FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK IBP

INTELLIGENTES KOMBINATIONSSYSTEM (VREM-SYSTEM) ZUR REGELUNGSTECHNISCHEN OPTIMIERUNG DER VERBRENNUNG UND ZUR VERMEIDUNG DER FEHLBEDIENUNG IN BIOMASSEHEIZKESSELN DURCH DEN EINSATZ DER O_2/CO_e-SONDE

ABSCHLUSSBERICHT ÜBER EIN FORSCHUNGSPROJEKT GEFÖRDERT VOM BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (03KB109A)

Dr.-Ing. Mohammad Aleysa

Prof. Dr.-Ing. Philip Leistner

Stuttgart, 27. März 2019

Vorwort:

Der vorliegende Abschlussbericht zum Thema „regelungstechnische Optimierung der Verbrennung und kontinuierliche Betriebs- und Emissionsüberwachung von Biomasseheizkesseln“ entstand im Fachgebiet Verbrennungs- und Umweltschutztechnik des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP im Rahmen des Kombinationssystemprojekts (Förderkennzeichen 03KB109A) im Zeitraum von Juli 2016 bis Juni 2018. Dieses Projekt wurde von dem Bundesministerium für Energie und Wirtschaft BMWi über den Projektträger Jülich (PTJ) gefördert und in Kooperation mit der Firma HDG Bavaria GmbH sowie mit der Firma LAMTEC Mess- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG durchgeführt.

Unser herzlichster Dank geht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi und an den Projektträger Jülich für die administrative und finanzielle Unterstützung zur Durchführung dieses Kombinationssystemprojekts. Einen besonderen Dank richten wir an die Frau Heike Neumann sowie Herrn Sven Matura vom Projektträger Jülich für die Unterstützung und Begleitung des Projekts.

Danken möchten wir auch der Firma HDG Bavaria GmbH sowie der Firma LAMTEC Mess- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG für die fachliche sowie technische Unterstützung dieses Projekts, die Bereitstellung der Versuchsanlagen sowie der notwendigen Sensoren. Unser spezieller Dank gilt Herrn Martin Ecker, dem Geschäftsführer der Firma HDG Bavaria GmbH, und seinen Mitarbeitern sowie Herrn Dr. Frank Hammer, dem Sales Manager der Firma Lamtec GmbH & Co. KG für die produktive und erfolgreiche Kooperation.

Ferner gilt unser Dank allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie Diplomanden und Doktoranden des Fachgebiets Verbrennungs- und Umweltschutztechnik des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP für ihre kooperative und produktive Zusammenarbeit.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi
Scharnhorststr. 34-37
10115 Berlin
Postanschrift: 11019 Berlin

Administrative Koordination:
Projektträger Jülich
Postfach 61 02 47
10923 Berlin

HDG Bavaria GmbH Heizsysteme für Holz
Siemensstraße 22
84323 Massing
Mail: Martin.Ecker@hdg-bavaria.com

LAMTEC Mess- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG
Wiesenstraße 6, 69190 Walldorf
Dr.-Ing. Frank Hammer
Mail: hammer@lamtec.de

Inhaltsverzeichnis

1	**Einleitung**	**12**
2	**Ziele und Inhalt des Projekts**	**16**
3	**Rechtliche und technische Anforderungen an Biomasseheizkessel**	**17**
3.1	Emissionsanforderungen gemäß der 1. BImSchV und der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG	17
3.2	Effizienzanforderungen an Heizkessel für feste Brennstoffe gemäß der DIN EN 303-5 und der Ökodesign-Richtlinie 2015/1187	22
3.3	Überwachungsmethode der Biomasseheizkessel gemäß der 1. BImSchV	28
3.4	Potential der Schadstoffminderung in der Praxis durch die Überwachung gemäß der 1. BImSchV	30
4	**Schadstoffemissionen bei der Verbrennung von Festbrennstoffen**	**33**
4.1	Staubförmige Emissionen	33
4.2	Gasförmige Emissionen	36
5	**Stand der Technik der Regelung des Verbrennungsprozesses in Heizkesseln**	**47**
5.1	Regelung von Biomasseheizkesseln	47
5.1.1	Thermische Leistung	47
5.1.2	Verbrennungsqualität	49
5.1.3	Betriebssicherheit	49
5.2	Nachteile der Regelung mit der Sauerstoffsonde (Lambda-Sonde)	51
5.3	Wärmeverluste beim Betrieb von Biomasseheizkesseln (während der Wärmeproduktion)	53
5.4	Reduzierung der effizienzrelevanten Wärmeverluste in Biomasseheizkesseln	57
5.5	Einflussfaktoren auf den Betrieb von Biomasseheizkesseln in der Praxis	59

6 VREM-System zur regelungstechnischen Optimierung und kontinuierlichen Überwachung von Biomasseheizkesseln 61

6.1 Überwachungs- und regelungstechnische Methodik des VREM-Systems 61

6.2 Funktion der permanenten Überwachung mit dem VREM-System 62

6.3 Mögliche Methode für die Fehlermeldung 64

6.4 Regelungs- und Überwachungsalgorithmen 66

6.4.1 Regelbausteine des VREM-Systems 66

6.4.2 Überwachungsalgorithmen des VREM-Systems 73

6.4.3 Ökologische und ökonomische Bewertung des Betriebs 79

6.5 O_2/CO_e-Sonde Typ KS1D für den Einsatz in Biomasseheizkesseln 83

6.6 Kalibrierung und Charakterisierung der O_2/CO_e-Sonde 86

6.7 Technische Besonderheiten, Vorteile und Beitrag des VREM-Systems zum Klimaschutz 90

7 Technische Einrichtungen zur Versuchsdurchführung 93

8 Eingesetztes VREM-System und durchgeführte Untersuchungen 99

8.1 Technischer Aufbau des entwickelten und eingesetzten VREM-Systems 99

8.2 Durchgeführte Untersuchungen zur Entwicklung und Bewertung des VREM-Systems 100

8.2.1 Untersuchungen zur Effektivität der O_2/CO_e-Regelung 100

8.2.2 Untersuchungen der Funktionalität der Emissionsüberwachung 101

8.2.3 Untersuchungen zur Bewertung des Betriebs 102

9 Ergebnisse bei der Entwicklung des VREM-Systems auf dem Prüfstand 104

9.1 Ergebnisse zur O_2/CO_e-Regelung 105

9.1.1 Regelverhalten beim Einsatz von harten und weichen Scheithölzern 105

9.1.2 Regelverhalten bei der Verbrennung von Rest- und Abfallstoffen 110

9.2 Ergebnisse zur Emissionsüberwachung und Betriebsbewertung 116

9.2.1 Ergebnisse zur Emissionsüberwachung durch das VREM-System 116

9.2.2 Ergebnisse zur Bewertung des Betriebs von Heizkesseln 120

9.3 Übertragbarkeit der O_2/CO_e-Regelung auf automatisch beschickte Heizkessel 132

10 Ergebnisse der Erprobung des VREM-Systems im Praxisbetrieb 134

10.1 Dauererprobung in einem handbeschickten Vergaserkessel 135

10.2 Dauererprobung in einem automatisch beschickten Heizkessel 147

10.3 Ergebnisse zur Funktionalität der O_2/CO_e-Sonde im Dauerbetrieb 154

10.4 Anwendungsbeispiel für das VREM-System in der Praxis 155

11 Ökologische und ökonomische Bewertung des VREM-Systems 158

12 Umsetzbarkeit des VREM-Systems in der Praxis 162

13 Verwertung der Forschungsergebnisse 164

13.1 Wissenschaftliche und technische Herausforderungen 164

13.2 Wirtschaftliche und markttechnische Herausforderungen 166

13.3 Empfehlungen für die Verstärkung des Einsatzes von Biomasseheizkesseln und Umsetzung innovativer Konzepte/Technologien 169

13.4 Planung der Firma HDG Bavaria GmbH für die Umsetzung der Forschungsergebnisse 174

14 Zusammenfassung und Ausblick/ Summary and Outlook 176

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufnahme mit einer Thermobildkamera beim Betrieb eines handelsüblichen Heizkessels. 26

Abbildung 2: Relevante Einflussfaktoren auf den Betrieb von Biomasseheizkesseln. 60

Abbildung 3: Funktionsprinzip des VREM-Systems. 65

Abbildung 4: Sensoren der Firma LAMTEC GmbH & Co KG für die Messung von Sauerstoff sowie der nicht verbrannten Abgasbestandteile. 83

Abbildung 5: Aufbau der O_2/CO_e-Sonde (Typ KS1D) der Firma LAMTEC GmbH & Co. KG im Vergleich zur Lambda-Sonde (Typ LSU4) der Firma Bosch GmbH. 84

Abbildung 6: Das Funktionsprinzip der O_2/CO_e-Sonde der Firma LAMTEC GmbH & Co. KG [in Anlehnung an Wiegleb 2016]. 85

Abbildung 7: Versuchsaufbau zur Kalibrierung und Charakterisierung der O_2/CO_e-Sonde. 87

Abbildung 8: Technische Einrichtung (akkreditierter Prüfstand gemäß DIN EN 304 für die Zulassungsprüfung von Heizkesseln gemäß DIN EN 303-5) für die Versuchsdurchführung und Entwicklung des VREM-Systems. 94

Abbildung 9: Prüfstand gemäß DIN EN 303-5 und DIN EN 304. 95

Abbildung 10: Hydraulischer Schaltplan für das im Rahmen des LEVS entwickelten eingesetzten Wärmeabfuhrsystems zur Simulation des Betriebs von Heizkesseln. 96

Abbildung 11: Speicherprogrammierbare Steuerung des VREM-Systems. 97

Abbildung 12: Verwendete Brennstoffe für die Entwicklung des VREM-Systems. 105

Abbildung 13: Automatisch beschickter Heizkessel der Firma HDG (Typ HDG M). 134

Abbildung 14: Bei der Praxiserprobung eingesetzter handbeschickter Vergaserkessel (Typ F-Kessel) der Firma HDG GmbH. 135

Abbildung 15: Visualisierung der Betriebsdaten aus der Cloud-Anwendung. 145

Abbildung 16: Screenshot von dem E-Mailkonto für die Betriebsmeldungen durch das VREM-System im Praxisbetrieb. 146

Abbildung 17: Anlagen zur Untersuchung des Einflusses der Verbrennungsqualität auf den Betrieb und die Abscheideleistung von Staubabscheidern in der Praxis. 156

Abbildung 18: Schritte zur Entwicklung eines neuen Biomasseheizkesseltyps vor der Markteinführung. 167

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Mindestwirkungsgrade von Heizkesseln gemäß DIN EN 303-5. 23

Diagramm 2: Mindestwirkungsgrade für Zentralheizgeräte gemäß Art 15a B-VG. 23

Diagramm 3: Feinstaubemissionen (PM_{10}) aus Kleinfeuerungsanlagen (Holz-, Kohle-, Heizöl-, und Erdgasfeuerungen) [UBA 2017]. 34

Diagramm 4: Quellen der Feinstaubemissionen (PM_{10}) in Deutschland im Jahr 2016 [nach den Daten vom Umweltbundesamt]. 35

Diagramm 5: Quellen der flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (NMVOC)in Deutschland im Jahr 2016 [nach den Daten vom Umweltbundesamt]. 38

Diagramm 6: Quellen des Kohlenstoffmonoxids (CO) in Deutschland im Jahr 2016 [nach den Daten vom Umweltbundesamt]. 39

Diagramm 7: Quellen der Säure-Äquivalente (stöchiometrisch errechnet bezogen auf das wirksame Säure-Ion H^+ (d. h. die Berechnung erfolgt aus den Emissionsangaben von SO_2 (/32), NH_3 (/17) und NO_x (berechnet als NO_2 /46))) in Deutschland im Jahr 2016 [Umweltbundesamt]. 41

Diagramm 8: Quellen der Stickstoffoxide (NO_x) in Deutschland im Jahr 2016 [Umwelt-bundesamt]. 42

Diagramm 9: Stickstoffoxide (NO_x) bei der Verbrennung unterschiedlicher Hölzer im LEVS-System (zweistufige Verbrennung) des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP. 43

Diagramm 10: Stickstoffoxide (NO_x) bei der Verbrennung von Traubentrester im LEVS-System (zweistufige Verbrennung) des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP. 43

Diagramm 11: Schwefeldioxid bei der Verbrennung von Traubentrester im LEVS-System (zweistufige Verbrennung) des Fraunhofer IBP. 45

Diagramm 12: Messtechnisches Verhalten der Lambda-Sonde bei unvollständiger Verbrennung. 52

Diagramm 13: Verluste durch freie Wärme im Abgas in Abhängigkeit von der Temperatur und Konzentration an Kohlenstoffdioxid CO_2 im Abgas. 55

Diagramm 14: Normative Berechnung der chemischen Verluste bei der Verbrennung in Biomasseheizkesseln. 56

Diagramm 15: Verdeutlichung des Konzepts der Emissionskantenregelung für die Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen in Biomasseheizkesseln. 67

Diagramm 16: Vergleich zwischen den mit der O_2/CO_e-Sonde gemessenen Konzentrationen an CO_e mit den mit einer Gasanalyse gemessenen Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid. 73
Diagramm 17: Konzept für die Bewertung der Verbrennung mit dem VREM-System. 80
Diagramm 18: Charakterisierungsebenen bei einer Beaufschlagung der O_2/CO_e-Sonde mit brennbaren Gasen. 89
Diagramm 19: Typisches Verbrennungsverhalten beim Betrieb des Heizkessels mit dem VREM-System bzw. beim Einsatz von Buchenscheitholz. 107
Diagramm 20: Regelverhalten der Primär- und Sekundärluft sowie Sauerstoffgehalt und Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid während des Betriebs. 109
Diagramm 21: Das Verhalten des Sauerstoffgehalts im Abgas beim Einsatz der O_2- sowie O_2/CO_e-Sonde. 109
Diagramm 22: Verbrennungs- und Regelverhalten des VREM-Systems beim Einsatz von Pferdemist. 112
Diagramm 23: Verbrennungs- und Regelverhalten des VREM-Systems beim Einsatz von Gärresten. 114
Diagramm 24: Verbrennungs- und Regelverhalten des VREM-Systems beim Einsatz von Traubentrester. 115
Diagramm 25: Erkennung von CO_e-Fluktuationen durch das VREM-System bei der Verbrennung von Pappelscheithölzern. 118
Diagramm 26: Erkennung von CO_e-Fluktuationen durch das VREM-System bei der Verbrennung von feuchten Pappelscheithölzern. 119
Diagramm 27: Typische Betriebsphasen beim Einsatz des VREM-Systems. 126
Diagramm 28: Verhalten der Primär- und Sekundärluft beim Einsatz des VREM-Systems. 126
Diagramm 29: Verbrennungsverhalten bei einer fehlerhaften Zündung aufgrund eines ungünstigen Anzündregimes im Biomasseheizkessel. 128
Diagramm 30: Verbrennungsverhalten beim Einsatz von feuchtem Buchenscheitholz (2. Auflage). 130
Diagramm 31: Verbrennungsverhalten beim Einsatz von feinen und trockenen Brennstoffen. 131
Diagramm 32: Verbrennungsverhalten von automatisch beschickten Heizkesseln. 133
Diagramm 33: Ergebnisse bei der Überwachung eines handbeschickten Vergaserkessels im Praxisbetrieb. 137
Diagramm 34: Darstellung eines sachgemäßen Betriebs eines Vergaserkessels bei der Praxiserprobung des VREM-Systems. 139
Diagramm 35: Betriebsverhalten bei unsachgemäßer Beschickung des Vergaserkessels. 140

Diagramm 36: Beispiel für den Betrieb (Abbrandverhalten) des Vergaserkessels mit Altholz. 143
Diagramm 37: Sauerstoffgehalt im Abgas, Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid und CO_e sowie Kessel- und Abgastemperaturen beim Betrieb einer automatisch beschickten Hackschnitzelfeuerungsanlage in der Praxis mit unterschiedlicher Brennstoffqualität. 148
Diagramm 38: Verbrennungsverhalten im automatisch beschickten Heizkessel im Regelbetrieb bei der Erprobung des VREM-Systems in der Praxis. 152
Diagramm 39: Verbrennungsverhalten im automatisch beschickten Heizkessel im Teillastbetrieb bei der Erprobung des VREM-Systems in der Praxis. 153
Diagramm 40: Verbrennungsverhalten in einem automatisch beschickten Heizkessel im Regelbetrieb nach der neuen Brennstofflieferung. 153
Diagramm 41: Erster Betriebstag des VREM-Systems in der Praxis beim Einsatz in einem Vergaserkessel. 154
Diagramm 42: Der letzte Betrieb des VREM-Systems in der Praxis beim Einsatz in einem automatisch beschickten Heizkessel.....155
Diagramm 43: Verbrennungsverhalten bei einem automatisch beschickten Heizkessel in der Praxis. 156
Diagramm 44: Verbrennungsverhalten über eine längere Betriebszeit bei einem automatisch beschickten Heizkessel in der Praxis, wobei zwischen den Betriebsstunden 300 h bis 600 h ein anderes Betriebsverhalten zu erkennen ist. 157
Diagramm 45: Szenarien für die Einsparungen an Kohlenstoffdioxid bei unterschiedlichen mittleren thermischen Leistungen durch eine breite Anwendung des VREM-Systems. 159
Diagramm 46: Szenarien für die finanziellen Einsparungen für den Nutzer bei unterschiedlichen Leistungsstufen durch die Anwendung des VREM-Systems.....161

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Emissionsgrenzwerte für Staub und Kohlenstoffmonoxid nach der 1. BImSchV für Heizkessel....18

Tabelle 2: Immissionsschutzrechtliche Anforderungen nach der 1. BImSchV beim Einsatz der Brennstoffe Nummer 8 und 13 (§ 3 Abs. 1)....19

Tabelle 3: Immissionsschutzrechtliche Anforderungen nach der Richtlinie zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt. 20

Tabelle 4: Emissionsgrenzwerte und Jahresnutzungsgrad bei Festbrennstoffkesseln für feste Brennstoffe gemäß Ökodesignrichtlinie. 21

Tabelle 5: Charakteristika der unterschiedlichen Betriebsphasen....70

Tabelle 6: Mittelwerte vom Kohlenstoffmonoxid (gemessen mit der Gasanalyse) und CO_e –Werte (gemessen mit der O_2/CO_e-Sonde) im Praxisbetrieb eines Vergaserkessels. ...136

Tabelle 7: Meldungen durch das VREM-System bei einer sachgemäßen Verbrennung. 139

Tabelle 8: Meldungen durch das VREM-System bei fehlerhafter Zündung. 141

Tabelle 9: Meldungen durch das VREM-System bei der Verbrennung von Althölzern. 144

Tabelle 10: Meldungen durch das VREM-System bei automatischer Beschickung. 149

Tabelle 11: Spezifische Kosten und Gesamtkosten (Euro/Stück) für das VREM-System....160

Tabelle 12: Übersicht für die BAFA-Förderung im Bereich der Biomasse (Basis-, Innovations- und Zusatzförderung).....170

1 Einleitung

Im Zuge der umwelt- und klimapolitischen Ziele der deutschen Bundesregierung sollen der Ausstieg aus der Kernenergie, der Ausbau der Energiebereitstellung durch erneuerbare Energien, die Unabhängigkeit Deutschlands von Energieimporten und Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz frühzeitig gefördert und umgesetzt werden. Nach der Nuklearkatastrophe in Fukushima mit vielen Todesfällen hat die Bundesregierung im Jahr 2011 beschlossen die in Deutschland betriebenen Kernkraftwerke bis zum Jahr 2022 sukzessiv abzuschalten. Gleichzeitig sollen die Ziele für den weltweiten Klimaschutz bzw. Minderung von Treibhausgasemissionen um mindestens 55 % bis zum Jahr 2030 und 80 % bis zum Jahr 2050 eingehalten werden. Ferner soll das Pariser Übereinkommen aus dem Jahr 2015 unterstützt werden, in dem über 195 Mitgliedsstaaten der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) beschlossen haben, die mittlere Erderwärmung auf höchstens 2 °C zu begrenzen. Die energie- und umweltpolitischen Ziele sollen im Zuge der sogenannten Energiewende durch den drastischen Ausbau der Nutzung von erneuerbaren Energien mit hoher Versorgungssicherheit und einer deutlichen Steigerung der Energieeffizienz erreicht werden. Neben den Umwelt- und Klimavorteilen soll durch den vermehrten Einsatz von erneuerbaren Energien auch ein großer Beitrag für die Steigerung der Unabhängigkeit Deutschlands von fossilen Energieträgern wie beispielsweise Erdöl oder Erdgas geleistet werden, wodurch eine preisstabile und versorgungssichere Energiebereitstellung in Deutschland erzielt werden soll.

Unter den erneuerbaren Energien spielt die Biomasse mit einem Anteil von ca. 88 % eine dominante Rolle für die Bereitstellung erneuerbarer Wärme in Deutschland [BMWi 2017]. Mit diesem hohen Anteil trägt die Biomasse maßgeblich zum Erreichen der klima- und umweltpolitischen Ziele nicht nur in Deutschland, sondern in Gesamteuropa bei. Die Vorteile der Biomasse ergeben sich aus der Kohlenstoffdioxidneutralität. Bei einer sachgemäßen thermischen Umwandlung wird nur so viel Kohlenstoffdioxid emittiert, wie bei der Photosynthese bzw. beim Wachstum gebunden wurde. Darüber hinaus ist die Biomasse im gesamten europäischen Raum leicht verfügbar und bietet praktikable Speicher- und Transportmöglichkeiten für eine flexible und zuverlässige Energiebereitstellung. Dadurch lassen sich die Fluktuationen ausgleichen, die durch andere erneuerbare Energien wie z. B. Windkraft- und Solaranlagen tageszeit- und wetterbedingt entstehen. Die Vorteile der energetischen Biomassenutzung kommen allerdings nur zum Tragen, wenn die Nutzung unter ökologischen und ökonomischen Bedingungen mit geeigneten Technologien erfolgt und eine hohe gesellschaftliche Akzeptanz erfährt.

Nach aktuellen Schätzungen der Europäischen Umweltagentur sterben in Gesamteuropa jährlich über 520.000 Menschen vorzeitig an den Folgen hoher Luftverschmutzung. Circa 15 % davon wurden in Deutschland gemeldet [EEA 2017], welche sich auf hohe Konzentrationen an Luftschadstoffen in der Umgebungsluft zurückführen lassen. Zu den

Hauptemittenten von Luftschadstoffen zählen beispielsweise die Industrie, der Verkehr und Kleinverbrennungsanlagen.

Biomassefeuerungsanlagen der 1. BImSchV (Einzelraumfeuerungsanlagen und Heizkessel) gelten als eine der Hauptemissionsquellen für unterschiedliche toxikologische und klimarelevante Schadstoffe wie Kohlenstoffmonoxid (CO), Methan (CH_4), Benzo[a]pyrene und weitere polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, welche überwiegend bei einer unsachgemäßen Verbrennung gebildet und anschließend in der Umgebungsluft verbreitet werden [Löschau 2014]. Derzeit werden etwa 11 Millionen Biomasseeinzelraumfeuerungsanlagen sowie 0,8 Millionen Biomasseheizkessel für die Bereitstellung von Wärme und Warmwasser in deutschen Haushalten eingesetzt [Weisser 2017]. Tendenziell wird die Anzahl der Biomassefeuerungen in Wohngebieten aufgrund hoher Attraktivität der Biomasse sowie der staatlichen Fördermaßnahmen für erneuerbare Energien im Gebäudebestand wie z. B. die Förderung des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle ansteigen.

Für eine effektive und nachhaltige Schadstoffminderung in Biomassefeuerungsanlagen werden hauptsächlich primäre und sekundäre Maßnahmen eingesetzt.

Unter Primärmaßnahmen sind konzeptionelle, konstruktive oder regelungstechnische Maßnahmen zu verstehen, die für die Verbesserung des Verbrennungs- und Emissionsverhaltens zu ergreifen sind. Zu den Primärmaßnahmen gehören außerdem die integrierten Technologien wie beispielsweise die Einbautentechnik [Aleysa et al. 2015] oder neuartige Zyklonbrennkammer [Aleysa et al. 2017], welche meistens vor dem Wärmetauscher bzw. vor der Abkühlung des Abgases eingebaut werden und eine funktionelle Verbesserung des Prozesses gewährleisten. Die Besonderheit der Primärmaßnahmen hinsichtlich der Anwendung in Biomasseheizkesseln liegt darin, dass sie eine sichere Funktion hinsichtlich der Minderung von Schadstoffen und der Erhöhung der Verbrennungseffizienz leistet. Darüber hinaus lassen sie sich wirtschaftlicher, sicherer sowie einfacher in der Praxis implementieren und betreiben.

Der Einsatz von Sekundärmaßnahmen erfolgt in der Regel über nachgeschaltete Systeme wie beispielsweise Staubabscheider, deren Betrieb meistens mit einem hohen technischen und wirtschaftlichen Aufwand verbunden ist. Soll die Schadstoffminderung ausschließlich durch nachgeschaltete Abgasbehandlungssysteme (Sekundärmaßnahmen) praktiziert werden, wird der Einsatz von Kleinfeuerungsanlagentechnik zur Bereitstellung von Wärme und Warmwasser in vielen Bereichen eingeschränkt. Gründe dafür sind vor allem die hohen Anschaffungs-, Betriebs- und Wartungskosten sowie der Bedarf an Platz und Fachkompetenzen für einen sicheren und sachgemäßen Betrieb.

Die bisher entwickelten Abgasbehandlungssysteme, vor allem Staubabscheider, zeigen keine hohe Stabilität im Dauerbetrieb. Sollten sie

nicht entsprechend im Praxisbetrieb überwacht werden, ist die gewünschte Schadstoffminderung nur bedingt zu erreichen. Aufgrund der oben geschilderten Problematiken sollten Sekundärmaßnahmen erst eingesetzt werden, wenn die Möglichkeiten zur Verbesserung der Verbrennung durch Primärmaßnahmen vollständig ausgeschöpft sind bzw. nicht mehr ökonomisch und ökologisch sinnvoll umgesetzt werden können. Zwar kann bei der Verbrennung von vielen niederqualitativen biogenen Brennstoffen (im Vergleich zu Holzpellets gemäß DIN ISO 17225-2) auf Sekundärmaßnahmen vor allem Staubabscheider nicht verzichtet werden, dennoch sollte das Potential der Primärmaßnahmen vollständig ausgeschöpft werden, um eine möglichst hohe Prozesswirtschaftlichkeit zu erzielen.

Weitere effektive Maßnahmen stellen die präventiven Maßnahmen dar, die durch die entsprechende Gesetzgebung anhand entsprechender Verordnungen, Normen und Richtlinien geregelt werden. Durch solche Maßnahmen werden die Zulassung, die Errichtung und der Betrieb von Feuerungsanlagen rechtlich verbindlich festgelegt. Beispielsweise legt die 1. BImSchV klare Anforderungen an die Emissionen bei der Überwachung sowie an die Brennstoffe fest, welche in Kleinfeuerungsanlagen eingesetzt werden dürfen. Außerdem verweist die 1. BImSchV auf die Normen und Richtlinien, nach denen die Feuerungsanlagen geprüft und errichtet werden müssen.

Eine wichtige präventive Maßnahme stellt die permanente Betriebs- und Emissionsüberwachung dar, welche bislang in Großverbrennungsanlagen etabliert ist und sich dank modernster Sensor-, Regelungs-, Automatisierungs- und Vernetzungstechnologien in Kleinverbrennungsanlagen technisch und wirtschaftlich umsetzen lässt. Ohne solche Maßnahmen ist eine ausschlaggebende Reduzierung der Schadstoffemissionen vor allem Feinstaub in Wohngebieten trotz verschärfter Grenzwerte nur bedingt zu erzielen. Gemäß der 1. BImSchV darf die Emissionsüberwachung nur im Regelbetrieb erfolgen, bei dem nur ein relativ geringer Anteil der gesamten Schadstoffemissionen im Vergleich zu anderen Betriebsphasen (Anfahrbetriebsphase, Teillastbetrieb, Gluthaltephase) entsteht und auf den sich die Effektivität der Grenzwertverschärfung bezieht. Sollten die kritischen Betriebsphasen von der Überwachung ausgeschlossen werden, sind die Heizkessel nicht so sachlich und repräsentativ zu bewerten, dass dadurch eine signifikante Schadstoffreduzierung trotz verschärfter Emissionsgrenzwerte realisiert werden kann.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde ein neuartiges System (das sogenannte VREM-System: Verbrennungsregelungs- und Emissionsmonitoring- bzw. Überwachungssystem) als präventive Maßnahme zur Schadstoffminderung und Effizienzsteigerung entwickelt und erfolgreich im Praxisbetrieb über eine Heizperiode beim Einsatz in automatisch- und handbeschickten Heizkesseln erprobt. Das Konzept des VREM-Systems beruht darauf, dass der Verbrennungsprozess mit einem möglichst geringen

aber für eine vollständige Verbrennung ausreichend hohen Sauerstoffgehalt im Abgas, unabhängig von der Verbrennungstechnik bzw. dem Verbrennungskonzept sowie dem eingesetzten Brennstoff, geregelt wird. Um diese Art der Sauerstoffregelung technisch zu realisieren, wird eine neuartige Sensorik bzw. O_2/CO_e-Sonde eingesetzt. Diese O_2/CO_e-Sonde kann gleichzeitig sowohl den Gehalt an Sauerstoff als auch an Kohlenstoffmonoxid-Äquivalenten (z. B. Kohlenstoffmonoxid, unterschiedliche Kohlenwasserstoffe wie Methan, Propan usw.) als wichtige Indikatoren für die Verbrennungsqualität bzw.-vollständigkeit im Abgas detektieren und entsprechende Signale für die Regelung bereitstellen. Der optimale bzw. minimale Sauerstoffgehalt ergibt sich aus dem maximal erlaubten Gehalt an Kohlenstoffmonoxid bzw. aus einer definierten Emissionskante während der Verbrennung, welche erreicht aber nicht überschritten werden darf. Bei der Regelung an dieser Emissionskante sollen die geringste Abgasmenge und somit thermischen Abgasverluste bzw. die höchste Verbrennungseffizienz ohne Überschreitung der Emissionsgrenzwerte gewährleistet werden. Diese Art der Regelung ist äußerst notwendig für die thermische Verwertung von heterogenen biogenen Brennstoffen mit variablen verbrennungstechnischen Eigenschaften, bei denen der optimale Sauerstoffbereich für eine sachgemäße Verbrennung stark variiert bzw. nicht als fester Sollwert in der Regelung angegeben wird. Ein besonderer Vorteil des VREM-Systems liegt in der Möglichkeit für die Ermittlung der Verbrennungsqualität bzw. der Emissionsüberwachung sowie der Betriebsbewertung, wodurch eine ökologische und ökonomische Energiebereitstellung durch die thermische Verwertung von Biomassen und biogenen Brennstoffen gewährleistet werden kann. Nur mit solchen innovativen Konzepten kann die Biomasse einen großen Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele sowie zur kommenden Energiewende in Deutschland leisten.

2 Ziele und Inhalt des Projekts

Das Hauptziel dieses Forschungsprojekts war ein innovatives System (sogenanntes VREM-System) für die Regelung der Verbrennung und das Monitoring bzw. die Überwachung der Emissionen auf Basis einer O_2/CO_e-Sonde zu entwickeln und anschließend unter praktischen Einsatz- und Betriebsbedingungen zu erproben. Ein wichtiger Aspekt bei dem Projekt befasste sich mit der grundsätzlichen Untersuchung der O_2/CO_e-Sonde (Typ: KS1D) hinsichtlich der Langzeitstabilität, der Integrierbarkeit in die bestehenden Regelungen herkömmlicher Heizkessel und der Praxistauglichkeit.

Die Durchführung dieses Forschungsprojekts unterteilte sich in die folgenden drei Entwicklungsphasen:

- In der ersten Projektphase dieses Forschungsprojekts wurden der Versuchsaufbau inklusive der Messtechnik, die Regelungs- und Überwachungshardware mit den Schnittstellen, das integrierte Datenspeicherungs- und Übertragungssystem sowie eine Datenbank geplant und entsprechend aufgebaut. Die komplette Entwicklung des VREM-Systems wurde auf einem Prüfstand gemäß DIN EN 303-5 bzw. DIN EN 304 mit einer handbeschickten Verbrennungsversuchsanlage sowie mit einem speziellen regelbaren Wärmeabfuhrsystem durchgeführt, mit denen praxisrelevante und komplexe Betriebszustände zwecks der regelungstechnischen Optimierung und Emissionsüberwachung simuliert werden können. In dieser Projektphase wurde außerdem die O_2/CO_e-Sonde (KS1D) mittels eines speziellen Abgassimulators unter Verwendung verschiedener Kalibriergase bzw. brennbarer gasförmiger Komponenten charakterisiert, wobei die nötigen Kalibrierkurven bzw. –ebenen für die Berechnung der O_2/CO_e-Signale ermittelt wurden.
- Die zweite Projektphase stellt den wichtigsten Teil des Projekts dar und befasste sich mit der Entwicklung des gesamten VREM-Systems mit den nötigen Algorithmen zur Verbrennungsregelung, Emissionsüberwachung und Betriebsbewertung, wobei die Fehlbedienung sowie die technischen Fehler aller Systemkomponenten automatisch erkannt und nach einer lokalen Speicherung über ein einfaches System beispielsweise per E-Mail und SMS an den Nutzer gemeldet werden.
- Nach der Entwicklung auf dem Prüfstand wurde das VREM-System im Praxisbetrieb in zwei Biomassefeuerungsanlagen über eine Heizperiode bezüglich der Emissionsüberwachung erprobt und weiteroptimiert. Bei der ersten Biomassefeuerungsanlage handelt es sich um einen herkömmlichen handbeschickten Heizkessel (Vergaserkessel), wobei die zweite Biomassefeuerungsanlage einen kontinuierlich beschickten Hackschnitzelheizkessel darstellt. Bei der Dauererprobung in der Praxis wurde sich ausschließlich auf die permanente Emissionsüberwachung sowie teilweise auf die Betriebsbewertung konzentriert. Ein wichtiger Aspekt der

Dauererprobung war die Untersuchung der Praxistauglichkeit der CO_e-Sonde.

In diesem Forschungsprojekt hat Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP das gesamte VREM-System entwickelt und in Kooperation mit der Firma HDG Bavaria GmbH im Praxisbetrieb erprobt. Die für die Entwicklung und Erprobung des VREM-Systems nötigen Biomassefeuerungsanlagen wurden von der Firma HDG Bavaria GmbH bereitgestellt. Die Firma HDG Bavaria GmbH hat nicht nur die konstruktiven Modifikationen für die technische Integration des VREM-Systems übernommen, sondern auch den Praxisbetrieb hauptsächlich durchgeführt und intensiv begleitet. Eine besondere Rolle bei diesem Forschungsprojekt hat die Firma LAMTEC Mess- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG bei der Bereitstellung sowie bei der Charakterisierung der O_2/CO_e-Sonde gespielt. Zusätzlich dazu hat die Firma LAMTEC Mess- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG die Entwicklung der Software des VREM-Systems fachlich und technisch begleitet.

3 Rechtliche und technische Anforderungen an Biomasseheizkessel

3.1 Emissionsanforderungen gemäß der 1. BImSchV und der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG

<u>Emissionsanforderungen gemäß der 1. BImSchV:</u>

Kleinfeuerungsanlagen werden durch die 1. BImSchV (Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen) geregelt. Sie haben eine thermische Nennwärmeleistung bis 1.000 kW_{th} und dürfen nur mit bestimmten Brennstoffen betrieben werden, welche im Paragraph 3 der 1. BImSchV aufgelistet sind. Bezüglich des Einsatzes im Haushalt ist zwischen dezentral und zentral einzusetzenden Kleinfeuerungsanlagen zu unterscheiden:

- Zentral einzusetzende Feuerungsanlagen sind beispielsweise Pellet-, Hackschnitzel- und Holzvergaserkessel: Diese werden vor dem Inverkehrbringen gemäß der DIN EN 303-5 sowie der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG geprüft und nach dem Inverkehrbringen gemäß der 1. BImSchV wiederkehrend einmal in jedem zweiten Kalenderjahr überwacht. Die wiederkehrende Überwachung wird nur für Heizkessel mit einer thermischen Nennwärmeleistung größer als 4 kW durch den zuständigen Schornsteinfeger gemäß dem Abschnitt 4 der 1. BImSchV durchgeführt.
- Dezentral im Wohnraum einzusetzende Feuerungsanlagen bzw. Einzelraumfeuerungsanlagen: Diese Feuerungsanlagen machen über 90 % der gesamten Biomassefeuerungen der 1. BImSchV aus und werden für die Bereitstellung von Wärme sowie von Warmwasser eingesetzt. Vor dem Inverkehrbringen müssen die Einzelraumfeuerungsanlagen nach bestimmten Normen (Raumheizer: DIN EN 13240, Kamineinsätze und Kachelöfen: DIN EN 13229 und Speicherfeuerstätten: DIN EN 15250, Pelletraumheizer:

DIN EN 14785 usw.) von einer unabhängigen Prüfstelle wie z. B. der Prüfstelle Feuerstätten und Abgasanlagen des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP (D-PL-11140-11-03) geprüft werden. Einzelraumfeuerungsanlagen unterliegen unabhängig von ihrer thermischen Leistung und dem eingesetzten Brennstoff keiner wiederkehrenden Emissionsüberwachung durch den Schornsteinfeger. Sie müssen lediglich bei der Typprüfung sowohl bestimmte Emissionsgrenzwerte als auch Mindestwirkungsgrade einhalten.

Tabelle 1: Emissionsgrenzwerte für Staub und Kohlenstoffmonoxid nach der 1. BImSchV für Heizkessel.

Kategorie		**Brennstoffe**	**NWL [kW]**	**Staub**	**Kohlenstoff-monoxid CO**
				[mg/Vm³]*	
1. BImSchV, nach dem 22.03.2010	**Stufe I:** Anlagen, die ab dem 22.03.2010 errichtet werden	naturbelassenes stückiges Holz	≥ 4 ≤ 500	100	1.000
			> 500	100	500
		Presslinge aus naturbelassenem Holz in Form von Holzbriketts und Holzpellets	≥ 4 ≤ 500	60	800
			> 500	60	500
		mit Schadstoffen unbelastete bzw. unbehandelte Holzprodukte und ihre Reste, wie z. B. Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten	≥ 30 ≤ 100	100	800
			> 100 ≤ 500	100	500
			> 500	100	300
		Stroh und ähnliche pflanzliche Stoffe und sonstige nachwachsende Rohstoffe	≥ 4 < 100	100	1.000
	Stufe II: Anlagen, die nach dem 31.12.2014 errichtet werden	naturbelassenes stückiges Holz, Presslinge aus naturbelassenem Holz in Form von Holzbriketts und Holzpellets	≥ 4	20	400
		mit Schadstoffen unbelastete bzw. unbehandelte Holzwerkstoffe und ihre Reste, wie z. B. Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten	≥ 30 ≤ 500	20	400
			> 500	20	300
		Stroh und ähnliche pflanzliche Stoffe und sonstige nachwachsende Rohstoffe	≥ 4 < 100	20	250

*: Konzentrationen im Normzustand, trocken und Bezugssauerstoff 13 [Vol.-%].

Die Tabelle 1 listet die aktuellen Grenzwerte für Staub und Kohlenstoffmonoxid gemäß der 1. BImSchV in Abhängigkeit von den eingesetzten Brennstoffen und der Nennwärmeleistung in Biomasseheizkesseln auf. Die in dieser Tabelle 1 dargestellten Konzentrationen beziehen sich auf einen Vergleichszustand (Abgas im Normzustand, trocken und bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 13 Vol.-%). Bei der Emissionsüberwachung durch den zuständigen Schornsteinfeger sollen die Anforderungen der 2. Anlage der 1. BImSchV

eingehalten werden. Beispielsweise müssen die überwachungsbedürftigen Emissionen (Kohlenstoffmonoxid und Staub) im ungestörten Dauerbetriebszustand der Feuerungsanlagen bei der höchsten einstellbaren Wärmeleistung im Kern des Abgasstroms gemessen werden. Das Messprogramm muss immer vollständig durchgeführt und soll nicht abgebrochen werden, wenn eine einzelne Messung negativ ausfällt.

Wie aus der Tabelle 1 zu entnehmen ist, liegt die Leistungsgrenze für die überwachungspflichtigen Biomassekleinfeuerungsanlagen bei 4 kW. Die Grenzwerte für Staub und Kohlenstoffmonoxid wurden sukzessiv in zwei zeitlichen Stufen verschärft. Seit dem 31.12.2014 müssen neue Biomassekleinfeuerungsanlagen (außer Scheitholzfeuerungsanlagen seit Januar 2017) einen Grenzwert für Staub von 20 mg/m³ unabhängig vom eingesetzten Brennstoff sowie der Nennwärmeleistung der Kleinfeuerungsanlage einhalten.

Bei der Verbrennung von Stroh und ähnlichen Pflanzen nach § 3 Abs. 1 Nr. 8 sowie sonstigen nachwachsenden Rohstoffen gemäß Abs. 1 Nr. 13 müssen nach Anlage 4 bei der Typprüfung der Feuerungsanlagen Grenzwerte für Dioxine und Furane von 0,1 ng/m³ und für Stickstoffoxide NO_x von 600 mg/m³ im Vergleichszustand eingehalten werden. Der Grenzwert für Stickstoffoxide wurde für die Feuerungsanlagen auf 500 mg/m³ verschärft, die nach dem 31. Dezember 2014 errichtet wurden. Nach Anlage 4 müssen Feuerungsanlagen, die nach dem 31. Dezember 2014 errichtet werden außerdem bei der Typprüfung einen niedrigeren Grenzwert für Kohlenstoffmonoxid von 250 mg/m³ einhalten. In der Tabelle 2 sind die Grenzwerte für die Prüfung von Brennstoffen nach § 3 Abs. 1 und 13 dargestellt.

Tabelle 2: Immissionsschutzrechtliche Anforderungen nach der 1. BImSchV beim Einsatz der Brennstoffe Nummer 8 und 13 (§ 3 Abs. 1).

Thermische Nennwärmeleistung (NWL)	Dioxine und Furane PCDD/PCDF	Stickstoffoxide NO_x(*)	Kohlenstoffmonoxid CO	Staub
[kW]	[ng/m³]	[mg/Vm³] (**)		
100 kW> NWL ≥ 4 kW	0,1	500	250(*) / 400	20

(*): Gilt nur für die Typprüfung zur Zulassung von Brennstoffen gemäß der 1. BImSchV.
(**): Abgas im Vergleichszustand (trocken, Normzustand, Bezugssauerstoff 13 Vol.-%).

Für eine staatliche Förderung durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA- Förderung) müssen zusätzlich Grenzwerte für Kohlenstoffmonoxid von 200 mg/Vm³ bei Nennwärmeleistung und 250 mg/Vm³ im Teillastbetrieb eingehalten werden. Außerdem dürfen die Konzentrationen an Stäuben bei der Verbrennung von Scheitholz von 15 mg/Vm³ und sonstigen Brennstoffen von 20 mg/Vm³ nicht überschritten werden. In der Tabelle 3 sind die Anforderungen an die Emissionen und Effizienz für eine finanzielle Förderung durch das BAFA dargestellt.

Tabelle 3: Immissionsschutzrechtliche Anforderungen nach der Richtlinie zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt.

Kategorien	Kohlenstoffmonoxid	Staub		Kesselwirkungsgrad
	Brennstoffe nach § 3 Absatz 1 Nr. 8	Scheitholz	sonstige Brennstoffe	
Leistung [kW]	[mg/Vm³]$^{(**)}$			[%]
100 kW> NWL ≥ 5 kW	200 / 250$^{(*)}$	15	20	89

$^{(*)}$: Gilt nur für die Typprüfung im Teillastbetrieb.

$^{(**)}$: Abgas im Vergleichszustand (trocken, Normzustand, Bezugssauerstoff 13 Vol.-% und 11 Vol.-% für Heizkessel mit einer thermischen Leistung ab 100 kW).

Es ist zu erwähnen, dass die oben genannten Emissionsgrenzwerte für den Betrieb und die Zulassung der Feuerungsanlagen lediglich bei der Typprüfung auf dem Prüfstand bzw. durch den Schornsteinfeger und nicht dauerhaft im Praxisbetrieb eingehalten werden müssen. Eine große Besonderheit bei den handbeschickten Heizkesseln liegt darin, dass der Betreiber durch sein Verhalten sowohl den Brennstoff als auch die Verbrennungstechnik (insbesondere durch die Bedienung und die Wartung) stark beeinflussen kann. Aufgrund dieser Doppelbeeinflussung können über das gesamte Jahr unbemerkt hohe Konzentrationen an Schadstoffen bei der Verbrennung in Feuerungsanlagen der 1. BImSchV entstehen (siehe Abschnitt 5.5).

Emissionsanforderungen gemäß der Ökodesignrichtlinie 2009/125/EG:

Für die Vereinheitlichung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte in Europa, wurde die Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG entwickelt. Zur Durchführung dieser Richtlinie wurden von der europäischen Kommission Verordnungen erlassen, die in allen europäischen Staaten unmittelbare Gültigkeit haben. In der Verordnung (EU) 2015/1189 sind die immissionsschutzrechtlichen Vorgaben für Feststoffkessel (Raumheizungs-Jahres-Emissionen) geregelt. Die Emissionsgrenzwerte und Jahresnutzungsgrade für Festbrennstoffkessel sind in der Tabelle 4 aufgelistet.

Diese Anforderungen gelten für alle Brennstoffe, die für den Festbrennstoffkessel geeignet sind. Gemäß der Verordnung (EU) 2015/1189 der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG bezeichnen die Raumheizungs-Jahres-Emissionen:

- bei automatisch befeuerten Festbrennstoffkesseln einen gewichteten Durchschnitt der Emissionen bei Nennwärmeleistung sowie der Emissionen bei 30 % der Nennwärmeleistung in mg/m³;
- bei manuell befeuerten Festbrennstoffkesseln, die dauerhaft bei 50 % der Nennwärmeleistung betrieben werden können, einen gewichteten Durchschnitt der Emissionen bei Nennwärmeleistung sowie der Emissionen bei 50 % der Nennwärmeleistung in mg/m³;

– bei manuell befeuerten Festbrennstoffkesseln, die nicht dauerhaft bei 50 % oder weniger der Nennwärmeleistung betrieben werden können, die Emissionen bei Nennwärmeleistung in mg/m³.

