des Brennstoffwassergehaltes auf den Wirkungsgrad.



6 Schlussfolgerungen und Diskussion

Bei der energetischen Nutzung von biogenen Festbrennstoffen zur Wärmegewinnung werden neben den Hauptprodukten Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf auch immer unerwünschte luftgetragene Stoffe emittiert. Ein idealer Brennstoff würde nur aus den Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff bestehen, der dann unter idealen Verbrennungsbedingungen mit reinem Sauerstoff als Oxidationsmittel vollständig zu Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf umgesetzt werden könnte.

Dieser idealisierte Prozess wird jedoch bei der tatsächlichen Biomasseverbrennung durch die Inhaltsstoffe im Brennstoff, der Reaktionen im Brennraum mit den Luftbestandteilen sowie der eingesetzten Verbrennungstechnik beeinflusst. Obwohl diese gasförmigen und aerosolartigen Stoffe im Abgas nur in sehr geringen Konzentrationen auftreten, spielen sie auf Grund ihrer Wirkung auf die Umwelt eine entscheidende Rolle in Bezug auf die Luftreinhaltung.

Bei der thermischen Umsetzung von biogenen Festbrennstoffen entstehen somit Emissionen, die auf Grund ihrer Herkunft aus vollständiger bzw. unvollständiger Verbrennung, unterteilt werden können. Im Wesentlichen gibt es zwei grundsätzliche Möglichkeiten, die gas- und aerosolartigen Emissionen bei der Verbrennung zu reduzieren. Zum einen durch Primärmaßnahmen, die konstruktive Maßnahmen wie Rost- und Feuerungsgeometrie oder die Ausführung der Luftstufung beinhalten können. Darüber hinaus kann durch regelungstechnische Möglichkeiten und adaptive Regelungskonzepte eine Emissionsreduktion vorangetrieben werden.

Zum anderen durch Sekundärmaßnahmen wo beispielsweise durch den Einsatz von Elektrofiltern oder Katalysatoren eine Abgasreinigung erfolgt. D.h. die Abgasreinigung wird nach der eigentlichen Feuerung im Abgasvolumenstrom mit Hilfe von zusätzlicher technischer Ausrüstung realisiert. Prinzipiell sollten Sekundärmaßnahmen dann zum Einsatz kommen, wenn die gültigen Emissionsgrenzwerte durch Primärmaßnahmen allein nicht eingehalten werden können oder der Einsatz von Sekundärmaßnahmen wirtschaftliche Vorteile aufweist. Andernfalls sollten Primärmaßnahmen den Sekundärmaßnahmen vorgezogen werden.

Ziel des vorliegenden Projektes war es den Einfluss der Brennstoffqualität auf die Entstehung von Emissionen zu untersuchen und eventuelle Handlungsempfehlungen abzuleiten. Hierzu wurden zwei handelsübliche automatisch beschickte Hackgutfeuerungsanlagen in einem

Leistungsbereich von <45 kW ausgewählt. Die ausgewählten Anlagen wurden dann mit 6 unterschiedlichen Versuchsbrennstoffen in Nenn- und Teillastversuchen gemäß den Anforderungen der EN 303-5 auf die Entstehung der Emissionsmessgrößen Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO_x), organisch gebundener Kohlenstoff (OGC) und Staub untersucht. Ergänzend zu den Verbrennungsversuchen gemäß EN 303-5 wurden auch Versuche mit 4 unterschiedlich gestalteten Lastzyklen durchgeführt. Die Lastzyklusversuche sollen zum einen die Auswirkungen der Brennstoffqualität in Abhängigkeit des Lastzustandes der Anlagen und zum anderen die Unterschiede zwischen Prüfstandergebnissen unter konstanten Verbrennungsbedingungen und praxisnahen Bedingungen mit Lastwechsel beleuchten.

Neben Hartholz hackschnitzel wurden Hobelspäne, Hackschnitzel aus Waldrestholz mit unterschiedlichen Qualitäten und rindenfreies Industriehackgut eingesetzt. Die Versuchsbrennstoffe wurden umfangreichen physikalischen und chemischen Brennstoffanalysen unterzogen und wiesen neben der Variation des Wassergehaltes auch deutliche Unterschiede in der Schüttdichte auf. Zudem wurden signifikante Differenzierungen in der chemischen Zusammensetzung der Brennstoffe festgestellt. Insbesondere die Gehalte an aerosolbildenden Elementen, Kalium, Natrium, Schwefel, Blei und Zink zeigten sowohl unter konstanten Verbrennungsbedingungen als auch im Zuge der Lastzyklusversuche deutlichen Einfluss auf die Emissionsbildung.