Die Raumheizungs-Jahres-Emissionen E_s von Staub, gasförmigen organischen Verbindungen, Kohlenstoffmonoxid und Stickstoffoxiden werden bei manuell befeuerten Festbrennstoffkesseln, die dauerhaft bei 50 % der Nennwärmeleistung betrieben werden können, sowie bei automatisch befeuerten Festbrennstoffkesseln wie folgt berechnet:

$$E_s = 0{,}85 * E_{s,\,p} + 0{,}15 * E_{s,\,n} \qquad \text{Gleichung 1}$$

Wobei:

– $E_{s,\,p}$ die jeweils bei 30 % oder 50 % der Nennwärmeleistung gemessenen Emissionen von Staub, gasförmigen organischen Verbindungen, Kohlenstoffmonoxid und Stickstoffoxiden sind;
– $E_{s,\,n}$ die bei Nennwärmeleistung gemessenen Emissionen.
– Die Staubemissionen sind mithilfe einer gravimetrischen Methode zu ermitteln, bei der keine Partikel berücksichtigt werden, die durch gasförmige organische Verbindungen gebildet werden, wenn sich Rauchgas mit Umgebungsluft vermischt.
– Die Stickstoffoxidemissionen werden als Summe von Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid berechnet und als Stickstoffdioxid angegeben.

Tabelle 4: Emissionsgrenzwerte und Jahresnutzungsgrad bei Festbrennstoffkesseln für feste Brennstoffe gemäß Ökodesignrichtlinie.

Biomasseheizkessel geteilt in zwei Leistungsbereiche (<= 20 kW und > 20 kW) sowie in manuell und automatisch betriebene Heizkessel.		Ökodesign-Richtlinie ab dem 01.01.2020				
		Raumheizungs-Jahres-Emissionen E_S				Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad η_{son}
		CO	NO_x	OGC	Staub	
		[mg/Vm³]*				[%]
Heizkessel mit einer Nennwärmeleistung von 20 kW oder weniger	manuell	700	200	30	60	75
	automatisch	500	200	20	40	
Heizkessel mit einer Nennwärmeleistung von mehr als 20 kW	manuell	700	200	30	60	77
	automatisch	500	200	20	40	

*) Die Emissionen werden in standardisierter Form bezogen auf ein trockenes Abgas mit einem Sauerstoffgehalt von 10 Vol.- % und unter Normbedingungen bei 0 °C und 1013 Millibar angegeben.

Ein direkter Vergleich zwischen den Grenzwerten zwischen der 1. BImSchV und der Ökodesign-Richtlinie lässt sich aufgrund der unterschiedlichen Ermittlungszustände und Definitionen nicht ziehen.

3.2 Effizienzanforderungen an Heizkessel für feste Brennstoffe gemäß der DIN EN 303-5 und der Ökodesign-Richtlinie 2015/1187

Im Gegensatz zu den Emissionen (Staub und Kohlenstoffmonoxid) wird die Effizienz bzw. der Kesselwirkungsgrad bei der wiederkehrenden Überwachung nicht kontrolliert. Bei niedriger Effizienz wird der spezifische CO_2-Ausstoß (Kilogramm CO_2 pro Kilowatt Nutzwärme) erhöht, wobei mehr Brennstoff für die Deckung des Energiebedarfs verbraucht als benötigt wird.

Die Mindestanforderungen an die Effizienz von Biomasseheizkesseln bei der Typprüfung sind in der DIN EN 303-5 geschildert. Seit April 2017 müssen zudem die Effizienzklassen (A++, A+, A, B, C und D) gemäß der Ökodesign-Richtlinie 2015/1187 berechnet und von Herstellern anhand eines gedruckten Etiketts für jeden Heizkessel angegeben werden. Bei der Berechnung der Effizienzklasse spielt der Kesselwirkungsgrad mit dem Verbrauch der elektrischen Energie eine ausschlaggebende Rolle. Im Folgenden werden die Effizienzanforderungen gemäß der DIN EN 303-5 sowie der Ökodesign-Richtlinie 2015/1187 beschrieben.

Anforderungen an die Effizienz gemäß DIN EN 303-5

In der DIN EN 303-5 sind die Anforderungen für die Zulassung von Heizkesseln für feste Brennstoffe innerhalb und außerhalb des Anwendungsbereichs der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG bis zu einer Nennwärmeleistung von 500 kW geregelt. Die Zulassungsanforderungen in der DIN EN 303-5 beziehen sich unter anderem auf die Sicherheit, Schadstoffe bei der Verbrennung und die Effizienz hinsichtlich des Kesselwirkungsgrads. Bei der Typprüfung nach DIN EN 303-5 wird der Kesselwirkungsgrad über eine Mindestbrenndauer von zwei Stunden bei handbeschickten und mindestens sechs Stunden bei automatisch beschickten Heizkesseln ermittelt. Gemäß der DIN EN 303-5 müssen Biomasseheizkessel für die Zulassung einen Mindestwirkungsgrad aufweisen. Für Heizkessel mit einer thermischen Nennwärmeleistung von kleiner als 100 kW darf der Kesselwirkungsgrad die Wirkungsgradangaben der jeweiligen Klasse gemäß dem Diagramm 1 nicht unterschreiten. Für Heizkessel mit einer thermischen Nennwärmeleistung von über 100 kW werden die Anforderungen für die Klasse 4 auf 84 % und für die Klasse 5 auf 89 % festgelegt. Für Heizkessel der Klasse 3 mit einer thermischen Nennwärmeleistung von über 300 kW werden die Werte auf 82 % festgelegt. Für eine staatliche Förderung von Heizkesseln durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (sogenannte BAFA-Förderung) gelten zusätzliche Anforderungen an den Wirkungsgrad, wobei unabhängig von der Wärmeleistung bei der Verbrennung von Scheithölzern ein Kesselwirkungsgrad von mindestens 89 % erreicht werden muss.

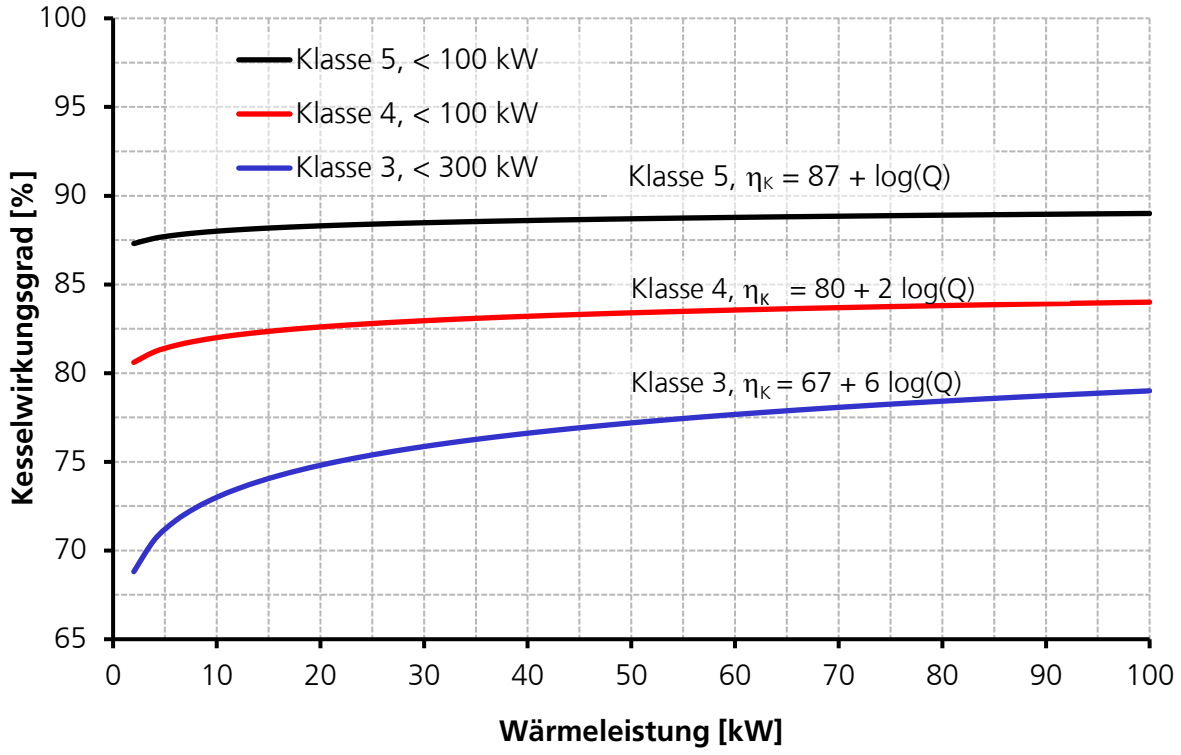

Diagramm 1: Mindestwirkungsgrade von Heizkesseln gemäß DIN EN 303-5.

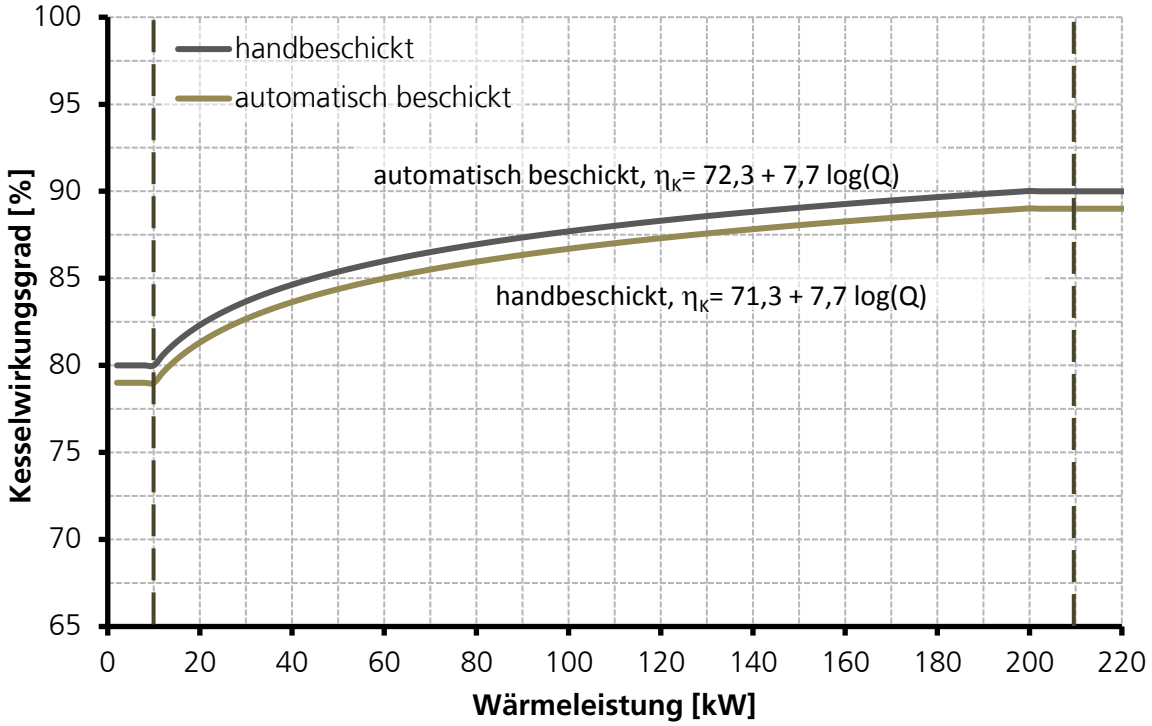

Diagramm 2: Mindestwirkungsgrade für Zentralheizgeräte gemäß Art 15a B-VG.

Abweichend zu den Anforderungen nach DIN EN 303-5 gibt es in Österreich gemäß Art 15a B-VG spezielle Anforderungen an den Kesselwirkungsgrad für Biomasseheizkessel. Bis zu einer thermischen Leistung von 10 kW

müssen handbeschickte Heizkessel bei der Typprüfung einen Mindestwirkungsgrad von 79 % und automatisch beschickte Heizkessel von 80 % aufweisen. Im Leistungsbereich zwischen 10 kW bis 200 kW hängt die Mindestanforderung an den Kesselwirkungsgrad von der thermischen Leistung des Heizkessels ab (Diagramm 2). Bei einer thermischen Leistung der Heizkessel über 200 kW müssen handbeschickte Heizkessel für die Zulassung einen Kesselwirkungsgrad größer 89 % und automatisch beschickte Heizkessel größer 90 % erreichen können.

Der Kesselwirkungsgrad beschreibt das Verhältnis von der an das Kesselwasser zugeführten Wärme zu der im Brennstoff enthaltenen Energie bzw. Feuerungsleistung nach Gleichung 2. Dabei handelt es sich um die sogenannte direkte Methode, welche nach DIN EN 303-5 bei Typprüfungen zur Bestimmung der Effizienz herangezogen wird.

$$\eta_K = \frac{\dot{m}_w \times c_p \times (T_v - T_R)}{\dot{m}_B \times H_u} \times 100 = \frac{Q_w}{Q_B} \times 100 \qquad \text{Gleichung 2}$$

Wobei:

- $\dot{m}_w$: Massenstrom des Kesselwassers [kg/s].
- c_p: Wärmespeicherkapazität des Kesselwassers [kJ/(kg.K)].
- T_v: Vorlauftemperatur des Kesselwassers [K].
- T_R: Rücklauftemperatur des Kesselwassers [K].
- $\dot{m}_B$: Brennstoffverbrauch [kg/s].
- H_u: Heizwert des Brennstoffs [kJ/kg].
- Q_w: Zugeführte Energie im Kesselwasser [kW].
- Q_B: Feuerungsleistung [kW].
- η_K: Kesselwirkungsgrad [%].

Zur Kontrolle der Ergebnisse kann der Kesselwirkungsgrad alternativ auch über die indirekte Methode gemäß Gleichung 3 berechnet werden, wobei Verluste durch freie Wärme im Abgas, durch die unvollständige Verbrennung, die Wärmestrahlung, die Wärmeleitung, die Konvektion und über nicht verbrannte Bestandteile im Brennstoff berechnet und berücksichtigt werden.

$$\eta_K = (1 - q_A - q_U - q_S - q_B) \times 100 \qquad \text{Gleichung 3}$$

Wobei:

- q_A: Verlust durch freie Wärme im Abgas [-] (bezogen auf die Feuerungsleistung Q_B).
- q_U: Verlust durch unvollständige Verbrennung [-] (bezogen auf die Feuerungsleistung Q_B).
- q_S: Verlust durch Wärmestrahlung, Konvektion und Wärmeleitung [-] (bezogen auf die Feuerungsleistung Q_B).
- q_B: Verlust durch nicht verbrannte Restbestandteile im Brennstoff [-] (bezogen auf die Feuerungsleistung Q_B).

Für die Berechnung der einzelnen Wärmeverluste gibt es in der Literatur unterschiedliche Näherungsgleichungen, wobei für die Typprüfung nach DIN EN 303-5 spezielle normative Gleichungen verwendet werden müssen.

Die Verluste durch freie Wärme im Abgas bzw. Abgasverluste bilden die höchsten Verluste bei dem Betrieb von Heizkesseln und hängen hauptsächlich von der Abgastemperatur sowie von dem Abgasvolumenstrom ab. Es gilt, je höher die Temperatur sowie größer der Abgasvolumenstrom sind, desto höher sind die Wärmeverluste. Die Einhaltung der Abgastemperatur unter bestimmten Grenzen für einen effizienten Betrieb erfolgt durch periodische Reinigung der Wärmeübertragungsflächen im Heizkessel sowie durch eine stufenlose Regelung der thermischen Leistung des Heizkessels. Die Reduzierung des Abgasvolumenstroms erfolgt durch die Minderung der gesamten Verbrennungsluftmenge mit konzeptionellen und regelungstechnischen Maßnahmen, wobei der Sauerstoffgehalt im Abgas als Indikator bzw. entscheidende Regelgröße eingesetzt wird.

Bei den Verlusten durch unvollständige Verbrennung handelt es sich um chemische Verluste durch nicht verbrannte energiehaltige Bestandteile im Abgas. Der Verlust durch unvollständige Verbrennung wird üblicherweise über den Gehalt an nicht verbrannten Abgasbestandteilen bzw. des Kohlenstoffmonoxids im Abgas abgeschätzt. Je höher der Gehalt an Kohlenstoffmonoxid bzw. Gehalt an nicht verbrannten Bestandteilen im Abgas ist, desto höher sind die chemischen Verluste aufgrund unvollständiger Verbrennung zu erwarten. Wärmeverluste durch Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung sind von der Konstruktion der Heizkessel abhängig und können nur durch eine Verbesserung der Wärmedämmung oder eine bessere Ausführung von Wärmetauschern reduziert werden. Üblicherweise liegen die Verluste durch Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung zwischen 0,2 % und 3,0 % [Schmid et al. 2016].

Wärmeverluste durch die Strahlung und die Wärmeleitung hängen von der Konstruktion und den verwendeten Herstellungsmaterialen des Heizkessels ab. Dabei spielen die Auskleidung des Feuerraums sowie der Abgaswege im Heizkessel, die Verteilung der Wassertaschen der Wärmeübertrager sowie die Wärmedämmung eine entscheidende Rolle. Die Abbildung 1 zeigt eine Aufnahme mit einer Thermobildkamera, in der die Wärmeleitungsverluste eines handelsüblichen Heizkessels dargestellt bzw. durch die Oberflächentemperaturen zu erkennen sind.

Der kleinste Anteil an Verlusten entsteht herkömmlicherweise durch nicht verbrannte Restbestandteile im Brennstoff. Die thermische Nutzung des Brennstoffs hängt von der Konstruktion und in besonderem Maße von dem Verbrennungsluftzufuhrsystem ab. Eine fast vollständige thermische Nutzung des gesamten Brennstoffs lässt sich durch die Zufuhr entsprechender Mengen an Primärluft in der Ausbrandphase bzw. in die Ausbrandzone erreichen. Eine ausführliche Betrachtung der bei dem Betrieb

von Biomasseheizkesseln entstehenden Wärmeverluste sind im Abschnitt 5.3 durchgeführt.

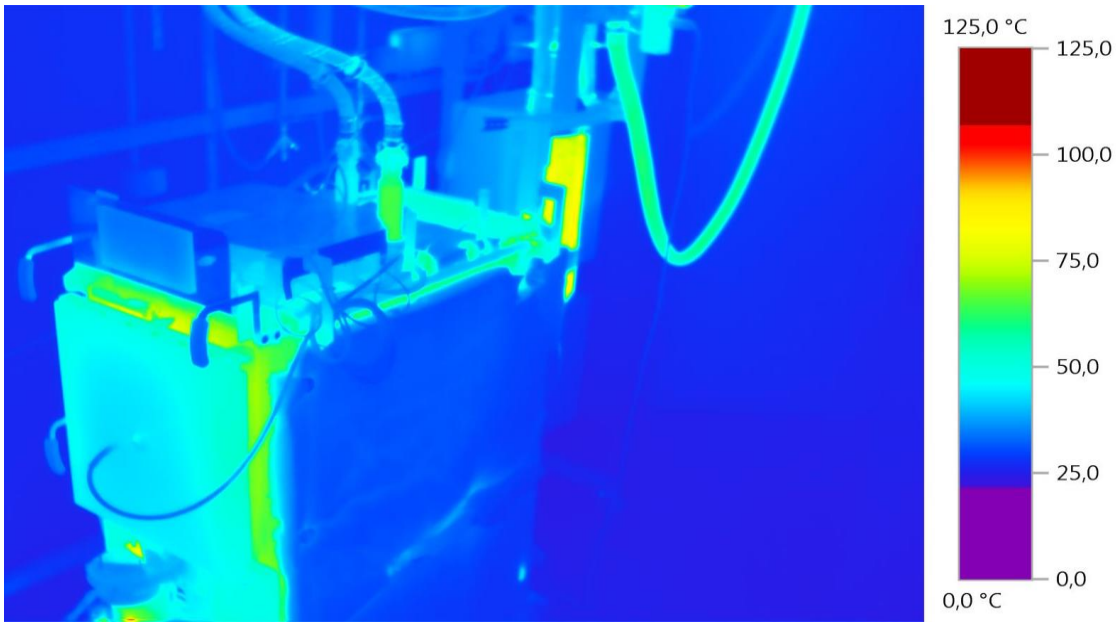

Abbildung 1: Aufnahme mit einer Thermobildkamera beim Betrieb eines handelsüblichen Heizkessels.

<u>Anforderung an die Effizienz in Europa gemäß Ökodesignrichtlinie 2009/125/EG und Energieverbrauchskennzeichnung</u>

Zur Vereinheitlichung der Betrachtung der Effizienz in Biomasseheizkesseln (Feststoffbrennkesseln) wurden von der Europäischen Kommission die Verordnungen (EU) 2015/1189 zur Durchführung der Ökodesignrichtlinie 2009/125/EG und (EU) 2015/1187 zur Ergänzung der ehemals geltenden Richtlinie 2010/30/EU bzw. der neuen Verordnung (EU) 2017/1369 des Europäischen Parlaments und des Rates für die Energieverbrauchskennzeichnung erlassen.

In der Verordnung (EU) 2015/1189 der Europäischen Kommission zur Durchführung der Ökodesignrichtlinie 2009/125/EG sind die Anforderungen an die Effizienz von Festbrennstoffkesseln über einen Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad im Betriebszustand η_{son} beschrieben. Der Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad wird nach Gleichung 4 berechnet.

$$\eta_s = \eta_{son} - F(1) - (F2) + F(3) \qquad \text{Gleichung 4}$$

Wobei:

η_s: Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad angegeben in %.

η_{son}: Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad im Betriebszustand, angegeben in %.

$F(1)$: Verlust aufgrund der angepassten Beiträge der Temperaturregelung, angegeben in %.

$F(2)$: Negativer Beitrag zum Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad durch den Hilfsstromverbrauch, angegeben in %.

$F(3)$: Beitrag zum Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad durch den elektrischen Wirkungsgrad von Festbrennstoffkesseln mit Kraft-Wärme-Kopplung, angegeben in %.

Für die Berechnung des Raumheizungs-Jahresnutzungsgrads im Betriebszustand ist zwischen automatischen und handbeschickten Heizkesseln zu unterscheiden. Hier wird außerdem zwischen handbeschickten Heizkesseln unterschieden, welche dauerhaft und nicht dauerhaft im Teillastbetrieb (50 % der Nennwärmeleistung) betrieben werden können. Für automatisch beschickte und handbeschickte Heizkessel, die über längere Zeit bei Teillast betrieben werden können, wird für die Berechnung des Raumheizungs-Jahresnutzungsgrads im Betriebszustand die folgende Gleichung 5 verwendet.

$$\eta_{son} = 0{,}85 \times \eta_P + 0{,}15 \times \eta_n \qquad \text{Gleichung 5}$$

Wobei:

η_P: Kesselwirkungsgrad im Teillastbetrieb (50 % der Nennwärmeleistung bei handbeschickten und 30 % bei automatisch beschickten Festbrennstoffkesseln) in %.

η_n: Kesselwirkungsgrad bei Nennwärmeleistung in %.

Für handbeschickte Heizkessel, die nicht dauerhaft bei 50 % der Nennwärmeleistung betrieben werden können, ist für den Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad der Kesselwirkungsgrad bei Nennwärmeleistung η_n anzunehmen, wobei η_{son} gleich η_n ist.

Für den Verlust durch angepasste Beiträge der Temperaturregelung F(1) zur Berechnung des Raumheizungs-Jahresnutzungsgrads nach Gleichung 9 wird ein pauschalwert von 3 % angenommen. Der negative Beitrag zum Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad durch den Hilfsstromverbrauch F(2) ist für handbeschickte Festbrennstoffkessel, die dauerhaft bei 50 % der Nennwärmeleistung betrieben werden können und für automatisch beschickte Festbrennstoffkessel gemäß Gleichung 6 zu berechnen.

$$F(2) = 2{,}5 \times \frac{0{,}15 \times el_{max} + 0{,}85 \times el_{min} + 1{,}3 \times P_{SB}}{0{,}15 \times P_n + 0{,}85 \times P_P} \qquad \text{Gleichung 6}$$

Wobei:

el_{max}: Hilfsstromverbrauch bei Nennwärmeleistung.

el_{min}: Hilfsstomverbrauch im Teillastbetrieb (50 % der Nennwärmeleistung bei handbeschickten und 30 % bei automatisch beschickten Festbrennstoffkesseln)

P_{SB}: Leistungsaufnahme des Festbrennstoffkessels im Bereitschaftszustand (Stand-by).

P_n: Nutzwärme bei Nennwärmeleistung.

P_P: Nutzwärme im Teillastbetrieb (50 % der Nennwärmeleistung bei handbeschickten und 30 % bei automatisch beschickten Festbrennstoffkesseln).

Bei manuell befeuerten Festbrennstoffkesseln, die nicht dauerhaft bei maximal 50 % der Nennwärmeleistung betrieben werden können und für Festbrennstoffkessel mit Kraft-Wärme-Kopplung soll der Verlust F(2) nach folgender Gleichung 7 berechnet werden.

$$F(2) = 2{,}5 \times \frac{el_{max} + 1{,}3 \times P_{SB}}{P_n} \qquad \text{Gleichung 7}$$

Der positive Beitrag zum Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad durch Kraft-Wärme-Kopplung F(3) wird nach Gleichung 8 über den Kehrwert (bzw. Umkehrkoeffizient) der EU-weiten durchschnittlichen Stromerzeugungseffizienz von 2,5 und den elektrischen Wirkungsgrad von den mit Kraft-Wärme-Kopplung betriebenen Festbrennstoffkesseln berechnet.

$$F(3) = 2{,}5 \times \eta_{el,n} \qquad \text{Gleichung 8}$$

Die ab Januar 2020 gültigen Ökodesignanforderungen für den Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad in Festbrennstoffkesseln sind in der Tabelle 4 dargestellt.

Zusätzliche Anforderungen an die Effizienz von Biomasseheizkesseln sind in der delegierten Verordnung (EU) 2015/1187 für die Energieverbrauchskennzeichnung geregelt. Gemäß dieser Verordnung müssen Festbrennstoffkessel mit einer Nennwärmeleistung bis 70 kW seit dem Jahr 2017 mit einem gedruckten Etikett mit Angabe der Effizienzklasse gemäß Anhang II der Verordnung gekennzeichnet sein. Die Effizienzklasse für Festbrennstoffkessel wird aufbauend auf den Gleichungen für die Bestimmung des Raumheizungs-Jahresnutzungsgrads gemäß Gleichung 9 mit einem Biomasse-Kennzeichnungsfaktor (BLF) von 1,45 rechnerisch ermittelt.

$$EEI = \eta_{son} \times 100 \times BLF - F(1) - F(2) \times 100 + F(3) \times 100 \qquad \text{Gleichung 9}$$

Die Energieeffizienzklassen sind in 10 Stufen aufgeteilt, wobei A^{+++} (EEI ≥ 150) die höchste und G (EEI ≤ 30) die niedrigste Effizienzklasse darstellen. Es ist zu erwähnen, dass die Regelung zur Stufung der Energieeffizienzklassen durch die neue Energieverbrauchskennzeichnung gemäß der EU-Energielabel-Verordnung (Verordnung (EU) 2017/1369 so geändert werden soll, dass die höchste Energieeffizienzklasse A statt A^{+++} wird.

3.3 Überwachungsmethode der Biomasseheizkessel gemäß der 1. BImSchV

In der 39. BImSchV sind die Immissionsgrenzwerte, Alarmschwellen und kritischen Werte für die Konzentrationen an Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid, Blei, Benzol, Kohlenstoffmonoxid und Partikeln (PM_{10} und $PM_{2,5}$) in der

Umgebungsluft festgelegt. Bei der Alarmschwelle handelt es sich um Grenzwerte, bei denen nach aktuellen umwelt- und humantoxikologischen Erkenntnissen auch nach kurzfristiger Exposition ein Risiko besteht und unverzüglich Gegenmaßnahmen zur Minderung der Konzentrationen an Schadstoffen zu treffen sind. Der kritische Wert beschreibt eine Konzentration, bei der nach wissenschaftlichen Erkenntnissen zwar keine Gefährdungen für den Menschen, jedoch schädliche Auswirkungen für Rezeptoren wie beispielsweise Bäume, sonstige Pflanzen oder natürliche Ökosysteme auftreten können. Bei dem Immissionsgrenzwert handelt es sich um die Konzentration eines Schadstoffs, bei der nach heutigen wissenschaftlichen Erkenntnissen schädliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und Umwelt auftreten können. Der Immissionsgrenzwert muss innerhalb eines bestimmten Zeitraums eingehalten werden.

Die häuslichen Kleinfeuerungsanlagen (Einzelraumfeuerungsanlagen und Heizkessel) stellen eine potentielle Quelle für Schadstoffemissionen dar und haben somit einen entsprechenden Einfluss auf die Luftqualität [Löschau 2014]. Aus diesem Grund wurden die Anforderungen an die Emissionen für Staub und Kohlenstoffmonoxid aus häuslichen Kleinfeuerungsanlagen im Jahr 2010 verschärft, welche ein wichtiger Indikator für eine sachgemäße Verbrennung bzw. einen sachgemäßen Betrieb darstellen. Darüber hinaus müssen bei der Typprüfung der Kleinfeuerungsanlagen nicht nur die Anforderungen an die Emissionen, sondern auch an die Effizienz eingehalten werden, welche für Einzelraumfeuerungsanlagen in der 1. BImSchV und für Heizkessel in der DIN EN 303-5 festgelegt sind. Durch die ab 2020 geltende Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG ist zu erwarten, dass die Anforderungen für die Zulassung, den Betrieb, die Emissionen und die Effizienz von häuslichen Kleinfeuerungsanlagen zukünftig weiter ansteigen werden. Die heutigen und zukünftigen Anforderungen an die Emissionen und die Effizienz in Biomasseheizkesseln sind ausführlich im Abschnitt 3.1 beschrieben.

Gemäß der 1. BImSchV ist zwischen der Überwachung neuer und wesentlich geänderter Feuerungsanlagen nach § 14 und der wiederkehrenden Überwachung nach § 15 zu unterscheiden. Im Rahmen der Typprüfung für die Zulassung von Feuerungsanlagen der 1. BImSchV werden die Emissionen und Effizienz eines Prototyps oder einer zufällig und repräsentativ ausgewählten Feuerstätte während des Betriebs ermittelt. Die Typprüfung wird in einem unabhängigen durch die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) akkreditierten Prüflabor (wie beispielsweise im Prüflabor Feuerstätten und Abgasanlagen) im Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP (D-PL-11140-11-03), einmalig unter optimalen Betriebsbedingungen nach einer bestimmten Norm (z. B. DIN EN 13240 für Raumheizer, DIN EN 15250 für Speicherfeuerstätten, DIN EN 303-5 für Heizkessel usw.) durchgeführt. Unter optimalen Betriebsbedingungen sind hier die sachgemäße Bedienung der Feuerungsanlagen durch geschultes Personal nach Vorgaben des Herstellers, die Messung der Konzentrationen in der Regelbetriebsphase ohne Betrachtung der Anfahrbetriebsphase und die Verwendung von

Prüfbrennstoffen (z. B. Buchenscheitholz) mit guten verbrennungstechnischen Eigenschaften zu verstehen. Außerdem werden die wichtigsten Betriebsphasen wie z. B. die Anfahrbetriebsphase bzw. Kaltstartphase und Gluthaltephase nicht berücksichtigt, in denen in der Regel hohe Konzentrationen bzw. der höchste Anteil an gefährlichen und klimarelevanten Schadstoffen entstehen. Die Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Messergebnisse sowie das Alterungsverhalten sind ebenfalls kein Bestandteil der Typprüfung.

Zentrale Heizkessel müssen außerdem gemäß § 15 im Abstand von zwei Jahren wiederkehrend überwacht werden. Auch bei der wiederkehrenden Überwachung werden die Heizkessel bei optimalen Betriebseinstellungen nach Vorgaben der Betriebsanweisung des Herstellers betrieben. Während der wiederkehrenden Überwachung werden gemäß VDI 4207 Blatt 2 die nach der 1. BImSchV geforderten Emissionen (Kohlenstoffmonoxid- und Staubkonzentrationen), die eingesetzten Brennstoffe und der technische Zustand der Verbrennungstechnik durch den Schornsteinfeger überprüft. Der Kesselwirkungsgrad bzw. die Effizienz der Heizkessel ist kein Gegenstand der wiederkehrenden Überwachung. Die Emissionsüberwachung durch den Schornsteinfeger erfolgt ausschließlich in der Regelbetriebsphase über einen Zeitraum von 15 Minuten. Bei den automatisch beschickten Heizkesseln muss die Einhaltung der Grenzwerte sowohl bei Nennwärmeleistung als auch im Teillastbetrieb gewährleistet werden. Die Anfahr- und Ausbrandbetriebsphasen, in denen herkömmlicherweise der größte Anteil der Emissionen bei der Verbrennung von Biomasse entsteht, werden hier nicht betrachtet. Aus den gemessenen Konzentrationen wird ein viertelstündiger Mittelwert gebildet und geprüft, ob die Emissionsanforderungen gemäß der 1. BImSchV eingehalten werden.

3.4 Potential der Schadstoffminderung in der Praxis durch die Überwachung gemäß der 1. BImSchV

Zur Minderung der toxikologischen und klimarelevanten Schadstoffemissionen in Wohngebieten aus der Verbrennung von Festbrennstoffen weisen die bisher gemäß der 1. BImSchV angewendeten Überwachungsmechanismen die folgenden Nachteile auf:

- Die Schornsteinfegermessung ist betrieblich nicht repräsentativ:
  Da die Emissionen nur kurzeitig und stichprobenartig unter optimalen Betriebsbedingungen gemessen werden, ist diese Art der Überwachung betrieblich nicht repräsentativ. Eine sachliche Bewertung der Feuerungsanlage bzw. des Heizkessels durch diese Methode ist nicht möglich und führt nur bedingt zur einer Minderung von Schadstoffemissionen in der Praxis.
- Große Unsicherheiten bei der Messtechnik:
  Sowohl für die Messung der Konzentration an Kohlenstoffmonoxid als auch für Feinstaub bestehen große Messunsicherheiten, sodass häufig keine signifikante Aussage über die tatsächliche Konzentration dieser Schadstoffe getroffen werden kann. Aufgrund der Messunsicherheit können bei der Messung nach VDI 4207 Blatt 2

von den gemessenen Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid 20 % und Feinstaub 40 % zu Gunsten des Anlagenbetreibers abgezogen werden.

- Keine ausreichende Betrachtung der eingesetzten Brennstoffe:
  Zwar werden von dem Schornsteinfeger bei der wiederkehrenden Überwachung gemäß VDI 4207 Blatt 2 die Brennstoffe im Brennstofflager des Anlagenbetreibers begutachtet. Allerdings ist der Einsatz illegaler oder ungünstiger Brennstoffe außerhalb des Überwachungszeitraums nicht auszuschließen [Gedamke 2012], welche nicht nur zu hohen Konzentrationen bei der Verbrennung, sondern auch zu gefährlichen bzw. sicherheitsbedenklichen Zuständen in den Feuerungsanlagen führen können.
- Keine ausreichende Betrachtung der Verbrennungstechnik:
  Ähnlich wie bei den Brennstoffen wird die Verbrennungstechnik nicht über das gesamte Jahr, sondern lediglich indirekt bzw. stichprobenartig im Rahmen der wiederkehrenden Schornsteinfegerüberwachung kontrolliert. Sollten technische Betriebsstörungen auftreten, durch die zwar der Betrieb nicht beeinflusst aber die Verbrennungsqualität maßgeblich verschlechtert werden, können auch bei sachgemäßer Bedienung und beim Einsatz von geeigneten Brennstoffen unmerklich hohe Schadstoffkonzentrationen entstehen. Ein typisches Beispiel dafür sind die Leckagen, die in der Regel aufgrund defekter Dichtungen oder Risse in der Brennkammer zustande kommen. Durch die Falschluft kann ein hoher Sauerstoffgehalt bzw. -überschuss im Abgas entstehen, welcher durch die Lambda-Sonde registriert wird. Auf Basis der elektrischen Signale aus der Lambda-Sonde wird die Sekundärluft gedrosselt, wodurch die Verbrennung schnell in Sauerstoffmangel gerät und erhebliche Schadstoffkonzentrationen (wie z. B. Feinstaub, Kohlenstoffmonoxid, PAKs, VOCs usw.) entstehen.
- Keine Betrachtung des Betreiberverhaltens:
  Gemäß VDI 4207 Blatt 2 müssen die Betreiber von Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe innerhalb eines Jahres über die sachgerechte Bedienung ihrer Technologien informiert werden. Darüber hinaus sind in den Aufstell- und Bedienungsanweisungen der Feuerungsanlagen wichtige Informationen für die Einstellung eines sachgemäßen und sicheren Betriebs beschrieben. Obwohl der Betreiber die Haupteinflussgröße und den größten Unsicherheits- bzw. Risikofaktor für eine Einstellung einer sachgemäßen Verbrennung darstellt, wird das Betreiberverhalten mit den bisherigen Überwachungsmechanismen gemäß der 1. BImSchV nicht überwacht.
- Kritische Betriebsphasen werden bisher nicht betrachtet:
  Bei der wiederkehrenden Überwachung werden die kritischen Betriebsphasen, vor allem die Anfahrbetriebsphase im Kaltstart nicht berücksichtigt, obwohl besonders hier hohe Konzentrationen an gefährlichen Schadstoffen entstehen. Beispielsweise führt eine

ungünstige Anzündung (manuell oder automatisch) bei handbeschickten Heizkesseln (Vergaserkessel) zu einer intensiven Vergasung ohne vollständige Verbrennung, wodurch nicht nur hohe Schadstoffkonzentrationen, sondern auch erhebliche chemische Verluste (bis zu ca. 36 %) und folglich eine niedrige Verbrennungseffizienz entstehen können.

- Keine Überwachung der Effizienz im Praxisbetrieb:
  Die Überwachung der Effizienz bzw. des Kesselwirkungsgrads in biomassebetriebenen Feuerungsanlagen ist bisher kein Bestandteil der wiederkehrenden Überwachung. Eine schlechtere Verbrennungseffizienz entsteht in der Regel durch einen hohen Gehalt an nicht verbrannten Bestandteilen (chemische Verluste) im Abgas sowie durch einen unvollständigen Ausbrand des Brennstoffs im Feuerraum. Darüber hinaus kann ein niedriger Wirkungsgrad trotz hocheffizienter Verbrennung entstehen, wobei aufgrund von mit Verbrennungsrückständen belegten Wärmetauschern hohe Wärmestrahlungsverluste und Abgastemperaturen verursacht werden. Sowohl bei einer schlechteren Verbrennungseffizienz als auch bei einem niedrigen Wirkungsgrad im Heizkessel erhöhen sich der Brennstoffverbrauch und somit die spezifischen Treibhausgasemissionen sowie die Kosten der Wärmebereitstellung im Gebäude.

Aufgrund der oben geschilderten Schwachpunkte der heutigen Überwachungsmethoden der Schornsteinfeger lässt sich keine plausible Aussage über die tatsächlichen Schadstoffemissionen aus Biomassefeuerungsanlagen treffen. Da die Überwachung bisher nur wiederkehrend, stichprobenartig und ausschließlich unter optimalsten Betriebsbedingungen erfolgt, werden die Konzentrationen an Schadstoffen in Wohngebieten auch bei einer Verschärfung der Emissionsanforderungen ohne eine Anpassung der Überwachungsvorschriften nur bedingt erreicht werden können.

Die Problematik der wiederkehrenden Überwachung in biomassebetriebenen Heizkesseln wurde in diesem Forschungsprojekt aufgegriffen und ausführlich untersucht. Auf Basis der bei den Forschungsaktivitäten im Fachgebiet Verbrennungs- und Umweltschutztechnik des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP gesammelten Erfahrungen wurde das VREM-System entwickelt, mit dem nicht nur die Emissionen permanent überwacht, sondern die Verbrennung gezielt geregelt und dadurch ein ökologischer und ökonomischer Betrieb gewährleistet werden können. Durch den zukünftigen Einsatz dieser Technologie sollen die Überwachungsmethoden durch den Schornsteinfeger nicht ersetzt werden, sondern nur modernisiert und zwecks sachlicher und fairer Bewertung von Heizkesseln unterstützend eingesetzt werden.

4 Schadstoffemissionen bei der Verbrennung von Festbrennstoffen

Bei der thermochemischen Umsetzung von Festbrennstoffen entsteht eine Vielzahl völlig unterschiedlicher Schadstoffe, welche die Luftqualität in Wohngebieten beeinflussen können. Diese Schadstoffe lassen sich in gas- und staubförmige Emissionen unterteilen.

4.1 Staubförmige Emissionen

Die staubförmigen Emissionen sind in primäre und sekundäre Partikel unterteilt. Zu den primären Partikeln gehören entweder im oder am Holz bestehende Bestandteile, wie Sand und Erde oder im Glutbett gebildete staubförmige Komponenten, die mit dem Abgasstrom mitgeführt werden, ohne in die Gasphase überzugehen [Klippel et al. 2006]. Sekundäre Partikel sind generell sehr fein. Sie entstehen durch chemische Reaktionen sowie durch physikalische Vorgänge (Absorption, Nukleation, Kondensation) aus chemischen Komponenten, wie z. B. SO_x, NO_x, die sich im Feuerraum gasförmig befinden [Marutzky 2002, Kaltschmitt et al. 2009]. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften staubförmiger Emissionen hängen von dem eingesetzten Brennstoff ab [Oser et al. 2003].

Staubförmige Emissionen können sowohl aufgrund vollständiger und unvollständiger Verbrennung als auch durch Mitreißen von Partikeln aus dem Brennstoff oder der Asche entstehen [Marutzky 2002, Kaltschmitt et al. 2009, Oser et al. 2003].

<u>Staubförmige Emissionen aus vollständiger Verbrennung:</u>

Staubförmige Emissionen aus vollständiger Verbrennung sind anorganische Bestandteile des Brennstoffs, die nach einer Fragmentierung und Verdampfung des Brennstoffpartikels bei wieder sinkenden Temperaturen über die Nukleation mit anschließender Koagulation sowie durch die direkte Kondensation freigesetzt werden können, und mineralische Aschepartikel, die mit dem Abgasstrom aus dem Glutbett mitgerissen werden können. Hierzu zählen folgende Partikeltypen [Marutzky 2002, Kaltschmitt et al. 2009]:

- Schwerflüchtige, mineralische Aschebestandteile (z. B. CaO, Al_2O_3, SiO_2),
- Ascheverbindungen, die durch Verdampfung und Kondensation oder Neubildung in der Feuerung entstehen (z. B. KCl, K_2SO_4, Nitrate) und
- Schwermetalle und Schwermetallverbindungen, die aus dem Brennstoff oder aus Verunreinigungen entstehen. Diese können in metallischer, oxidischer oder chloridischer Form vorkommen.

Die Minderung dieser Stäube im Abgas kann hauptsächlich durch eine mehrstufige Verbrennung erreicht werden. In der ersten Verbrennungsstufe in der Vergasungszone muss die Temperatur niedriger eingestellt werden als die Verdampfungstemperatur dieser Stäube. Außerdem tragen die Verteilung und Regulierung der Verbrennungsluft zur Reduzierung dieser Stäube maßgeblich bei. Es müssen dabei günstige Strömungsverhältnisse in

der Glutzone gewährleistet werden, so dass diese Stäube durch die Begrenzung des Sauerstoffangebotes nicht entstehen können bzw. durch niedrige Strömungsgeschwindigkeiten in der Vergasungszone nicht mit dem Abgasstrom mitgerissen und anschließend emittiert werden. Zudem lässt sich der Anteil der schwerflüchtigen, mineralischen Aschebestandteile durch den Einsatz von rindefreien Hölzern und mit Erde und Sand unbelasteten Brennstoffen sehr gut mindern [Marutzky 2002].

Staubförmige Emissionen aus unvollständiger Verbrennung:

Hierunter werden nicht verbrannte Kohlenstoffverbindungen verstanden, die kohlenstoffhaltige feste oder nach der Abkühlung der Reaktionsprodukte entstehenden Zersetzungsprodukte sowie kondensierte Syntheseprodukte umfassen [Marutzky 2002, Klippel et al. 2006].

Kohlenstoffhaltige Zersetzungsprodukte sind organische Verbindungen, die bei der pyrolytischen Zersetzung aufgrund des hohen Anteils der flüchtigen Bestandteile des Brennstoffs freigesetzt werden können. Sie werden aufgrund ungünstiger Verbrennungsbedingungen, wie z. B. ungenügend zugeführter Sauerstoff, zu kurze Verweilzeiten, unzureichende Oxidationstemperatur im Brennraum und schlechte Durchmischung gebildet. Die kohlenstoffhaltigen kondensierten Syntheseprodukte, wie z. B. Ruß, werden in der Flamme durch Agglomeration kleinster Kohlenstoff-Cluster freigesetzt. Ihre Bildung wird durch eine ungenügende Luftzufuhr, ungleichmäßige Entzündung und schlechte Durchmischung vom Brennstoff und Luft bzw. Sauerstoff begünstigt.

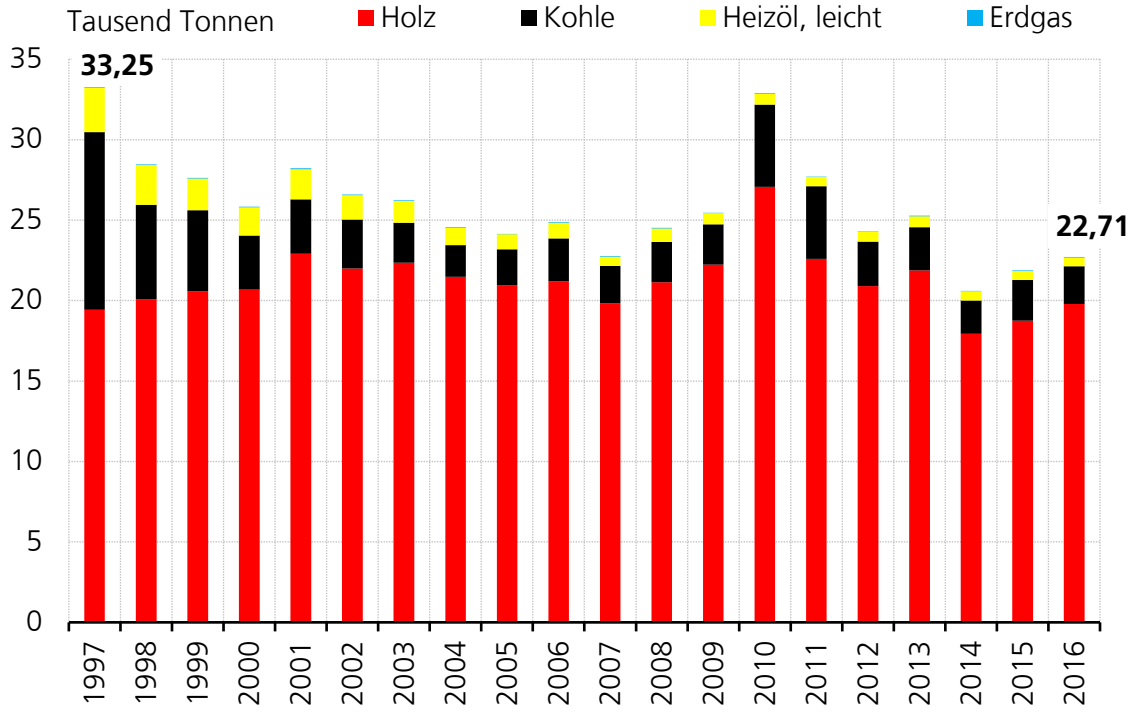

Diagramm 3: Feinstaubemissionen (PM_{10}) aus Kleinfeuerungsanlagen (Holz-, Kohle-, Heizöl-, und Erdgasfeuerungen) [UBA 2017].

Die staubförmigen Emissionen aus unvollständiger Verbrennung können durch die Verbesserung der Brennstoffeigenschaften, wie z. B. Einsatz von trockenen Brennstoffen und/oder einer Stückigkeit, die an dem Brennstoffraum angepasst ist, sowie durch die Verbesserung der Feuerungstechnik erheblich gemindert werden. Für die Verbesserung der Feuerungstechnik können folgende Maßnahmen genutzt werden:

- Automatische Beschickung des Brennstoffs.
- Regelung des Verbrennungsprozesses bzw. die Zufuhr der Primär- und Sekundärverbrennungsluft durch den Einsatz geeigneter Sensorik wie z. B. O_2/ CO_e -Sonde.
- Konstruktive Optimierung des Feuerraumes, so dass eine günstige Verteilung der Primär- und Sekundärverbrennungsluft sowie eine gute Durchmischung mit Brenngas gewährleistet werden können.
- Einsatz von Pufferspeichern, so dass die benötigte Energiemenge durch einen durchgängigen Betrieb der Feuerungsanlage (Vermeidung des Teillastbetriebs) bereitgestellt werden kann.
- Verwendung von Energiemanagementsystemen, wobei die zugeführten Mengen an Primärluft und somit die Vergasung sowie die thermische Leistung an den tatsächlichen Bedarf angepasst werden.

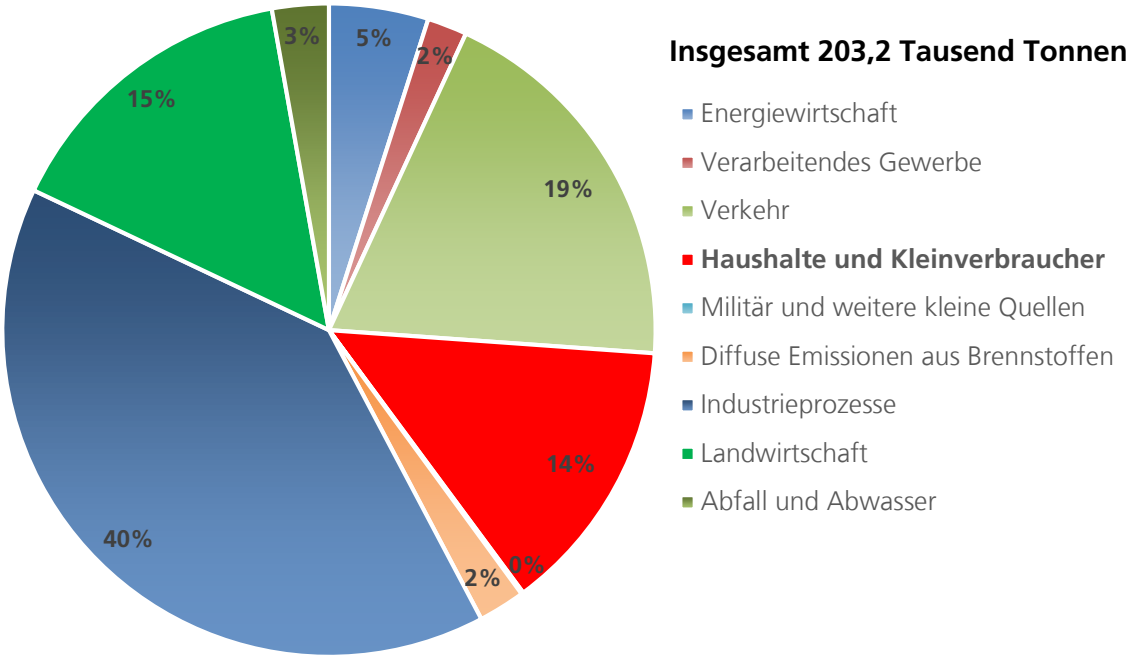

Diagramm 4: Quellen der Feinstaubemissionen (PM_{10}) in Deutschland im Jahr 2016 [nach den Daten vom Umweltbundesamt].

Stäube aus unvollständiger Verbrennung müssen definitiv durch Primärmaßnahmen gemindert werden, da sie einen erheblichen negativen Einfluss auf die nachgeschalteten Abgasbehandlungssysteme, vor allem auf

Entstaubungssysteme haben. Diese Stäube bilden beispielsweise bei Elektroabscheidern eine klebrige Schicht auf den Sprühelektroden, so dass die Ionisation und somit die Abscheidung gestört werden. Zudem wird auf der Niederschlagselektrode aufgrund ihrer Leitfähigkeit eine Staubschicht mit schlechten elektrischen Eigenschaften gebildet, was das Rücksprühen von der Niederschlagselektrode zur Folge hat [Schwister 2009]. Bei Nassabscheidern bildet sich aus diesen Stäuben eine klebrige Schicht auf der Oberfläche des Wärmetauschers, den Innenwänden der Waschkammer und des Wasserführungssystems (Rohre, Ventile und Pumpen), was zu einer Störung des Betriebs führen kann. Die Problematik dieser Art von Stäuben besteht bei Abreinigungsfiltern in einer Erhöhung des Druckverlustes sowie in der Bildung einer Staubschicht, die eine schlechte Permeabilität und Durchlässigkeit hat und sich nur schwierig abreinigen lässt.

Feinstäube aus vollständiger und unvollständiger Verbrennung haben einen großen Einfluss auf die Luftqualität in Wohngebieten. Der Feinstaubanteil (PM_{10}) aus Haushalten und Kleinverbrauchern, unter denen die Kategorie der Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen fällt, macht lediglich 14 % (entspricht ca. 28,45 Tausend Tonnen) des gesamten Feinstaubs in Deutschland aus (Diagramm 4). Gemäß den Angaben des Umweltbundesamts emittieren die Kleinfeuerungsanlagen aller Arten (Biomasse-, Kohle-, Erdgas- und Heizölfeuerungen) ca. 80 % (entspricht 22,71 Tausend Tonnen) der gesamten Feinstaubmenge aus Haushalten und Kleinverbrauchern. Dabei beträgt der Feinstaubanteil aus Biomassefeuerungen 87 % (entspricht 19,8 Tausend Tonnen) (Diagramm 3).

Bei Verbrennungsprozessen entstehen thermisch nicht oder teilweise umgesetzte Staubpartikel aus dem Brennstoff. Diese Partikel sind in der Regel sehr grob (bis ein paar Millimeter) im Vergleich zu den Feinstaubpartikeln aus vollständiger und unvollständiger Verbrennung. Ihr Anteil im Abgas hängt von der Art und Konstruktion der Feuerungsanlage sowie den Eigenschaften des Brennstoffs ab. Die Bildung dieser Partikel wird durch hohe Geschwindigkeiten der Luftströmung in dem Feuerraum, ungünstige Stellen für die Primär- und Sekundärluftzufuhr, den Einsatz von Brennstoffen mit niedriger Dichte, ungenügende Durchmischung von Verbrennungsluft und Brennstoff und lokal unzureichende Verbrennungstemperaturen verstärkt. Zur Minderung können Gegenmaßnahmen wie z. B. die mehrstufige Verbrennung und Verteilung der Verbrennungsluft, Regulierung der Verbrennungsluftzufuhr und Verbesserung der Brennstoffeigenschaften wie z. B. durch die Pelletierung oder Brikettierung genannt werden.

4.2 Gasförmige Emissionen

Die Art und Konzentrationen der gasförmigen Schadstoffemissionen im Abgas hängen von der elementaren Zusammensetzung des Brennstoffs bzw. dem Anteil der chemischen Elemente wie z. B. Stickstoff (N), Chlor (Cl), Fluor (F) und Schwefel (S) und Schwermetallen ab, die bei der Verbrennung zu Schadstoffen umgewandelt werden können [Joos 2006]. Bei der

Verbrennung von Festbrennstoffen ist zwischen den folgenden Gruppen der gasförmigen Emissionen zu unterscheiden:

- Gasförmige Emissionen aus unvollständiger Verbrennung wie z. B. Kohlenstoffmonoxid, Kohlenwasserstoffe, flüchtige organische Verbindungen und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe PAKs,
- Dioxine und Furane,
- Saure Schadstoffkomponenten wie z. B. Stickstoffoxide (NO_x), Schwefeldioxid (SO_2) und Chlorwasserstoff (HCl).

Die beiden Gruppen werden im Folgenden erläutert:

Gasförmige Emissionen aus unvollständiger Verbrennung:

Kohlenwasserstoffe und Kohlenstoffmonoxid stellen die typischen gasförmigen Produkte aus einer unvollständigen Verbrennung dar, welche für Kleinfeuerungsanlagen hinsichtlich der aktuellen sowie künftigen immissionsschutzrechtlichen Anforderungen gemäß der 1. BImSchV relevant sind. Bei der wiederkehrenden Überwachung von Heizkesseln müssen bisher nur das Kohlenstoffmonoxid sowie der Gesamtstaub durch den Schornsteinfeger kontrolliert werden.

Die Messung von Gesamtkohlenwasserstoffen bei der wiederkehrenden Überwachung ist bisher nicht erforderlich. In vielen Betriebszuständen korrelieren die Konzentrationen an Kohlenwasserstoffen bzw. Kohlenstoffmonoxid mit dem Feinstaub und sonstigen kohlenstoffhaltigen Stoffen wie z. B. flüchtige organische Verbindungen (VOCs). Die Entstehung solcher Schadstoffe ist direkt auf mangelhafte Oxidationsbedingungen (niedrige Temperaturen, Sauerstoffmangel sowie kurze Verweilzeit in der aktiven Reaktionszone) zurückzuführen. Die Behandlung dieser Schadstoffe durch nachgeschaltete Technologien ist technisch sowie wirtschaftlich sehr aufwendig. Integrierte Technologien wie z. B. die Einbautentechnik des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP (siehe Abschnitt 5.4) stellen eine günstige und sehr effektive Methode für die Behandlung von schweroxidierbaren Verbindungen dar, welche sich bei der Abkühlung des Abgases durch Aerosole sowie Feinstäube bilden können. Gemäß den Angaben vom Umweltbundesamt produzieren die Haushalte und die Kleinverbraucher 6 % der gesamten flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (Diagramm 5) sowie 26 % des gesamten Kohlenstoffmonoxids in Deutschland (Diagramm 6). Der Anteil der flüchtigen organischen Verbindungen sowie des Kohlenstoffmonoxids aus Biomassefeuerungen ist bei der Abschätzung des Umweltbundesamts nicht direkt angegeben bzw. herauszulesen.

Sowohl Kohlenstoffmonoxid als auch Kohlenwasserstoffe sind gesundheitlich sehr relevant. Zwar weist das Kohlenstoffmonoxid keine kanzerogene Wirkung auf, jedoch ist es bei hohen Konzentrationen lebensgefährlich bzw. giftig. Die Gefahr durch Kohlenstoffmonoxid beruht darauf, dass es sich an das Hämoglobin an den roten Blutkörperchen heftet und dadurch den Sauerstofftransport im Körper behindert.

Das Gefährdungspotential bzw. die Kanzerogenität der Kohlenwasserstoffe steigt an, wenn sie ringförmige Verbindungen (sogenannte Benzolringe) bilden. Verbinden sich die Benzolringe miteinander werden sogenannte polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffverbindungen PAKs gebildet, welche eine große Gefahr für die Gesundheit darstellen.

Bei Anwesenheit von Halogenen (Chlor Cl, Fluor F usw.) werden aus polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffverbindungen die halogenierten polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffverbindungen gebildet, die als hochgradig krebserregend bekannt sind. Wenn chlorierte bzw. fluorierte polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffverbindungen mit Sauerstoff reagieren entstehen zudem hochgiftige Dioxine und Furane.

Bei der Verbrennung von Hölzern werden die halogenierten polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffverbindungen und somit die Dioxine und Furane aufgrund des sehr geringen Anteils (meistens unter der nachweisbaren Grenze) an Halogenen nicht gebildet. Bei halogenhaltigen biogenen Brennstoffen ist die Bildung von Dioxinen und Furanen nicht ausgeschlossen.

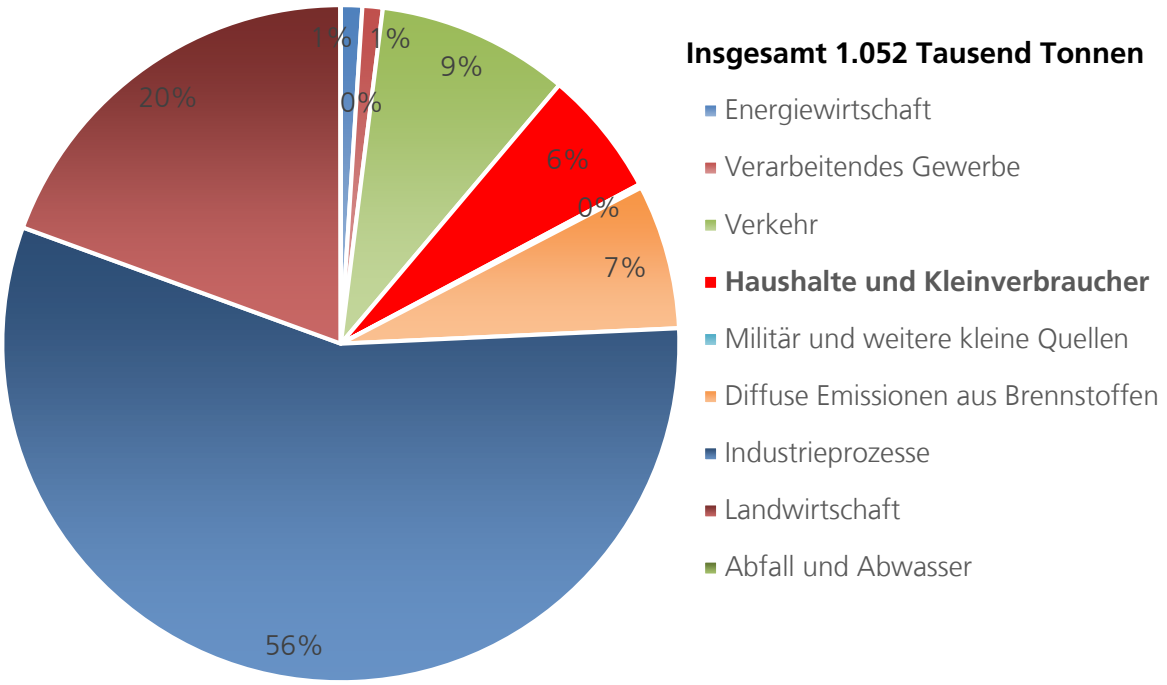

Diagramm 5: Quellen der flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (NMVOC)in Deutschland im Jahr 2016 [nach den Daten vom Umweltbundesamt].

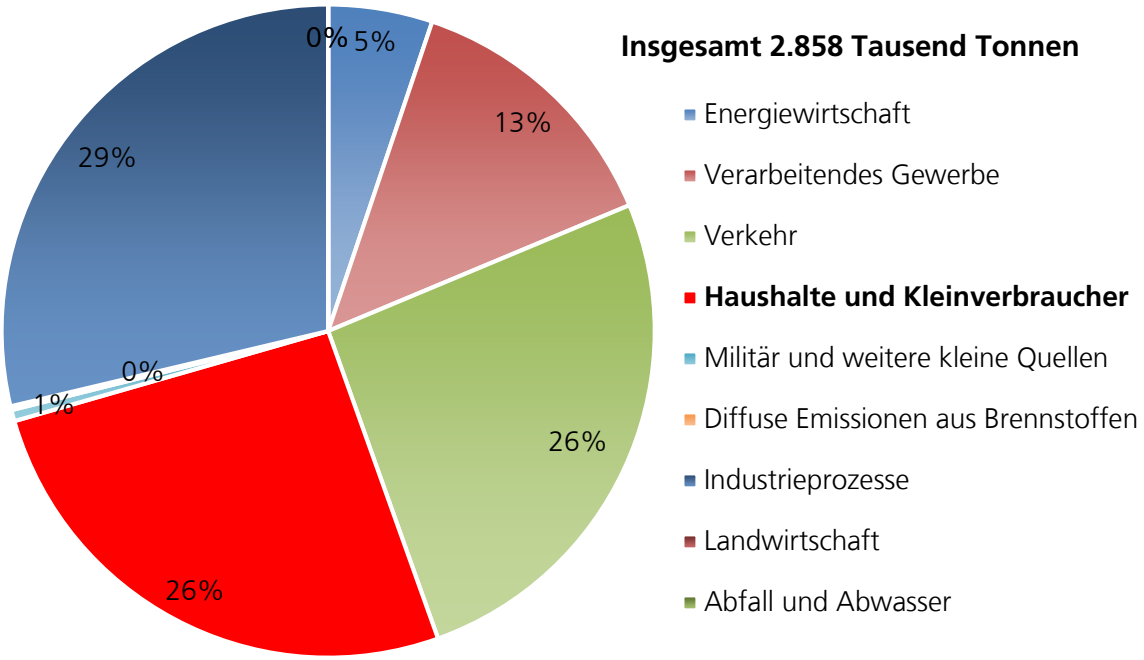

Diagramm 6: Quellen des Kohlenstoffmonoxids (CO) in Deutschland im Jahr 2016 [nach den Daten vom Umweltbundesamt].

Dioxine und Furane:

Dioxine und Furane können ein großes Problem bei Verbrennungsprozessen darstellen. Ihre Bildung bei dem Verbrennungsvorgang wird insbesondere im Temperaturbereich zwischen 200 °C und 700 °C bei Anwesenheit von Sauerstoff, Chlor und Aromaten begünstigt [Schultes 1996]. Die höchste Bildungsgeschwindigkeit von Dioxinen und Furanen erfolgt in einem Temperaturbereich von 250 °C und 400 °C. Bei höheren Temperaturen (T > 1.000 °C) beginnt die Zersetzung von Dioxinen und Furanen. Die Bildung von Dioxinen und Furanen wird bei Anwesenheit von katalytisch wirkenden Schwermetallen (wie z. B. Kupfer) sowie beim Einsatz von Elektrofiltern begünstigt. Außerdem hat das Sauerstoffangebot in der Primärreaktionszone einen ausschlaggebenden Einfluss auf die Bildung von Dioxinen und Furanen. Untersuchungen haben gezeigt, dass bei einem Sauerstoffüberschuss von mehr als 13 Vol.-% mit einem exorbitanten Anstieg der Dioxine und Furane im Abgas zu rechnen ist [nach Kaltschmitt et al. 2009]. Dioxine und Furane werden bei der Verbrennung vornehmlich an den festen Verbrennungsrückständen adsorbiert (ca. 80 % bis 90 %). Der Rest wird mit dem Abgas ausgetragen. Etwa 90 % davon wird im nachgeschalteten Entstaubungssystem mit dem Staub abgeschieden [Schultes 1996]. Dioxine und Furane können nur diskontinuierlich mit komplexen Probeentnahmesystemen und Analyseverfahren ermittelt werden. Sie müssen bei der Typprüfung für die Zulassung von Brennstoffen Nummer 8 und 13 (§ 3 Abs. 1) für den Einsatz in Kleinfeuerungsanlagen der 1. BImSchV überwacht werden und bestimmte

Grenzwerte einhalten. Die Grenzwerte gemäß der 1. BImSchV sind in der Tabelle 2 dargestellt.

Die Einhaltung der in der Tabelle 2 dargestellten Grenzwerte von Kohlenstoffmonoxid und vor allem von Stickstoffoxiden, Dioxinen und Furanen durch Primärmaßnahmen wie z. B. durch die gestufte Verbrennung mit Abgasrückführung ist außerordentlich wichtig. Primärmaßnahmen spielen eine ausschlaggebende Rolle für die Zulassung neuer biogener Brennstoffe für den Einsatz in Biomasseheizkesseln gemäß der 1. BImSchV, weil sich diese Schadstoffemissionen durch Sekundärmaßnahmen nur mit entsprechend hohem technischem und wirtschaftlichem Aufwand behandeln lassen. Je aufwändiger das gesamte Biomasseverbrennungssystem (Biomasseheizkessel, Abgasbehandlung, Wärmespeicherung, Wärmeeinspeisung und Wärmenutzung), desto größer ist die Gefahr, dass das Interesse an solchen Energiebereitstellungs-technologien abnimmt.

Erfahrungen sowie neuste Untersuchungen haben gezeigt, dass bei der Verbrennung von biogenen Brennstoffen (wie z. B. Gärreste, Grünschnitt, Gras und niederqualitativem Hackgut) in automatisch beschickten Biomassefeuerungsanlagen eine deutliche Überschreitung der Grenzwerte von Stickstoffoxiden sowie Dioxinen und Furanen bei der Typprüfung stattfindet, sodass diese Brennstoffe für den Einsatz in Kleinfeuerungsanlagen der 1. BImSchV nicht zugelassen werden dürfen. Eine bedeutsame Minderung von Dioxinen und Furanen bei der Verbrennung von Biomasse ist durch die Reduzierung der Sauerstoffkonzentration im Glutbett zu erreichen [Kaltschmitt et al. 2009].

Saure Schadstoffkomponenten:

Gemäß den Angaben vom Umweltbundesamt fallen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher 5 % (Säure-Äquivalent) der gesamten Mengen der sauren Schadstoffkomponenten in Deutschland an (Diagramm 7). Der Anteil der Biomassefeuerungen lässt sich nicht direkt aus diesen Angaben ableiten. Bei vermehrtem Einsatz von biogenen Brennstoffen in Kleinfeuerungsanlagen ist mit erhöhten Mengen an sauren Schadstoffkomponenten zu rechnen.

Zu den relevanten sauren Schadstoffkomponenten, die bei der Verbrennung von Biomasse bzw. biogenen Brennstoffen in Kleinfeuerungsanlagen entstehen, gehören Stickstoffoxide NO_x, Schwefeldioxid SO_2 und Chlorwasserstoff HCl. Die Konzentrationen dieser Komponenten im Abgas hängen direkt von dem Massenanteil des Stickstoffs, Schwefeldioxids und Chlors im Brennstoff ab. Die Temperaturen mit dem Sauerstoffgehalt im Glutbett zählen zu den wichtigsten Einflussfaktoren, die die Bildung von sauren Schadstoffkomponenten begünstigen. Bei der Verbrennung von Hölzern befinden sich das Schwefeldioxid sowie der Chlorwasserstoff in geringeren Konzentrationen im Abgas. Die Konzentrationen der Stickstoffoxide im Abgas variieren nach Holzart (weiche oder harte Hölzer) sowie nach dem Anteil von Rinden, Blättern und Ästen im Brennstoff. Bei

der Verbrennung von biogenen Brennstoffen wie Gärrest, Gräser, Traubentrester, Hühner- und Pferdemist ist grundsätzlich mit höheren Konzentrationen an sauren Schadstoffkomponenten zu rechnen als bei der Verbrennung von Hölzern.

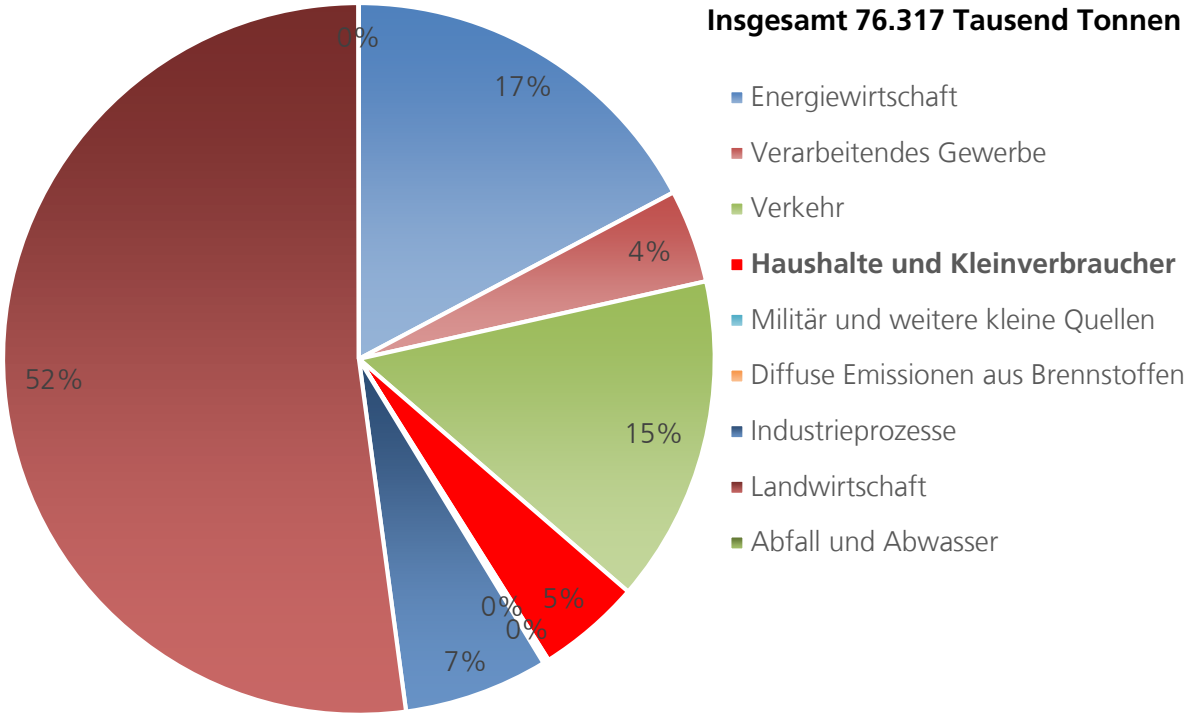

Diagramm 7: Quellen der Säure-Äquivalente (stöchiometrisch errechnet bezogen auf das wirksame Säure-Ion H^+ (d. h. die Berechnung erfolgt aus den Emissionsangaben von SO_2 (/32), NH_3 (/17) und NO_x (berechnet als NO_2 /46))) in Deutschland im Jahr 2016 [Umweltbundesamt].

<u>Stickstoffoxide (NO_x):</u>

Gemäß den Angaben des Umweltbundesamts produzieren die Haushalte und Kleinverbraucher 11 % (134 Tausend Tonnen) der gesamten Menge der Stickstoffoxide in Deutschland. Der Anteil der Stickstoffoxide aus Kleinfeuerungsanlagen bzw. der Biomassefeuerungen ist nicht direkt angegeben.

Elementarer Stickstoff wird bei der Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen zu Stickstoffmonoxid (> 95 %) und Stickstoffdioxid (< 5 %) und selten zum Distickstoffmonoxid bzw. Lachgas (N_2O) umgewandelt. Dabei ist je nach Entstehungsmechanismus zwischen Brennstoffstickstoffoxiden, thermischen Stickstoffoxiden und prompten Stickstoffoxiden zu unterscheiden. Zuerst werden Stickstoffoxide bei dem Verbrennungsvorgang überwiegend durch die Reaktion des im Brennstoff gebundenen Stickstoffs mit Sauerstoff gebildet. Der Anteil des im Brennstoff gebundenen Stickstoffs, der zu Stickstoffoxiden reagiert, hängt von der Verbrennungstemperatur ab. Er schwankt zwischen 15 % bei mehrstufiger

Verbrennung und 35 % bei einstufiger Verbrennung [Joos 2006]. Zweitens beginnt bei einer Flammentemperatur von über 1.200 °C der molekulare und atomare Stickstoff aus der Verbrennungsluft zu oxidieren. Dadurch entstehen die sogenannten thermischen Stickstoffoxide. Zusätzlich werden prompte Stickstoffoxide bei Anwesenheit von Kohlenwasserstoffradikalen und Sauerstoff bei einer Flammentemperatur von über 1.300 °C gebildet [Schultes 1996, Marutzky 2002, Kaltschmitt et al. 2009]. Aufgrund der niedrigen Temperaturen (< 1.200 °C) im Flammen- und Glutbettbereich bei der Verbrennung in Biomassefeuerungen spielen die thermischen und prompten Stickstoffoxide nur eine untergeordnete Rolle.

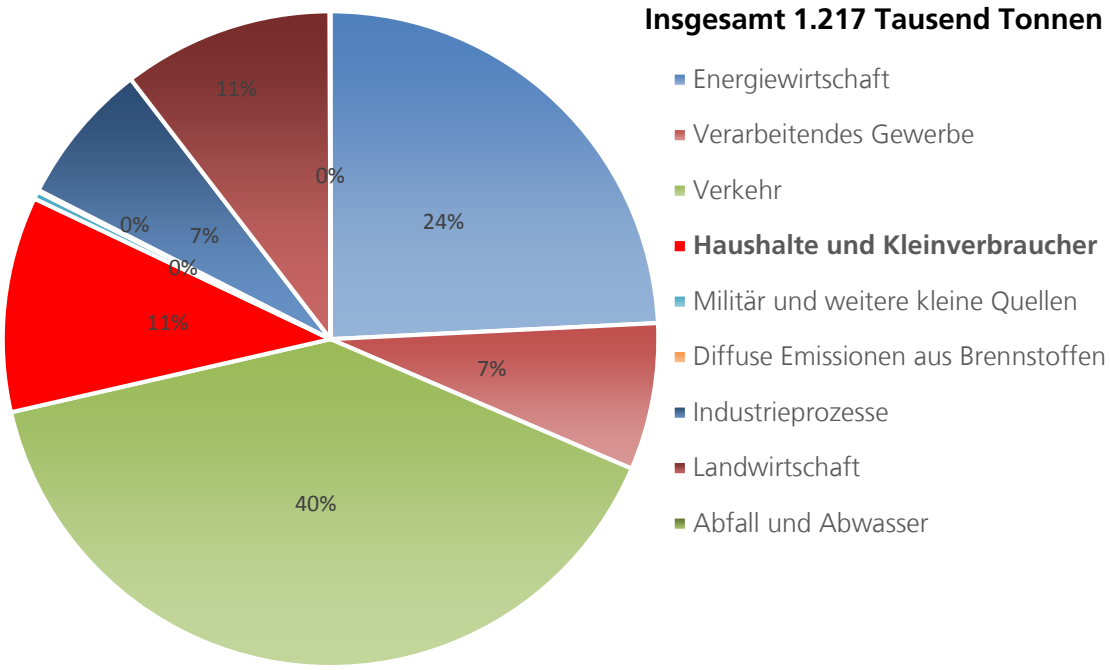

Diagramm 8: Quellen der Stickstoffoxide (NO_x) in Deutschland im Jahr 2016 [Umweltbundesamt].

Bei der Verbrennung von Holz in Kleinfeuerungsanlagen entstehen in der Regel geringere Konzentrationen an Stickstoffoxiden im Vergleich zu anderen biogenen Brennstoffen. Das Diagramm 9 zeigt die Verläufe der Stickstoffoxide bei der Verbrennung unterschiedlicher Hölzer (Buche, Kiefer, Fichte, Pappeln, hochqualitatives Hackgut) in einem Vergaserkessel. Die Konzentrationen an Stickstoffoxiden liegen unter 150 mg/Vm^3 (Vm^3: Abgas im Vergleichszustand: Normzustand, trocken und bezogen auf einen Sauerstoffgehalt im Abgas von 13 Vol.-%). Bei der Verbrennung von Weichhölzern wie z. B. Fichte und Kiefer entstehen geringere Konzentrationen an Stickstoffoxiden als bei Harthölzern wie z. B. Buche. Bei der Verbrennung von biogenen Brennstoffen variieren die Konzentrationen der Stickstoffoxide gemäß dem elementaren Stickstoffgehalt im Brennstoff.

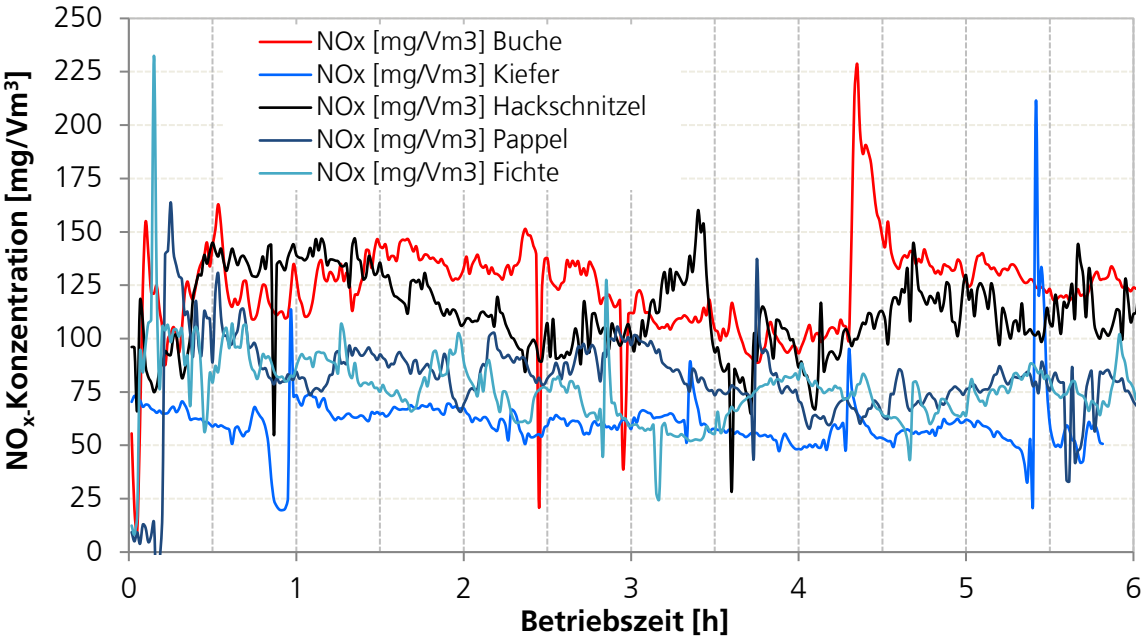

Diagramm 9: Stickstoffoxide (NO_x) bei der Verbrennung unterschiedlicher Hölzer im LEVS-System (zweistufige Verbrennung) des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP.

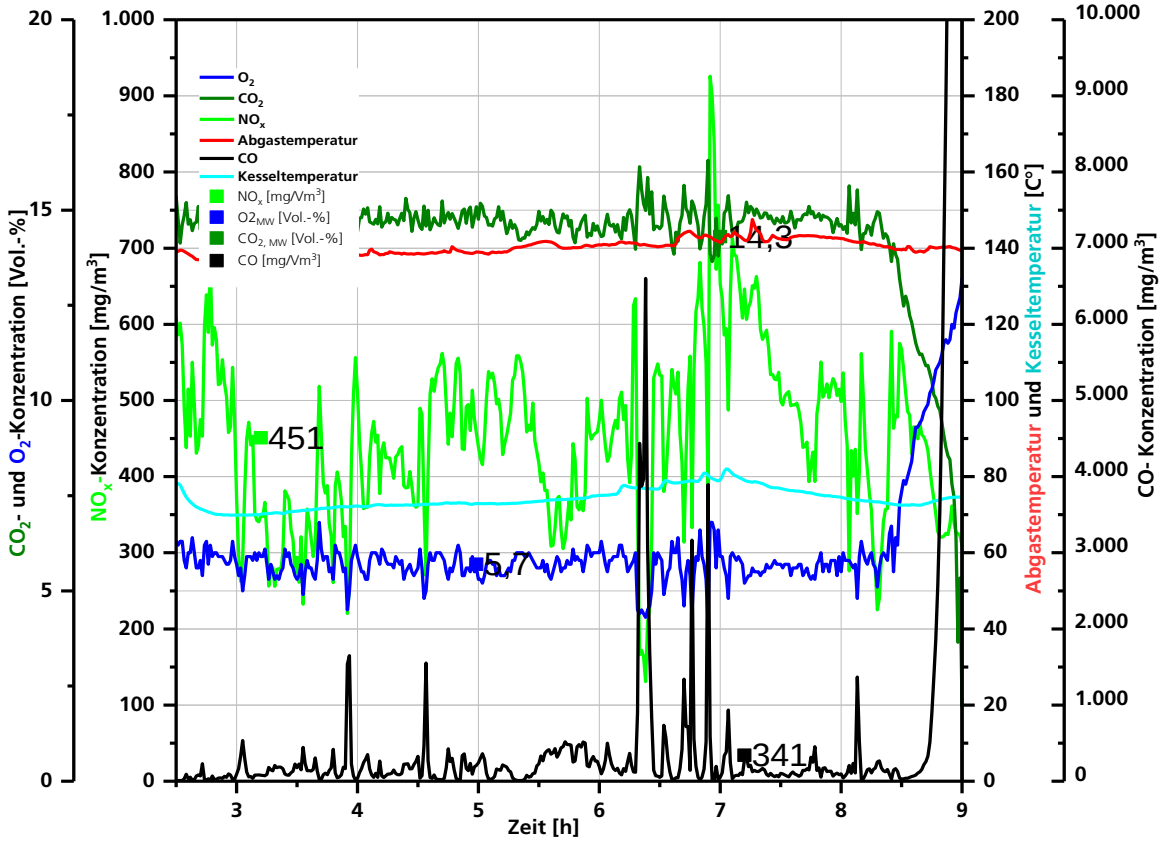

Diagramm 10: Stickstoffoxide (NO_x) bei der Verbrennung von Traubentrester im LEVS-System (zweistufige Verbrennung) des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP.

Im Diagramm 10 ist der Verlauf der Stickstoffoxide (als Summe NO + NO_2 = NO_x) bei der zweistufigen Verbrennung von Traubentrester dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Konzentrationen der Stickstoffoxide deutlich höher sind als bei der Verbrennung von Holz (Diagramm 9) und während der Verbrennung zwischen 300 mg/Vm^3 und 700 mg/Vm^3 variieren. Im Durchschnitt liegen sie bei ca. 450 mg/Vm^3. Bei einer einstufigen bzw. direkten Verbrennung ist mindestens mit den doppelten Konzentrationen bzw. bis 850 mg/Vm^3 zu rechnen.

Bei der Verbrennung in automatisch beschickten Biomassefeuerungen müssen die Stickstoffoxide bisher bei der wiederkehrenden Kontrolle durch den Schornsteinfeger nicht überwacht werden. Sie müssen lediglich bei der Typprüfung für die Zulassung von Brennstoffen Nummer 8 und 13 (§ 3 Abs.1) für den Einsatz in Kleinfeuerungsanlagen der 1. BImSchV kontrolliert werden und bestimmte Grenzwerte einhalten. Die Grenzwerte gemäß der 1. BImSchV sind in der Tabelle 2 dargestellt.

Schwefeloxide:

Der im Brennstoff befindliche Schwefel kann während der Verbrennung mit Sauerstoff reagieren und mit dem Abgas als Schwefeldioxid ausgetragen werden. Bei einer unvollständigen Verbrennung reagiert der elementare Schwefel mit dem Wasserstoff und bildet Schwefelwasserstoff H_2S, welches bei hohen Temperaturen und in Anwesenheit vom Sauerstoff zu Schwefeldioxid umgewandelt wird. Beim Verbrennungsvorgang im Glutbettbereich kann ein Teil des Schwefels mit dem im Brennstoff vorhandenen Kalzium und Kalium reagieren und dort in der Verbrennungsasche als Calciumsulfat $CaSO_4$ und Kaliumsulfat K_2SO_4 eingebunden werden. Aufgrund der leichten Flüchtigkeit des Schwefels sind hinsichtlich des Umfangs der Schwefeleinbindung in der Verbrennungsasche keine gesicherten Aussagen möglich [Kaltschmitt et al. 2009].

Die Einbindung des Schwefels ist von der Art der Schwefelverbindung im Brennstoff, der Gestaltung der Feuerung, den Temperaturverhältnissen, der Verweilzeit des Abgases im Verbrennungsraum sowie von der Art und dem Gehalt der basischen Komponenten in der Asche abhängig. Je nach diesen Einflussgrößen lässt sich zwischen 40 % und 60 % des Schwefelanteils aus dem Brennstoff in die Asche einbinden. Der Rest reagiert zu gasförmigen Verbindungen, die in nachgeschalteten Abgasreinigungssystemen wie z. B. Wäscher- oder Sorptionsverfahren entfernt werden sollten [Kaltschmitt et al. 2009].

Obwohl in der 1. BImSchV keine Grenzwerte für Schwefeloxide vorgegeben sind, ist die Einhaltung der Schwefeldioxidkonzentrationen unter bestimmten Grenzen für die Schonung und den Schutz der Feuerungsanlagen, der abgasführenden Bauteile sowie der nachgeschalteten Systeme (Wärmeaustauscher, Abgasbehandlungssysteme, Abgasanlagen und ihre Bestandteile) vor Nieder- und Hochtemperaturkorrosion zu empfehlen.

Bei der Verbrennung von Hölzern entsteht kaum Schwefeldioxid und somit besteht keine Notwendigkeit für die Abgasentschwefelung. Biogene Brennstoffe weisen einen hohen Gehalt an Schwefel auf und produzieren somit hohe Konzentrationen an Schwefeldioxid bei der Verbrennung.
Das Diagramm 11 stellt den Verlauf der Schwefeldioxidkonzentrationen bei der Verbrennung von Traubentrester dar, welcher in der Regel über einen Schwefelgehalt von größer als 0,12 Ma.-% (ca. 12 g Schwefel/kg Trester) verfügt.

Dem Diagramm 11 ist zu entnehmen, dass die Konzentrationen an Schwefeldioxid zwischen 100 mg/Vm³ und 250 mg/Vm³ liegen. Im Durchschnitt liegen Konzentrationen in den ersten fünf Stunden bei ca. 200 mg/Vm³, wobei sie in dem Zeitraum zwischen der fünften und achten Betriebsstunde im Durchschnitt um ca. 120 mg/Vm³ lagen.

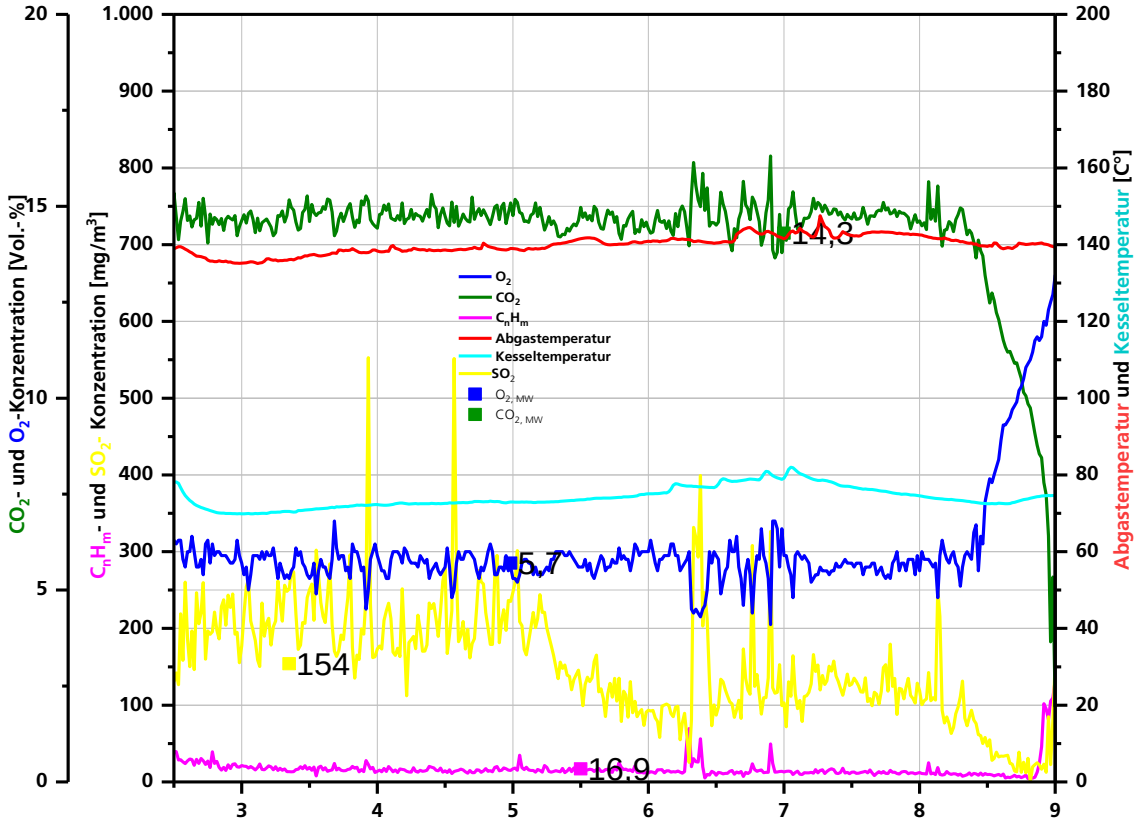

Diagramm 11: Schwefeldioxid bei der Verbrennung von Traubentrester im LEVS-System (zweistufige Verbrennung) des Fraunhofer IBP.

Chlor- und Fluorwasserstoff:

Die sich im Brennstoff befindlichen Chlor- und Fluorverbindungen reagieren bei der Verbrennung überwiegend (80 % bis 90 %) mit dem vorhandenen Wasserstoff zu Chlor- und Fluorwasserstoffen und werden mit dem Abgas ausgetragen [Joos 2006]. Die Anteile der Chlor- und Fluorwasserstoffe im Abgas hängen bei der Verbrennung von der Art des Brennstoffs sowie von dem Gehalt der Chlor- und Fluorverbindungen im Brennstoff ab. Der Rest

(10 % bis 20 %) der Chlor- und Fluorverbindungen liegt nach der Verbrennung in Form von Chlorid- und Fluoridsalzen sowie in Form von Schwermetallchloriden und Schwefelfluoriden vor, die sich in der Rost- und Flugasche sowie im Staub wiederfinden. Die Einbindung in die Asche hängt von der Art der Schwefelverbindungen im Brennstoff, vom Gehalt der basischen Komponenten in der Asche, von der Gestaltung der Feuerung und von den Temperaturverhältnissen ab [Kaltschmitt et al. 2009].