Neben der chemischen Zusammensetzung wurden die Aufbereitungsform und die brennstoffspezifische Struktur der Partikelzusammensetzung als maßgebliche Einflussfaktoren auf die Verbrennungsqualität und die Emissionsentstehung festgestellt. Am Beispiel der Hobelspäne wurde verdeutlicht, dass die geringe Schütt- und Partikeldichte in Abhängigkeit von der Brennraumgeometrie und des jeweiligen Lastzustandes die Verbrennungsgüte maßgeblich beeinflussen und die CO- aber auch Staubemissionen deutlich erhöhen. Auch in Bezug auf den Wassergehalt konnte ein deutlicher Einfluss auf die Entstehung der Emissionen festgestellt werden. Jedoch zeigten bereits geringfügige Änderungen der Anlageneinstellungen und Anpassungen an die geänderten Brennstoffeigenschaften positive Auswirkungen auf die Emissionsentstehung.

Hinsichtlich der NO_x-Emissionen zeigen die Ergebnisse einen starken Zusammenhang zwischen der Höhe der Konzentration im Abgas und dem Brennstoffstickstoff sowie der Wärmeleistung bzw. der Kesselauslastung. Im Vergleich zu CO oder Staub hat die Verbrennungstechnologie und die Anlageneinstellung deutlich weniger Einfluss auf die NO_x-Emissionen. Aus diesem Grund waren die Unterschiede in den Ergebnissen der heiztechnischen Prüfung und der Versuche mit Werkseinstellung deutlich niedriger.

Die Versuche mit Lastzyklen zeigten insbesondere bei den CO- und Staubemissionen Unterschiede im Vergleich zu den Nenn- und Teillastversuchen. Bei den Nenn- und Teillastversuchen werden die Verbrennungsbedingungen stabil und konstant über die gesamte Laufzeit gehalten und die Regelung der Anlagen kann sich somit auf eine möglichst vollständige und somit emissionsarme Verbrennung einstellen. Die mit den Lastzyklen einhergehenden Lastwechsel sorgen im Gegensatz dazu, dass sich die Verbrennungsbedingungen im Brennraum permanent ändern. Diese Änderungen führen zu einem Ungleichgewicht in der Verbrennungsreaktion und in weiterer Folge zu erhöhten Emissionen. Der Anstieg der CO- und Staubemissionen war insbesondere in Phasen mit sehr niedrigen Lastzuständen bzw. beim Start-Stopp-Betrieb während der Gluterhaltung festzustellen. Aber auch die Gestaltung der Lastzyklen, d.h. die Anzahl, Höhe und Abfolge der Lastwechsel hat maßgeblichen Einfluss gezeigt. Die Versuche mit moderaten Lastwechseln, die den Einsatz eines Lastausgleichspeichers simulierten, zeigten daher auch die niedrigsten Emissionen.

Fazit: Aus den vorliegenden Ergebnissen lassen sich einige klare Handlungsempfehlungen für die Praxis ableiten.

Hinsichtlich der Brennstoffqualität lässt sich hervorheben, dass prinzipiell immer die bestmögliche Qualität angestrebt und eingesetzt werden soll. Alle gemessenen Emissionsgrößen (CO, NO_x und auch Staub) werden maßgeblich von einigen Brennstoffeigenschaften, wie beispielsweise dem Wassergehalt, der Aufbereitungsform (Feinanteil und Schüttdichte) und der chemischen Zusammensetzung spezifischer Elemente wie Stickstoff und den aerosolbildenden Bestandteilen beeinflusst. Sollten bestimmte Brennstoffeigenschaften wie zum Beispiel der Wassergehalt oder der Feinanteil nicht bereits in der Brennstoffherstellung und Aufbereitung optimiert werden können, so können die Emissionen durch geringfügige Änderungen der Anlageneinstellungen deutlich reduziert werden. D.h. auf eine bestmögliche Anpassung der Anlageneinstellungen an die Brennstoffeigenschaften sollte auch in der Praxis geachtet werden, da hier ein deutliches Emissionseinsparungspotential gegeben ist. Weiterführende Forschungsaktivitäten in Richtung Optimierung der Brennstoffqualität durch gezielte Aufbereitungsschritte wie zum Beispiel Siebung wären in diesem Zusammenhang sehr interessant, da festgestellt werden konnte, dass insbesondere die aerosolbildenden Elemente aber auch der Stickstoffgehalt maßgeblich durch einen hohen Rindenanteil und einem hohen Grad an Verunreinigung mit Nadeln, Blattmaterial oder anderen Störstoffen erhöht werden.

Im Zuge der Lastzyklusversuche konnte festgestellt werden, dass ein adäquate Anlagenauslegung und Dimensionierung und der damit verbundene Anlagenbetrieb ebenso ein großes Potential zur Reduktion der Emissionen aus dem Hausbrand darstellt. Wie die

Ergebnisse der Lastzyklusversuche zeigen, sollten in der Praxis Betriebszustände mit sehr niedriger Kesselauslastung (Start-Stopp-Betrieb) vermieden werden, da hier die höchsten Emissionen anfallen. Zur Vermeidung sind daher eine richtige Auslegung des Heizsystems sowie die Verwendung eines Lastausgleichsspeichers (Pufferspeicher) empfehlenswert.

In Hinblick auf die Diskussion, wie die Prüfmethode praxisnaher gestaltet werden kann, stellt sich primär die Frage nach dem „richtigen“ Lastzyklus. Um der Forderung der Europäischen Kommission nach einer möglichst praxisnahen Prüfmethode gerecht zu werden muss erst ein Zyklusverfahren definiert werden, das auch eine vergleichbare Prüfung mit reproduzierbaren Ergebnissen ermöglicht. Hierfür sind weiterführende Forschungsaktivitäten notwendig, um praxisnahe Kriterien eines Prüfzyklus zu erarbeiten. Zudem wird es hier notwendig sein, Praxisdaten einzubeziehen die entweder erst generiert werden müssen, oder von Herstellern, sofern vorhanden, zur Verfügung gestellt werden müssen. Es hat sich gezeigt, dass bei der Gestaltung des Lastzyklus auf abrupte Lastwechsel verzichtet werden sollte und hingegen Rampen verwendet werden sollten. Zudem müssen die derzeit gültigen Grenzwerte neu evaluiert werden, da diese auf Basis von derzeit gültigen Prüfrichtlinien bestimmt wurden und dieses gegenwärtige Emissionsniveau von Nennlastversuchen im Rahmen von Typenprüfungen mit Lastzyklen nicht unmittelbar vergleichbar ist.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aufstellung der Messgeräte und Messbereiche für kontinuierlich erfasste Emissionen.	12
Tabelle 2: Datentabelle zum Jahresreferenzlastzyklus für den Jahresnormnutzungsgrad, PK ist die Kesselleistung in % der Nennleistung	16
Tabelle 3: Umfang der physikalischen und chemischen Brennstoffanalysen	19
Tabelle 4: Versuchsumfang nach Art der Messung und eingesetztem Versuchsbrennstoff.	22
Tabelle 5: Ergebnisse der physikalisch-brennstofftechnischen Untersuchungsparameter	25
Tabelle 6: Ergebnisse der Kohlenstoff- (C), Wasserstoff- (H), Stickstoff- (N) und Schwefelgehalte (S).	26
Tabelle 7: Gehalt an aerosolbildenden Elementen Schwefel (S), Kalium (K), Natrium (Na), Zink (Zn) und Blei (Pb) der verwendeten Versuchsbrennstoffe	27
Tabelle 8: Ergebnisse ausgewählter Elementkonzentrationen.	27
Tabelle 9: Abscheideleistungen der eingesetzten E-Filter nach Art der Messung und eingesetztem Versuchsbrennstoff.	50