Gemäß der 1. BImSchV sind keine Grenzwerte für Chlor- und Fluorwasserstoff definiert bzw. einzuhalten. Um die Feuerungsanlagen, die abgasführenden Bauteile sowie die nachgeschalteten Systeme (Wärmeaustauscher, Abgasbehandlungssysteme, Abgasanlagen und ihre Bestandteile) vor Nieder- und Hochtemperaturkorrosion zu schützen sowie die Bildung von Dioxinen und Furanen zu vermeiden, sollten immer chlor- und fluorarme Brennstoffe oder Maßnahmen für die Begünstigung der Bindung dieser chemischen Elemente in der Verbrennungsasche, eingesetzt werden.

5 Stand der Technik der Regelung des Verbrennungsprozesses in Heizkesseln

Das Hauptziel der Regelung des Verbrennungsprozesses in Biomasseheizkesseln besteht in:

- Der Gewährleistung einer möglichst schadstoffarmen Verbrennung und
- der Sicherstellung eines sicheren Betriebs gemäß der DIN EN 303-5 sowie der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG.

Die gezielte Regelung der Verbrennung für die Einstellung einer hohen Verbrennungseffizienz bzw. eines hohen Kesselwirkungsgrads vor allem im Praxisbetrieb ist bisher mit den auf dem Markt verfügbaren Verbrennungskonzepten sowie Verbrennungsreglern nicht möglich.

Bei der thermischen Nutzung der Biomasse in Heizkesseln ist zwischen der Verbrennungs- und Betriebseffizienz zu unterscheiden. Während sich eine hohe Verbrennungseffizienz aus der Minderung der Wärmeverluste in jeglicher Form (Verlust durch freie Wärme, latente Wärme und durch brennbare Bestandteile im Rost- und Schürdurchfall) ergibt, ist eine optimale Betriebseffizienz nur durch eine bedarfsgerechte Wärmeproduktion durch eine entsprechende regelungstechnische Integration der Heizkessel in das Energiemanagementsystem des Gebäudes zu erreichen.

In diesem Abschnitt wird die heutige Regelung von Heizkesseln mit den Nachteilen sowie dem Potential der Effizienzverbesserung durch Minderung der Wärmeverluste geschildert.

5.1 Regelung von Biomasseheizkesseln

Herkömmlicherweise basiert die Regelung von Biomasseheizkesseln auf dem Einsatz von Temperaturfühlern sowie einer Lambda-Sonde, wobei die Regelung des Verbrennungsprozesses durch die Einstellung des Brennstoffdurchsatzes und der Verbrennungsluft erfolgen kann. Zur Regelung des Verbrennungsprozesses gehören die Einstellung der thermischen Leistung sowie einer sachgemäßen (effiziente und schadstoffarme) Verbrennung mit einem sicheren Betrieb gemäß DIN EN 303-5 sowie der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG.

5.1.1 Thermische Leistung

Die thermische Leistung des Heizkessels kann über die Einstellung der zugeführten Brennstoffmenge sowie der Primärluft geregelt werden, wobei die Kesseltemperatur in einem günstigen und sicheren Betriebsbereich (75 °C und 85 °C) liegen soll. Die Brennstoffzufuhr erfolgt manuell oder automatisch bzw. quasikontinuierlich und stellt eine wichtige Kenngröße dar, mit der nicht nur die thermische Leistung eingestellt, sondern auch die Schadstoffbildung während der Verbrennung beeinflusst wird. Beispielsweise führt eine Überfüllung des Feuerraums mit dem Brennstoff nicht nur zu einer thermischen Überlastung, sondern auch zu einer instabilen sowie unvollständigen Verbrennung mit erhöhten Schadstoffemissionen und entsprechenden Wärmeverlusten durch freie und latente Wärme im Abgas. Durch das Brennstoffzufuhrsystem werden die

Verteilung und die Höhe des Brennstoff- bzw. Glutbetts entlang des Feuerraums bestimmt. Die Kenngrößen (Höhe und Verteilung des Brennstoffbetts auf dem Rost) bestimmen maßgeblich die Bildung von staub- und gasförmigen Schadstoffemissionen, vor allem Feinstaub und Stickstoffoxiden, während der Verbrennung.

Eine maximale thermische Belastung des Feuerraums sowie eine bestimmte Relation zwischen der Primärluft zu der zugeführten Brennstoffmenge soll eingehalten werden, um eine sachgemäße Verbrennung zu gewährleisten. Je nach Brennstoffmenge im Feuerraum und verbleibendem Energiegehalt im Brennstoff im Laufe der Verbrennung hat die Primärluft unterschiedliche Einflüsse auf die Abgasverluste. Beispielsweise erhöht sich der Sauerstoffgehalt im Abgas in automatisch beschickten Feuerungsanlagen bei ungünstigen bzw. langen Brennstoffzufuhrzeiten (on/off-Takten des Schneckenförderers), sodass die Abgasverluste während eines Abbrandzyklus (die Zeit zwischen zwei Brennstoffzufuhrzyklen) exorbitant ansteigen. Das Gleiche gilt bei einer falschen Auslegung und Konstruktion des Primärluftzufuhrsystems. Eine optimale Taktung der Brennstoffzufuhr hängt von vielen Faktoren vor allem von den physikalischen und verbrennungstechnischen Brennstoffeigenschaften, dem Verbrennungsluftzufuhrsystem und von der Rosttechnik ab. Die meisten Heizkessel in der Praxis arbeiten mit einer konstanten Taktung, mit der in der Regel die thermische Leistung ohne Rücksicht auf die Verbrennungseffizienz und –qualität eingestellt wird. Die minimale thermische Belastung des Feuerraums ergibt sich aus der nötigen Oxidationstemperatur in der aktiven Reaktionszone. Bei einem bestimmten Brennstoffdurchsatz (Teillastbetrieb) können die notwendigen Temperaturen sowie die günstigen Strömungsverhältnisse für eine vollständige Oxidation nicht erreicht werden, wodurch nicht nur hohe Schadstoffemissionen erzeugt, sondern auch eine niedrige Verbrennungseffizienz aufgrund hoher Wärmeverluste verursacht werden. Es ist zu erwähnen, dass es sich bei den automatisch beschickten Biomasseheizkesseln um eine quasikontinuierliche und nicht um eine kontinuierliche Brennstoffzufuhr wie bei Gas- und Heizölfeuerungen handelt, wie es in vielen Stellen in der Literatur verwechselt wird.

Die Differenz zwischen Abgas- und Kesseltemperatur stellt eine mögliche Größe für die Regelung der thermischen Leistung dar, welche im Regelbetrieb in einem bestimmten Bereich liegen soll, um einen sicheren und effizienten Betrieb zu gewährleisten. Der optimale Differenzbereich hängt von der aktiven Wärmeaustauschfläche und den Strömungsverhältnissen im Heizkessel ab. Es gilt hier, je größer die Differenz ist, umso ineffizienter ist der Betrieb bzw. höher sind die Abgasverluste. Bei niedriger Differenz zwischen Abgas- und Kesseltemperatur steigt zwar die Verbrennungseffizienz an, jedoch besteht die Gefahr zur Unterschreitung der Taupunkttemperatur des Abgases inner- und außerhalb vom Heizkessel. Eine Unterschreitung der Taupunkttemperatur führt zur Bildung von aggressiven Säuren und somit zu Korrosionsproblemen bzw. zu erheblichen Schäden in Abgas- oder Schornsteinsystemen, die für den feuchten Betrieb nicht ausgelegt bzw. zugelassen sind.

5.1.2 Verbrennungsqualität

Die Verbrennungsqualität ist eine wichtige Zielgröße für die Regelung des Verbrennungsprozesses. Entscheidend dabei ist der Sauerstoffgehalt im Abgas (Sauerstoffüberschuss und somit Lambdawert (Lambda= 21/ (21 - O_2)), welcher einen direkten Indikator für den Sauerstoffgehalt in der aktiven Reaktionszone darstellt. In der Regel wird der Sauerstoffgehalt über eine Lambda-Sonde ermittelt und über die Menge der Sekundär- und Tertiärluft geregelt. Für eine effiziente und schadstoffarme Verbrennung muss der Sauerstoffgehalt in einem bestimmten möglichst niedrigen Bereich liegen. Der Sauerstoffregelbereich hängt von zahlreichen Faktoren wie beispielsweise der Betriebsphase (Anfahr- und Regelbetriebsphase, Ausbrand, Nachbeschicken usw.), der Konstruktion des Heizkessels und den verbrennungstechnischen Eigenschaften des Brennstoffs ab. Aus sicherheitstechnischen Gründen werden die Heizkessel in der Regel mit einem höheren Sauerstoffgehalt (bis 12 Vol.-%) betrieben als für die effizienteste Verbrennung (< 5 Vol.-% bei gut konstruierten Heizkesseln) im Biomasseheizkessel erforderlich ist, wodurch eine größere Bandbreite der Brennstoffe bzw. Betriebsfälle im Praxisbetrieb abgedeckt werden können. Mit dieser Regelstrategie (Regelung mit hohem Sauerstoffgehalt im Abgas) können zwar die Emissionsgrenzwerte in vielen Betriebsfällen eingehalten werden, jedoch ist die Verbrennungseffizienz deutlich niedriger als diese technisch zu realisieren ist.

Die Aussagekraft des Sauerstoffgehalts im Abgas als Indikator für die Verteilung sowie für die zur Verbrennung verfügbare Sauerstoffmenge hängen stark von der Durchmischung bzw. den Strömungsverhältnissen in der aktiven Reaktionszone sowie der Dichtigkeit bzw. Luftleckage im Heizkessel ab. Luftleckagen führen zur Verfälschung des Sauerstoffgehalts in der aktiven Reaktionszone, wobei der Verbrennungsprozess ohne Erkennungsmöglichkeit in Sauerstoffmangel gerät. Das Gleiche gilt bei einer ungünstigen Konstruktion des Brennraums sowie der Nachbrennkammer, wobei nicht nur Sauerstoffmangel herrscht, sondern auch kalte Stellen aufgrund ungünstiger Temperatur- und Strömungsverteilung gebildet werden können. Sowohl beim Sauerstoffmangel als auch bei einem hohen Sauerstoffüberschuss entstehen hohe Schadstoffkonzentrationen mit entsprechenden Wärmeverlusten. Die Abgasverluste verhalten sich proportional zum Sauerstoffgehalt und zur Temperatur im Abgas. Bei sinkendem Sauerstoffgehalt im Abgas nehmen zwar die Abgasverluste (Verluste durch freie Wärme) ab, hingegen steigen aber die chemischen Verluste unter einem bestimmten Sauerstoffgehalt (< 3,5 Vol.-% bei gut konstruierten Brennkammern) exorbitant an.

5.1.3 Betriebssicherheit

Zusätzlich zur thermischen Leistung und der Verbrennungsqualität stellt die Betriebssicherheit den wichtigsten Aspekt bei der Regelung des Verbrennungsprozesses dar und spielt eine ausschlaggebende Rolle bei der Zulassung der Verbrennungstechnik gemäß DIN EN 303-5 sowie der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG. Potenzielle Gefährdungen durch den

Heizkessel einschließlich des Verbrennungsbetriebs und der Beschickungseinrichtung sind entweder durch konstruktive Maßnahmen oder regelungstechnisch durch die Verwendung von Sicherheitseinrichtungen zu vermeiden. Bei möglichen Ausfällen der Sicherheitseinrichtung muss die Sicherheit weiterhin gewährleistet werden. In Bezug dessen muss vom Hersteller eine Risikobewertung aller möglichen Gefährdungen durch den Heizkessel vorgenommen und in einem Sicherheitskonzept die Maßnahmen zu deren Vermeidung oder Überwachung beschrieben sein. Die Regel- und Steuerfunktionen im Sicherheitskonzept müssen entsprechend klassifiziert und realisiert sein. Die Risikobewertung muss nach EN ISO 12100 mit spezieller Berücksichtigung der Kesselausführung und des verwendeten Brennstoffs durchgeführt werden.

Die Sicherheitsklassen der Regel- und Steuerfunktionen sind gemäß DIN EN 303-5 in drei unterschiedliche Kategorien zu definieren:

- **Klasse A:** Regel- und Steuerfunktionen, die hinsichtlich der Sicherheit nicht verlässlich sind.
- **Klasse B:** Regel- und Steuerfunktionen, die dazu vorgesehen sind, einen unsicheren Zustand zu verhindern. Ein Versagen der Regel- und Steuerfunktionen führt nicht unmittelbar zu einer gefährlichen Situation. Die Fehler der Regel- und Steuereinrichtung, einschließlich der Verwendung der Software-Klasse B nach EN 60730-1 müssen von Herstellern entsprechend bewertet werden.
- **Klasse C:** Regel- und Steuerfunktionen, die für die Vermeidung besonderer Gefährdungen, wie z. B. Explosionen, vorgesehen sind, oder deren Ausfall direkt zu einer Gefährdung führen kann. Es ist eine Bewertung von zwei unabhängigen Fehlern der Regel- und Steuereinrichtung, einschließlich der Verwendung der Software-Klasse C, nach EN 60730-1 erforderlich.

Wenn die Sicherheitsfunktionen durch eine programmierbare elektronische Regel- und Steuereinrichtung realisiert werden, so muss die Software den Anforderungen der entsprechenden Software Klasse B und C (einschließlich Fehlerbewertung nach EN 60730-2-5 in Verbindung mit EN 60730-1) entsprechen.

Die Risikobewertung muss zusätzlich zur Kesselfunktion einschließlich Anlauf, Durchlüftung, Zündung, Flammenüberwachung, Abgasstrom, Regelung des Wärmebedarfs und Verbrennungsregelung mindestens Folgendes abdecken:

- Sicherheit gegen Rückbrand für automatische Heizkessel,
- Sicherheit gegen Brennstoffüberfüllung oder Unterbrechung der Brennstoffzufuhr,
- Sicherheit gegen Verbrennungsluftmangel oder unvollständige Verbrennung,
- Oberflächentemperaturen,

- Heizgasseitige Dichtheit,
- Temperatur-, Regel- und Begrenzungseinrichtungen.

Bei der Risikobewertung ist jeder festgestellten Gefährdung eine der oben genannten Sicherheitsklassen der Regel- und Steuerfunktion zuzuordnen. Die Auslösung einer Sicherheitsfunktion der Klasse B oder Klasse C muss mindestens zu einer Unterbrechung der Brennstoffzufuhr führen.

Es ist zu erwähnen, dass unterschiedliche firmenspezifische Regler für die Regelung der thermischen Leistung sowie der Verbrennungsqualität in Biomasseheizkesseln existieren. Zwar ist eine präzise Beschreibung dieser Regler nicht möglich, jedoch funktionieren diese gemäß der oben dargestellten Regelphilosophie mit den beschriebenen Effekten der Wärmeverluste während der Verbrennung.

5.2 Nachteile der Regelung mit der Sauerstoffsonde (Lambda-Sonde)

Obwohl sich die Regelung mit der Lambda-Sonde, Abgastemperatur- und Kesseltemperaturfühlern sowie Abgasdrucksensoren etabliert hat und einen wissenschaftlichen und technischen Sprung im Bereich der Biomasseverbrennungstechnik darstellt, weisen auf diesen Regelgrößen basierende Regelkonzepte folgende Nachteile auf:

- Der meistens im Abgasstutzen durch die Lambda-Sonde erfasste Sauerstoffgehalt im Abgas entspricht häufig nicht dem Sauerstoffüberschuss in der aktiven Reaktionszone. Es ist grundsätzlich mit Luftleckagen und fehlerhaften bzw. inkonsequenten Einstellungen der Verbrennungsluftzufuhr zu rechnen. Die Luftleckagen hängen von dem technischen Zustand sowie von der Qualität und Verarbeitung des Heizkesselmaterials ab.
- Der optimale Sauerstoffgehalt im Abgas (Lambda-Wert) für eine vollständige Verbrennung hängt von der Konstruktion der Brenn- und Nachoxidationskammer, Dichtheit der gesamten Abgaswege sowie von den verbrennungstechnischen Eigenschaften des eingesetzten Brennstoffs, vor allem bezüglich des Vergasungsverhaltens ab. Ein Verbrennungsprozess mit einem festen Lambda-Wert zu regeln ist nur unter bestimmten Bedingungen und mit geringerer Flexibilität hinsichtlich der Variationen der Prozessbetriebsparameter möglich.
- Die Lambda-Sonde liefert bei einer unvollständigen Verbrennung (ab ca. 0,5 Vol.-%) falsche Signale für die Regelung. Der Einfluss der unvollständigen Verbrennung auf die Genauigkeit der Lambda-Sonde lässt sich beispielsweise in der Anfahrbetriebsphase von handbeschickten Biomasseheizkesseln deutlich erkennen (Diagramm 12). In der Anfahrbetriebsphase entsteht aufgrund niedriger Temperaturen unvermeidbar eine unvollständige Verbrennung mit hohen Konzentrationen an Schadstoffen. Die nicht verbrannten Bestandteile lagern sich durch unterschiedliche physikalische Prozesse

an der Lambda-Sonde ab und werden anschließend bei hohen Temperaturen an der beheizten Sonde (> 650 °C) thermisch zersetzt. Da bei der thermischen Zersetzung an der Lambda-Sonde Sauerstoff verbraucht wird, wird ein niedrigerer Sauerstoffgehalt im Abgas angezeigt als tatsächlich im Abgas vorhanden ist.

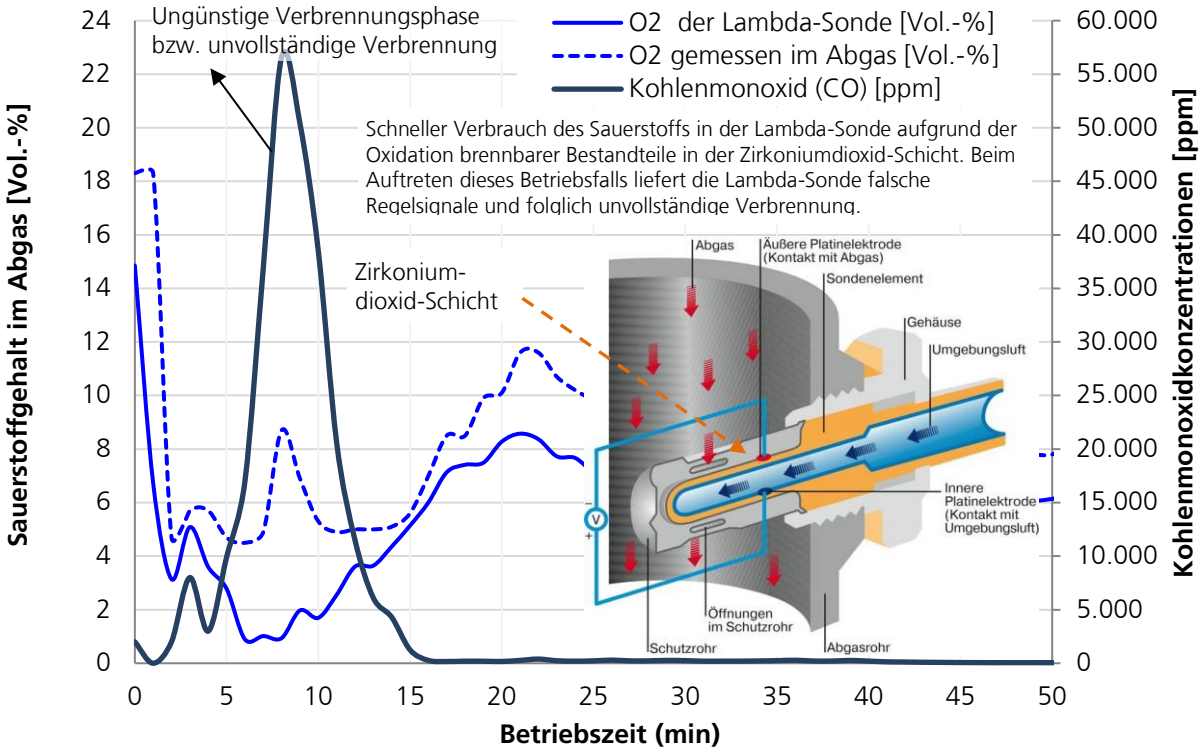

Diagramm 12: Messtechnisches Verhalten der Lambda-Sonde bei unvollständiger Verbrennung.

- Der optimale Sauerstoff-Sollwert für eine sachgemäße Verbrennung variiert stark in Abhängigkeit von der Art und den verbrennungstechnischen Eigenschaften des Brennstoffs sowie von den Strömungsverhältnissen während der Verbrennung. Die Einstellung des Sauerstoff-Sollwerts gemäß dem Brennstoff ist nicht praktikabel bis unmöglich, um eine sachgemäße Verbrennung über den gesamten Abbrandzyklus zu gewährleisten.
- Mit dem gemessenen Sauerstoffgehalt in der Abgasanlage können keine Rückschlüsse auf die Verbrennungsqualität gezogen werden. In vielen Betriebsfällen kann zwar der günstige durch die Hersteller ermittelte Sauerstoffgehalt (Sauerstoff-Sollwert) eingestellt werden, trotzdem findet dabei eine unvollständige Verbrennung statt. Solche Betriebsfälle kommen beim Einsatz ungünstiger Brennstoffe oder bei einer nicht erfolgreichen Anzündung des Brennstoffs in der Anfahrbetriebsphase vor.

Zwar ist der Sauerstoffgehalt im Abgas eine sehr wichtige Regelgröße, jedoch ist das Signal aus der Lambda-Sonde für die Regelung der Verbrennung besonders in Biomasseheizkesseln aus ökologischen und

ökonomischen Gründen nicht ausreichend. Da die Regelung in herkömmlichen Biomasseheizkesseln auf den Sauerstoffsignalen der Lambda-Sonde basiert, wird durch die Aktoren bei den dargestellten Messfehlern fälschlicherweise mehr Verbrennungsluft in die Biomasseheizkessel zugeführt, sodass sowohl höhere Konzentrationen an Schadstoffen als auch eine geringere Effizienz entstehen. Für den Verbraucher entstehen aufgrund der geringen Effizienz ein höherer Verbrauch und folglich höhere Brennstoffkosten, um den Energiebedarf im Gebäude weiterhin decken zu können.

Die regelungstechnischen Probleme für die Einstellung einer effizienten und schadstoffarmen Verbrennung in Biomasseheizkesseln lassen sich nur mit einer zusätzlichen Regelgröße (dem sogenannten CO_e-Signal bzw. Kohlenstoffmonoxid-Äquivalent) vermeiden, wobei für die Regelung des Sauerstoffgehalts im Abgas nicht nur der Gehalt an Sauerstoff, sondern auch an nicht verbrannten Bestandteilen im Abgas berücksichtigt werden. Zum Detektieren des Gehaltes der nicht verbrannten Bestandteile im Abgas bietet sich die O_2/CO_e-Sonde der Firma LAMTEC Mess- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG an. Diese Sonde mit einer entsprechenden Regelung wurde erfolgreich in Gas- und Ölfeuerungsanlagen eingesetzt. Bisher hat sich diese Art der innovativen Regelung in Biomasseheizkesseln trotz hohem Potential sowohl für die Schadstoffminderung als auch für die Effizienzerhöhung nicht etabliert.

Der Hauptnachteil der heutigen Regelungen (Regelung mit Lambdasonde sowie Temperatur- und Drucksensoren) liegt darin, dass eine gute Verbrennungsqualität nur in bestimmten Betriebszuständen und beim Einsatz bestimmter Brennstoffe gewährleistet wird. Außerdem kann der Betrieb hinsichtlich der Erhöhung der Verbrennungseffizienz nicht gezielt geregelt werden.

5.3 Wärmeverluste beim Betrieb von Biomasseheizkesseln (während der Wärmeproduktion)

Die Effizienz von Heizkesseln wird nach DIN EN 303-5 über die sogenannte direkte Methode berechnet und als Kesselwirkungsgrad angegeben. Zur Überprüfung der Ergebnisse kann der Kesselwirkungsgrad auch über eine sogenannte indirekte Methode berechnet werden. Die beiden Berechnungsmethoden für die Bestimmung des Kesselwirkungsgrads in Heizkesseln sind im Abschnitt 3.2 ausführlich beschrieben.

Für die Berechnung des Wirkungsgrads werden folgende Wärmeverluste berücksichtigt:

- Wärmeverluste durch freie Wärme im Abgas q_A,
- durch unvollständige Verbrennung q_B (chemische Verluste),
- Wärmeverluste durch den nicht verbrannten Brennstoffanteil q_U in den Verbrennungsrückständen,
- Wärmeverluste durch Strahlung und Konvektion q_S.

Zur Ermittlung der Verbrennungseffizienz spielen die Wärmeverluste durch die Strahlung und die Konvektion keine Rolle und werden somit nicht berücksichtigt. Die Verbrennungseffizienz beschreibt den Anteil der umgewandelten Energie des Brennstoffs, welcher durch die Verbrennung in Form von Wärme vorliegen kann und sich über Wärmetransportvorgänge (Leitung, Konvektion und Strahlung) übertragen und nutzen lässt. Der Wirkungsgrad des Heizkessels beschreibt lediglich den Anteil der Wärme, der vom Wärmeübertrager an das Kesselwasser übertragen und zur Nutzung bereitgestellt wird. Die Verluste durch Strahlung und Konvektion hängen überwiegend von der Konstruktion und den eingesetzten Materialien im Heizkessel ab. Sie können daher nur durch konstruktive Maßnahmen wie beispielsweise bessere Wärmedämmung, Warmwasser- und Abgasführung im Heizkessel gemindert werden.

Die Wärmeverluste durch freie Wärme bilden den größten Anteil der Gesamtwärmeverluste bei der thermischen Umsetzung bzw. Nutzung von Biomasse in Heizkesseln und verhalten sich proportional zur Menge sowie zur Temperatur des Abgases. Die minimale Abgasmenge ergibt sich aus einer stöchiometrischen Verbrennung, bei der der Sauerstoffüberschuss im Abgas gleich Null (entspricht Lambda = 1) ist bzw. der höchste Gehalt an Kohlenstoffdioxid CO_2 (je nach Holzart zwischen 19,6 Vol.-% bis 21,0 Vol.-%) erreicht wird. Bei der Verbrennung von Biomasse ist eine stöchiometrische Verbrennung gemäß dem Stand der Technik nicht möglich. Um die Verbrennung mit möglichst niedrigem Sauerstoffüberschuss (Sekundärluft) zu betreiben, soll eine sehr gute Durchmischung der Sekundärluft mit den Brenngasen in der aktiven Reaktionszone im Heizkessel gewährleistet werden. Gemäß dem Stand der Technik wird ein Lambda-Wert zwischen 1,50 und 2,20 (entspricht einem Sauerstoffüberschuss von ca. 7 Vol.-% und 12 Vol.-%) während der Verbrennung eingestellt, um dem Verbrennungsprozess unabhängig vom Brennstoff und der Betriebsdynamik zureichend Sauerstoff zuzuführen. Das Diagramm 13 zeigt die Wärmeverluste des Abgases durch freie Wärme in Abhängigkeit von der Abgastemperatur sowie dem Sauerstoff- bzw. Kohlenstoffdioxidgehalt im Abgas. Diesem Diagramm ist zu entnehmen, dass die Wärmeverluste mit zunehmenden Abgastemperaturen sowie erhöhtem Sauerstoffgehalt im Abgas bzw. höherer Abgasmenge ansteigen.

Gemäß dem Stand der Technik variieren die Wärmeverluste durch freie Wärme stark über den gesamten Betrieb des Heizkessels sowie von einem zum anderen Heizkessel. Bei veralteten sowie schlecht konstruierten Heizkesseln können sie im Praxisbetrieb auf bis zu 24 % ansteigen.

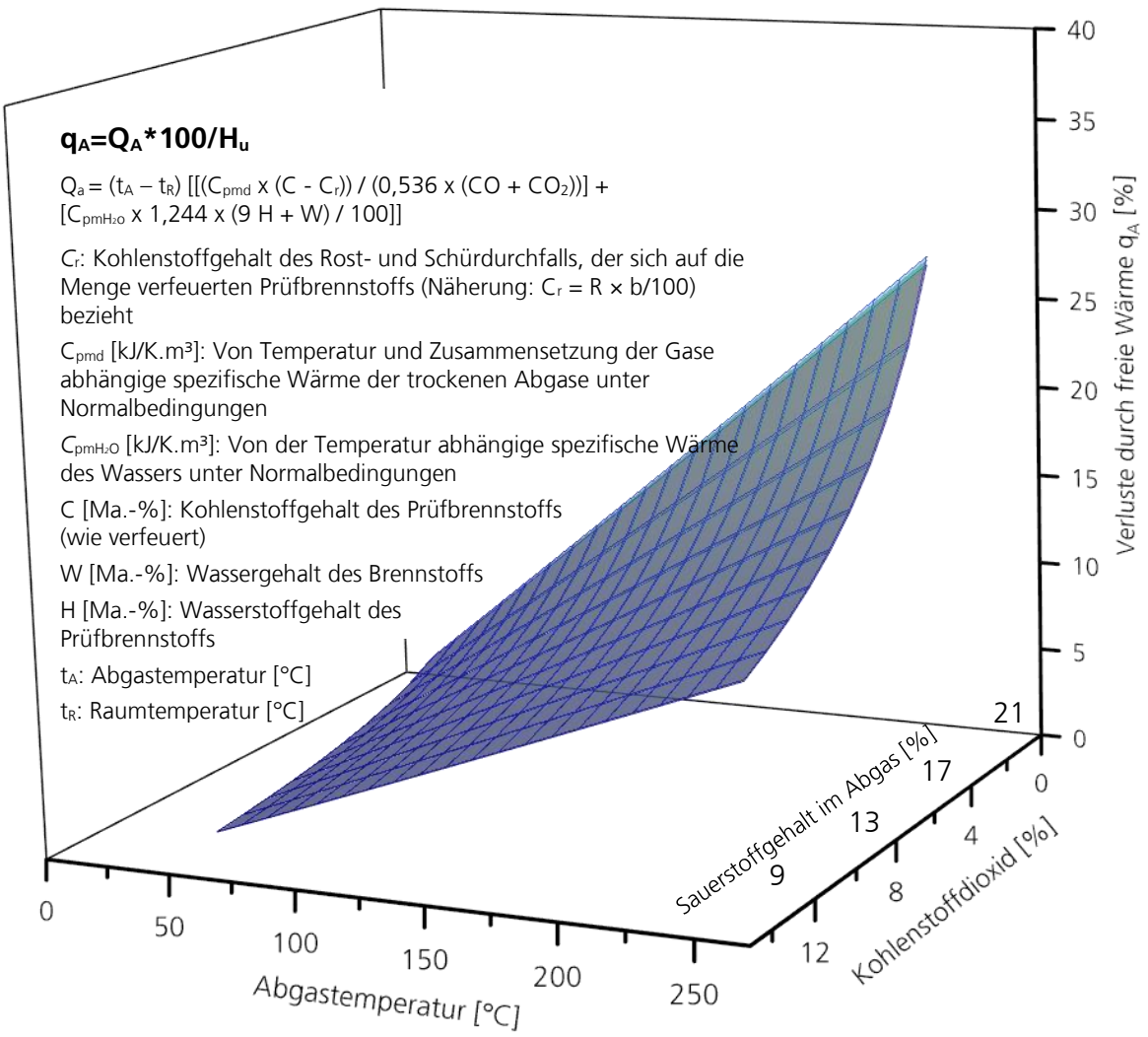

Diagramm 13: Verluste durch freie Wärme im Abgas in Abhängigkeit von der Temperatur und Konzentration an Kohlenstoffdioxid CO_2 im Abgas.

Eine weitere Form der Wärmeverluste stellen die chemischen Verluste dar, die aufgrund unvollständiger Verbrennung entstehen. In der Regel werden diese Verluste näherungsweise über den Gehalt an das Kohlenstoffmonoxid berechnet. Gemäß den normativen Gleichungen wird der Energiegehalt von anderen nicht verbrannten Bestandteilen im Abgas wie beispielsweise Kohlenwasserstoffen und nicht verbrannten Stäuben für die Berechnung der chemischen Verluste nicht berücksichtigt. Im Diagramm 14 sind die chemischen Verluste in Abhängigkeit vom Gehalt des Kohlenstoffmonoxids im Abgas bei unterschiedlichen Gehalten an Kohlenstoffdioxid dargestellt.

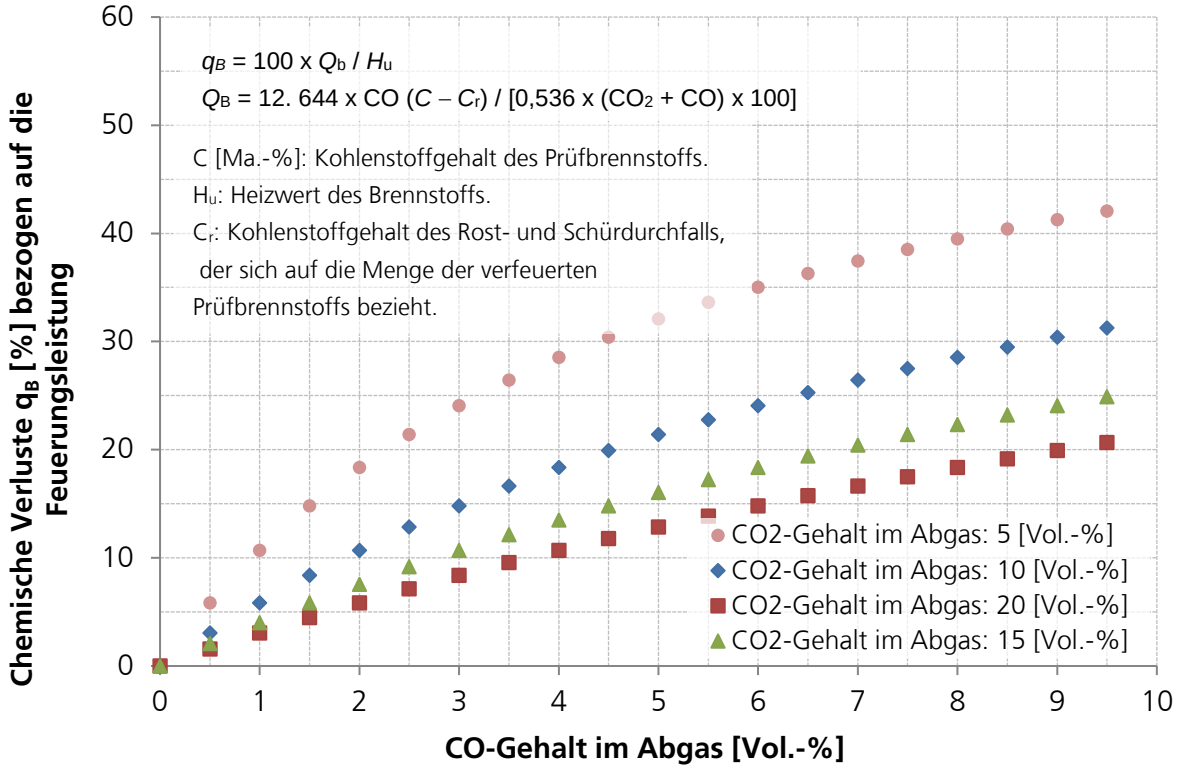

Diagramm 14: Normative Berechnung der chemischen Verluste bei der Verbrennung in Biomasseheizkesseln.

Im Diagramm 14 ist ersichtlich, dass sich die chemischen Verluste näherungsweise proportional zum Gehalt an Kohlenstoffmonoxid bzw. zu den nicht verbrannten Abgasbestandteilen verhalten und mit abnehmendem Gehalt an Kohlenstoffdioxid aufgrund ineffizienter thermischer Umsetzung des Kohlenstoffs im Brennstoff ansteigen. Beispielsweise betragen die chemischen Verluste bei einem CO-Gehalt von 2 Vol.-% und einem CO_2-Gehalt von 15 Vol.-% ca. 5 %. Sinkt dabei der CO_2-Gehalt auf 5 Vol.-% steigen die chemischen Verluste hingegen auf 18 % an. Wie oben erwähnt, wurde bei der Erstellung vom Diagramm 14 nur der Gehalt des Kohlenstoffmonoxids berücksichtigt. Bei hohen Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid steigen die chemischen Verluste durch die anderen nicht verbrannten Abgasbestandteile wie z. B. Methan, Propan exorbitant an. Beispielsweise entsteht bei einer unvollständigen Verbrennung mit einem CO-Gehalt von 0,5 Vol.-% mehr als 0,22 Vol.-% Propan-Äquivalent, welches ca. einen fünffach höheren Heizwert besitzt als Kohlenstoffmonoxid. Dadurch entstehen deutlich höhere chemische Verluste als anhand der normativen Formeln berechnet bzw. im Diagramm 14 dargestellt sind. Zusätzlich zu den oben dargestellten Wärmeverlusten, welche bei der Wärmeproduktion zustandekommen, treten auch Wärmeverluste (Kessel-Standby-Verluste, Pufferspeicher-Standby-Verluste) bei der Wärmenutzung auf. Diese Art von Verlusten lässt sich nur durch intelligente Wärmemanagementsysteme, welche eine bedarfsgerechte Wärmeproduktion gewährleisten, umsetzen.

5.4 Reduzierung der effizienzrelevanten Wärmeverluste in Biomasseheizkesseln

Über 97 % der gesamten Wärmeverluste bei der Verbrennung in Biomasseheizkesseln ergeben sich aus den chemischen sowie Wärmeverlusten durch die freie Wärme im Abgas. Zur Minderung dieser Verluste kommen konzeptionelle, konstruktive sowie regelungstechnische Maßnahmen zum Einsatz.

Die Minderung der Wärmeverluste durch die freie Wärme im Abgas erfolgt durch die Reduzierung der Abgasmenge bzw. des Sauerstoffüberschusses sowie der Abgastemperatur. Die Reduzierung des Sauerstoffüberschusses im Abgas und somit die Abgasmenge kann sowohl durch konstruktive zur Verbesserung der Durchmischung des Brenngases mit der Verbrennungsluft als auch regelungstechnische Maßnahmen erfolgen. Die Einstellung eines niedrigen Lambda-Werts mit guter Verbrennungsqualität lässt sich nur mit einer intelligenten Regelung mit entsprechenden hochdynamischen Aktoren (beispielsweise Gebläse statt Belimoluftklappen) und neuartigen Sensoren wie z. B. O_2/CO_e-Sensor realisieren, so dass dadurch der Sauerstoffgehalt nicht nur schnell angepasst, sondern auch möglichst niedrig eingestellt werden kann, ohne die Verbrennung in Sauerstoffmangel geraten zu lassen. Typische konstruktive Maßnahmen sind die Zyklonbrennkammer sowie die Einbautentechnik des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP, bei denen der Verbrennungsprozess aufgrund der intensiven Durchmischung mit einer geringeren Verbrennungsluft- und folglich Abgasmenge betrieben werden kann. Beim Einsatz der Zyklonbrennkammer mit der Einbautentechnik kann die Verbrennung mit einem Lambda-Wert von kleiner als 1,2 problemlos betrieben werden [Aleysa et al. 2017]. Wärmeverluste durch die freie Wärme im Abgas können außerdem durch konzeptionelle Maßnahmen reduziert werden. Die gestufte Verbrennung mit Abgasrückführung gemäß dem GVAGR-Konzept des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP stellt eine neuartige Methode für eine effiziente und schadstoffarme Verbrennung dar. Bei diesem Konzept wird der Verbrennungsprozess mit heißem Abgas (O_2 < 10 Vol.-%, T > 400 °C) statt mit Primärluft betrieben, wodurch nicht nur die Abgasmenge bis 42 %, sondern auch die NO_x-Emissionen bis 56 % reduziert werden sollen. Dieses Konzept befindet sich noch in der Erforschung. Die ersten Voruntersuchungen haben erfolgsversprechende Ergebnisse gezeigt.

Die Minderung der chemischen Verluste im Abgas erfolgt durch die Optimierung der Verbrennung. Jede Maßnahme dient für die Vollständigkeit und für die Stabilisierung der Verbrennung und führt zur Minderung der chemischen Verluste. Dabei sind sowohl regelungstechnische als auch konstruktive Maßnahmen zu nennen. Die Zyklonbrennkammer sowie die Einbautentechnik zählen zu den günstigsten und effektivsten konstruktiven Maßnahmen, mit denen eine vollständige Verbrennung gewährleistet werden kann.

Die Zyklonbrennkammer agiert sowohl als hocheffektive Brennkammer als auch als Feinstaubabscheider. Die besondere Leistung der

Zyklonbrennkammer für eine effektive Oxidation sowie für die Feinstaubabscheidung ergibt sich aus der Begünstigung der Mischungs- - und Agglomerationsmechanismen. Aufgrund einer intensiven Durchmischung der Brenngase mit der Sekundärluft sowie der Verlängerung der aktiven Verweilzeit unabhängig von der Menge des Gasgemischs (Brenngas- und Sekundärluftmenge) während der Verbrennung wird nicht nur eine geringere Sekundärluftmenge benötigt, sondern auch eine nahezu vollständige Verbrennung gewährleistet. Dadurch werden sowohl die Wärmeverluste durch freie Wärme im Abgas als auch die chemischen Verluste reduziert. In der Zyklonbrennkammer erfolgt außerdem eine Vorabscheidung grober und feiner Staubpartikel. Staubpartikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von bis zu 10 µm lassen sich bis zu 90 % dank der effektiven Agglomerationsmechanismen (thermische, elektrostatische und turbulente Agglomeration sowie Agglomeration durch Gradienten) in der Zyklonbrennkammer abscheiden. Durch die Abscheidung der Verbrennungsaschen und – stäube wird eine schnelle Belegung des Wärmeübertragers mit Verbrennungsasche vermieden, wodurch ein besserer Wärmeaustausch und somit hoher Kesselwirkungsgrad bzw. niedriger Wärmeverlust über eine längere Betriebszeit ohne notwendige Kesselreinigung durch den Bediener gewährleistet wird. Weitere Vorteile der Zyklonbrennkammer bestehen in der Erhöhung der Modulierbarkeit der thermischen Leistung sowie in der Vermeidung der Kurzschlussströmung im Brennkammerbereich bei kleineren Abgasvolumenströmen.

Die Einbautentechnik agiert als thermischer Oxidationsreaktor und gewährleistet eine vollständige Verbrennung, unabhängig von den Störungen bzw. der Dynamik des Vergasungsprozesses. Dabei wird für die Funktion keine externe Energie zugeführt. Die für die Oxidation benötigte Energie wird während der Verbrennung im Einbautenmodul gespeichert und für die Oxidation in den kritischen Betriebsphasen wie z. B. im Teillastbetrieb sowie in der Ausbrandphase automatisch bereitgestellt. Durch den Einsatz der Einbautentechnik wird die aktive Reaktionszone durch die Intensivierung der Durchmischung, die Homogenisierung sowie die Stabilisierung der Temperatur vergrößert, wodurch eine vollständige Verbrennung mit geringeren chemischen Verlusten unabhängig von der Dynamik des Vergasungsprozesses stattfinden kann. Ein besonderer Vorteil der Einbautentechnik liegt darin, dass schweroxidierbare Abgasbestandteile (Aerosole, Ruß und Kohlenwasserstoffe) aufgrund intensiver Durchmischung und ständig höherer homogener Temperaturen vollständig oxidiert werden können.

Die Wärmeverluste durch die nicht verbrannten Brennstoffbestandteile in den Verbrennungsrückständen sind in der Regel sehr gering und machen weniger als 3 % der gesamten Wärmeverluste (entspricht weniger als 1% von der gesamten Verbrennungseffizienz) aus. Ausgenommen davon sind Brennstoffe mit sehr niedrigen Ascheerweichungstemperaturen, bei denen aufgrund des ungünstigen Agglomerations- und Anbackungsverhaltens ein Teil vom Brennstoff mit den erweichten bzw. geschmolzenen Verbrennungsrückständen im heißen Feuerraumbereich bedeckt wird und

nicht effizient reagieren kann. In diesem Fall können die Wärmeverluste bis zu 35 % ansteigen. Um die Bildung von Anbackungen bzw. Brennstoffverschlackungen im Feuerraum zu vermeiden, können wassergekühlte Verbrennungsroste oder mehrstufige Verbrennungskonzepte verwendet werden. Wärmeverluste durch den Rost- und Schürdurchfall können nur durch die Verbesserung der Rosttechnik bzw. durch die Verringerung der Luftspalte zwischen den Rostelementen bzw. Feuerraumwänden vermieden werden. Bei beweglichen Rosten soll das Brennstoffördersystem (Brennstoffschubgeschwindigkeit, Taktungsintervalle usw.) sowie die Bewegungsweite mit der Geschwindigkeit der Rostelemente entsprechend eingestellt werden, so dass unter Zugabe der Rostluft ein sachgemäßer Abbrand ohne erhöhte Emissionen gewährleistet werden kann.

5.5 Einflussfaktoren auf den Betrieb von Biomasseheizkesseln in der Praxis

Im Gegensatz zur Verbrennung von flüssigen und gasförmigen Brennstoffen wird die Verbrennung von Festbrennstoffen wie Biomasse nicht nur von der Verbrennungstechnik, sondern auch maßgeblich von der Art des Brennstoffs sowie von dem Betreiber beeinflusst. Für eine sachgemäße Verbrennung im Biomasseheizkessel müssen diese drei Faktoren (Brennstoff, Verbrennungstechnik und Betreiber) positiv zusammenwirken, ansonsten entsteht eine unvollständige Verbrennung mit zahlreichen Schadstoffemissionen.

Die Verbrennungstechnik hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Schadstoffbildung sowie auf den Wirkungsgrad während des Betriebs. Die technischen Anforderungen an die Verbrennungstechnik bzw. an die automatisch und handbeschickten Biomasseheizkessel sind in der Norm DIN EN 303-5 sowie in der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG festgelegt und messtechnisch nur auf dem Prüfstand während der Typprüfung zu betrachten. Die permanente Überwachung der technischen Funktionalität der Verbrennungstechnik im Praxisbetrieb steht bislang aus, obwohl sie außerordentlich wichtig ist, um technische Betriebsfehler zu erkennen und möglichst schnell zu beseitigen. In der Regel ergeben sich diese Fehler aus defekten Aktoren, Sensoren und aktiven Bestandteilen bzw. aus einer Materialermüdung, mangelhafter Produktion oder Installation der Verbrennungstechnik.