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektstruktur – „HGηEm“	10
Abbildung 2: schematische Darstellung der Versuchsaufbauten am Prüfstand	11
Abbildung 3: schematische Darstellung der gravimetrischen Staubmessung (Quelle: ÖNORM EN 13284-1:2017)	13
Abbildung 4: schematische Darstellung des Lastzyklus BLT Wieselburg (PrüfReal)	15
Abbildung 5: schematische Darstellung des Jahresreferenzlastzyklus BEST/BE 2020+	16
Abbildung 6: schematische Darstellung des Lastzyklus ohne Pufferspeicher	17
Abbildung 7: schematische Darstellung des Lastzyklus mit Pufferspeicher	18
Abbildung 8: Versuchsbrennstoff 1 – Hartholz-Hackgut und Versuchsbrennstoff 2 - Hobelspäne	23
Abbildung 9: Versuchsbrennstoff 3 – Waldhackgut (hohe Qualität) und Versuchsbrennstoff 4 – Waldhackgut (Schlechte Qualität)	24
Abbildung 10: Versuchsbrennstoff 5 – Industriebrennstoff (ohne Rinde) und Versuchsbrennstoff 6 – Hackschnitzel frisch (hoher Wassergehalt)	24
Abbildung 11: Ablauf und Leistungsregelung der eingesetzten Feuerungsanlagen im Lastzyklus 1 am Beispiel von Brennstoff-Nr. 1 Hartholz Hackgut.	30
Abbildung 12: Ablauf und Leistungsregelung der eingesetzten Feuerungsanlagen im Lastzyklus 2 am Beispiel von Brennstoff-Nr. 1 Hartholz Hackgut.	30
Abbildung 13: Ablauf und Leistungsregelung der eingesetzten Feuerungsanlagen im Lastzyklus 3 am Beispiel von Brennstoff-Nr. 1 Hartholz Hackgut.	31
Abbildung 14: Ablauf und Leistungsregelung der eingesetzten Feuerungsanlagen im Lastzyklus 4 am Beispiel von Brennstoff-Nr. 1 Hartholz Hackgut.	32
Abbildung 15: Auswirkung des Wassergehaltes auf die Leistungsregelung der eingesetzten Feuerungsanlage im Lastzyklus 3 am Beispiel von Brennstoff-Nr. 6.	33
Abbildung 16: Brennstoffeinfluss auf die CO Emissionen bei Nennlast.	35
Abbildung 17: Brennstoffeinfluss auf die CO Emissionen bei Teillast	35
Abbildung 18: Gegenüberstellung der Kohlenmonoxid (CO) Emissionen der Lastzyklusversuche und der Nennlastversuche gemäß EN 303-5.	36
Abbildung 19: Ablauf von Zyklus 2 mit spezifischer Werkseinstellung	37
Abbildung 20: Ablauf von Zyklus 2 ohne spezifischer Werkseinstellung	38
Abbildung 21: Ablauf von Zyklus 4 bei dem die Verwendung eines Pufferspeichersystems simuliert wird.	39
Abbildung 22: Einfluss des Wassergehaltes auf die CO-Emissionen mit dem Brennstoffwassergehalt angepassten und nicht angepassten Anlageneinstellungen.	40
Abbildung 23: Ergebnisse der NO _x -Emissionsmessung bei Nennlast	41
Abbildung 24: Ergebnisse der NO _x -Emissionsmessung bei Teillast	41

Abbildung 25: Zusammenhang zwischen NO _x -Emissionen und Stickstoffgehalt im Brennstoff	42
Abbildung 26: Korrelation zwischen NO _x -Emissionen und Stickstoffgehalt im Brennstoff	43
Abbildung 27: Zusammenhang zwischen NO _x -Emissionen und Wärmeleistung bzw. Kesselauslastung	44
Abbildung 28: Zusammenhang zwischen NO _x -Emissionen und Wärmeleistung bzw. Kesselauslastung	44
Abbildung 29: Brennstoffeinfluss auf die Staubemissionen bei Nennlast.	46
Abbildung 30: Brennstoffeinfluss auf die Staubemissionen bei Teillast.	47
Abbildung 31: Zusammenhang zwischen Staubemissionen und der Gehalte an aerosolbildenden Elementen	48
Abbildung 32: Zusammenhang zwischen Staubemissionen und der Gehalte an Kalium, Natrium, Schwefel und Zink.	48
Abbildung 33: Vergleich der Staubemissionen bei Nennlast und Lastzyklusversuchen sowie die Reduktion durch elektrostatische Staubabscheider.	49
Abbildung 34: Vergleich der Staubemissionen bei Nennlast und Lastzyklusversuchen sowie der zugrunde liegenden effektiven Wärmeleistung.	50
Abbildung 35: Einfluss der mittleren effektiven Wärmeleistung auf die Entstehung von Staubemissionen.	51
Abbildung 36: Einfluss der Brennstoffwassergehalte auf die Entstehung von Staubemissionen	52
Abbildung 37: Einfluss des Messzeitpunktes während der Lastzyklusversuche auf die Ergebnisse der Staubemissionen.	53
Abbildung 38: Zeitlicher Verlauf der Leistungsvorgabe, Wärmeleistung, CO-Emissionen, Gesamtstaub- und Feinstaubemissionen am Beispiel von Zyklus 3.	54
Abbildung 39: Zeitlicher Verlauf der Leistungsvorgabe, Wärmeleistung, CO-Emissionen und Gesamtstaubemissionen am Beispiel von Zyklus 4.	55
Abbildung 40: Mittlere Wirkungsgrade bei den Nennlastversuchen in Abhängigkeit der Brennstoffqualität	56
Abbildung 41: Mittlere Wirkungsgrade bei den Teillastversuchen in Abhängigkeit der Brennstoffqualität	56
Abbildung 42: Einfluss des Brennstoffwassergehaltes auf den Wirkungsgrad.	57