Die für den Einsatz in Kleinfeuerungsanlagen erlaubten Brennstoffe sind im § 3 der 1. BImSchV aufgelistet. Diese Brennstoffe sind untersucht und sollen bei einer vollständigen sachgemäßen Verbrennung kaum Schadstoffemissionen (CO, PAKs, VOCs, Feinstaub) bilden. Spurengase wie z. B. SO_2, HCl, HF, NO_x und Schwermetalle sollen dabei nur in sehr geringen Mengen entstehen können, wobei sie ein vernachlässigbares Potential bei der gesamten Schadstoffbilanzierung aufweisen.

Bisher ist der Einfluss des Betreibers auf den Betrieb von Kleinfeuerungsanlagen nicht geregelt bzw. zu erkennen, obwohl er durch

sein Verhalten sowohl den Brennstoff als auch die Verbrennungstechnik (insbesondere durch die Bedienung und die Wartung) maßgeblich beeinflussen kann. Aufgrund dieser Doppelbeeinflussung soll die Regelung des Betreiberverhaltens maßgeblich zu einer effizienten und umweltverträglichen Energiebereitstellung beitragen.

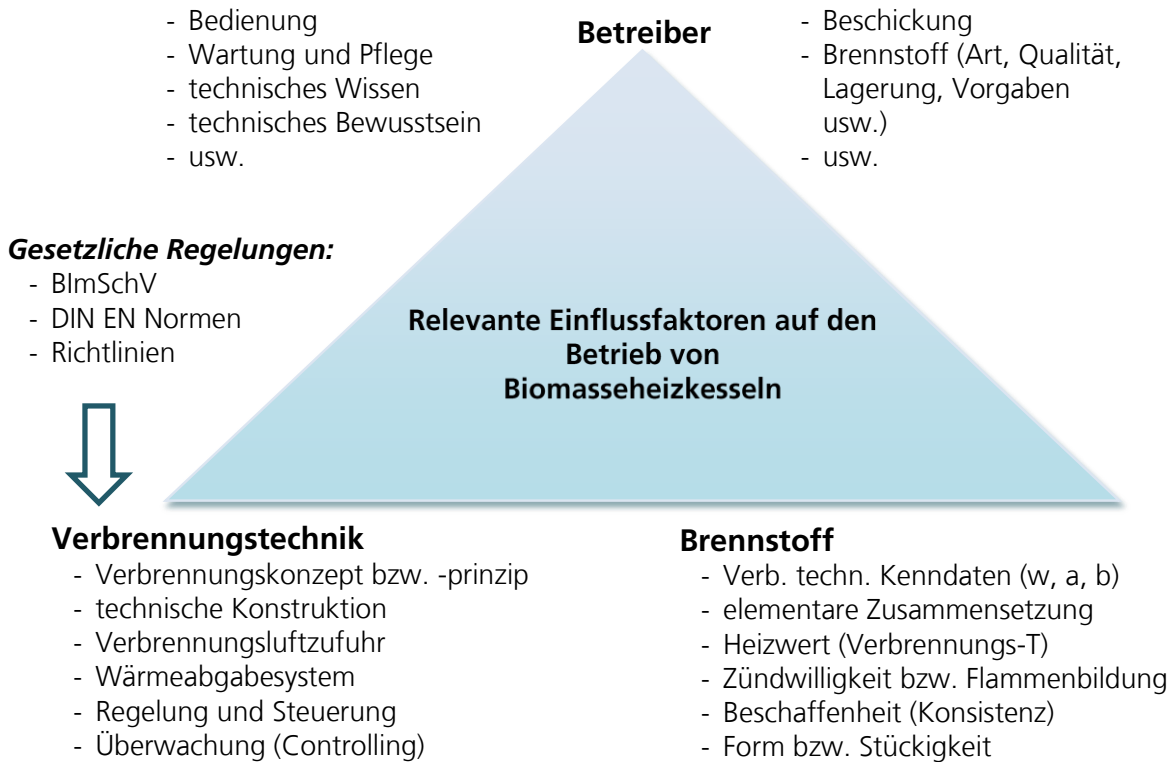

Abbildung 2: Relevante Einflussfaktoren auf den Betrieb von Biomasseheizkesseln.

Die positive Beeinflussung des Betreiberverhaltens lässt sich durch die permanente Überwachung der Feuerungsanlage erreichen, bei der die Qualität der Verbrennung zu jedem Zeitpunkt des Betriebs erkannt und erfasst wird. Dadurch wird der Betreiber verantwortungsbewusst und sorgfältig - sowohl mit dem Brennstoff als auch mit der Verbrennungstechnik - umgehen und alle betrieblichen Anforderungen sachgemäß berücksichtigen.

6 VREM-System zur regelungstechnischen Optimierung und kontinuierlichen Überwachung von Biomasseheizkesseln

Bei dem VREM-System handelt es sich um eine neue Software, die für die drei folgenden Hauptaufgaben entwickelt wurde:

- Regelungstechnische Verbesserung des Verbrennungsprozesses, wobei sowohl eine schadstoffarme als auch hocheffiziente Verbrennung unabhängig von den eingesetzten Brennstoffen im Praxisbetrieb erreicht werden soll.
- Eine permanente Überwachung und Bewertung des Betriebs bzw. des Verbrennungsprozesses, sodass Fehlbedienungen z. B. aufgrund des Einsatzes falscher Brennstoffe oder durch technische Fehler an der Verbrennungstechnik frühzeitig erkannt und folglich eine niedrige Verbrennungseffizienz sowie erhöhte Emissionen über eine lange Betriebszeit vermieden werden können.
- Eine kontinuierliche Emissionsüberwachung bzw. Bewertung der Verbrennungsqualität durch die Messung des Gehalts an nicht verbrannten Abgasbestandteilen als Summenparameter (sogenannte CO-Äquivalente) anhand der O_2/CO_e-Sonde.

Das VREM-System wurde sowohl für hand- als auch automatisch beschickte Biomasseheizkessel erfunden. Durch die Kombination der Regelung mit der Überwachung kann die Wärmebereitstellung durch Biomassefeuerungsanlagen über das gesamte Jahr ökologischer und ökonomischer erfolgen. Aus ökologischer Sicht soll durch die permanente Überwachung eine deutliche Minderung der Schadstoffemissionen erreicht werden, welche bei der Verbrennung in Biomasseheizkesseln durch falsches Bedienerverhalten, ungeeignete Brennstoffe sowie Fehler in der Verbrennungstechnik entstehen. Mit dem Einsatz des VREM-Systems können diese Fehler innerhalb kürzester Zeit an die Betreiber und Externe (z. B. Wartungsdienstleister, Schornsteinfeger oder Umweltbehörden) gemeldet werden. Anschließend können diese Fehler entweder durch den Betreiber oder geschultes Fachpersonal behoben werden. Durch die Regulierung des Betreiberverhaltens kann eine hohe Verbrennungseffizienz (> 94 %) im Dauerbetrieb in der Praxis erreicht werden.

6.1 Überwachungs- und regelungstechnische Methodik des VREM-Systems

Bei dem VREM-System des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP handelt es sich um eine neue Technologie bzw. Methodik für die Verbesserung der Regelung und die permanente Überwachung bei der Verbrennung in Biomasseheizkesseln. Diese Methodik beruht darauf, dass nicht nur reine momentane Sensorsignale wie gemäß dem Stand der Technik, sondern auch thermodynamische integrale Berechnungen für die Beschreibung und Regelung des Verbrennungsprozesses eingesetzt werden. Zusätzlich dazu werden die eingesetzten Aktoren (z. B. Gebläse, Klappen bzw. Verbrennungsluftzufuhrsystem und Schneckenförderer bzw. Brennstoffzufuhrsystem) für die Erkennung der Prozessgrenzen und somit

für eine sichere Regelung und Überwachung des Verbrennungsprozesses herangezogen.

Bei den eingesetzten Sensoren ist zwischen zwei Gruppen zu unterscheiden. Bei der ersten Gruppe handelt es sich um eine innovative O_2/CO_e-Sonde, die die Qualität der Verbrennung detektiert und entsprechende CO_e-Signale sowie O_2-Signale bereitstellt. Der Vorteil für den Einsatz der O_2/CO_e-Sonde beruht darauf, dass nicht nur der Sauerstoffgehalt im Abgas, sondern auch nicht verbrannte Schadstoffe (CO-Äquivalente bzw. CO_e) detektiert werden können, wodurch der Sauerstoffgehalt im Abgas während des Betriebs sukzessiv reduziert wird und folglich höhere Wirkungsgrade aufgrund der Minderung der chemischen Verluste und Abgasverluste (siehe Diagramm 13 und Diagramm 14) bei der Verbrennung erreicht werden können. Die zweite Sensorgruppe umfasst den Abgastemperatursensor, den Kesseltemperatursensor und den Drucksensor für die Messung des Unterdrucks im Heizkessel. Diese Sensorgruppe wird hauptsächlich für die Ermittlung der Dynamik (Entwicklung der Temperaturen und Schwankungen des Drucks über die Zeit) und Grenzen des Prozesses (maximal erlaubte Kesseltemperatur, maximal erlaubte Abgastemperatur, Unterdruck im Heizkessel) verwendet, wodurch der Verbrennungsprozess sicherer und zielführender geregelt werden kann.

Zusätzlich zu den Sensorgruppen werden die Aktoren für die Regelung sowie Überwachung des Verbrennungsprozesses eingesetzt. Hier werden über spezielle Schnittstellen und Programme der Leistungsstand (z. B. 10 % einer maximalen Drehzahl) sowie das Verhalten (Änderung der Leistung über die Zeit) der jeweiligen Aktoren studiert, wodurch prozentuale Werte für die Beschreibung ihrer Leistung generiert und für die Regelung bzw. vor allem die Überwachung eingesetzt werden. Ferner kommunizieren die Aktoren untereinander, so dass sie im günstigen Bereich ihrer Leistungen arbeiten, wodurch gefährliche und ungünstige Betriebszustände vermieden werden können. Außerdem werden für die Beschreibung des Verbrennungsprozesses und somit die Ermittlung von Betriebsfehlern feuerungstechnische und thermodynamische Berechnungen verwendet, wodurch die Systemgrenzen beschrieben und mathematisch dargestellt werden können.

6.2 Funktion der permanenten Überwachung mit dem VREM-System

Zu der Funktion des VREM-Systems gehört die regelungstechnische Verbesserung der Verbrennung hinsichtlich der Effizienzsteigerung als auch die Betriebs- und Emissionsüberwachung, welche gemäß dem Stand der Technik nur durch den Einsatz der O_2/CO_e-Sonde sinnvoll umgesetzt werden kann.

Die Emissionsüberwachung basiert auf der integralen Bewertung der CO_e-Signale, wobei überwacht wird, ob die CO_e-Konzentrationen (Konzentrationen aller brennbaren Bestandteile, die durch die O_2/CO_e-Sonde detektiert werden können) einen definierten Grenzwert mit einer bestimmten Logik (Überschreitungsfaktor, Überschreitungshäufigkeit und

Überschreitungsdauer) überschreiten. Mit diesem Grenzwert soll die Verbrennungsqualität beschreibbar sein, sodass zwischen sachgemäßer und nicht sachgemäßer Verbrennung unterschieden werden kann.

Für die Bewertung der Emissionen wird eine sogenannte FDH-Methode (Emissionsfaktor-, Überschreitungsdauer- und Überschreitungshäufigkeit-Methode) eingesetzt. Bei dieser Methode handelt es sich sowohl um ein einfaches qualitatives als auch quantitatives Bewertungsschema, wodurch die Verbrennung im Biomasseheizkessel für jede Betriebsstunde sowie beim Auftreten von Störungen bewertet werden kann. Bei dem Emissionsfaktor handelt es sich um einen absoluten Wert, der die nicht verbrannten Abgasbestandteile beschreibt, welche durch die O_2/CO_e-Sonde erfasst werden können. Gemäß den im Rahmen dieses Projekts gesammelten Erfahrungen beträgt dieser Wert ca. das 1,2-fache des CO-Grenzwerts gemäß der 1. BImSchV. Dieser Wert stellt die Grenzen zwischen der sachgemäßen und unsachgemäßen Verbrennung dar. Sollte der Wert des Emissionsfaktors während der Verbrennung überschritten werden, wird die Überschreitungsdauer anhand eines mathematischen Zeitzählers gemessen und dabei ein stündlicher Mittelwert der erfassten Emissionen gebildet. Wenn der Mittelwert über die Bewertungsdauer von einer Stunde während dieser Überschreitungsdauer den Emissionsfaktorwert nicht überschreitet, wird keine Emissionsüberschreitung über das System gemeldet. Ansonsten wird über das System eine Fehlermeldung versendet. Außerdem spielt die Überschreitungshäufigkeit (Anzahl der Überschreitungen pro Zeiteinheit) eine große Rolle bei der Emissionsüberwachung und somit Fehlermeldung durch das System, wobei sowohl langzeitige Überschreitungen als auch sehr häufige Überschreitungen pro Zeiteinheit betrachtet werden können.

Zur Bewertung des Betriebs gehören die Erkennung der Betriebsphasen (Anfahrbetriebsphase, Regelbetriebsphase, Ausbrand, Nachbeschickung, Gluthalten), Erkennung der Qualität des eingesetzten Brennstoffs, Berechnung der Verbrennungseffizienz, Betriebsstabilität sowie -sicherheit, technische Funktionalität der Sensoren sowie der Aktoren. Die Beschreibung der oben dargestellten Betriebsaspekte erfolgt durch statistische und betriebliche Analysen von den Verläufen, Trends und Korrelationen der Betriebsparameter wie z. B. Abgas-, Feuerraum und Kesseltemperatur, Druck im Feuerraum bzw. in der Abgasanlage, Sauerstoff- und Kohlenstoffdioxidgehalt. Dazu spielt die Bewertung des Betriebsverhaltens der Regelaktoren eine entscheidende Rolle für die Beschreibung des Verbrennungsprozesses. Beispielsweise beschreibt die minimale Einstellung des Primärluftaktors mit gleichzeitig maximaler Einstellung des Sekundärluftaktors einen typischen Betrieb beim Einsatz von sehr trockenen bzw. sehr feinen Brennstoffen, welche nicht unbedingt für den Einsatz in dieser Anlage geeignet sind. Eine entsprechende Meldung durch das Überwachungssystem erfolgt in diesem Fall bei einer langzeitigen Überschreitung des Grenzwerts.

Die Störungen, welche zu hohen CO_e-Konzentrationen bzw. einer nicht sachgemäßen Verbrennung führen können nicht nur erkannt, sondern auch

die Ursachen für die entsprechenden Störungen festgestellt werden. Außerdem ermöglicht die Betriebsüberwachung auch die automatische Erkennung von Betriebsphasen, der thermischen Leistung sowie Effizienz des Betriebs. Die nachträgliche Integration der Betriebsüberwachung ist deutlich aufwändiger als die Integration der Emissionsüberwachung.

6.3 Mögliche Methode für die Fehlermeldung

Beim Auftreten von Störfällen aufgrund technischer Mängel oder einer Fehlbedienung wie z. B. beim Einsatz ungünstiger Brennstoffe, werden diese Störfälle durch intelligente Algorithmen des VREM-Systems quantitativ mit den möglichen technischen Ursachen analysiert und entsprechend gespeichert. Bei der Festlegung der Ursachen sind zwischen Ursachen aufgrund der Verbrennungstechnik, dem Brennstoff und einer unsachgemäßen Bedienung des Heizkessels individuell zu unterscheiden. Die Meldung der Störfälle mit den Analyseergebnissen erfolgt beispielsweise automatisch über E-Mails oder eine spezielle Handyapplikation, wobei die Daten in einem Datenportal gespeichert bzw. bei den betroffenen Stellen (Nutzer, Betreiber, Anlagenhersteller, zuständiger Kundendienst, Umweltbehörde usw.) für eine möglichst schnelle Fehlerbeseitigung gemeldet werden.

Nach dem Konzept des VREM-Systems erfolgt die Bewertung der Verbrennungs- und Betriebsqualität permanent und integral über den gesamten Betrieb, wodurch nicht nur die Verbrennungstechnik, sondern auch die Bedienungsqualität individuell und in jeder Betriebsphase mitbetrachtet und entsprechend analysiert werden können. Beispielsweise gilt gemäß dem Konzept des VREM-Systems, dass der Nutzer für hohe Schadstoffemissionen beim Einsatz ungünstiger bzw. nicht zugelassener Brennstoffe und nicht der Anlagenhersteller verantwortlich ist. Sollten hohe Emissionen beispielsweise durch ein starken Sensordrift oder durch einen defekten Aktor ausgelöst werden, kann ein zuständiger Kundendienst automatisch über die Problematik inklusive den möglichen Ursachen für eine schnelle Problembehebung informiert werden.

Mit dem Konzept des VREM-Systems können erstmals Erkenntnisse über das Betriebsverhalten von Biomasseheizkesseln in der Praxis und eine bessere Abschätzung der tatsächlichen Emissionen in biomassebetriebenen Heizkesseln erhoben werden. Dank der permanenten Bewertung der Verbrennungsqualität kann mit dem intelligenten VREM-System eine praxisgerechte konsequente Überwachung und somit eine realistische Bewertung für Kleinfeuerungsanlagen geleistet werden.

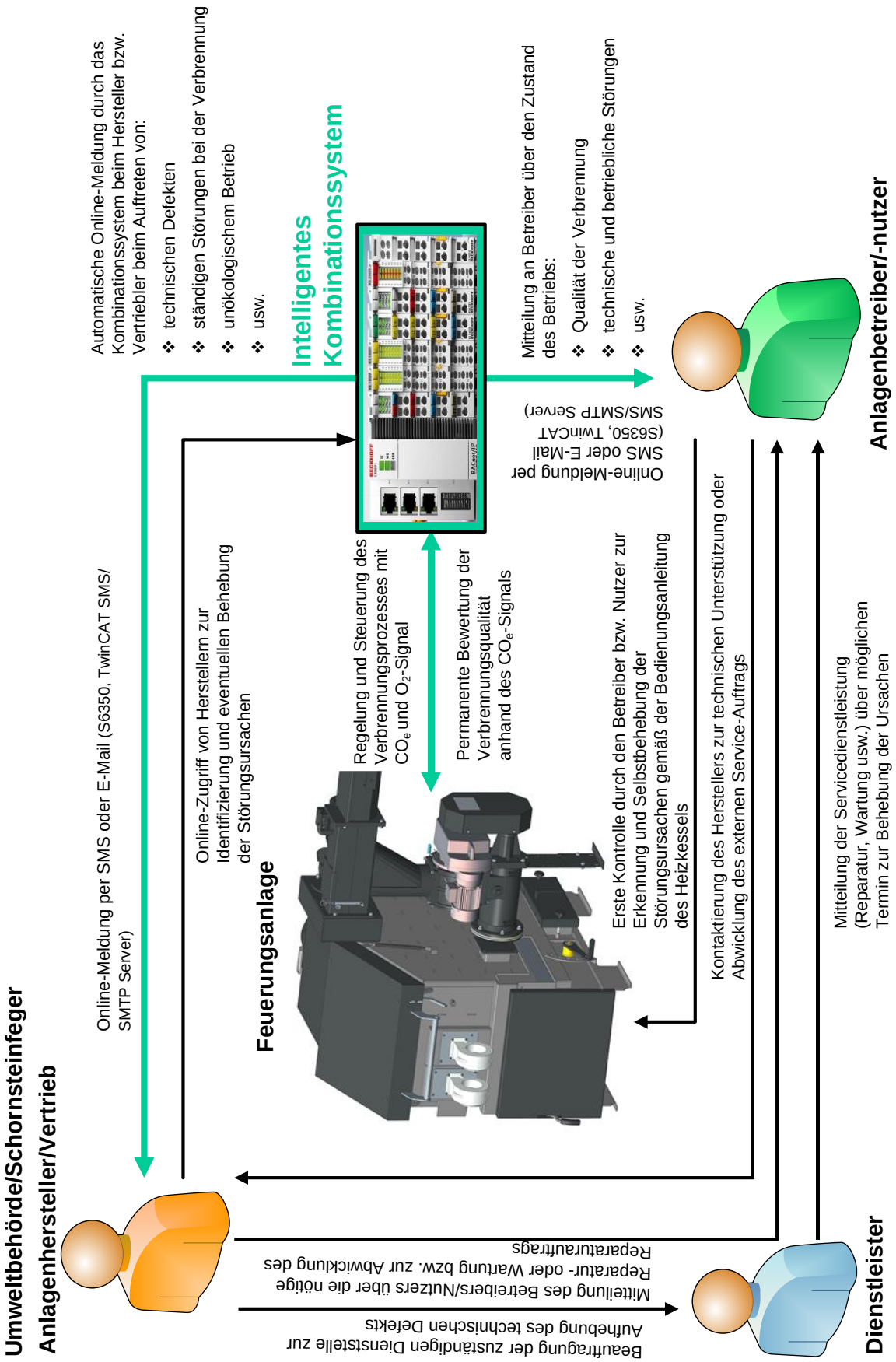

Abbildung 3: Funktionsprinzip des VREM-Systems.

6.4 Regelungs- und Überwachungsalgorithmen

Bei dem VREM-System ist zwischen den Regelungs- und Überwachungsalgorithmen zu unterscheiden. Diese werden im Folgenden ausführlich beschrieben.

6.4.1 Regelbausteine des VREM-Systems

Bei der Entwicklung von Biomasseheizkesseln wird von den Herstellern ein für die Heizkessel spezifischer Sauerstoffbereich ermittelt, mit dem die Verbrennung schadstoffarm und effizient erfolgen soll. Im Praxisbetrieb werden die Heizkessel mit einem Sauerstoffüberschuss zwischen 6 Vol.-% und 11 Vol.-% betrieben. Der optimale Sauerstoffgehalt im Abgas hängt stark von der Verbrennungstechnik sowie von den verbrennungstechnischen Eigenschaften des Brennstoffs ab. Gemäß dem Stand der Technik werden die Heizkessel mit erhöhtem Sauerstoffüberschuss betrieben, um Sauerstoffmangel beim Einsatz unterschiedlicher Brennstoffe bzw. Betriebsbedingungen zu vermeiden.

Der empirisch ermittelte optimale Bereich des Sauerstoffüberschusses wird von den Herstellern vor der Typprüfung bzw. Vermarktung in die Regelung der Biomasseheizkessel als Sauerstoff-Sollwert hinterlegt. Die Regelung der Verbrennung in den herkömmlichen Biomasseheizkesseln erfolgt unabhängig von den verbrennungstechnischen Eigenschaften und dem Zustand der Verbrennungstechnik ausschließlich in diesem festen Sauerstoffbereich. Die Nachteile mit diesem Regelkonzept sind im Abschnitt 5.2 dargestellt.

Für die Regelung der Verbrennung mit dem VREM-System können die Kessel- und Abgastemperaturen, der Sauerstoffgehalt im Abgas, die CO_e-Konzentrationen, der Unterdruck im Biomasseheizkessel und sonstige berechnete thermodynamische und feuerungstechnische Hilfsgrößen genutzt werden, welche den Verbrennungsprozess bei jedem Betriebszustand beschreiben können.

In der Software des VREM-Systems sind die folgenden Regelbausteine bzw. Funktionsbausteine für die Regelung des Verbrennungsprozesses entwickelt worden. Bei diesen Regelbausteinen handelt es sich um Teilprogramme, die sich unabhängig voneinander in jede Regelung integrieren lassen.

- Ein Regelbaustein für die Verbesserung der Verbrennungseffizienz unabhängig vom Heizkessel sowie von dem eingesetzten Brennstoff.
- Ein Regelbaustein für die Regelung der thermischen Leistung des Heizkessels und Berechnung der Verbrennungseffizienz,
- Ein Regelbaustein für die automatische Erkennung der Betriebsphasen,
- Ein Regelbaustein basierend auf der Berechnung von thermodynamischen und feuerungstechnischen Größen.

Das Ziel dieser oben dargestellten Regelbausteine ist eine schadstoffarme und hocheffiziente Verbrennung mit einer integralen Bewertung zu gewährleisten. Diese Regelbausteine werden im Folgenden beschrieben.

Regelbaustein für die Verbesserung der Verbrennungseffizienz (Emissionskantenregelung)

Das intelligente VREM-System des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP beruht auf dem Einsatz einer neuartigen Sensorik bzw. des O_2/CO_e-Feststoffelektrolytsensors. Der Vorteil dieses Sensors im Vergleich zu dem herkömmlichen Lambda-Sensor ergib sich daraus, dass nicht nur der Sauerstoffgehalt im Abgas, sondern auch die nicht verbrannten Bestandteile (sogenannte CO_e: CO-Äquivalente) detektiert werden können. Durch diese kombinierte Signalnutzung (O_2 plus CO_e) lässt sich die Verbrennung regelungstechnisch so einstellen, dass durch eine sukzessive Minderung des Sauerstoffgehalts im Abgas bei gleichzeitig niedrigen Konzentrationen an nicht verbrannten Bestandteilen die höchste Verbrennungseffizienz erreicht werden kann. Das Prinzip dieser sogenannten Emissionskantenregelung ist im Diagramm 15 erklärt.

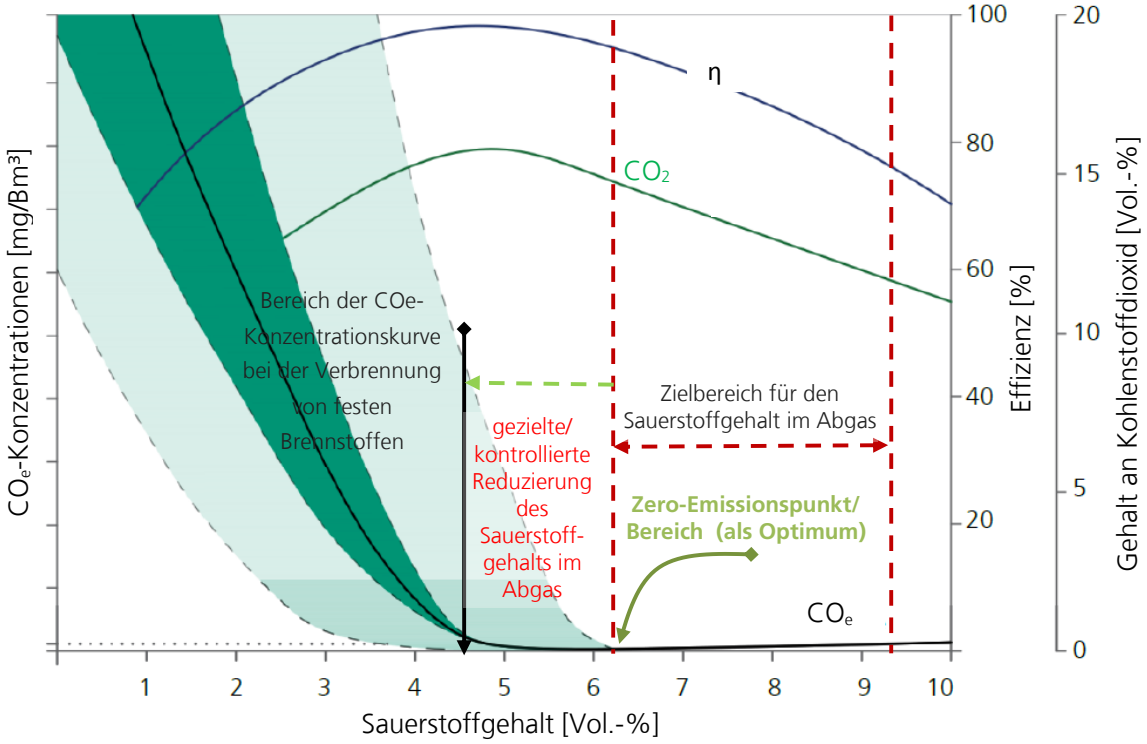

Diagramm 15: Verdeutlichung des Konzepts der Emissionskantenregelung für die Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen in Biomasseheizkesseln.

Gemäß dem Regelkonzept des VREM-Systems gibt es, im Gegensatz zu den herkömmlichen Regelsystemen, keinen festen Sollwert für den Sauerstoffgehalt (Sauerstoffüberschuss bzw. Lambdawert >=1) im Abgas, welche in der Software als fester Wert hinterlegt und durch die Regelung unabhängig von der Verbrennungsqualität eingestellt werden muss. Dabei

variiert der optimale Wert des Sauerstoffgehalts im Abgas (Lambdawert oder Luftüberschusszahl) in Abhängigkeit von der Verbrennungsqualität bzw. dem Gehalt an nicht verbrannten gasförmigen Bestandteilen (gemessen als CO_e-Wert). Die Regelung versucht durch die Einstellung der Sekundärluft den optimalen und möglichst niedrigsten Sauerstoffüberschusswert im Abgas zu finden, bei dem die niedrigsten Emissionen (optimaler Betriebspunkt) erreicht bzw. die Grenzwerte des Kohlenstoffmonoxids und der Gesamtkohlenwasserstoffe (als Summe CO_e) eingehalten werden können. Außerdem werden die Primärluft sowie die Brennstoffförderung so gezielt geregelt, dass günstige Temperaturen, d. h. hohe Temperaturen in der Brennkammer, für eine vollständige Oxidation erreicht und gleichzeitig möglichst geringe Abgastemperaturen und somit Abgasverluste eingehalten werden können.

Um einen stabilen und sachgemäßen Verbrennungsprozess mit der Emissionskantenregelung zu gewährleisten, wurde ein fester Startbereich für den Sauerstoffüberschuss festgelegt. In der Anfahrbetriebsphase wird die Verbrennung in einem günstigen Sauerstoffbereich (Soll-Bereich: Zwischen 5,4 Vol.-% und 5,8 Vol.-%) betrieben. Sobald die Anfahrbetriebsphase beendet wird und die CO_e-Konzentrationen einen bestimmten in der Regelung hinterlegten CO_e-Grenzwert unterschreiten, wird die Emissionskantenregelung des VREM-Systems aktiviert. Gemäß der ausgesuchten Regelstrategie der Emissionskantenregelung wird der Soll-Bereich für den Sauerstoffüberschuss um einen bestimmten Faktor gemindert. Diese Minderung des Sauerstoffüberschusses wird anschließend regelungstechnisch durch eine Reduzierung der zugeführten Menge an Sekundärluft erreicht. Während der Reduzierung des Sauerstoffüberschusses wird die Entwicklung des CO_e-Werts (Emissionssteigerung) beobachtet. Fängt der CO_e-Wert an zu steigen, wird ein Emissionssteigerungsbeiwert (Delta CO_e/Delta Zeit) ermittelt und die Förderleistung des Sekundärluftgebläses entsprechend eingestellt, sodass weder Sauerstoffmangel noch –überschuss entstehen dürfen. Mit der ausgesuchten Regelstrategie versucht das VREM-System die Emissionskante während der Verbrennung zu ermitteln, bei der sowohl eine schadstoffarme als auch hocheffiziente Verbrennung stattfinden kann. Es ist zu erwähnen, dass sich diese Art der Regelung stark von der bekannten Emissionskantenregelung gemäß dem Stand der Technik unterscheidet. Dort wird mit einem einzigen fest definierten Wert geregelt. Außerdem wird der Emissionssteigerungsbeiwert nicht betrachtet, welcher eine ausschlaggebende Rolle bei der Stabilität des Verbrennungsprozesses spielt.

Regelbaustein für die Regelung der thermischen Leistung des Heizkessels

Die thermische Leistung des Heizkessels wird sowohl durch die Brennstoffzufuhr als auch durch die zugeführten Mengen an Primärluft geregelt. Es gilt, je mehr Brennstoff und entsprechend Primärluft dem Verbrennungsprozess zugeführt werden, umso höher steigt die thermische Leistung des Heizkessels an. In der Regelung ist ein Algorithmus hinterlegt, welcher die Differenz der bestehenden Kesseltemperatur zu der optimalen Kesselbetriebstemperatur mit der zeitlichen Entwicklung der Kesseltemperatur ermittelt und die thermische Leistung durch die Brennstoffzufuhr sowie die Zugabe von Primärluft entsprechend einstellt. Hier gilt, je ferner die Kesseltemperatur von der günstigen Kesselbetriebstemperatur (in der Regel zwischen 75 °C und 85 °C) ist, umso mehr Brennstoff wird umgesetzt und Primärluft zugeführt. Bei der Einstellung der zugeführten Brennstoff- sowie Primärluftmenge wird die Leistung der anderen Aktoren berücksichtigt, sodass die Verbrennung weder in Sauerstoffmangel gerät noch mit Überdruck betrieben werden darf. Außerdem stellt die Feuerraumtemperatur einen wichtigen Faktor für die Regelung dar. Eine Feuerraumtemperatur zwischen 800 °C und maximal 1.100 °C sollte bei Biomasseheizkesseln eingehalten werden, um sowohl eine vollständige Verbrennung zu gewährleisten als auch eine starke thermische Belastung des Feuerraummaterials zu vermeiden. Die optimale Betriebstemperatur ergibt sich daraus, dass sowohl eine vollständige Verbrennung gewährleistet als auch die Abgasverluste bei einer maximalen Temperatur von 180 °C minimal gehalten werden.

Regelbaustein für die automatische Erkennung der Betriebsphasen

Die automatische Erkennung der Betriebsphasen (Anfahrbetriebsphase, Regelbetriebsphase, Ausbrandbetriebsphase, Gluthalten) unterscheidet sich stark zwischen automatischen und handbeschickten Heizkesseln. Eine genauere Beschreibung und Bestimmung der Betriebsphasen lässt sich nur durch die kombinierte Betrachtung des zeitlichen Verhaltens von den Betriebsparametern und der Einstellung von den Regelaktoren erreichen, wie in der Tabelle 5 dargestellt ist.

Die Darstellung in der Tabelle 5 beschreibt die Zusammenhänge zwischen den Aktoren und Sensoren bzw. berechneten Größen beim Betrieb von Heizkesseln, welche sowohl für die Erkennung der Betriebsphasen als auch für die Regelung sowie Betriebsüberwachung notwendig sind. Es ist zu erwähnen, dass die Zusammenhänge deutlich komplizierter sind als die Beschreibungen in der Tabelle 5.

Tabelle 5: Charakteristika der unterschiedlichen Betriebsphasen.

	Parameter	Anfahrbetriebs-phase	Regelbetriebs-phase	Ausbrandbetriebs-phase
Sensoren	**Sauerstoff- und Kohlenstoffdioxid-gehalt im Abgas**	Zum Beginn der Verbrennung liegt der Sauerstoffgehalt im Abgas bei 21 Vol.-% und nimmt je nach Verbrennungsintensität während der Verbrennungszeit ab. Bei einem sachgemäßen Start erreicht der Sauerstoffgehalt innerhalb von wenigen Minuten den günstigen Betriebsbereich.	Der Sauerstoffgehalt wird in der Regelbetriebsphase in einem bestimmten Bereich (3,8 Vol.-% bis 6,8 Vol.-%) geregelt, mit dem eine effiziente und vollständige Verbrennung gewährleistet werden kann.	In dieser Betriebsphase steigt der Sauerstoffgehalt im Abgas stetig an. Die Ausbrandbetriebsphase gilt als beendet, wenn der Sauerstoff einen Wert von > 16 Vol.-% erreicht bzw. im Fall von automatisch beschickten Heizkesseln die Brennstoffzufuhr gestoppt wird.
		Für die Erkennung der Betriebsphasen spielt das Kohlenstoffdioxid eine wichtige Rolle. Das Kohlenstoffdioxid und der Sauerstoff im Abgas verhalten sich bei vollständiger Verbrennung gegensätzlich. Steigt das Kohlenstoffdioxid an, sinkt der Sauerstoff im Abgas gleichzeitig und entsprechend ab. Die Berechnung des Kohlenstoffdioxids erfolgt gemäß der Gleichung 10 (siehe Regelbaustein basierend auf der Berechnung von thermodynamischen und feuerungstechnischen Größen). Zum Beginn der Anfahrbetriebsphase liegt das Kohlenstoffdioxid bei < 1 Vol.-%, wobei es bei einem sachgemäßen Start mit absinkendem Sauerstoffgehalt ansteigt. In der Regelbetriebsphase liegt das Kohlenstoffdioxid je nach Sauerstoffgehalt im Abgas zwischen etwa 12 Vol.-% und 16 Vol.-%. In der Ausbrandbetriebsphase sinkt das Kohlenstoffdioxid erneut ab und erreicht am Ende dieser Phase einen Gehalt von unter 4 Vol.-%.		
	CO_e-Konzentrationen	Sehr hohe CO_e-Konzentrationen (bis 30.000 mg/Vm³) aufgrund von niedrigen Temperaturen im Feuerraumbereich. Die CO_e-Konzentrationen sinken im Verlauf der Anfahrbetriebsphase auf unter 400 mg/Vm³.	Niedrige CO_e-Konzentrationen (< 50 mg/Vm³) und vollständige Verbrennung in der Regelbetriebsphase. Die Konzentrationen schwanken während des Betriebs bzw. nach der Brennstoffzufuhr.	Die CO_e-Konzentrationen steigen durch niedrige Feuerraumtemperaturen und Verdünnungseffekte sukzessiv an. Dabei sind CO_e-Konzentrationen von bis zu 8.000 ppm zu messen.
	Kesseltemperaturen	Niedrige Kesseltemperaturen (< 40 °C) zum Beginn der Verbrennung. Die Kesseltemperatur steigt während des Betriebs an.	Die Kesseltemperatur wird nach Möglichkeit im Sollbereich (beispielsweise zwischen 75 °C und 85 °C) geregelt.	In der Ausbrandbetriebsphase sinkt die Kesseltemperatur sukzessiv ab und erreicht je nach hydraulischer und regelungstechnischer Bindung einen Wert von < 50 °C.
	Abgastemperaturen	Niedrige Abgastemperaturen (< 40 °C) zu Beginn der Anfahrbetriebsphase. Die Abgastemperatur steigt in der Regel schneller an als die Kesseltemperatur. Bei einer sachgemäßen Verbrennung erreicht der Heizkessel innerhalb von weniger als 30 Minuten eine Abgastemperatur > 120 °C.	Die Abgastemperatur wird im Sollbereich (150°C - 180 °C) geregelt, sodass hohe Abgasverluste während der Verbrennung vermieden werden. Eine schnelle Überschreitung der Abgastemperatur von 180 °C deutet auf eine verschmutzte Oberfläche des Wärmetauschers.	Die Abgastemperatur nimmt am Ende der Verbrennung stark ab und erreicht je nach hydraulischer und regelungstechnischer Bindung des Heizkessels sowie der Regelung der Verbrennungsluft innerhalb von 60 Minuten einen Wert von weniger als 50 °C.
Aktoren	**Primärluft-zufuhr**	Zufuhr großer Mengen an Primärluft um die Vergasung bzw. die Verbrennung im Biomasseheizkessel zu beschleunigen und hohe Temperaturen im Feuerraum für eine sachgemäße Verbrennung zu erreichen. Die Logik der Primärluftzufuhr hängt von der Regelung der thermischen Leistung (siehe Regelbaustein für die Regelung der thermischen Leistung) ab.	Die benötigte Menge an Primärluft hängt stark von den verbrennungstechnischen Eigenschaften vor allem vom Wassergehalt und von der Korngrößenverteilung bzw. der spezifischen Oberfläche des Brennstoffs ab. Feine und trockene Brennstoffe benötigen in der Regel deutlich weniger Primärluft für die Vergasung als feuchte und großstückige Brennstoffe.	Die zugeführte Menge an Primärluft wird langsam erhöht, um den Brennstoff vollständig zu vergasen und die Abgas- und Kesseltemperaturen auf einem hohen Niveau zu halten. Wird kein Brennstoff zugeführt bzw. die Abgas- und Feuerraumtemperatur trotz der Zufuhr maximal möglicher Primärluftmengen nicht erhöht, gilt die Ausbrandbetriebsphase als beendet.
	Sekundärluft-zufuhr	Die Sekundärluft wird erst zugeführt, wenn sich der Sauerstoffgehalt im Abgas im unteren zulässigen Bereich (< 5.5 Vol.-%) befindet und die Abgastemperatur > 80 °C beträgt sowie tendenziell um einen bestimmten Wert (bspw. > 2 °C pro Minute) ansteigt. Außerdem spielt die Feuerraumtemperatur und ihre Entwicklung mit der Zeit eine große Rolle für die Zufuhr von Sekundärluft.	Die benötigte Sekundärluftmenge hängt in der Regelbetriebsphase stark von den verbrennungstechnischen Eigenschaften des Brennstoffs bzw. von der produzierten Menge an Brenngas ab. Beispielsweise benötigen trockene und feine Brennstoffe viel mehr Sekundärluft um eine sachgemäße Verbrennung zu erreichen. Das Gegenteil gilt für feuchte und großstückige Brennstoffe.	In der Regel werden in der Ausbrandphase sehr geringe Mengen an Sekundärluft für eine vollständige Verbrennung benötigt. Wenn der Sauerstoffgehalt einen Wert von > 8 Vol.-% überschreitet und gleichzeitig die Feuerraum- und Abgastemperatur tendenziell absinken, stellt sich der Sekundärluftaktor auf die minimale Leistung ein.

Regelbaustein für die Berechnung der Verbrennungseffizienz

Die Verbrennungseffizienz stellt eine wichtige Größe für die Bewertung des Betriebs sowie der Verbrennungsqualität dar. Für die Berechnung der Verbrennungseffizienz sind die folgenden verbrennungstechnischen Größen zu ermitteln:

- Luftüberschusszahl (λ).
- Mindestluftbedarf (l_{min}).
- Mindestrauchgasvolumen ($V_{R,min,tr}$).
- Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid (CO_2).
- Maximaler Gehalt an Kohlenstoffdioxid im trockenen Abgas ($CO_{2,max}$).

Die Berechnung der notwendigen Größen erfolgt in diesem Regelbaustein in Anlehnung an Schubert et al. 1959. Die Luftüberschusszahl λ ist eine dimensionslose Größe und beschreibt das Verhältnis von der tatsächlichen zugeführten Luftmenge zur theoretisch benötigten Mindestluftmenge. Die Luftüberschusszahl stellt eine wichtige Größe nicht nur für die Berechnung der Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid sowie der Effizienz, sondern auch für die Auslegung von Biomasseheizkesseln dar. Diese Größe lässt sich Näherungsweise über den mit der O_2/CO_e-Sonde gemessenen Sauerstoffgehalt O_2 im Abgas nach Gleichung 10 berechnen.

$$\lambda = \frac{21}{21 - O_2}$$ Gleichung 10

Die theoretische Mindestluftmenge gemäß der Gleichung 11 kann entweder über die Elementaranalyse des Brennstoffs oder über die Näherungsgleichung nach Rosin-Fehling berechnet werden, wobei für die Berechnung nach der Rosin-Fehling-Gleichung für biogene Festbrennstoffe ein mittlerer Heizwert von etwa 17.000 kJ/kg_{BS} angenommen werden kann. Für biogene Festbrennstoffe liegt der Mindestluftbedarf zwischen 4,3 mg/Nm³ und 4,9 mg/Nm³.

L_{min} = 8,891c + 26,667h + 3,333s – 3,333o,

entspricht ungefähr: 0,241H_u + 0,5 Gleichung 11

Wobei:

H_u:	Heizwert des Brennstoffs [MJ/kg_{BS}]
c:	Massenanteil an Kohlenstoff im Brennstoff [Ma.-%]
o:	Massenanteil an Sauerstoff im Brennstoff [Ma.-%]
h:	Massenanteil an Wasserstoff im Brennstoff [Ma.-%]
s:	Massenanteil an Schwefel im Brennstoff [Ma.-%]

Das trockene Mindestrauchgasvolumen $V_{R,min,tr}$ hängt ebenfalls von der Elementarzusammensetzung des Brennstoffs ab und berechnet sich nach

Gleichung 12. Für feste Biomasse können hier Werte zwischen 4,4 Nm^3/kg_{BS} und 4,9 Nm^3/kg_{BS} angenommen werden.

$$V_{R,min,tr} = 8{,}891c + 0{,}8n + 3{,}333s + 21{,}067h - 2{,}633o \qquad \text{Gleichung 12}$$

Wobei:

n: Gehalt an Stickstoff im Brennstoff [Ma.-%]

Bei dem maximalen Kohlenstoffdioxid $CO_{2,max}$ im Abgas handelt es sich um einen theoretischen Wert, welcher nach Gleichung 13 über den Gehalt an Kohlenstoff im Brennstoff und das Mindestrauchgasvolumen berechnet wird (vollständige stöchiometrische Verbrennung). Für biogene Festbrennstoffe kann hier je nach Massenanteil an Kohlenstoff ein maximaler Kohlenstoffdioxidgehalt von 19 Vol.-% bis 21 Vol.-% berechnet werden.

$$\mathrm{CO}_{2,\max} = \frac{1{,}867\mathrm{c}}{V_{R,min,tr}} \qquad \text{Gleichung 13}$$

Über die oben berechneten Größen mit der über die O_2/CO_e-Sonde gemessenen Konzentration an CO_e (Summenparameter aller nicht verbrannten gasförmigen Bestandteile im Abgas) in Volumenprozent kann der Gehalt an Kohlenstoffdioxid im Abgas durch die Gleichung 14 berechnet werden.

$$CO_2 = \frac{CO_{2,max}}{(\lambda - 1) \times \frac{l_{min}}{V_{R,min,tr}} + 1} - CO_e \qquad \text{Gleichung 14}$$

Für die Überprüfung der Plausibilität der oben dargestellten Gleichung 14 wurden mehrere Verbrennungsversuche mit unterschiedlichen Brennstoffen (vor allem holzartige und biogene Brennstoffe) durchgeführt. Ein Beispiel für die Validierungsuntersuchung ist im Diagramm 16 dargestellt. Für die Bewertung der Ergebnisse wurde der Korrelationskoeffizient ermittelt. Der Korrelationskoeffizient ist ein dimensionsloses Maß, welches den linearen Zusammenhang zwischen zwei Variablen beschreibt. Zwischen zwei Merkmalen besteht ein starker linearer Zusammenhang, wenn der Korrelationskoeffizient zwischen 0,8 und 1,0 liegt, wobei bei Werten von kleiner als 0,5 von einem schwachen linearen Zusammenhang ausgegangen wird.

In dem Diagramm 16 ist deutlich zu erkennen, dass eine starke Korrelation (Korrelationskoeffizient $r_{CO2,\ berechnet/CO2,\ gemessen}$ von 0,91) zwischen dem gemessenen und berechneten Kohlenstoffdioxid vorhanden ist. Die Werte stimmen außerdem mit einer geringen Abweichung überein. Das Gleiche gilt für Kohlenstoffmonoxid und dem sogenannten CO-Äquivalent (CO_e-Summenparameter). Dem Diagramm 16 ist auch zu entnehmen, dass eine starke Korrelation (Korrelationskoeffizient $r_{CO/COe}$ von 0,83) zwischen dem

gemessenen Kohlenstoffmonoxid und dem CO-Äquivalent besteht. Außerdem ist ersichtlich, dass der Wert des CO_e-Summenparameters höher ist als der Wert des gemessenen Kohlenstoffmonoxids. Das ist damit zu begründen, dass durch die O_2/CO_e-Sonde nicht nur Kohlenstoffmonoxid, sondern auch viele andere nicht verbrannte gasförmige Bestandteile im Abgas mit unterschiedlicher Sensibilität bzw. Sensitivität detektiert werden. Hier war zu beobachten, dass je höher die gemessenen Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid bzw. je unvollständiger die Verbrennung stattfindet, umso größer weichen die beiden Werte (gemessenes Kohlenstoffmonoxid und der CO-Äquivalent) voneinander ab.

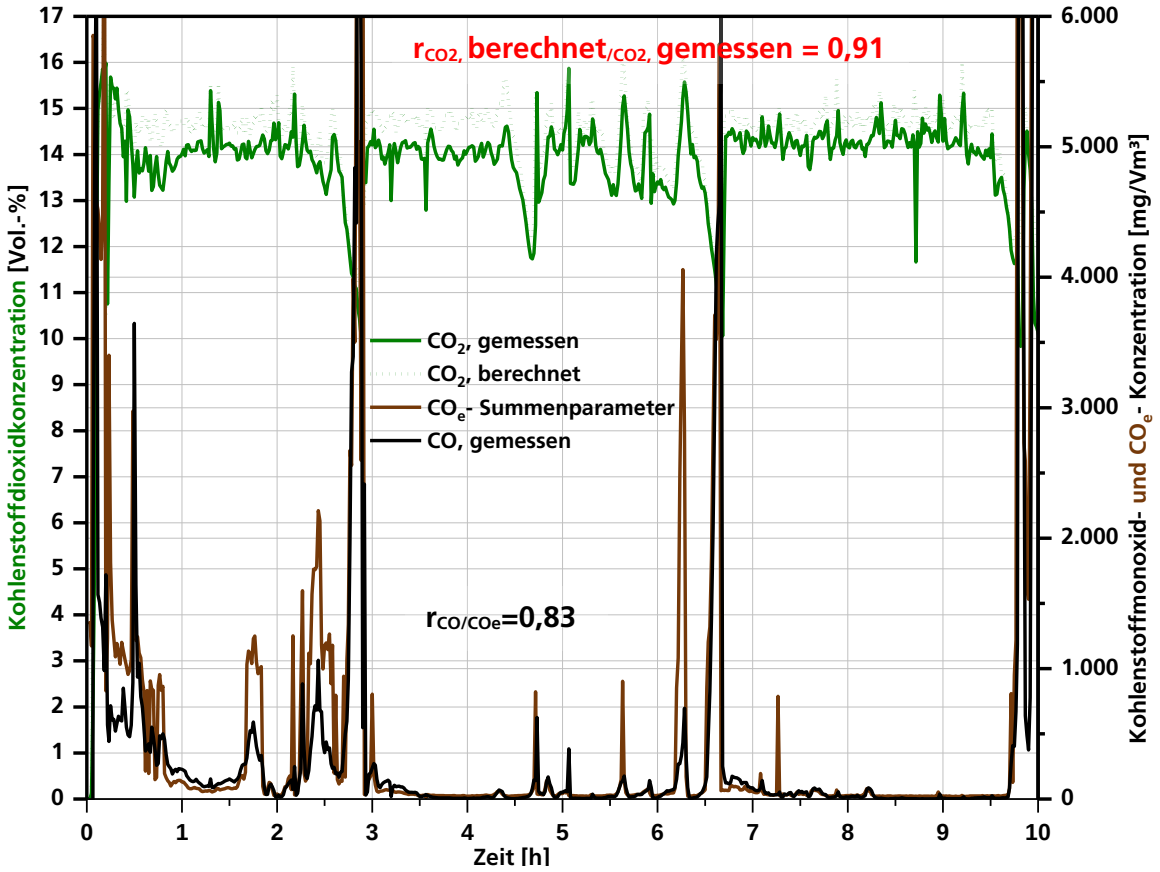

Diagramm 16: Vergleich zwischen den mit der O_2/CO_e-Sonde gemessenen Konzentrationen an CO_e mit den mit einer Gasanalyse gemessenen Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid.

Zusätzlich zu den Leistungsstufen wird der Kesselwirkungsgrad über die sogenannte indirekte Methode gemäß DIN EN 303-5 berechnet. Die Berechnungsmethode für die Bestimmung des Wirkungsgrads ist im Abschnitt 3.2 ausführlich erläutert.

6.4.2 Überwachungsalgorithmen des VREM-Systems

Mit dem VREM-System kann die Verbrennung in Biomasseheizkesseln nicht nur regelungstechnisch verbessert, sondern auch einfach und kostengünstig überwacht werden. Eine unsachgemäße Verbrennung mit erhöhten

Emissionen und niedriger Effizienz im Biomasseheizkessel kann auf eine fehlerhafte Bedienung der Verbrennungstechnik, ungeeignete Brennstoffe oder technische Fehler in der Verbrennungstechnik zurückgeführt werden.

Für die einfache Erkennung eines fehlerhaften Betriebs ist die Emissionsüberwachung ausreichend, wobei die Bewertung der Emissionen (CO_e-Konzentrationen als Summenparameter für alle gasförmigen nicht verbrannten Bestandteile im Abgas) bewertet und nach einer bestimmten Logik mit einem verschlüsselten Informationsübertragungssystem bei den betroffenen Stellen gemeldet werden kann. Eine mögliche Methodik für die Durchführung der Überwachung ist im Abschnitt 6 bzw. 6.3 ausführlich beschrieben.

Die Fehlerursachenanalyse kann bei alleiniger Betrachtung der CO_e-Konzentrationen nicht durchgeführt werden. Dafür soll der Input anderer Sensoren und Aktoren sowie Hilfs- und Berechnungsgrößen genutzt werden. Im Rahmen der Entwicklung des VREM-Systems wurden Analysen für die folgenden Betriebsfehler beispielhaft durchgeführt, bei denen sowohl die Emissionen als auch die Betriebssicherheit berücksichtigt werden können:

- Fehlererkennung beim Einsatz ungeeigneter bzw. ungünstiger Brennstoffe,
- Fehlererkennung bei mangelhafter und/oder mangelnder Verbrennungstechnik,
- Fehlererkennung bei einer unsachgemäßen Bedienung der Verbrennungstechnik und
- Fehlererkennung bei unpassenden Betriebsbedingungen außerhalb der Verbrennungstechnik.

Es ist zu erwähnen, dass eine unsachgemäße Verbrennung auch aufgrund von Fehlerkombinationen wie z. B. durch technische Mängel oder aufgrund des Einsatzes ungünstiger Brennstoffe und/oder einer unsachgemäßen Bedienung der Verbrennungstechnik in der Praxis auftreten kann. Das VREM-System ist so programmiert, dass die Fehler nach ihrer Wichtigkeit und Auftrittswahrscheinlichkeit mit den wichtigsten Ursachen analysiert und entsprechend zugeordnet werden können. Dabei ist außerdem zwischen allgemeingültigen und verbrennungstechnikspezifischen Fehlern zu unterscheiden. Obwohl die Erkennung bzw. die Ursachenanalyse der allgemeingültigen Fehler für die Bewertung der Verbrennungsqualität und Ableitung von Gegenmaßnahmen ausreichend sind, bleibt die Analyse der verbrennungstechnikspezifischen Fehler notwendig, um den Verbrennungsprozess bzw. den gesamten Betrieb genauer zu bewerten. Im Folgenden werden die Fehlererkennungen gemäß den oben dargestellten Punkten ausführlich beschrieben:

Fehlererkennung beim Einsatz ungeeigneter Brennstoffe

Biomasseheizkessel werden über die 1. BImSchV geregelt und errichtet. Ihre Zulassungsprüfung erfolgt gemäß der Norm DIN EN 303-5 sowie der

Maschinenrichtlinie 2006/42/EG. In der Regel dürfen Biomasseheizkessel nur mit Brennstoffen (nach § 3 Absatz 1 der 1. BImSchV) betrieben werden, für deren Einsatz sie nach Angaben des Herstellers geeignet und entsprechend geprüft sind. Ein ausschlaggebender Faktor für erhöhte Emissionen in der Praxis stellen die verwendeten Brennstoffe dar. Während die Biomasseheizkessel im Rahmen der Typprüfung ausschließlich mit hochqualitativen Brennstoffen zu prüfen sind, werden sie in der Praxis mit allen möglichen Brennstoffen, unabhängig von ihrer Qualität, betrieben. Das gilt sowohl für automatische als auch für handbeschickte Biomasseheizkessel. Das VREM-System kann die verwendete Brennstoffqualität sowohl durch die differenziale Entwicklung des CO_e-Werts mit der Zeit in Kombination mit den Feuerraum- und Nachoxidationskammertemperaturen sowie dem Sauerstoffgehalt im Abgas unter Berücksichtigung der eingestellten Leistungen der Primär- sowie Sekundärluftglieder erkennen. Dabei ist zwischen den folgenden Fällen zu unterscheiden:

<u>Einsatz von feuchten oder großstückigen Brennstoffen:</u>

Dieser Fall ist durch einen hohen CO_e-Wert mit relativ niedrigen Temperaturen im Feuerraumbereich sowie in der Nachoxidationskammer gekennzeichnet, wobei der Sauerstoffgehalt hoch (> 8 Vol.-%) sein kann. Ein hoher Sauerstoffgehalt in diesem Betriebsfall mit einer gleichzeitig niedrigen eingestellten Leistung des Sekundärluftglieds deutet auf einen hohen Feuchtegehalt und/oder niedrige Vergasungswilligkeit des verwendeten Brennstoffs hin. Die Vergasungswilligkeit hängt sowohl von den physikalischen (große Stückigkeit bzw. Holzstücke) als auch von den chemischen (flüchtige Bestandteile) Eigenschaften des Brennstoffs ab. Dabei gilt, je höher der Anteil des Wasserstoffs im Brennstoff ist, umso mehr Brenngase mit günstigen verbrennungstechnischen Eigenschaften werden produziert. Das Gegenteil trifft hier ebenfalls zu.

<u>Einsatz von feinen und sehr trockenen Brennstoffen:</u>

Erhöhte CO_e-Werte können auch beim Einsatz von trockenen und/oder feinen Brennstoffen auftreten. Dieser Betriebsfall lässt sich durch einen niedrigen Sauerstoffgehalt im Abgas mit einer gleichzeitig maximalen Leistungseinstellung des Sekundärluftglieds bzw. minimalen Leistungseinstellung des Primärluftglieds erkennen. Dabei findet eine intensive Vergasung mit einem energiereichen Brenngas statt, welches einen hohen Sauerstoffbedarf für eine vollständige Oxidation benötigt. Kann das Sekundärluftglied diese Sauerstoffmenge nicht bereitstellen, gerät die Verbrennung in einen Sauerstoffmangel mit einem exorbitanten Schadstoffausstoß.

Während der zweite Fall (Einsatz von feinen und sehr trockenen Brennstoffen) durch die Optimierung der Verbrennungstechnik durch eine entsprechende Dimensionierung der Nachbrennkammer und des Sekundärluftglieds bzw. durch regelungstechnische Maßnahmen hinsichtlich der Brennstoff- und Verbrennungsluftzufuhr vermieden werden kann, lässt

sich der erste Fall (Einsatz von feuchten oder großstückigen Brennstoffen) verbrennungstechnisch nicht lösen. In beiden Fällen werden nicht nur hohe Emissionen produziert, sondern auch eine sehr niedrige Verbrennungseffizienz verursacht.

Fehlererkennung bei mangelhafter Verbrennungstechnik

Die Typprüfung von Biomasseheizkesseln gemäß der DIN EN 303-5 wird in der Regel mit einem Prototyp durchgeführt, auf Basis dessen die Serienprodukte hergestellt werden. Selten erfolgen die Typprüfungsmessungen an einem Heizkessel, der aus der Produktion probenartig entnommen wird. Die Alterung sowie die Dauerfunktion der technischen Bestandteile stellen keinen Teil der Typprüfung dar. Trotz einer optimalen Funktion des Prototyps können technische Probleme bzw. Mängel entweder bei der Produktion oder nach einer kurzen Nutzung des Heizkessels an den folgenden technischen Stellen auftreten:

- Elemente des Feuerraums oder der Nachbrennkammer:
  Falsch konstruierte oder aufgebaute bzw. defekte Elemente des Feuerraums bzw. der Nachbrennkammer führen zur ungünstigen Strömung wie z. B. Kurzschlussströmung und somit einer unsachgemäßen Verbrennung trotz optimaler Einstellung des Sauerstoffüberschusses im Abgas.
- Elemente des Abgaswegs:
  Falsch konstruierte oder aufgebaute bzw. defekte Elemente des Abgaswegs nach der Nachoxidationskammer führen, vor allem aufgrund von Falschluft, zu ungünstigen Rückschlüssen auf den Sauerstoffgehalt in der aktiven Reaktionszone und folglich zu einer falschen Einstellung der Verbrennungsluft sowie Brennstoffzufuhr im Fall von automatisch beschickten Heizkesseln.
- Sensoren:
  Zur Regelung von Verbrennungsprozessen werden in der Regel Sensoren für die Messung von Temperaturen, Druck und Sauerstoff eingesetzt, welche mit der Zeit große Drifts aufweisen und somit falsche Signale für die Regelung liefern. Es ist außerdem nicht auszuschließen, dass die Sensoren im Neuzustand defekt sein können oder unterschiedliche Kalibrierkurven aufweisen, welche in der Regelungssoftware des Heizkessels nicht berücksichtigt sind.
- Aktoren:
  Der Verbrennungsprozess in Biomasseheizkesseln wird sowohl durch die Verbrennungsluft- als auch durch die Brennstoffzufuhr geregelt, wobei dieser sich verbrennungstechnisch durch eine absolute und differenziale Entwicklung der Temperaturen (im Feuerraum, Kessel, Abgas), des Abgasdrucks, des Sauerstoffgehalts während des Betriebs beschreiben lässt. Zusätzlich dazu spielen andere Aktoren wie z. B. das Bewegungssystem des Treppenrosts oder das Füllstandüberwachungs- und Einstellsystem eine ausschlaggebende Rolle bei der Abbrand-Qualität sowie der

Entwicklung bzw. bei der Bildung von staub- und gasförmigen Schadstoffemissionen. Andere zusätzliche Regelaktoren wie z. B. das Staub- und Ascheaustragungssystem sowie das Reinigungssystem des Wärmeübertragers spielen vor allem mit ihren mechanischen Schnittstellen aufgrund möglicher Luftleckagen bei einer falschen technischen Ausführung eine nicht zu vernachlässigende Rolle bei der Verbrennung.

Technische und/oder konstruktive Fehler an den oben genannten technischen Bestandteilen führen zu einem instabilen Verbrennungsprozess, wobei die Aktoren in einem ungünstigen Bereich geregelt bzw. ungünstige Oxidationsbedingungen und –parameter eingestellt werden können. Das führt meistens nicht nur zu einer ineffizienten, sondern auch zu einer unvollständigen Verbrennung mit erhöhten Schadstoffemissionen. Solche Prozessfehler lassen sich ohne entsprechende Messung der gasförmigen nicht verbrannten Abgasbestandteile als Indikator für die Verbrennungsqualität nicht bemerken.

Die Fehlererkennung gemäß dem VREM-System erfolgt hier durch die Messung und Bewertung der CO_e-Werte, wobei für eine genauere Fehleridentifizierung und Fehlerbeschreibung die aktuellen Einstellungen der Regelaktoren mit den Signalwerten anderer Sensoren eingesetzt werden. Beispielsweise führen Luftleckagen in der Vergasungszone bzw. im Füllraum bei Vergaserkesseln zu einem instabilen Vergasungsprozess mit einem Brenngas, welches ungünstige verbrennungstechnische Eigenschaften aufweist. Trotz richtiger Einstellung des Sauerstoffs findet eine unvollständige Verbrennung statt, wobei sowohl die Regelaktoren in üblichen Regelbereichen eingestellt sind, als auch die Sensoren richtig messen. Das Gleiche erfolgt bei einer leichten Luftleckage in der Abgasstrecke des Heizkessels.

Fehlererkennung bei einer unsachgemäßen Installation und Bedienung der Verbrennungstechnik

Die Verbrennungstechnik bzw. ein Biomasseheizkessel stellt nur einen Teil eines gesamten Wärmebereitstellungssystems in Gebäuden dar, wobei die hydraulische und regelungstechnische Bindung des Heizkessels mit dem gesamten System eine entscheidende Rolle für einen sachgemäßen Betrieb spielt. Eine falsche hydraulische bzw. regelungstechnische Bindung des Heizkessels und fehlende Energiemanagementsysteme führen zu einer drastischen Senkung der Effizienz sowie einer exorbitanten Erhöhung der Emissionen. Der gleiche Effekt lässt sich bei einer falschen Auslegung des Heizsystems bzw. Überdimensionierung des Heizkessels und/oder Unterdimensionierung des Pufferspeichers beobachten.

Eine ungünstige Taktung des Heizkessels lässt sich durch die Entwicklung der Temperaturen sowie der CO_e-Werte während des Betriebs erkennen. Solange der Heizkessel im Bereich einer Leistungsmodulation fährt, bei der niedrige CO-Emissionen (kleiner als die jeweiligen Grenzwerte) gewährleistet werden, wird die Leistungstaktung als normal bzw. günstig eingestuft.

Je automatisierter die Biomasseheizkessel hinsichtlich der Verbrennungsluft- und Brennstoffzufuhr bzw. hinsichtlich der Reinigung sind, umso effizienter und schadstoffärmer können sie betrieben werden. Der Einfluss der Betreiber auf die Verbrennung ergibt sich aus der Auswahl sowie aus der Beschickung des Brennstoffs in den Heizkessel. Der Einfluss durch die Auswahl gilt sowohl für automatisch als auch handbeschickte Heizkessel mit vergleichbaren Effekten. Der Betreiber entscheidet, welche Brennstoffe für den Betrieb des Heizkessels eingesetzt werden. Gesetzliche Anforderungen an eine gute bzw. bestimmte Qualität der im § 3 der 1. BImSchV erwähnten Brennstoffe im Praxisbetrieb existieren bisher nicht. Der Einfluss der Beschickung sowie der manuellen Anzündung des Brennstoffs ist nur für handbeschickte Heizkessel relevant, wobei der Betreiber mit seinem Verhalten und technischen Bewusstsein einen enormen Einfluss auf die Verbrennungsqualität hat. Beispielsweise führt eine falsche Beschickung bzw. Anzündung des Brennstoffs zur Entwicklung großer Mengen an staub- und gasförmiger Schadstoffemissionen (CO > 55.000 ppm, Feinstaub > 3.000 mg/Vm^3), wobei die Verbrennungseffizienz (aufgrund hoher Konzentrationen an nicht verbrannten Bestandteilen im Abgas um 12 % bis 27 % abnimmt (siehe Abschnitt 5.3).

Schlechte Brennstoffqualität bzw. ungünstige Beschickungsregime lassen sich direkt durch die Entwicklung des CO_e-Werts bzw. der Temperaturen im Feuerraumbereich während des Betriebs erkennen, wie im oberen Abschnitt (Fehlererkennung beim Einsatz ungeeigneter Brennstoffe) ausführlich beschrieben wurde. Eine unsachgemäße Beschickung und Anzündung lässt sich durch die starken Druckschwankungen mit erhöhten Emissionen erkennen. Dabei spielen die Einstellungen (Einstellverhalten) der Primär- und Sekundärluftglieder eine große Rolle.

Eine Mindestfeuerraum- bzw. Nachbrennkammertemperatur (> 800 °C) mit bestimmten Sauerstoffkonzentrationen in der aktiven Reaktionszone soll innerhalb einer bestimmten Zeit nach der Anzündung bzw. während des Betriebs für eine Mindestverweilzeit (in der Regel > 2 Sekunden) gewährleistet werden, ansonsten findet eine unvollständige Verbrennung mit zahlreichen Schadstoffemissionen statt. Der optimale Sauerstoffüberschuss (als Regelgröße) hängt hauptsächlich von dem Verbrennungskonzept sowie von der Konstruktion des Feuerraums und der Nachbrennkammer ab. Der Lambda-Wert variiert je nach Heizkessel zwischen 1,2 und 2,3. Es ist zu erwähnen, dass eine Mindestfeuerraum- bzw. Nachbrennkammertemperatur für eine bestimmte Verweilzeit bisher gesetzlich nicht vorgeschrieben bzw. gefordert sind.

Eine Fehlervermeidung aufgrund falscher Bedienung des Heizkessels lässt sich durch eine normative Regelung und Erkennung der Brennstoffqualität vermeiden bzw. entsprechend im Praxisbetrieb überwachen.

Fehlererkennung bei unpassenden Betriebsbedingungen und Installationen außerhalb der Verbrennungstechnik

Hier werden alle technischen Bestandteile und physikalischen Gegebenheiten bzw. Parameter außerhalb der Verbrennungstechnik berücksichtigt, die sowohl die Verbrennungsluftzufuhr als auch die Abgasabfuhr aus dem Heizkessel negativ beeinflussen, wobei instabile bzw. für eine sachgemäße Verbrennung ungünstige Druck- und Strömungsverhältnisse in der Verbrennungstechnik herrschen. Zu den technischen Bestandteilen gehören vor allem die nachgeschalteten Systeme wie z. B. Abgasbehandlungssysteme und zusätzliche Wärmeübertrager, Verbindungsstücke mit einem Zugbegrenzer, die Abgasanlage bzw. der Schornstein. Jeder Mangel bzw. Auslegungsfehler dieser Bestandteile führt zu einem negativen Einfluss auf die Verbrennung und somit zu erhöhten Emissionen.

Zu den physikalischen Parametern zählen der Umgebungsdruck und die Temperaturen in dem Installationsraum. Diese beiden Parameter können die Verbrennungsqualität aufgrund der Störung der Verbrennungsluftzufuhr, im Falle eines starken Unterdrucks, und/oder aufgrund einer starken Abkühlung des Feuerraums oder der Nachbrennkammer wie beispielsweise bei sehr niedrigen Umgebnungstemperaturen, stark negativ beeinflussen. Einen Anderen, nicht beeinflussbaren physikalischen Parameter, stellen die Witterungsverhältnisse dar, welche in manchen Fällen ungünstige Effekte auf den Kaminzug aufweisen.

Die Fehlererkennung durch unpassende Betriebsbedingungen und Installationen außerhalb der Verbrennungstechnik lässt sich durch die Druckmessung in der Verbrennungstechnik sowie in der Abgasanlage erkennen, wobei Rückschlüsse auf eine unsachgemäße Verbrennung bei hohen CO_e-Werten gezogen werden können.

Für die Erkennung und Bewertung der Betriebsfehler ist es sehr wichtig, die Betriebsphase des Heizkessels zu identifizieren. Die Interpretationen der gemessenen Werte bzw. Parameter hängt maßgeblich von der Betriebsphase ab. Bei dem im Rahmen der Entwicklung eingesetzten Heizkessel (Vergaserkessel) wurde zwischen Anfahrbetriebsphase, Regelbetriebsphase, Nachbeschickungsbetriebsphase und Ausbrandbetriebsphase unterschieden, für die eine separate Bewertung der Emissionen (CO_e-Emissionen) sowie des Wirkungsgrades des Heizkessels durchgeführt wurde.

6.4.3 Ökologische und ökonomische Bewertung des Betriebs

Die ökologische und ökonomische Bewertung des Betriebs stellt ein wesentliches Ziel des VREM-Systems in der Praxis dar. Für die Bewertung des Betriebs werden die Qualität der Verbrennung hinsichtlich der Emissionen (nicht verbrannte gasförmige Bestandteile: CO_e-Emissionen als Summenfaktor) sowie die Verbrennungseffizienz betrachtet, woraus Rückschlüsse auf die Funktionalität der Verbrennungstechnik sowie auf die

Qualität des eingesetzten Brennstoffs gezogen werden können. Für die Durchführung der Bewertung werden zusätzlich zu den CO_e-Werten thermodynamische und normative Berechnungen eingesetzt. Außerdem spielen sonstige physikalische Größen wie z. B. Temperaturen und Drücke im Abgas sowie im Feuerraumbereich, die Kesseltemperatur sowie Einstellungspositionen, Funktions- und Betriebsverhalten der eingesetzten Aktoren eine entscheidende Rolle.

Während des Betriebs werden die Mittelwerte von allen gemessenen und berechneten Parametern permanent erfasst, aufgezeichnet und bewertet. In dem Diagramm 17 sind die unterschiedlichen Bereiche für die CO_e-Konzentrationen (Bereich für die Regelung an der Emissionskante, sachgemäße und nicht sachgemäße Verbrennung) und für den Sauerstoffgehalt im Abgas dargestellt, welche für die Regelung und Bewertung der Verbrennung im Biomasseheizkessel herangezogen werden.

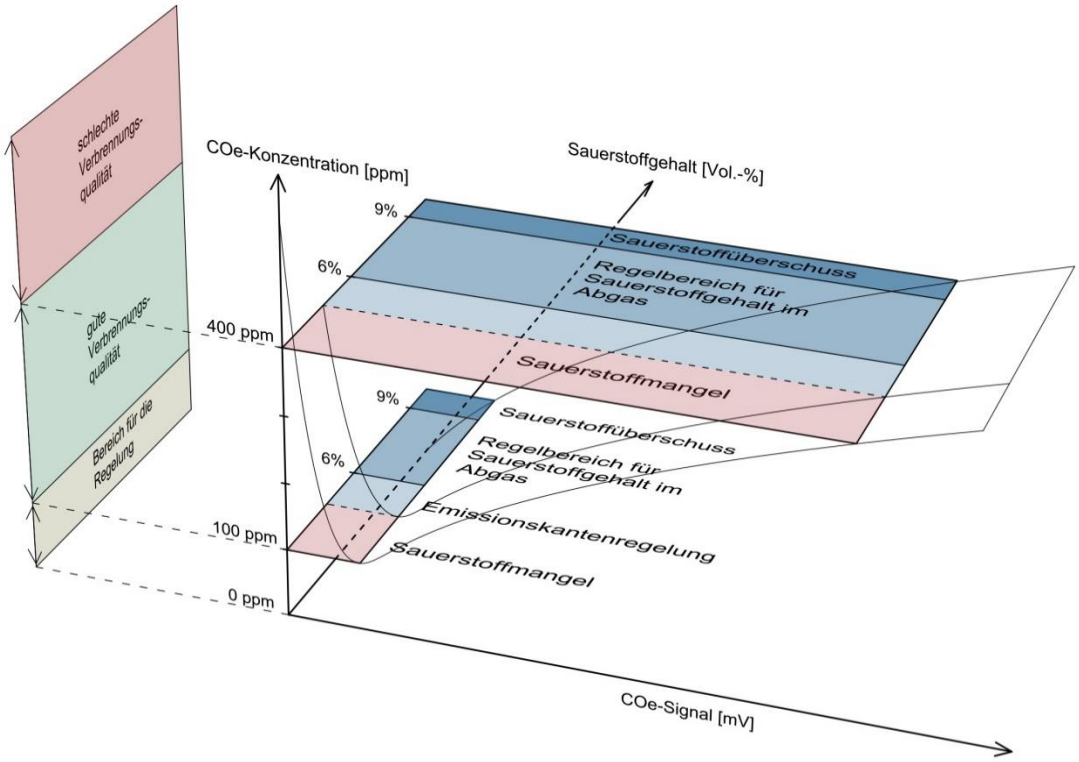

Diagramm 17: Konzept für die Bewertung der Verbrennung mit dem VREM-System.

In dem Diagramm 17 sind vier Bereiche für den Sauerstoffgehalt im Abgas dargestellt. Diese regelungs- und überwachungsrelevanten Bereiche sind:

- Bereich des Sauerstoffmangels, bei dem eine unvollständige Verbrennung stattfindet,
- Bereich für die Emissionskantenregelung,
- Bereich für die Lambdaregelung und
- Bereich mit einem hohen für die Verbrennung ungünstigen Sauerstoffüberschuss.

Ein sachgemäßer Betrieb mit hohen Wirkungsgraden und niedrigen Schadstoffen lässt sich nur erreichen, wenn der Sauerstoffüberschuss in einem bestimmten anlagen- und brennstoffspezifischen Sollbereich reguliert wird. Außerhalb dieses Sauerstoffsollbereichs kann die Verbrennungseffizienz aufgrund zunehmender Wärmeverluste abnehmen (siehe Abschnitt 5.3). Gemäß dem Stand der Technik wird die Verbrennung nicht mit einem Sauerstoffbereich, sondern ausschließlich mit einem Sauerstoffsollwert geregelt. Dieser Sauerstoffsollwert wird für jeden Heizkesseltyp einmalig ermittelt und in der Regelung festgelegt. Dabei wird die Art der Brennstoffe so berücksichtigt, dass der Betreiber softwaretechnisch entweder hartes oder weiches Holz für die Regelung auswählt, wobei der entsprechende Sauerstoffsollwert händisch oder automatisch in der Software angepasst wird. Andere Brennstoffe wie biogene Brennstoffe sind bzw. können nicht berücksichtigt werden.

Eine automatische nutzerunabhängige Einstellung eines günstigen Sauerstoffbereichs für eine effiziente und schadstoffarme Verbrennung unabhängig von dem Anlagentyp bzw. des eingesetzten Brennstoffs lässt sich nur durch den Einsatz der CO_e-Sonde oder vergleichbarer Sensoren implementieren, wobei eine sogenannte Emissionskantenregelung eingesetzt werden kann. Das Konzept der Emissionskantenregelung ist im Abschnitt 6.4.1 ausführlich erläutert.

Für die Bewertung der Ökologie werden nicht nur die Reduzierung der Schadstofffrachten (CO_e-Wert als Summenparameter für alle nicht verbrannten gasförmigen Bestandteile im Abgas), sondern auch die CO_2-Ersparnisse durch die Verbesserung der Verbrennungseffizienz dank der Emissionskantenregelung berücksichtigt. Die ökonomische bzw. wirtschaftliche Bewertung erfolgt auf Basis der Brennstoff- und somit der Kostenersparnisse, die durch die Emissionskantenregelung zu erzielen sind. Diese Größen bzw. Schadstoffreduzierung, CO_2- sowie Brennstoff- und folglich Kostenersparnisse werden visualisiert und dem Nutzer entsprechend während und nach jedem Betrieb mitgeteilt.

Zur Bewertung der Verbrennungseffizienz wird der Kesselwirkungsgrad ermittelt. Die Ermittlung des Kesselwirkungsgrads erfolgt hier auf Basis der indirekten Methode nach DIN EN 303-5 gemäß der Gleichung 3. Der Wirkungsgrad wird über den gesamten Betrieb aufgezeichnet und bis zum Ende der Verbrennung gemittelt.

Das Einsparpotential für Brennstoffe ist sowohl eine wichtige ökologische als auch ökonomische Größe für die Bewertung des Betriebs im Biomasseheizkessel. Sobald der Ausbrand durch die Algorithmen des VREM-Systems festgestellt wurde, wird das mögliche Einsparpotential (z. B. durch ein besseres Bedienerverhalten) berechnet und dem Nutzer per E-Mail oder SMS mitgeteilt. Die Berechnung des Einsparpotentials für Brennstoffe erfolgt nach Gleichung 15.

$$E_p = m_{BS} \times \frac{\eta_{max} - \eta}{100} \times A_{tag} \times t_B$$ Gleichung 15

Wobei:

Ep: Einsparpotential für Brennstoffe [kg/a].
η_{max}: Maximaler Kesselwirkungsgrad gemäß Typprüfung [%].
η_K: Während des Betriebs berechneter Kesselwirkungsgrad [%].
A_{tag}: Anzahl der Beschickungen [Beschickungen/Tag].
t_B: Betriebstage pro Jahr [Tage].
m_{BS}: Mittlere Brennstoffmasse pro Beschickung [kg/Beschickung].

Die Kostenersparnisse berechnen sich nach Gleichung 16. Für die spezifischen Kosten können zwischen 10 Cent und 14 Cent pro Kilogramm Brennstoff angenommen werden [Bruhn 2018]. Durch einen speziellen Programmbaustein im VREM-System können die aktuellen Brennstoffkosten bzw. der Tageskurs aufgerufen und die Brennstoffeinsparung berechnet werden.

$$K_{ES} = K_{BS} \times E_P$$ Gleichung 16

Wobei:

K_{ES}: Kosteneinsparung bei sachgemäßer Bedienung [€/a].
K_{BS}: Mittlere Kosten für biogene Brennstoffe [€/kg].

Die einsparbaren CO_2-Mengen, welche sich durch die Brennstoffeinsparung ergeben kann, ist nach Gleichung 17 zu berechnen:

$$E_{CO2} = m_{BS} \times A_{tag} \times \frac{\eta_{max} - \eta}{100} \times H_u \times t_B \times m_{CO2}$$ Gleichung 17

Wobei:

E_{CO2}: Einsparpotential für Kohlenstoffdioxid [kg CO_2/a].
m_{CO2}: Spezifische Menge an Kohlenstoffdioxid [g CO_2/MJ], ungefähr 92 g/MJ Brennstoff.
H_u: Heizwert des Brennstoffs [MJ/kg].
P_{NWL}: Nennwärmeleistung gemäß Bedienungsanweisung [MW_{th}].
t_B: Betriebszeit pro Jahr [Tage].

Durch das Regelungs- und Überwachungskonzept des VREM-Systems lässt sich der Wirkungsgrad im Praxisbetrieb durchschnittlich von etwa 78 % bis auf über 93 % verbessern. Durch diese Verbesserung lassen sich beispielsweise bei einem Heizkessel mit einer thermischen Nennwärmeleistung von 60 kW CO_2-Ersparnisse von ungefähr vier Tonnen im Jahr erreichen, wobei die Brennstoffkosten von ca. 560 € im Jahr erzielt werden können. Ein nachhaltiger ökologischer Effekt beim Einsatz des VREM-Systems ergibt sich vor allem durch die Entwicklung des technischen Umweltbewusstseins des Betreibers und seinem Verhalten bei der Brennstoffauswahl und Bedienung des Heizkessels.

6.5 O_2/CO_e-Sonde Typ KS1D für den Einsatz in Biomasseheizkesseln

Für die Regelung moderner Verbrennungstechnologien werden in der Regel und gemäß dem Stand der Technik Temperatur-, Druck- und Lambdasensoren eingesetzt. Mit der Hilfe dieser Sensorik werden Signale generiert, mit denen die Verbrennungsaktoren geregelt und der Verbrennungsprozess entsprechend betrieben werden kann. Die Regelung mit der O_2/CO_e-Sonde Type KS1D (Abbildung 4, blau gestrichelte Linie bzw. markierter Sensor) hat sich trotz eines großen Potentials und einer sicheren Funktionalität bislang aus vielen Gründen nicht durchgesetzt. Als Hauptgrund ist hier die mangelnde Betrachtung der CO_e-Sonde hinsichtlich des Einsatzes bei der Verbrennung von Festbrennstoffen zu nennen. Dazu zählen die fehlenden interdisziplinären Erfahrungen in den Forschungseinrichtungen in den Bereichen Regelung und Verbrennung.

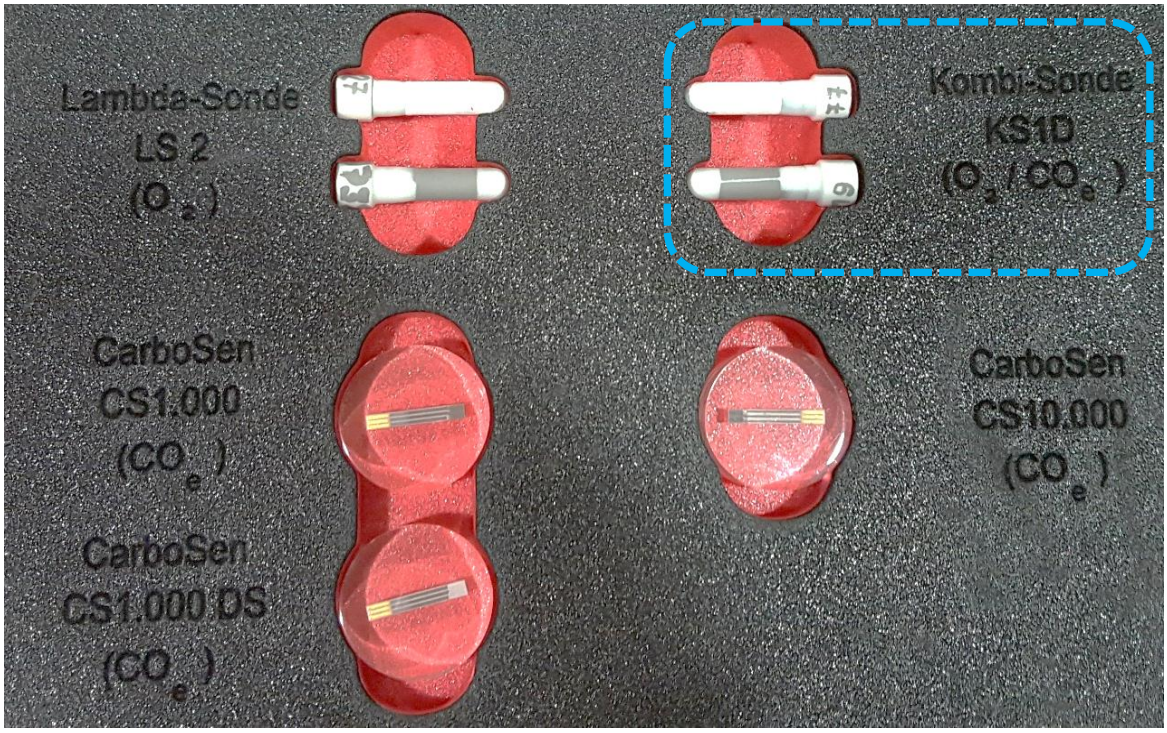

Abbildung 4: Sensoren der Firma LAMTEC GmbH & Co KG für die Messung von Sauerstoff sowie der nicht verbrannten Abgasbestandteile.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde die O_2/CO_e-Sonde des Typs KS1D ausführlich untersucht und anschließend für die Regelung der Verbrennung verwendet. Die originale Kalibrierkurve der Firma LAMTEC wurde ursprünglich für Öl- und Gasbrenner mit größerer Leistung entwickelt. Die Nutzung dieser Kalibrierkurve hat sich für die Verbrennung von Festbrennstoffen nicht bewährt. Daher war es unvermeidbar, die O_2/CO_e-Sonde zu kalibrieren und entsprechend zu charakterisieren. Für die Charakterisierung und Kalibrierung der O_2/CO_e-Sonde wurde ein spezieller im Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP entwickelter Abgassimulator eingesetzt, mit dem stationäre Betriebszustände bzw. die Zusammensetzung

von Abgasen praxisnah simuliert werden können. In diesem Abgassimulator lassen sich unterschiedliche Sensoren einfach integrieren, um das Sensorverhalten bzw. die Entwicklung der elektrischen Signale bei unterschiedlichen Betriebszuständen und Abgasbelastungen (beispielsweise Gaszusammensetzungen, Temperaturen usw.) zu untersuchen.

O_2/CO_e-Sensor (Mischpotentialsonde)

Der O_2/CO_e-Sensor ist auf das Mischpotential-Messprinzip aufgebaut, mit dem sich nicht nur der Sauerstoff, sondern auch zusätzliche Komponenten im Abgas wie beispielsweise CO_e (als Summenparameter für nicht verbrannte Bestandteile) detektieren lassen. Sowohl die CO_e- als auch O_2-Signale aus der O_2/CO_e-Sonde hängen stark von der Zusammensetzung des Abgases bzw. von den im Abgas enthaltenen nicht verbrannten Bestandteilen ab. Hinsichtlich des äußeren technischen Aufbaus unterscheiden sich die O_2- und die O_2/CO_e-Sonden kaum voneinander, wie der Abbildung 5 zu entnehmen ist.

O_2/CO_e-Sonde, Typ KS1D

O_2-Sonde, Typ LSU4

Abbildung 5: Aufbau der O_2/CO_e-Sonde (Typ KS1D) der Firma LAMTEC GmbH & Co. KG im Vergleich zur Lambda-Sonde (Typ LSU4) der Firma Bosch GmbH.

Trotz der Ähnlichkeit des technischen Aufbaus unterscheidet sich die O_2/CO_e-Sonde deutlich von der Lambda- bzw. O_2-Sonde durch das Funktionsprinzip. Abbildung 6 zeigt das Funktionsprinzip der O_2/CO_e-Sonde der Firma LAMTEC GmbH & Co. KG.

Bei der O_2/CO_e-Sonde handelt es sich um einen hochdynamischen Festelektrolytsensor aus Zikrondioxidkeramik mit katalytischer Beschichtung. Auf der Innenseite der O_2/CO_e-Sonde befindet sich ein Referenzraum mit Umgebungsluft (Sauerstoffkonzentration etwa 21 %), der mit einer

Referenzelektrode (1) aus Platin umhüllt ist. Die Außenseite der O_2/CO_e-Sonde wird mit Abgas angeströmt, welches aus unterschiedlichen brennbaren Bestandteilen (CO_e) mit entsprechenden Konzentrationen besteht und eine geringere Sauerstoffkonzentration als Umgebungsluft aufweist. An der Außenseite der O_2/CO_e-Sonde befinden eine Messelektrode (2) aus Platin für die Ermittlung des Sauerstoffgehalts im Abgas und eine Messelektrode (3) aus einer Platin/Edelmetall-Mischung welche für die Ermittlung der CO_e-Konzentration verwendet wird. Der Sensor wird durch einen integrierten Heizer (7) auf etwa 650 °C aufgeheizt. In diesem Temperaturbereich hat die Zikrondioxidkeramik eine sauerstoffionenleitende Eigenschaft. Durch die unterschiedlichen Sauerstoffpartialdrücke bzw. Differenz zwischen der Sauerstoffkonzentration im Abgas und dem Referenzraum in der O_2/CO_e-Sonde werden Sauerstoffionen vom Referenzraum zum Abgas geleitet, wodurch eine elektrische Spannung (Nernst-Spannung) erzeugt wird. Es gilt, je höher die Differenz zwischen der Sauerstoffkonzentration in dem Referenzraum (Umgebungsluft) und dem Abgas ist, desto größer wird die Nernst-Spannung. Befinden sich im Abgas zusätzlich brennbare Gase bzw. CO_e, entsteht zwischen der Elektrode aus der Platin/Edelmetall-Mischung und der Referenzelektrode in der O_2/CO_e-Sonde eine zusätzliche sogenannte nicht-Nernst-Spannung, welche sich rechnerisch aus der Differenz der Gesamtspannung (Nernst-Spannung und nicht-Nernst-Spannung) zwischen der Platin/Edelmetallelektrode und der Referenzelektrode sowie der Spannung zwischen der Platinelektrode und Referenzelektrode (Nernst-Spannung) ergibt. Die nicht-nernstische Spannung ist stark vom Sauerstoffgehalt (die sogenannte Querempfindlichkeit) sowie der Art und den Konzentrationen der brennbaren Bestandteile im Abgas abhängig.

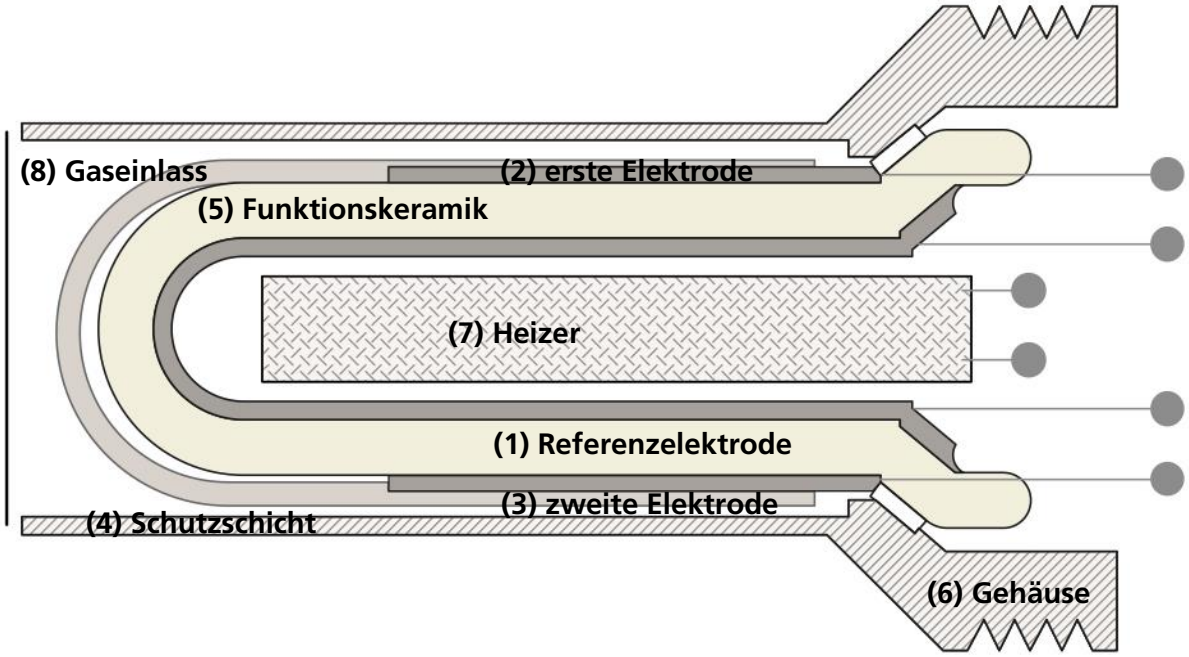

Abbildung 6: Das Funktionsprinzip der O_2/CO_e-Sonde der Firma LAMTEC GmbH & Co. KG [in Anlehnung an Wiegleb 2016].

Für die Verwendung von Sensoren in Biomasseheizkesseln sind nicht nur die Zuverlässigkeit der Ergebnisse, sondern auch die Stabilität und Dauerhaftigkeit von großer Bedeutung. Die drei Kriterien wurden im Rahmen dieses Forschungsprojekts sowohl auf dem Prüfstand als auch in der Praxis ausgiebig untersucht.

Auf dem Markt werden neben den Mischpotentialsonden bzw. Kombinationssonden auch reine CO_e-Sonden wie beispielsweise die CarboSen-Sonde der Firma LAMTEC GmbH & Co. KG angeboten. Die CarboSen-Sonde wurde im Rahmen dieses Forschungsprojekts über einen Zeitraum von ca. sechs Betriebswochen getestet. Zwar wurde die Sonde erfolgreich kalibriert und eingesetzt, jedoch hat der CarboSen-Sensor nicht die Stabilität aufgewiesen wie die KS1D Mischpotentialsonde.