Literaturverzeichnis

Hartmann, H.; Böhm, T.; Maier, L. (2000): Naturbelassene biogene Festbrennstoffe – umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. Hrsg.: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen. München: Selbstverlag, 155 S. (Schriftenreihe „StMLUMaterialien“,154)

Heckmann, M.; Friedl, G.; Schwarz, M.; Rossmann, P.; Hartmann, H.; Baumgartner, H.; Lasselsberger, L.; Themess, A. (2010): Bestimmung von Jahresnutzungsgrad und Emissionsfaktoren von Biomasse-Kleinfeuerungen am Prüfstand. Projektendbericht. BIOENERGY 2020+ GmbH

Hofbauer, H.; Kaltschmitt, M.; Nussbaumer, T. (2009): Thermochemische Umwandlungsprozesse. In Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-85094-6. S.375-441

Lenz, V. (2014): Stand und technische Entwicklungspotenziale bei Pellet- und Hackschnitzelkessel in Deutschland im Hinblick auf Effizienz und Emissionen. FNR-Fachveranstaltung: Effizienzsteigerung und Emissionsminderung bei Biomassefeuerungsanlagen im Zuge der Umsetzung der 1.BImSchV, Berlin, 21. Januar 2014

Loichinger, A. (2005): Analyse und Optimierung der Kühlschmierstoff-Versorgung von rotierenden Werkzeug. Schriftenreihe des ISF, Hrsg.: Klaus Weinert, Vulkan Verlag Essen.

Nussbaumer, T. (2003): Grundlagen der Aerosolbildung in Holzfeuerungen. Projekt im Auftrag des Schweizer Bundesamt für Energie und des Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Verenum Zürich.

Nussbaumer, T. (2009): Stoffe aus vollständiger Oxidation der Hauptbrennstoffbestandteile. In Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-85094-6. S.375-441

Obernberger, I.; Brunner, T.; Bärnthaler, G. (2005): Chemical properties of solid biofuels – significance and impact. Institute for Resource Efficient and Sustainable Systems, Graz university of Technology, Austria

ÖNORM EN 13284-1: 2017 12 15: Emissionen aus stationären Quellen - Ermittlung der Staubmassenkonzentration bei geringen Staubkonzentrationen - Teil 1: Manuelles gravimetrisches Verfahren

ÖNORM EN 15104:2011: Feste Biobrennstoffe - Bestimmung des Gesamtgehaltes an Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff - Instrumentelle Verfahren

ÖNORM EN 303-5: 2018 05 01: Heizkessel - Teil 5: Heizkessel für feste Brennstoffe, manuell und automatisch beschickte Feuerungen, Nennwärmeleistung bis 500 kW - Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung

ÖNORM EN ISO 16967:2015: Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung von Hauptelementen - Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na und Ti (ISO 16967:2015); Deutsche Fassung EN ISO 16967:2015

ÖNORM EN ISO 16968:2015: Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung von Spurenelementen (ISO 16968:2015)

ÖNORM EN ISO 16994:2016: Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Gesamtgehaltes an Schwefel und Chlor (ISO 16994:2016)

ÖNORM EN ISO 17225-4: 2014 09 01: Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 4: Klassifizierung von Holzhackschnitzeln (ISO 17225-4:2014)

ÖNORM EN ISO 17818:2016: Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung der Schüttdichte (ISO 17828:2015)

ÖNORM EN ISO 17827-1:2016: Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung für unkomprimierte Brennstoffe - Teil 1: Horizontales Rüttelsiebverfahren mit Sieben mit einer Lochgröße von 3,15 mm und darüber (ISO 17827-1:2016)

ÖNORM EN ISO 18122:2016: Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Aschegehaltes (ISO 18122:2015)

ÖNORM EN ISO 18123:2015: Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Gehaltes an flüchtigen Bestandteilen

ÖNORM EN ISO 18125:2017: Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Heizwertes (ISO 18125:2017)

ÖNORM EN ISO 18134-2:2017: Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Wassergehaltes - Ofentrocknung - Teil 2: Gesamtgehalt an Wasser - Vereinfachtes Verfahren (ISO 18134-2:2017)

Sulzbacher, L.; Lasselsberger, L.; Baumgartner, H. (2012): Miscanthus - Vom Feld bis zum Ofen. Abschlussbericht Teil 2: Technische Möglichkeiten der thermischen Nutzung von Miscanthus, Forschungsbericht Nr.54, S. 61

HBLFA Francisco Josephinum Wieselburg

Schloss Weinzierl 1, 3250 Wieselburg

josephinum.at