6.6 Kalibrierung und Charakterisierung der O_2/CO_e-Sonde

Trotz des großen Potentials für den Einsatz der O_2/CO_e-Sonde ist es den Forschern in zahlreichen vorherigen Forschungsprojekten nicht gelungen die O_2/CO_e- Sonde erfolgreich in Biomasseheizkesseln einzusetzen. Bei keiner der bisher durchgeführten Forschungsprojekte wurde die O_2/CO_e- Sonde miterforscht und entsprechend für den Einsatz in Biomasseheizkesseln charakterisiert bzw. kalibriert. In diesem Abschnitt werden der Versuchsaufbau mit den Ergebnissen der Charakterisierung und Kalibrierung der O_2/CO_e-Sonde des Typs KS1D der Firma LAMTEC GmbH & Co. KG dargestellt.

Versuchsaufbau für die Kalibrierung und Charakterisierung:

Ein großes Problem beim Einsatz von Mischpotentialsonden wie beispielsweise der O_2/CO_e-Sonde beruht darauf, dass die Sonden unterschiedliche Sensitivitäten gegenüber den im Abgas vorhandenen brennbaren Komponenten haben. Zusätzlich dazu weist diese Sonde eine starke Querempfindlichkeit der CO_e-Signale gegenüber dem Sauerstoffgehalt im Abgas auf. Die O_2/CO_e-Sonde des Typs KS1D wurde im Rahmen dieses Forschungsprojekts in einem speziellen im Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP entwickelten Abgassimulator (Abbildung 7) bei unterschiedlichen Konzentrationen an brennbaren Abgasen (Kohlenstoffmonoxid CO, Methan CH_4, Propan C_3H_8, Wasserstoff H_2) bzw. in Anwesenheit unterschiedlicher Sauerstoffkonzentrationen kalibriert und entsprechend charakterisiert.

Die O_2/CO_e-Sonde (1) ist in dem Abgasrohr des Abgassimulators so befestigt, dass der Kopf der Sonde durch das Abgas mittig angeströmt wird. Unterhalb der Sonde bzw. in dem Abgasrohr befindet sich eine Homogenisierungsschicht aus Drahtgestrick (2), welche mit Abgas durchströmt wird. In dieser Schicht wird das Abgas durch starke Turbulenz vermischt bzw. homogenisiert, sodass über den gesamten Querschnitt im Abgasrohr ähnliche Konzentrationen an Schadstoffen gemessen werden können. Unterhalb der Homogenisierungsschicht befindet sich die Stickstoffzugabe (3). Der Vorteil durch die Zugabe von Stickstoff beruht

darauf, dass der Stickstoff nicht brennbar ist bzw. kaum reaktive Eigenschaften aufweist. Über die in den Abgassimulator zugeführte Menge an Stickstoff kann der Sauerstoffgehalt im Abgas genauestens eingestellt und die Querempfindlichkeit des CO_e-Signals bei unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen entsprechend ermittelt werden.

Abbildung 7: Versuchsaufbau zur Kalibrierung und Charakterisierung der O_2/CO_e-Sonde.

Unterhalb der Stickstoffzugabe befindet sich die Zugabe der brennbaren Abgase (3), welche über eine Dosiereinrichtung (Abgasquelle bzw. Gasflaschen, Druckminderer, Druck- und Massendurchflussmesser, Gasventile und Mischer) in den Abgassimulator zugeführt werden. Über die Einstellung der Förderleistung eines Gebläses (5) können zudem unterschiedliche Abgasvolumenströme und -geschwindigkeiten eingestellt werden. Eine Besonderheit des Abgassimulators beruht auf einem kompakten Porenbrenner, mit dem durch gezielte Zugabe an Gas und Sauerstoff in den Brenner unterschiedliche Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid sowie Abgastemperaturen eingestellt werden können. Dieser Versuchsaufbau liefert optimale Bedingungen für die Charakterisierung, Kalibrierung und Überprüfung von Sensortechnologien wie beispielsweise O_2/CO_e-, CO_e-, O_2 und NO_x-Sensoren, welche für den Einsatz in mit Festbrennstoffen betriebenen Verbrennungssystemen eingesetzt werden sollen.

Bei der Charakterisierung und Kalibrierung der O_2/CO_e-Sonde wurden die elektrischen Signale und deren Korrelationen bei verschiedenen Gehalten an Sauerstoff und Konzentrationen an brennbaren Gasen wie beispielsweise Kohlenstoffmonoxid, Methan, Propan und Wasserstoff in dem simulierten Abgas im Abgassimulator ermittelt und statistisch bewertet.

Ergebnisse der Kalibrierung und Charakterisierung der O_2/CO_e-Sonde

Da zu Beginn dieses Forschungsprojekts nur wenige Langzeiterfahrungen mit dem Einsatz der O_2/CO_e-Sonde in mit Festbrennstoffen betriebenen Heizkesseln vorlagen, musste die O_2/CO_e-Sonde charakterisiert werden. Bei der Charakterisierung der O_2/CO_e-Sonde in dem Abgassimulator wurde die Sonde mit unterschiedlichen brennbaren Gasen (Methan, Propan, Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff) und verschiedenen Sauerstoffgehalten im Abgas beaufschlagt, wobei das Sensorverhalten untersucht wurde. Bei den Untersuchungen wurde festgestellt, dass sich die Korrelationen zwischen den CO_e-Konzentrationen und dem generierten elektrischen Signal mit einfachen linearen Kalibrierkurven nicht beschreiben lassen. Je nach CO_e-Konzentrationen und dem Sauerstoffgehalt im Abgas hat sich die Sonde unterschiedlich verhalten. Dabei hat die Sensitivität der Sonde stark variiert. In dem Diagramm 18 sind die Korrelationsebenen dargestellt, welche die Abhängigkeit zwischen der Sensorspannung (nicht-nernst´sche Spannung) und den Konzentrationen an brennbaren Gasen bei unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen beschreiben. Dem Diagramm 18 ist zu entnehmen, dass aufgrund der Querempfindlichkeit eine große Abhängigkeit zwischen der Konzentration an Sauerstoff und der Sensorspannung besteht. Tendenziell ist die Sensorspannung im Fall von gleichen Konzentrationen an Schadgasen bei niedrigen Konzentrationen an Sauerstoff im Abgas höher als bei höheren Konzentrationen an Sauerstoff.

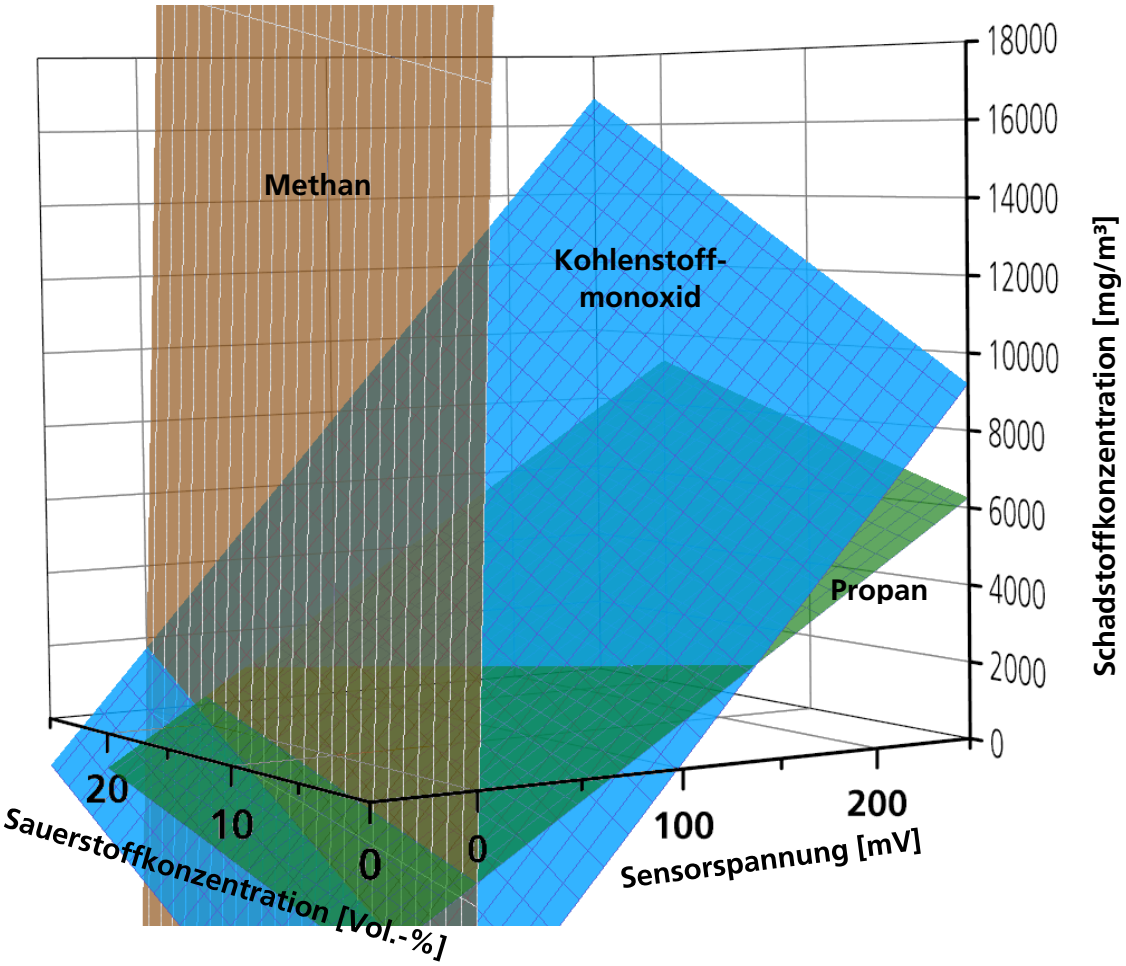

Diagramm 18: Charakterisierungsebenen bei einer Beaufschlagung der O_2/CO_e-Sonde mit brennbaren Gasen.

Dem Diagramm 18 ist außerdem zu entnehmen, dass die Sensitivität bzw. die Entwicklung der Sensorspannung stark von der Art der brennbaren Gase abhängt. Beispielsweise ist die Sensitivität der Sensorspannung bei der Beaufschlagung mit Propan deutlich größer als bei Kohlenstoffmonoxid und Methan, wobei bereits bei niedrigen Konzentrationen an Propan im Abgas hohe Sensorspannungen entstehen. Im Gegensatz dazu entsteht bei der Beaufschlagung mit Methan auch bei hohen Konzentrationen eine deutlich geringere Sensorspannung. Eine sehr große Sensitivität des CO_e-Signals wurde im Rahmen der Versuche bei der Beaufschlagung der Sonde mit Wasserstoffgas festgestellt. Hier wurde bereits bei niedrigsten Konzentrationen an Wasserstoff die höchste Sensorspannung erreicht. Aus diesem Grund war die Erstellung von entsprechenden Charakterisierungsebenen bei der Beaufschlagung mit Wasserstoff nicht möglich. Die höhere Sensitivität der O_2/CO_e-Sonde bei der Beaufschlagung mit Propan gegenüber Methan ist vermutlich auf den höheren Wasserstoffgehalt in der Propanverbindung (Propan besitzt acht Wasserstoffatome, wobei Methan aus vier Wasserstoffatomen besteht) zurückzuführen, wobei die Kohlenwasserstoffverbindungen nicht direkt verbrannt, sondern zunächst an der O_2/CO_e-Sonde in Kohlenstoffmonoxid

und Wasserstoff umgewandelt werden. Bei der Anwesenheit von Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid wird an der Sonde je nach Konzentration ein entsprechendes elektrisches Signal erzeugt. Es ist zu vermuten, dass das Sensorsignal bei Kohlenwasserstoffen mit der Anzahl der in den Kohlenwasserstoffen enthaltenen Wasserstoffatome korreliert.

Die Charakterisierungsebene für Kohlenstoffmonoxid liegt im Zwischenbereich von den Charakterisierungsebenen für Methan und Propan. Die Beschreibung der Konzentrationen an nicht verbrannten Bestandteilen im Abgas als CO-Äquivalente hat die folgenden Vorteile:

- Die Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid im Abgas sind in der Regel bei der Verbrennung höher als die Konzentrationen an Kohlenwasserstoffen: Die Oxidation von Kohlenwasserstoffen zu Kohlenstoffmonoxid verläuft deutlich schneller als die Umwandlung von Kohlenstoffmonoxid zu Kohlenstoffdioxid [Kaltschmitt et al. 2009]. Aus diesem Grund sind die Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid im Abgas während des gesamten Betriebs größer als die der Gesamtkohlenwasserstoffe.
- Bei den Reaktionen von nicht verbrannten Bestandteilen an dem O_2/CO_e-Sensor ist die Sensitivität für die CO-Äquivalente für die Beschreibung von Konzentration an nicht verbrannten Bestandteilen am geeignetsten. Bei Angaben bzw. Berechnung als Methanäquivalente ist die Sensitivität des Sensors sehr hoch, wobei die Konzentrationen an nicht verbrannten Bestandteilen deutlich höher dargestellt werden, als sie während des Betriebs tatsächlich anfallen. Im Gegensatz dazu werden Emissionen an nicht verbrannten Bestandteilen bei der Berechnung als Propan-Äquivalente aufgrund einer geringen Sensitivität niedriger dargestellt als sie sich im Abgas wiederfinden. Diese technischen Feststellungen sind dem Diagramm 18 zu entnehmen.

Aufgrund der oben dargestellten Vorteile der Ermittlung der Konzentrationen an nicht verbrannten Bestandteilen im Abgas als CO-Äquivalente bzw. Summenparameter wird dieser für die Emissionskantenregelung sowie die permanente Bewertung der Verbrennungsqualität bzw. Emissionsüberwachung sowie des Betriebs eingesetzt.

6.7 Technische Besonderheiten, Vorteile und Beitrag des VREM-Systems zum Klimaschutz

Die Kombination aus der regelungstechnischen Optimierung der Verbrennung von Biomasseheizkesseln mit der Überwachung der Verbrennungsqualität durch eine permanente Messung der nicht verbrannten Abgasbestandteile (CO_e als Summenparameter) soll als effektive Methode zur sicheren Verbesserung der Verbrennungseffizienz sowie als präventive Maßnahme zur Schadstoffminderung im Praxisbetrieb weiter zunehmend an Bedeutung gewinnen. Diese neuartige Kombination gemäß dem Stand der Technik führt zu einer nachhaltigen und bedeutsamen

Reduzierung der Schadstoffemissionen vor allem Feinstaub, VOCs und PAKs im Praxisbetrieb und gewährleistet eine angemessenere und zeitgemäße Bewertung/Kontrolle im Vergleich zur heutigen Kontrolle gemäß der 1. BImSchV bzw. Schornsteinfegermethode.

Die Besonderheiten des VREM-Systems liegen in den folgenden konzeptionellen, regelungs- und kalibrierungstechnischen Punkten:

- Kombination der permanenten Überwachung mit der Regelung des Verbrennungsprozesses, wobei sich der Betrieb hinsichtlich ökonomischer und ökologischer sowie sicherheitstechnischer Aspekte bewerten lässt.
- Die Software mit den Regel- und Überwachungsalgorithmen sind so designed und entwickelt, dass sie sich für einen universellen Einsatz eignen. Dabei spielen die Brennstoffe sowie die verwendete Verbrennungstechnik eine untergeordnete Rolle. Die Regel- und Überwachungsalgorithmen sind in der Lage den Verbrennungsprozess zu jedem Betriebszeitpunkt zu analysieren und die günstigsten Einstellungen der Verbrennungs- und Leistungsparameter auszusuchen, bei denen ein ökologischer und ökonomischer Betrieb gewährleistet werden kann.
- Für eine möglichst genaue Ermittlung der nicht verbrannten gasförmigen Bestandteile, unabhängig von der Betriebsphase, wurden mehrere Kalibrierebenen für den Einsatz in mit festbrennstoffbetriebenen Heizkesseln entwickelt und in die Software integriert. Die mathematischen Funktionen dieser Kalibrierebenen variieren je nach den Konzentrationen an nicht verbrannten gasförmigen Bestandteilen sowie nach dem vorhandenen Sauerstoffgehalt im Abgas. Die Auswahl der geeigneten Kalibrierebenen für den jeweiligen Betriebspunkt erfolgt automatisch anhand weiterer intelligenter Algorithmen, welche im Rahmen dieses Forschungsprojekts entwickelt wurden.
- In dem VREM-System sind alle sicherheitsrelevanten und technischen Aspekte berücksichtigt, welche gemäß der Norm DIN EN 303-5 sowie der Maschinenrichtlinie (MRL Richtlinie 2006/42/EG) zu erfüllen sind. Die Software ist so aufgebaut, dass bei der Konfiguration der Software alle sicherheitsrelevanten Parameter abgefragt werden können.
- Das VREM-System ist technisch so aufgebaut, dass es entweder als getrennte Einheit mit dem Regler des Heizkessels kombiniert oder als Programmbaustein in die Regelung bzw. Software des Heizkessels integriert werden kann.

Aus den oben erwähnten Besonderheiten ergeben sich folgende technische Vorteile:

- Einfache Übertragbarkeit des VREM-Systems auf alle Arten der festbrennstoffbetriebenen Heizkessel ohne großen Aufwand für die regelungstechnische Anpassung der Software.
- Da die Anforderungen gemäß der DIN EN 303-5 und der MRL 2006/42/EG in der Software des VREM-Systems systematisch berücksichtigt sind, kann das VREM-System in den sich im Praxisbetrieb

befindlichen Heizkesseln vor allem hinsichtlich der permanenten Betriebsüberwachung ohne Probleme bzw. ohne großen technischen Aufwand nachgerüstet werden.

- Durch die mögliche integrierte und kombinierte Bauweise des VREM-Systems lässt sich eine hohe Wirtschaftlichkeit sowie einfache Nachrüstbarkeit des VREM-Systems gewährleisten.

Ein besonderer Vorteil bei dem VREM-System ergibt sich aus dem permanenten Monitoring bzw. aus der Erkennung der Funktionalität der Verbrennungstechnik. Diese ermöglicht den Herstellern eine kostengünstige Fernwartung der Verbrennungstechnik sowohl innerhalb als auch außerhalb der Gewährleistungsgarantiezeit. Das Gleiche gilt für die Überprüfung der nachgeschalteten Abgasreinigungsanlagen wie z. B. Staubabscheider, deren Funktionalität und Abscheideleistung von der Verbrennungsqualität abhängt.

Die Klimarelevanz des VREM-Systems ergibt sich aus den Brennstoff- und somit CO_2- Ersparnissen im Praxisbetrieb. Außerdem lassen sich oxidierbare Schadstoffkomponenten vor allem Kohlenstoffmonoxid, PAKs, VOCs sowie organische Feinstäube vermeiden, wodurch das VREM-System eine große Gesundheitsrelevanz besitzt. Diese Abgase werden nicht nur durch die Optimierung der Verbrennung vermieden, sondern auch durch die Vermeidung von kritischen Betriebsphasen, bei denen die Verbrennung trotz Einstellung des Sauerstoffsollwerts unvollständig stattfindet. Beispielsweise werden Biomasseheizkessel gemäß der DIN EN 303-5 für eine bestimmte Nennlast bzw. Nennwärmeleistung sowie im Teillastbetrieb geprüft, welcher maximal 30 % der von den Herstellern angegebenen Nennwärmeleistung bei automatisch beschickten bzw. 50 % bei handbeschickten Heizkesseln sein darf. Die günstigen Betriebseinstellungen für die Nennlast sowie für den Teillastbetrieb werden bei dem Heizkessel meistens beim Einsatz guter Brennstoffe (Prüfbrennstoff) ermittelt, mit denen anschließend die Typprüfung auf dem Prüfstand durchgeführt wird. Bei einer Abweichung von der Qualität des Brennstoffs im Praxisbetrieb ändern sich diese optimalen Einstellungen vor allem für den Teillastbetrieb und es findet zwangsläufig eine unvollständige und somit ineffiziente Verbrennung statt. Die Erkennung und die Korrektur solcher kritischen Betriebszustände, welche sehr häufig im Praxisbetrieb auftreten, sind ohne entsprechende Überwachungssysteme wie z. B. mit dem VREM-System nicht möglich.

7 Technische Einrichtungen zur Versuchsdurchführung

Das VREM-System wurde unter normativen Bedingungen mit Hilfe eines handelsüblichen Heizkessels entwickelt. Die Entwicklungs- und Optimierungsarbeiten wurden auf einem akkreditierten Prüfstand gemäß DIN EN 304 sowie DIN EN 303-5 durchgeführt. Darüber hinaus wurde das VREM-System zur Überprüfung der Funktionalität unter praktischen Betriebsbedingungen sowie der Übertragbarkeit in zwei Biomasseheizkesseln (automatisch und handbeschickt) integriert und über eine Heizperiode getestet. Im Folgenden werden die technischen Einrichtungen vorgestellt, welche für die Entwicklung des VREM-Systems eingesetzt wurden.

In der Abbildung 8 sind die technischen Versuchseinrichtungen dargestellt, welche für die Entwicklung und Erprobung des VREM-Systems eingesetzt wurden. Der Versuchsaufbau besteht aus den folgenden Bestandteilen (Abbildung 8):

- Handbeschickte Verbrennungsversuchsanlage mit einer thermischen Leistung von 50 kW. Dabei handelt es sich um einen handelsüblichen Holzvergaserkessel mit einem seitlichen Abbrand, welcher die Simulation unterschiedlicher Betriebszustände und kritischer Betriebsphasen ermöglicht,
- Abbrandwaage mit einem integrierten Temperaturmessboden für einen sicheren Betrieb und eine genaue Bestimmung der Brennstoffabnahme und somit der thermischen Leistung während der Verbrennung,
- Abgasmessstrecke gemäß DIN EN 304 bzw. DIN EN 303-5 für die Messung von staub- und gasförmigen Emissionen sowie sonstigen Abgasparametern für die Umrechnung der Emissionen sowie die Einstellung der Betriebsbedingungen,
- kaltextraktive (der Firma ABB Ltd des Typs AO 2020) und heißextraktive (der Firma ANSYCO analytische Systeme und Componenten GmbH des Typs FTIR Gas-Analysator GASMET) Abgasmessgeräte sowie Flammenionisationsdetektor FID der Firma SK Elektronik GmbH für die Messung der Gesamtkohlenwasserstoffe. Mit diesen Messgeräten lassen sich folgende Abgaskomponenten mit einer hohen Genauigkeit messen:
    - Typische Verbrennungsprodukte: Kohlenstoffdioxid (CO_2), Wasserdampf (H_2O), Sauerstoff (O_2),
    - Brennbare Komponenten im Abgas aus unvollständiger Verbrennung: Kohlenstoffmonoxid (CO), Gesamtkohlenwasserstoffe (C_nH_m), gefährliche Kohlenwasserstoffverbindungen (z. B. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe).
    - Nicht-brennbare saure Komponenten im Abgas: Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO_2), Schwefeldioxid (SO_2), Chlorwasserstoff (HCL).
- Staubmesssysteme gemäß VDI 2066 sowie gemäß der üblichen Schornsteinfegermessmethode,

- ein regelbares Wärmeabfuhrsystem für die Simulation unterschiedlicher Wärmeabgaben in Analogie zum Kesselbetrieb in der Praxis,
- Druck-, Temperatur- und Massenstrommesser, welche sowohl in die Abgasmessstrecke als auch in den Heizkessel in unterschiedlichen Stellen integriert sind und
- Datenerfassungs- und Bewertungssystem mit einer integrierten Regelung auf Basis einer speicherprogrammierbaren Steuerung SPS (Abbildung 11).

Abbildung 8: Technische Einrichtung (akkreditierter Prüfstand gemäß DIN EN 304 für die Zulassungsprüfung von Heizkesseln gemäß DIN EN 303-5) für die Versuchsdurchführung und Entwicklung des VREM-Systems.

Die Abbildung 9 zeigt eine schematische Darstellung eines Teils des gesamten Versuchsaufbaus, in dem die Stellen für die Messung der staub- und gasförmigen Emissionen sowie die Abgasparameter verdeutlicht sind.

Die Verbrennungsversuchsanlage ist über einen entsprechenden Abgasstutzen mit einer Messstrecke verbunden. In dem Abgasstutzen sind die O_2/CO_e-Sonde zur Ermittlung der Konzentrationen an nicht verbrannten Bestandteilen bzw. CO_e und des Sauerstoffgehalts im Abgas sowie ein Temperaturfühler befestigt. Dazu sind Fühler für die Messung der Kesselwassertemperatur zwecks der Prozessregelung und -überwachung installiert.

Abbildung 9: Prüfstand gemäß DIN EN 303-5 und DIN EN 304.

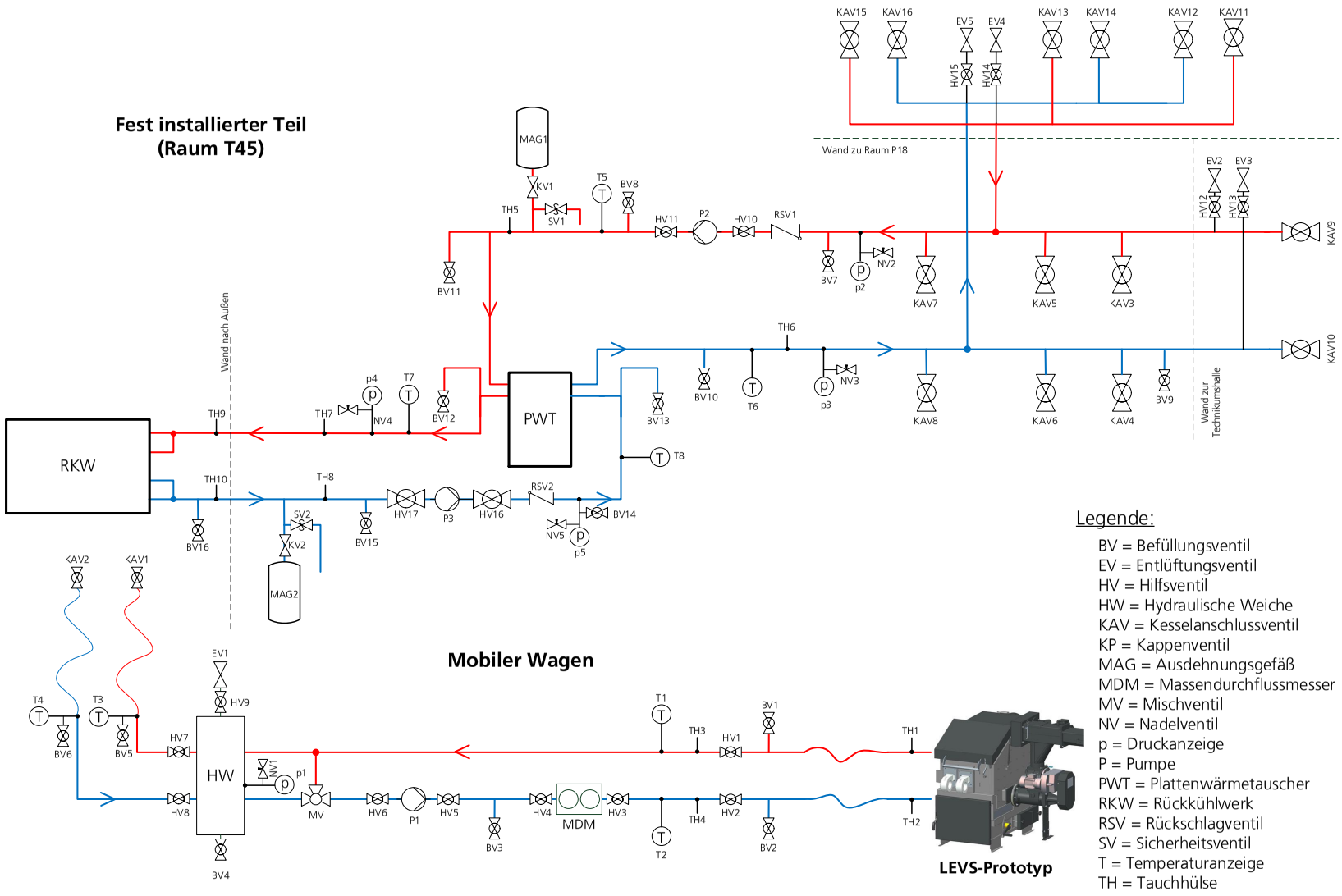

Abbildung 10: Hydraulischer Schaltplan für das im Rahmen des LEVS entwickelten eingesetzten Wärmeabfuhrsystems zur Simulation des Betriebs von Heizkesseln.

Zur Simulation unterschiedlicher Betriebszustände in der Praxis, welche für die Entwicklung des VREM-Systems notwendig sind, wurde ein neuartiges Wärmeabfuhrsystem verwendet (Abbildung 10).

Das Wärmeabfuhrsystem besteht aus zwei Kreisläufen. Die vom Kessel an den Primärkreislauf übertragene Energie wird über einen Plattenwärmetauscher an den Sekundärkreislauf übertragen und von dort über ein Rückkühlwerk an die Umgebung abgegeben. Die abgeführte Wärmeleistung wird über zwei geregelte Umwälzpumpen und über ein stufenlos geregeltes Rückkühlwerk eingestellt. Durch die Pumpen wird die Verweilzeit des Wassers sowohl im Primär- als auch Sekundärkreislauf und somit die mitgeführte Wärme eingestellt. Durch die Kühlleistung des Rückkühlwerks lässt sich die thermische Leistung in der Verbrennungsversuchsanlage zusätzlich modulieren. Die im selbstentwickelten Betriebsprogramm des Wärmeabfuhrsystems hinterlegten Leistungslinien ermöglichen systematische Einstellungen der Wärmeleistung des Heizkessels, wodurch unterschiedliche Betriebszustände (Überlast, Nennlastbetrieb, Teillastbetrieb sonstige Leistungsstufen) eingestellt und entsprechend simuliert werden können.

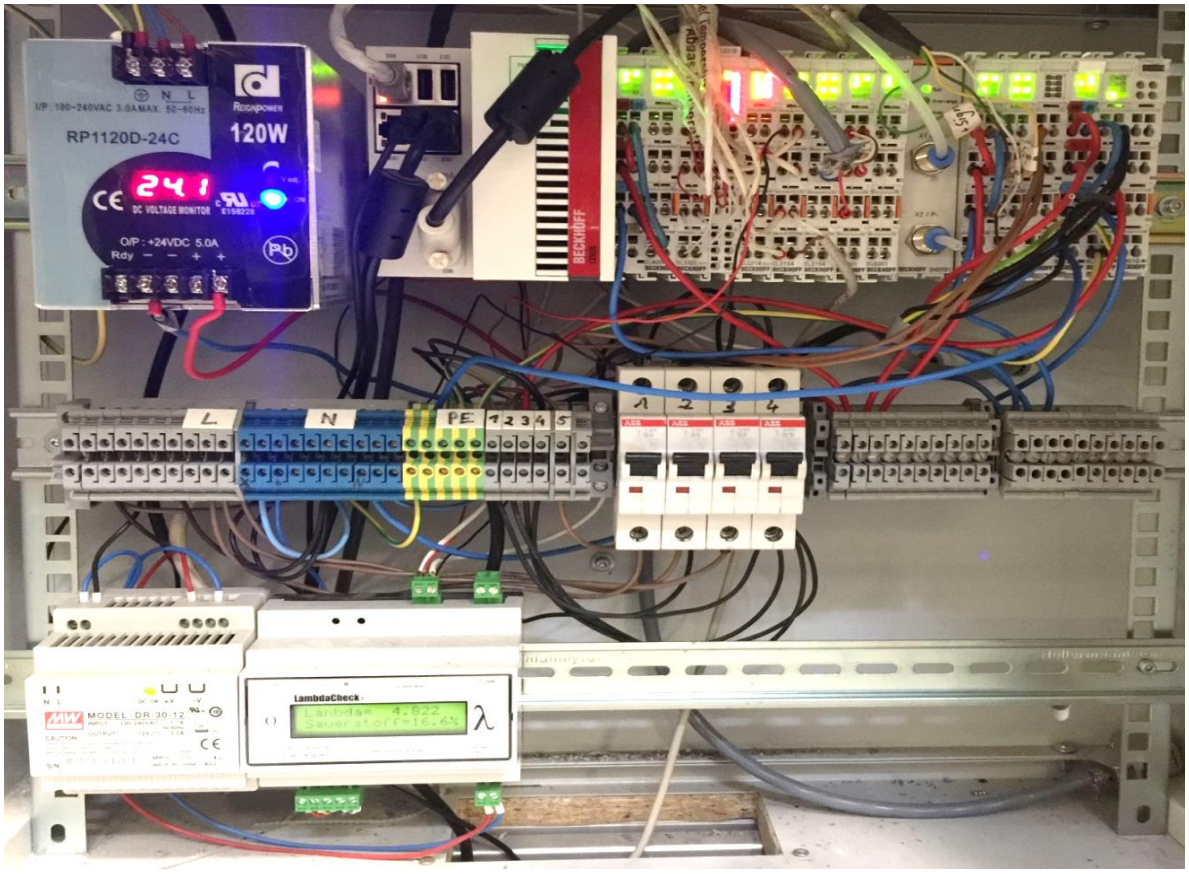

Abbildung 11: Speicherprogrammierbare Steuerung des VREM-Systems.

Die für die Versuchsdurchführung und Bewertung des Betriebs notwendigen Parameter werden in einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) aufgezeichnet, gespeichert und in einem Bildschirm bzw. Human Machine

Interface (HMI) visualisiert. Die SPS mit den entsprechenden Ein- und Ausgangsklemmen ist in der Abbildung 11 dargestellt. Hier sind die Sensoren (z. B. Temperatur-, O_2/CO_e- und Drucksensor) und Aktoren (Primär- und Sekundärluftgebläse oder –klappen) elektrisch mit der SPS verbunden.

Für die digitale Kommunikation und Weitergabe von Informationen an den Nutzer über die Qualität der Verbrennung im Biomasseheizkessel wurde ein SMS/SMTP Server der Firma BECKHOFF eingesetzt. Mit diesem lassen sich sowohl E-Mails über entsprechende Mailserver als auch SMS über ein GSM/GPRS Modem auf das Mobiltelefon bzw. Smartphone versenden.

Die Betriebsparameter des Heizkessels werden in dem HMI der SPS visualisiert und mit Hilfe einer selbstprogrammierten Oberfläche dargestellt. Der Nutzer und gegebenenfalls Externe haben die Möglichkeit den Betrieb über eine Remote-Verbindung oder Fernwartungssoftware wie z. B. TeamViewer verschlüsselt zu beobachten. Die aufgezeichneten Daten werden zudem in einer verschlüsselten Cloud im Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP online gespeichert. In der Visualisierung sind die Betriebsphasen, Leistungsstufe, Messwerte aus den Sensoren, Ergebnisse aus thermodynamischen Berechnungen und die zugeführten Mengen an Primär- und Sekundärluft dargestellt.

8 Eingesetztes VREM-System und durchgeführte Untersuchungen

In diesem Abschnitt werden die Versuchsergebnisse mit den technischen Einrichtungen dargestellt.

8.1 Technischer Aufbau des entwickelten und eingesetzten VREM-Systems

Bei dem VREM-System des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP handelt es sich um eine neuartige Technik für die Regelung und permanente Überwachung von Biomasseheizkesseln. Durch die Regelung mit der Überwachung werden sowohl eine bedeutsame Minderung oxidierbarer Schadstoffkomponenten als auch der verbrennungstechnisch höchstmögliche Wirkungsgrad erreicht. Zusätzlich dazu bietet das VREM-System auch eine kostengünstige und effektive Alternative zu den heutigen Überwachungsmechanismen gemäß der 1. BImSchV. Durch diese permanente und nicht nur stichprobenartige Überwachung der Verbrennungsqualität lässt sich eine nachhaltige und sichere Minderung der Schadstoffe in Wohngebieten erreichen. Die Minderung der Schadstoffe soll besonders durch eine bessere Mensch-Maschine-Interaktion zwischen dem Biomasseheizkessel, Nutzern und gegebenenfalls Externen unterstützt werden. Die oben dargestellten technischen Funktionalitäten (Regelung, permanente Überwachung, verstärkte Interaktion zwischen Mensch und Maschine) mit den technischen Bestandteilen des VREM-Systems wurden im Rahmen der Entwicklung und Dauererprobung des VREM-Systems besonders betrachtet. Das VREM-System, welches auf dem Prüfstand entwickelt bzw. für die Durchführung der nötigen experimentellen Untersuchungen eingesetzt wurde besteht aus den folgenden technischen Komponenten:

- **Hardware**:
  Dabei handelt es sich um eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS), welche die Messdaten der eingebundenen Sensoren empfängt, verarbeitet bzw. aus- und bewertet sowie anschließend nach bestimmten Prioritäten speichert. Außerdem sind die für die Regelung des Verbrennungsprozesses notwendigen Aktoren mit der SPS über spezielle Klemmen verbunden. Diese Aktoren werden mit entsprechenden Signalen durch die SPS versorgt, welche anhand einer ST-basierten Software bzw. der entwickelten Regelalgorithmen berechnet sind.
- **Sensoren:**
  Die O_2/CO_e-Sonde stellt einen essentiellen Teil des VREM-Systems dar, welches sowohl O_2- als auch CO_e-Signale generiert und über eine entsprechende Elektronik sowohl für die Regelung als auch für die permanente Überwachung verwendet wird. Zusätzlich zu der O_2/CO_e-Sonde werden Temperaturfühler sowie Druckmesssensoren eingesetzt.
- **Software:**
  Die Software ist mit der Programmiersprache ST (Structured Text) geschrieben, wobei TwinCat als Entwicklungsumgebung verwendet wurde. Die Software beinhaltet alle Variablen, Bibliotheken, Funktionen, Bausteine und das Hauptprogramm, in dem die Hauptalgorithmen

zusammengefasst bzw. geschrieben sind. Zusätzlich dazu verfügt das Programm über eine Visualisierungsoberfläche, welche eine einfache Überwachung der Prozessparameter ermöglicht.

- **Datenübertragungssystem:**
  Bei diesem System wurden zwei technische Möglichkeiten zur Online-Übertragung verwendet, wobei es sich bei der ersten Möglichkeit um die Übertragung von E-Mails und bei der zweiten Möglichkeit um die Versendung von SMS handelt. Darüber hinaus wurde eine Fernwartungssoftware verwendet, mit der die Betriebsparameter über eine entsprechende Visualisierung beobachtet werden können.

Die in der Praxis durchgeführte Dauererprobung bestand nur in der Verifizierung der Emissionsüberwachung unter praktischen Einsatzbedingungen. Dabei wurde der Verbrennungsprozess aus rechtlichen Gründen regelungstechnisch nicht beeinflusst. Heizkessel dürfen nach der Zulassungsprüfung (Typprüfung) weder konstruktiv noch regelungstechnisch geändert werden. Jede Änderung erfordert die Wiederholung der Typprüfung.

8.2 Durchgeführte Untersuchungen zur Entwicklung und Bewertung des VREM-Systems

Dabei ist zwischen den folgenden Untersuchungen zu unterscheiden:

- Untersuchungen der Effektivität der O_2/CO_e-Regelung,
- Untersuchungen zur konzeptionellen und technischen Funktionalität der Überwachung sowohl auf dem Prüfstand als auch in der Praxis und
- Untersuchungen zur Bewertung des Betriebs auf dem Prüfstand sowie im Praxisbetrieb.

Im Folgenden werden die oben aufgelisteten Untersuchungen inhaltlich ausführlich beschrieben:

8.2.1 Untersuchungen zur Effektivität der O_2/CO_e-Regelung

Zur Untersuchung der Effektivität der O_2/CO_e-Regelung wurde die Verbrennung nach den folgenden Kriterien analysiert und bewertet:

- Regelbarkeit des Verbrennungsluftzufuhr- und Abgasfördersystems,
- Verbrennungs- und Abbrandverhalten vom Brennstoff,
- Emissionsverhalten beim Betrieb des Heizkessels mit der O_2/CO_e-Regelung,
- Übertragbarkeit und Praxistauglichkeit der O_2/CO_e-Regelung.

Diese Punkte werden im Folgenden ausführlich beschrieben.

- Regelbarkeit des Verbrennungsluftzufuhr- und Abgasfördersystems:
  Die O_2/CO_e-Regelung (Emissionskantenregelung) mit dem VREM-System unterscheidet sich maßgeblich von der klassischen O_2-Regelung. Beim

Versuchsbetrieb soll der Einfluss der Verbrennungsluftzufuhr auf den Vergasungsprozess sowie auf die Qualität und die Stabilität der Verbrennung in verschiedenen Betriebszuständen (Startbetriebsphase, Regelbetriebsphase, Nachbeschickung, Teillastbetrieb usw.) untersucht werden.

- Verbrennungs- und Abbrandverhalten vom Brennstoff:
  Für die Entwicklung der O_2/CO_e-Regelung wurde eine Anlagentechnik (Vergaserkessel) ausgesucht, aus der sich die technischen Worstcases ergeben bzw. diese entsprechend simuliert werden können. Die Entwicklung der O_2/CO_e-Regelung für automatisch beschickte Heizkessel stellt keinen Teil des Projektes dar und soll in weiteren Forschungsprojekten durchgeführt werden. Bei den Untersuchungen des Abbrandverhaltens ist es sehr wichtig, das Verbrennungsluftzufuhr- und Abgasfördersystem für die Ermittlung der betrieblichen Systemgrenzen mit den jeweiligen technischen und sicherheitstechnischen Anforderungen zu betrachten. Ein wichtiger Aspekt ist die Untersuchung der Stabilität des Vergasungsprozesses bezüglich der geforderten Leistung des Heizkessels. Dazu gehören vor allem Untersuchungen zur Effizienz, Stabilität und Modulierbarkeit der Verbrennung.
- Emissionsverhalten mit der O_2/CO_e-Regelung:
  Die Art und Menge der gebildeten gas- und staubförmigen Schadstoffemissionen sind sehr wichtige Parameter zur Beurteilung der Regelungseffektivität und somit der Praxistauglichkeit von Verbrennungssystemen. Im Rahmen der Entwicklung der O_2/CO_e-Regelung wurden Messungen für Feinstaub, Kohlenstoffmonoxid, Gesamtkohlenwasserstoffe durchgeführt, welche für die Bewertung des Verbrennungsprozesses eine ausschlaggebende Rolle spielen.
- Übertragbarkeit und Praxistauglichkeit der O_2/CO_e-Regelung:
  Für den breiten Einsatz des VREM-Systems sind die Übertragbarkeit und Praxistauglichkeit von großer Bedeutung. Diese beschreiben die technische Funktionalität der O_2/CO_e-Regelung unter praktischen Einsatzbedingungen sowie die Einsatzfähigkeit der O_2/CO_e-Regelung in unterschiedlichen Biomasseheizkesseln, wobei sowohl eine ökologische als auch ökonomische Verbrennung über längere Betriebszeit gewährleistet werden muss.

8.2.2 Untersuchungen der Funktionalität der Emissionsüberwachung

Die technische Funktionalität der Überwachung wurde sowohl auf dem Prüfstand als auch im Praxisbetrieb anhand von zwei Verbrennungsanlagen getestet. Dabei wurden folgende Untersuchungen durchgeführt bzw. Aspekte betrachtet:

- Validierung und Verifizierung der ermittelten Kalibrierkurven auf dem Prüfstand gemäß Abschnitt 6.6:
  Vor dem Beginn der Untersuchungen auf dem Prüfstand wurde die O_2/CO_e-Sonde für den Einsatz in Biomasseheizkesseln kalibriert und entsprechend charakterisiert, wobei ein besonderer Wert auf die

Grenzen (Richtigkeit der Messung bei unterschiedlichen CO_e-Konzentrationen bzw. O_2-Gehalten sowie Temperaturen und Abgasgeschwindigkeiten) der O_2/CO_e-Sonde gelegt wurde. Nach der Kalibrierung wurde die Sonde in den Heizkessel integriert und auf ihre Messplausibilität anhand des Einsatzes von Referenzbrennstoffen sowie von hochgenauen Gasanalysen zur Messung von Kohlenstoffmonoxid und Gesamtkohlenwasserstoffen bzw. des Anteils von nicht verbrannten Bestandteilen im Abgas überprüft. Dabei wurden die Messunsicherheiten sowie die Abweichungen der Messungen (O_2/CO_e-Sonde /Gasanalysegeräte) voneinander besonders betrachtet.

- Technische Funktionalität und Stabilität der O_2/CO_e-Sonde auf dem Prüfstand sowie im Praxisbetrieb:
  Die Bewertung der Plausibilität der Messergebnisse der O_2/CO_e-Sonde beim Einsatz unterschiedlicher Brennstoffe bzw. Betriebsfälle ist sowohl für die Regelung als auch für die Überwachung mit dem VREM-System von großer Bedeutung. Hierzu wurde ein direkter Vergleich von den Konzentrationen der nicht verbrannten Abgasbestandteile gezogen, welche mit der O_2/CO_e-Sonde sowie mit den Gasanalysen parallel bei den jeweiligen Betriebszuständen gemessen wurden.

- Funktionalität und Plausibilität der verwendeten Algorithmen:
  Die Überwachungsalgorithmen (Abschnitt 6.4.2) wurden zunächst auf dem Prüfstand unter normativen Betriebs- und Messbedingungen geschrieben und entsprechend getestet. Ein wichtiger Forschungspunkt war die Plausibilität dieser Algorithmen im Praxisbetrieb zu testen. Darüber hinaus wurden die Algorithmen für die Fehlererkennung hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit in unterschiedlichen Betriebssituationen und –zuständen überprüft.

8.2.3 Untersuchungen zur Bewertung des Betriebs

In Analogie zur Emissionsüberwachung wurden folgende Untersuchungen zur Bewertung des Betriebs sowohl auf dem Prüfstand als auch im Praxisbetrieb unter Berücksichtigung ökologischer, ökonomischer und sicherheitsbasierender Aspekte durchgeführt:

- Automatische Erkennung der Betriebsphasen (Anfahrbetriebsphase, Regelbetriebsphase und Ausbrand):
  Die Erkennung der Betriebsphasen ist sowohl für die Auswahl der richtigen Regelstrategien als auch für die Überwachung und Bewertung des Betriebs von großer Bedeutung. Beispielsweise lässt sich eine zielführende Emissionskantenregelung nur in der Regelbetriebsphase durchführen, wobei die Verbrennung stabil läuft. Weder in der Ausbrandbetriebsphase noch im Teillastbetrieb bzw. in der Anfahrbetriebsphase ist die Emissionskantenregelung zu empfehlen bzw. zielführend. Die Regelung in diesen Betriebsphasen soll mit den klassischen Regelalgorithmen der Lambdasonde erfolgen. Für die Emissionsbewertung ist es sehr wichtig, die jeweiligen Betriebsphasen zu erkennen und die Emissionen der nicht verbrannten Abgasbestandteile entsprechend zu messen und getrennt zu bewerten bzw. darzustellen. Dadurch lassen sich direkte Rückschlüsse auf die sachgemäße

Funktionalität der Verbrennungstechnik sowie des gesamten Wärmebereitstellungssystems ziehen. Beispielsweise führt eine mangelhafte hydraulische bzw. regelungstechnische Bindung des Heizkessels mit dem Heizsystem bzw. die Überdimensionierung der Verbrennungstechnik und/oder die Unterdimensionierung des Pufferspeichers zu einer ungünstigen Taktung des Heizkessels, welche sich durch die Auftretenshäufigkeit des Teillastbetriebs oder on/off-Betriebsmodus erkennen lässt.

- Bewertung der Verbrennungseffizienz und des Kesselwirkungsgrads: Die Grundlage für die Bewertung des Betriebs auf Basis des VREM-Systems ist im Abschnitt 6.4.3 beschrieben. Im Abschnitt 6.4.1 ist die verwendete Methode bzw. der Regelbaustein für die Berechnung der Verbrennungseffizienz ausführlich beschrieben.
- Erkennung von technischen Fehlern und Fehlbedienungen: Dabei werden ausschließlich Fehler bzw. Fehlerkombinationen (siehe Abschnitt 6.4.2) betrachtet, welche zu einem unsachgemäßen Betrieb führen. Ein unsachgemäßer Betrieb bedeutet in diesem Zusammenhang ein Betrieb, bei dem ein bestimmter Grenzwert an nicht verbrannten Abgasbestandteilen überschritten wird sowie keine hohe Verbrennungseffizienz gewährleistet werden kann.

9 Ergebnisse bei der Entwicklung des VREM-Systems auf dem Prüfstand

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden sowohl die O_2/CO_e-Regelung als auch die Überwachung des Betriebs in Biomasseheizkesseln auf Basis einer speicherprogrammierbaren Steuerung SPS (siehe Abbildung 11) entwickelt. Die Funktion des VREM-Systems ist im Abschnitt 6.1 ausführlich erläutert. Für die Entwicklung der Regelungs- sowie Überwachungsalgorithmen wurde ein handbeschickter Biomasseheizkessel (Vergaserkessel mit einem seitlichen Abbrand gemäß DIN EN 303-5) eingesetzt, in dem unterschiedliche Brennstoffe eingesetzt werden können bzw. sich unterschiedliche Betriebsfälle simulieren lassen. Im Folgenden werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen auf dem Prüfstand erläutert.

Das VREM-System wurde beim Einsatz unterschiedlicher Brennstoffe entwickelt und entsprechend erprobt. Dabei wurden sowohl hochqualitative als auch niederqualitative Hölzer sowie Holzprodukte vor allem Holzpellets, Hackschnitzel, Spanplatten, Schreinereireste als auch biogene und Restbrennstoffe wie z. B. Pferdemist, Traubentrester und Gärreste verwendet. Für die Überprüfung der technischen Stabilität der O_2/CO_e-Sonde wurde auch eine Mischung aus Holz und Verpackungsabfällen aus dem gelben Sack verbrannt. In der Abbildung 12 sind beispielhafte Brennstoffe dargestellt, welche im Rahmen der Entwicklung des VREM-Systems eingesetzt wurden.

Die Brennstoffe unterscheiden sich stark durch ihre physikalischen (Dichte, Stückigkeit, Feinheit, Feuchtegehalt, Oberfläche usw.) und verbrennungstechnischen Eigenschaften (Heizwert, Anteil an flüchtigen Bestandteilen, Brennbares, Aschegehalt usw.), wodurch unterschiedliche Schadstoffbelastungen sowie Betriebszustände eingestellt werden können.

Abbildung 12: Verwendete Brennstoffe für die Entwicklung des VREM-Systems.

9.1 Ergebnisse zur O_2/CO_e-Regelung

Das Hauptziel der O_2/CO_e-Regelung ist die Gewährleistung eines möglichst hocheffizienten Betriebs von Heizkesseln bei gleichzeitig niedrigen Emissionen an nicht verbrannten Abgasbestandteilen bzw. ohne jegliche Einstellungen des Verbrennungsprozesses durch den Betreiber bzw. durch den Nutzer. Die Verbesserung der Effizienz sowie der Verbrennungsqualität soll unabhängig von dem eingesetzten Brennstoff bzw. dem Typ des Heizkessels und dem verwendeten Verbrennungskonzept erfolgen.

Für die Ermittlung der Funktionalität der O_2/CO_e-Regelung wurden sowohl holzartige Brennstoffe (Buche, Fichte, Kiefer, Birke und Pappeln) in Form von Scheiten und Hackgut in unterschiedlichen Qualitäten als auch biogene Festbrennstoffe (Gärrest, Pferdemist und Traubentrester) verwendet.

9.1.1 Regelverhalten beim Einsatz von harten und weichen Scheithölzern

Für die Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens wird die Entwicklung des Sauerstoffgehalts im Abgas mit dem Kohlenstoffmonoxid sowie mit dem Kohlenstoffdioxid während der Verbrennung studiert. Zudem wurde für die

Erkennung des Regelverhaltens die Einstellung von der Primär- und Sekundärluft während der Verbrennung untersucht.

In dem Diagramm 19 und dem Diagramm 20 lässt sich das Regelverhalten des VREM-Systems während des Betriebs der Verbrennungsversuchsanlage mit der O_2/CO_e-Regelung erkennen. In dem Diagramm 19 sind der Sauerstoffgehalt im Abgas, die Abgastemperatur, die mit der Gasanalyse gemessenen Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid sowie die mit der O_2/CO_e-Sonde gemessenen CO_e-Konzentrationen dargestellt. In dem Diagramm 20 sind die zugeführten Mengen an Primärluft und Sekundärluft mit dem Sauerstoffgehalt im Abgas und den Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid aus der Gasanalyse zu sehen. In dem Diagramm 19 ist dargestellt, dass die Abgastemperaturen und Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid nach dem Kaltstart der Verbrennungsversuchsanlage schnell ansteigen und gleichzeitig die Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid sowie der Sauerstoffgehalt im Abgas entsprechend auf die in der Regelung hinterlegten Sollwerte absinken. Diese für den Betrieb des Heizkessels schnelle Einstellung günstiger Betriebsparameter (Kesseltemperatur, Feuerraumtemperatur, Druck) wird durch die Zufuhr entsprechender Mengen an Primärluft in der Anfahrbetriebsphase bzw. beim Kaltstart erreicht, wodurch eine rasche Wärmefreisetzung gewährleistet wird.

Wie in dem Diagramm 20 zu sehen ist, wird nach dem Zünden eine Primärluftmenge von etwa 68 Nm³/h zugeführt. Anschließend wird die Menge an Primärluft kurzzeitig reduziert, um einen starken Überdruck in der Zündphase zu vermeiden. Sukzessiv wird die Menge an Primärluft anschließend auf über 60 Nm³/h erhöht, um den Brennstoff in der Vergasungskammer des Biomasseheizkessels vollständig zu vergasen. Dieses Regelverhalten ist typisch für die Regelung von handbeschickten Vergaserkesseln.

Den Kurvenverläufen im Diagramm 19 kann auch entnommen werden, dass die CO_e-Konzentrationen und Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid nach der Anfahrbetriebsphase schnell und deutlich unter den Grenzwert der 1. BImSchV (400 mg/Vm³) liegen, wobei der Sauerstoffgehalt zunächst im niedrigen Bereich bzw. zwischen 4,7 Vol.-% und 7,0 Vol.-% schwankt und sich anschließend stabilisiert. Sobald die Stabilisierung des Sauerstoffgehalts im Abgas erreicht ist und die CO_e-Konzentrationen die in der Regelung hinterlegte Emissionskante (in diesem Beispiel 100 mg/Vm³) unterschreitet, werden durch die Regelung des VREM-Systems der Sauerstoffsollwert und entsprechend die zugeführten Mengen an Sekundärluft sukzessiv reduziert. In dem Diagramm 19 und dem Diagramm 20 ist deutlich zu sehen, dass die zugeführten Mengen an Sekundärluft in der Regelbetriebsphase von etwa 30 Nm³/h auf etwa 10 Nm³/h und der Sauerstoffgehalt im Abgas dementsprechend von etwa 8,0 Vol.-% auf 5,3 Vol.-% reduziert werden. Gleichzeitig werden die Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid im Abgas von ca. 13 Vol.-% auf 15 Vol.-% erhöht. Durch dieses Regelverhalten lässt sich

der Wirkungsgrad im Biomasseheizkessel während des Betriebs um etwa 3 % steigern.

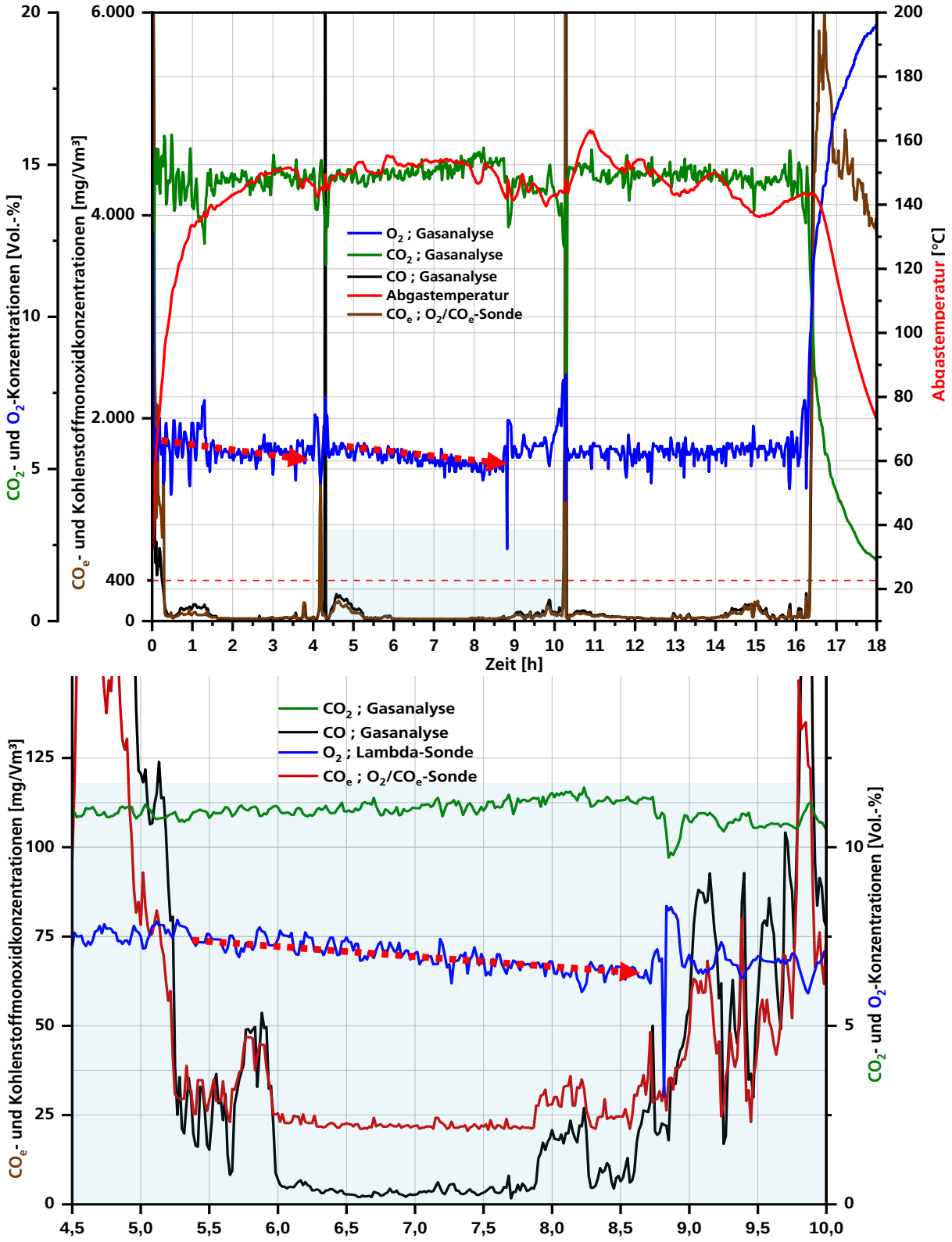

Diagramm 19: Typisches Verbrennungsverhalten beim Betrieb des Heizkessels mit dem VREM-System bzw. beim Einsatz von Buchenscheitholz.

Dem Diagramm 19 sowie dem Diagramm 20 ist auch zu entnehmen, dass der Sauerstoffgehalt im Abgas durch die Erhöhung der zugeführten Menge an Sekundärluft ansteigt, sobald die CO_e-Konzentrationen den Wert der Emissionskante überschreiten. Dieses Regelverhalten lässt sich beispielsweise im Ausbrand erkennen. Im Ausbrand sinken die Abgastemperaturen und die Temperaturen im gesamten Biomasseheizkessel ab. Um den Brennstoff im Biomasseheizkessel vollständig zu vergasen, wird die zugeführte Menge an Primärluft durch die Regelung erhöht, wodurch mehr Brenngas generiert wird. Gleichzeitig steigen die Abgasmenge und die Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid bzw. CO_e an, während sich der Sauerstoffgehalt im Abgas reduziert. Der leichte Anstieg der CO_e-Konzentrationen, welcher durch die Brenngasproduktion und das dadurch gestörte Verhältnis zwischen Brenngasmenge und der zugeführten Menge an Sauerstoff bzw. Sekundärluft entsteht, wird durch die O_2/CO_e-Sonde detektiert. In der Regelung des VREM-Systems werden der Sauerstoffsollbereich und dadurch die zugeführte Menge an Sekundärluft erhöht, sodass bis zur vollständigen Verbrennung des Brennstoffs kein Sauerstoffmangel und hohe Konzentrationen an Schadstoffen im Abgas entstehen. Erst am Ende der Verbrennung bzw. vor dem Nachbeschicken steigen die Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid und der Sauerstoffgehalt im Abgas an, da der Brennstoff vollständig vergast wurde. Nach dem Nachbeschicken des Brennstoffs sinken die CO_e-Konzentrationen und der Sauerstoffgehalt im Abgas erneut auf die in der Regelung hinterlegten Sollwerte. Sobald sich der Sauerstoffgehalt stabilisiert hat, wird der Sauerstoffgehalt im Abgas zur Steigerung der Effizienz im Biomasseheizkessel durch die Emissionskantenregelung erneut sukzessiv reduziert.

Durch diese kontrollierte Reduzierung des Sauerstoffüberschusses im Abgas werden die Abgasmenge und somit die thermischen Abgasverluste minimiert, ohne die chemischen Abgasverluste zu erhöhen. Bei der eingesetzten Versuchsverbrennungsanlage wurde der Wirkungsgrad durch die Regelung mit dem VREM-System um 5,8 % dauerhaft mit hoher Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit verbessert. Das Diagramm 21 zeigt die Regelung des Sauerstoffgehalts im Abgas bzw. Lambda mit der O_2-Sonde im Vergleich zur O_2/CO_e-Sonde gemäß dem Regelkonzept des VREM-Systems. Im Diagramm 21 ist ersichtlich, dass sich der Sauerstoffgehalt bzw. -Sauerstoffüberschuss im Abgas beim Einsatz der O_2/CO_e-Sonde deutlich stabiler verhält als bei der Regelung mit der herkömmlichen O_2-Sonde. Er liegt dabei bei einem Wert von 5,1 Vol.-% O_2 und damit um ca. 53 % unter dem ermittelten Sauerstoffwert (10,83 Vol.-%) bei der Regelung mit der herkömmlichen O_2-Sonde. Durch die Reduzierung des Sauerstoffgehalts (um 53 %) im Abgas können die Abgasmenge und somit die thermischen Abgasverluste um ca. 23,80 % gemindert bzw. der Wirkungsgrad entsprechend verbessert werden.

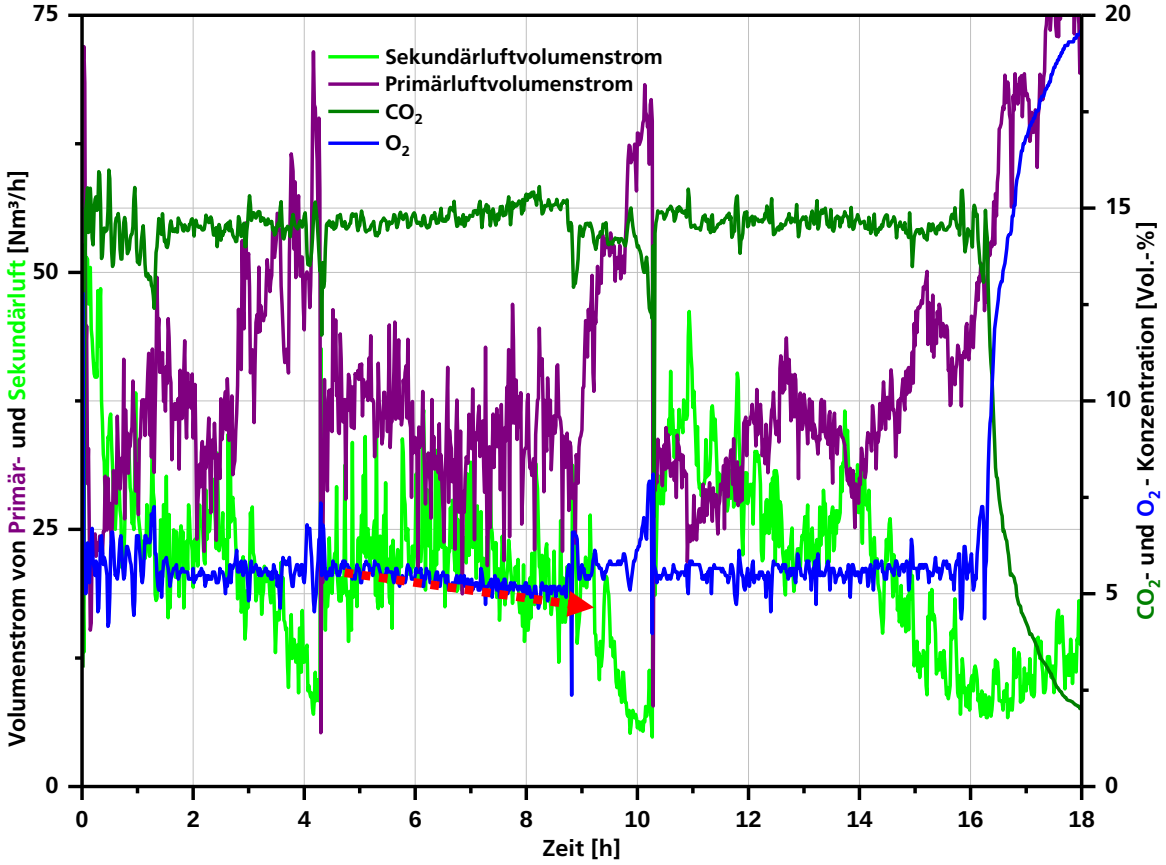

Diagramm 20: Regelverhalten der Primär- und Sekundärluft sowie Sauerstoffgehalt und Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid während des Betriebs.

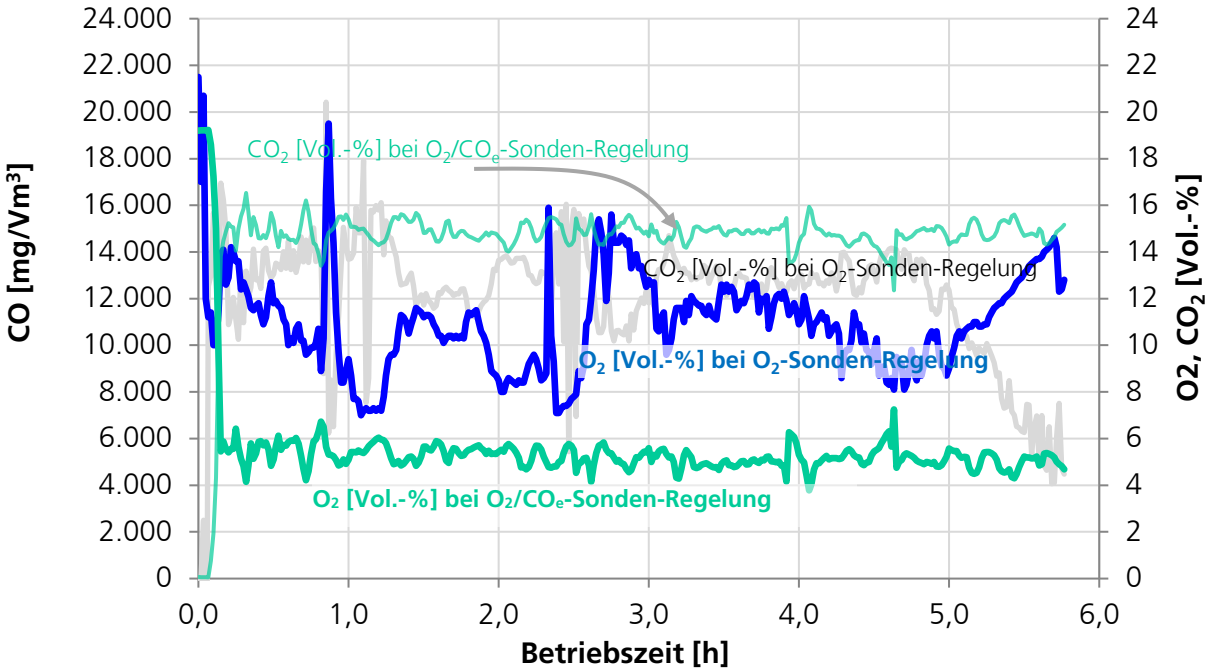

Diagramm 21: Das Verhalten des Sauerstoffgehalts im Abgas beim Einsatz der O_2- sowie O_2/CO_e-Sonde.

Durch den Einsatz der O_2/CO_e-Sonde lässt sich sowohl ein ökonomischer als auch ein ökologischer Betrieb von Biomasseheizkesseln realisieren. Nur durch solche innovativen Maßnahmen kann die thermische Verwertung von Biomasse und sonstigen biogenen Brennstoffen ohne negativen Einfluss auf die Luftqualität in Wohngebieten ausgebaut werden.

Ein ähnliches Regelverhalten wurde bei der Verbrennung von unterschiedlichen Festbrennstoffen wie beispielsweise Fichten-, Pappel-, und Kiefernscheithölzern, Hackschnitzeln, Gärresten und Pferdemist erreicht. Die Untersuchung der Flexibilität der Regelung des VREM-Systems bei der Verbrennung von biogenen Reststoffen ist im Abschnitt 9.1.2 ausführlich dargestellt.

9.1.2 Regelverhalten bei der Verbrennung von Rest- und Abfallstoffen

Für einen nachhaltigen Ausbau der thermischen Nutzung von Biomasse ist es notwendig, nicht nur hochqualitative Hölzer wie beispielsweise Buchen- oder Fichtenscheithölzer, sondern auch sonstige biogene Brennstoffe bzw. Rest- und Abfallstoffe zu verwenden. Ein großes bisher ungenutztes Potential bieten unterschiedliche biogene Rest- und Abfallstoffe, welche häufig durch die Abfallproduzenten kostenintensiv entsorgt werden müssen. Durch die Entwicklung bzw. Ausweiterung der Nutzungspfade sollen die Abfall- und Reststoffe in Wertstoffe umgewandelt und ein maßgeblicher Beitrag zur Minderung des jährlichen Abfallaufkommens und zur Entlastung der Waldbestände geleistet werden.

Herkömmliche Biomasseheizkessel werden für bestimmte hochqualitative Brennstoffe geprüft und entsprechend zugelassen, wobei in der Regelung ein fester Sauerstoffsollwert hinterlegt ist. Da der optimale Sauerstoffbereich bzw. –wert für eine sachgemäße Verbrennung stark von dem eingesetzten Brennstoff abhängt, ist der Einsatz unterschiedlicher Brennstoffe in dem gleichen Heizkessel ohne eine entsprechende händische Einstellung des Sollbereichs in der Regelung nicht möglich. Gemäß dem Stand der Technik unterscheiden die Hersteller in der Regelung zwischen Hart- und Weichhölzern, für die unterschiedlichen Sollbereiche hinterlegt sind, welche von den Nutzern auszuwählen sind.

In der Regel hängt der optimale Sauerstoffbereich (Sauerstoffüberschuss und somit Lambda-Wert) für die Regelung von Verbrennungsprozessen von dem Vergasungsverhalten des Brennstoffs ab. Beispielsweise neigen trockene und feine Brennstoffe zu einer starken Vergasung, wobei hohe Schadstoffkonzentrationen aufgrund von Sauerstoffmangel entstehen können, wenn der hinterlegte Sauerstoffsollwert zu gering ausgesucht wird. Die Auswahl von hohen Sauerstoffsollwerten für die Regelung ist aufgrund der Kühlung der aktiven Reaktionszone vor allem beim Einsatz von ungünstigen Brennstoffen nicht zu empfehlen. Ungünstige Brennstoffe bedeutet in diesem Zusammenhang, dass bei der Vergasung ein Brenngas mit schlechten verbrennungstechnischen Eigenschaften gebildet wird.

Ein großer Vorteil der O_2/CO_e-Regelung des VREM-Systems beruht darauf, dass der Sauerstoffgehalt im Abgas dank der Emissionskantenregelung automatisch an den für die Verbrennung im Biomasseheizkessel notwendigen Sauerstoffgehalt im Abgas angepasst wird. Durch die automatische Anpassung des Sauerstoffgehalts lässt sich eine höhere Flexibilität für die Verbrennung von biogenen Brennstoffen mit unterschiedlicher Qualität und verbrennungstechnischen Eigenschaften gewährleisten. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde die Emissionskantenregelung des VREM-Systems mit unterschiedlichen biogenen Abfall- und Reststoffen getestet. In diesem Abschnitt werden einige beispielhafte Betriebe bei der Verbrennung von biogenen Rest- und Abfallstoffen dargestellt.

Verbrennung von Pferdemist

Bei Pferdemist handelt es sich um eine Mischung aus Pferdekot, Einstreu, Urin und Verunreinigungen wie beispielsweise Haaren und Futterreste [Uhl 2017]. Durch den großen Gehalt an Brennbarem beinhaltet Pferdemist ein bisher ungenutztes Potential für die Energiebereitstellung. In Deutschland gibt es etwa 1 Millionen Nutzpferde, welche jährlich bis 15 Mio. Tonnen Mist erzeugen [Oechsner et al. 2014]. Ein großes logistisches Problem mit Pferdemist besteht darin, dass die Pferde meistens in spezialisierten Großbetrieben gehalten werden und große Mengen an Mist dementsprechend konzentriert in kleinen Ortsflächen anfallen. Die großen Mengen an Pferdemist können häufig nicht wirtschaftlich genutzt werden. Darüber hinaus besteht ein großes Problem mit Sickerwasser, welches beim Mist anfallen kann und eine große Gefahr für die Gewässer darstellt. Für die Pferdewirte entstehen durch die großen Mistaufkommen hohe Entsorgungskosten. Durch die thermische Nutzung von Pferdemist sollen zukünftig neue Nutzungspfade für den Energieträger Pferdemist erschlossen und Pferdemist als neuer Wertstoff für die Energiebereitstellung angesehen bzw. besonders im ländlichen Bereich dezentral thermisch wie beispielsweise in Vergaserkesseln genutzt werden.

Das Diagramm 22 zeigt einen typischen Betrieb des für die Entwicklung des VREM-Systems eingesetzten Vergaserkessels bei der Verbrennung von Pferdemist im Vergleich zum Buchenscheitholz, welches in der Regel für die Zulassungsprüfung in Vergaserkesseln eingesetzt wird. Dabei sind der Sauerstoffgehalt im Abgas mit den Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid und Stickstoffoxiden dargestellt.

Im Diagramm 22 ist ersichtlich, dass die O_2/CO_e-Regelung ohne jegliche Einstellung oder Nachstellung des optimalen Sauerstoffbereichs einen sachgemäßen Betrieb bei der Verbrennung gewährleistet hat, wobei die CO-Konzentrationen im Mittelwert deutlich unter dem Grenzwert gemäß der 1. BImSchV lagen. Trotz intensiver Vergasung des feinen und sehr trockenen Pferdemists wurde nicht nur der Sauerstoffgehalt richtig eingestellt, sondern auch die Emissionskantenregelung aktiviert. Dabei wurde der Sauerstoffgehalt im Abgas durch die Emissionskantenregelung von etwa 6 % auf zeitweise bis unter 5 % sukzessiv reduziert.

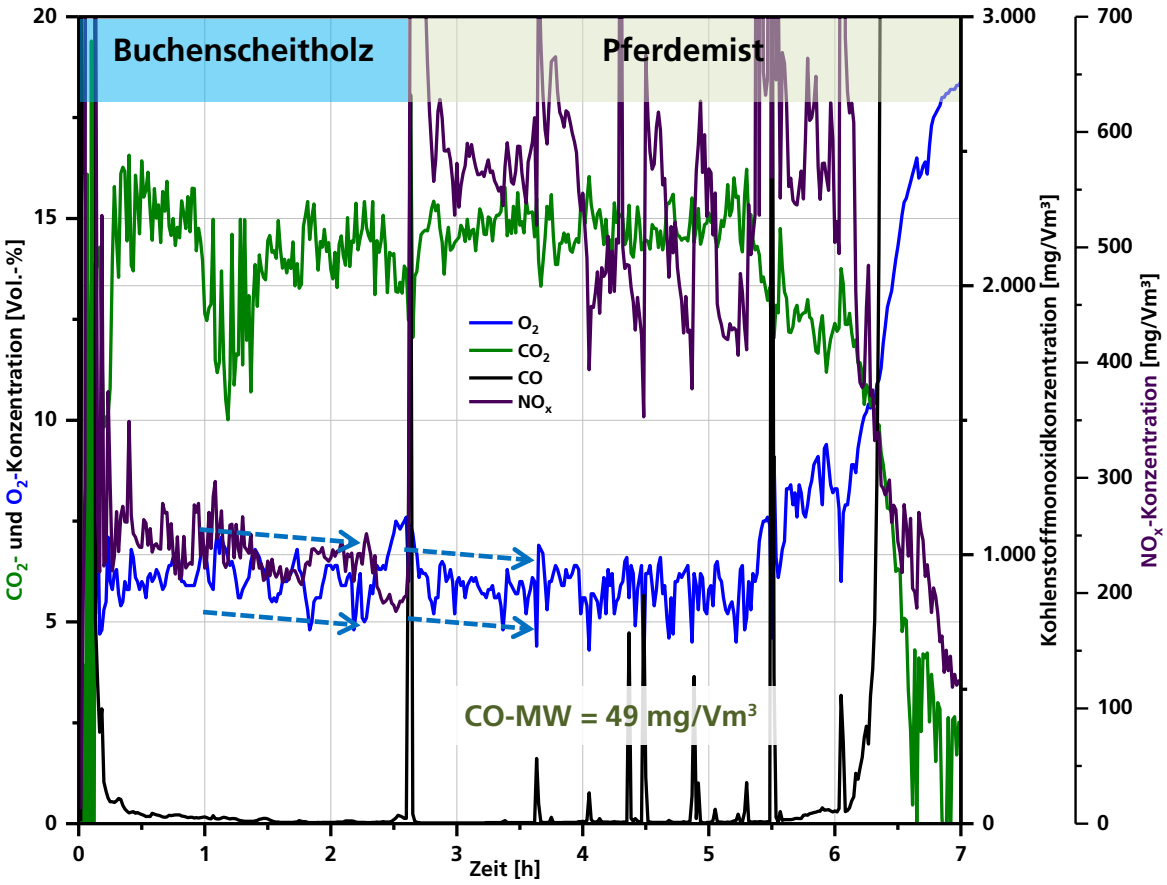

Diagramm 22: Verbrennungs- und Regelverhalten des VREM-Systems beim Einsatz von Pferdemist.

Die Unterschiede zwischen dem Vergasungsverhalten von Buchenscheitholz und Pferdemist sind deutlich durch den Verlauf des Sauerstoffs sowie des Kohlenstoffmonoxids bzw. durch die starken Schwankungen bei der Verbrennung von Pferdemist zu erkennen.

Im Diagramm 22 ist außerdem zu erkennen, dass die Konzentrationen an Stickstoffoxiden nach der Beschickung mit Pferdemist von etwa 180 mg/Vm³ auf über 700 mg/Vm³ ansteigen. Dieser Anstieg der Konzentrationen an Stickstoffoxiden lässt sich mit dem höheren Gehalt an Stickstoff im Pferdemist im Vergleich zum Buchenscheitholz (Pferdemist ca. 4 %, Buchenscheitholz ca. 0,2 %) begründen. Die Minderung von Stickstoffoxiden lässt sich beispielsweise durch neue Verbrennungssysteme (z. B. GVAGR-Verbrennungssysteme: Gestufte Verbrennung mit Abgasrückführung) oder durch integrierte Abgasentstickung (z. B. NO_x-Out-System) mindern. Die beiden Systeme (GVAGR- und NO_x-Out-System) befinden sich im Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP in der Erforschung.

Verbrennung von Gärresten

In Deutschland sind etwa 9.000 Biogasanlagen mit einer gesamten elektrischen Leistung von ca. 4.000 MW_{el} in Betrieb [Fachverband Biogas 2016], wobei jährlich etwa 80 Millionen Tonnen an Reststoffen bzw. Gärresten anfallen [DBFZ 2018], welche bisher kaum für die energetische Nutzung verwendet werden. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde die O_2/CO_e-Regelung beim Einsatz von Gärresten aus der Essensverwertung in der Verbrennungsversuchsanlage getestet.

In dem Diagramm 23 sind die Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid mit dem Sauerstoffgehalt im Abgas bei der Verbrennung von Gärresten im Vergleich zu Buchenscheitholz dargestellt. Dabei ist deutlich zu sehen, dass der Sauerstoffgehalt im Abgas durch die Regelung reduziert wird, bis die Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid anfangen anzusteigen, wobei sie unter dem vorgegebenen Wert der Emissionskante (CO_e = 200 mg/Vm³) schwanken. Im Durchschnitt bleiben die Mittelwerte des Kohlenstoffmonoxids gemessen durch die Gasanalyse deutlich unter 60 mg/Vm³ bzw. unter dem Grenzwert (400 mg/Vm³) der 1. BImSchV. Außerdem ist dem Diagramm 23 zu entnehmen, dass der Sauerstoffüberschuss im Abgas sowohl bei der Verbrennung von Buchenscheitholz als auch von Gärresten deutlich unter einem Wert von 6 Vol.-% geregelt wird, welcher in der Regel als Sollwert für den Betrieb von Vergaserkesseln mit hochqualitativen Hölzern in der Regelung hinterlegt ist. Die Regelung des Sauerstoffs in diesem niedrigen Bereich hat keinen Einfluss auf die Entwicklung von Emissionen an nicht verbrannten staub- und gasförmigen Bestandteilen. Die bei der Verbrennung entstehenden Spitzen an Kohlenstoffmonoxid lassen sich ohne Probleme durch die Einstellung eines niedrigeren Emissionskantenwerts (< 50 mg/Vm³) vermeiden. Dabei gilt, je intensiver sich die Brennstoffe vergasen lassen, umso niedriger soll der Emissionskantenwert gewählt werden.

Obwohl es sich bei den Gärresten sowie dem Pferdemist um feine (im Durchschnitt < 6 mm), trockene (< 7 Ma.-%) Brennstoffe handelt, weisen die beiden Brennstoffe unterschiedliche Verbrennungsverhalten auf. Das lässt sich durch den Vergleich von Diagramm 22 mit dem Diagramm 23 feststellen. Hier spielen der Heizwert bzw. der Anteil an flüchtigen Bestandteilen im Brennstoff eine entscheidende Rolle. Vergärte Stoffe zeigen in der Regel einen geringeren Anteil an flüchtigen Bestandteilen als der Rohstoff. Ein großer Teil der leichtflüchtigen Bestandteile wird bei dem Gärprozess durch Mikroorganismen biologisch in brennbare Gase umgewandelt. Verbrennungstechnisch gilt, je geringer der Anteil an brennbaren Bestandteilen ist, umso moderater bzw. langsamer findet die Vergasung statt, wobei Brenngas mit einem geringeren Heizwert und somit Sauerstoffbedarf für eine vollständige Verbrennung gebildet wird.

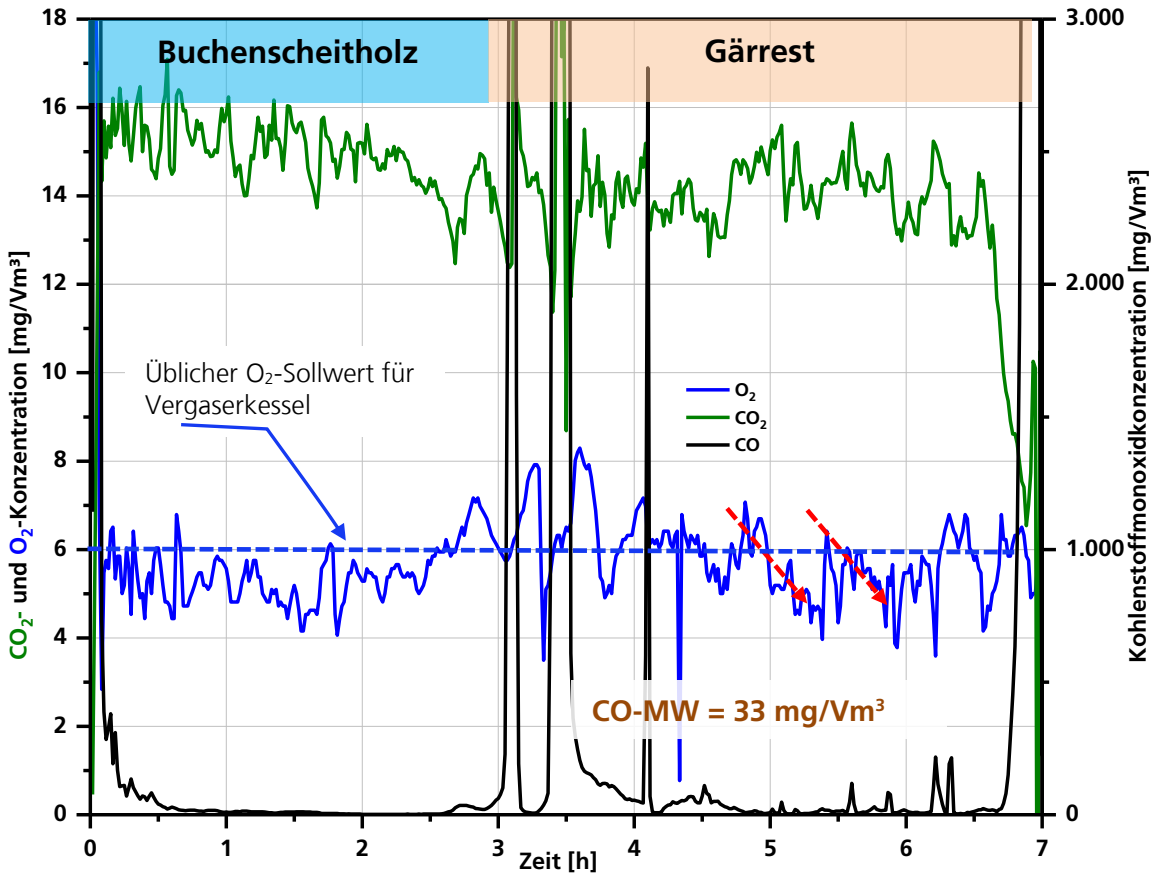

Diagramm 23: Verbrennungs- und Regelverhalten des VREM-Systems beim Einsatz von Gärresten.

<u>Verbrennung von Traubentrester</u>

Traubentrester sind feste Pressrückstände, welche nach dem Auspressen von Weintrauben entstehen. Der Trester wird häufig zur Produktion von Spirituosen wie beispielsweise Grappa verarbeitet. Die Voraussetzung für die Weiterverarbeitung von Traubentrester sind eine sehr hohe Tresterqualität und ein guter Konservierungszustand. Ansonsten ist die Weiterverarbeitung ausgeschlossen und eine Entsorgung der Tresterrückstände notwendig.

Obwohl Traubentrester einen höheren Heizwert (größer als 19 MJ/kg bei einem Wassergehalt von kleiner als 15 Ma.-%) als Holz aufweist, wird er bislang aufgrund seines komplexen Verbrennungsverhaltens thermisch kaum genutzt. Zu diesem komplexen Verbrennungsverhalten tragen sowohl der hohe Aschegehalt (größer als 6 Ma.-%) als auch die niedrige Ascheerweichungstemperatur bei [Zeng et al. 2012]. Außerdem kennzeichnet sich Traubentrester durch hohe Massenanteile an Stickstoff und Schwefel, wodurch hohe Konzentrationen an sauren Schadstoffkomponenten bzw. Schwefeldioxide und Stickstoffoxide bei der Verbrennung gebildet werden (Diagramm 10, Diagramm 24). Dazu neigt Traubentrester je nach Verbrennungskonzept zur Bildung hoher Feinstaubkonzentrationen, welche eine effektive Entstaubung erfordern. Bei

einer einstufigen direkten Verbrennung ist mit Staubkonzentrationen von bis zu 3.800 mg/Vm³ zurechnen.

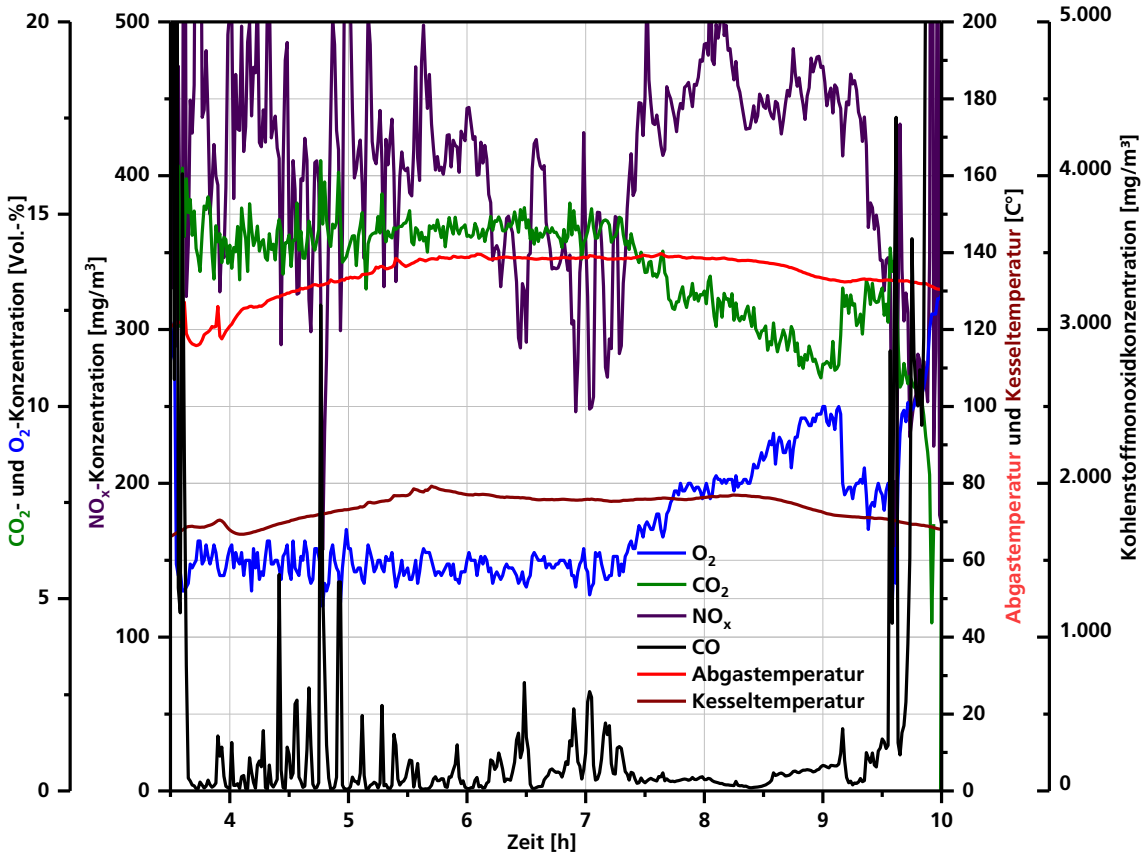

Diagramm 24: Verbrennungs- und Regelverhalten des VREM-Systems beim Einsatz von Traubentrester.

In dem Diagramm 24 sind Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid, Stickstoffoxide (als NO_2-Äquivalent) mit den Abgas- und Kesseltemperaturen sowie dem Sauerstoffüberschuss bei der Verbrennung von Traubentrester mit der O_2/CO_e-Regelung dargestellt. In dem Diagramm 24 lässt sich erkennen, dass die Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid während des Betriebs aufgrund der starken Vergasung stark schwanken. Eine intensive Vergasung führt zur Bildung größerer Mengen an Brenngas, mit einem hohen Heizwert und Energiebedarf für eine vollständige Verbrennung. Die Reduzierung des Sauerstoffüberschusses unter einen bestimmten Wert (< 5,2 Vol.-%) führt zu einer schlagartigen Erhöhung des Kohlenstoffmonoxids während der Verbrennung.

Die Emissionskante liegt bei der Verbrennung von Traubentrester in einem deutlich höheren Sauerstoffbereich als beispielsweise bei Buchenscheithölzern. Dabei hat die Regelung die Verbrennung mit einem durchschnittlichen Sauerstoffüberschuss von ca. 6,2 Vol.-% betrieben, wobei sich Buchenscheitholz mit einem Sauerstoffgehalt von ca. 4,9 Vol.-% effizient und schadstoffarm verbrennen lässt.

Durch die oben dargestellten Diagramme lässt sich feststellen, dass die O_2/CO_e-Regelung unabhängig von dem Brennstoff den optimalen Sauerstoffbereich eingestellt hat, in dem eine möglichst emissionsarme und effiziente Verbrennung stattfinden kann. Gemäß dem Stand der Technik werden Heizkessel mit einem Sauerstoffüberschuss bis 11 Vol.-% betrieben, um die Variation des Brennstoffs zu kompensieren. Das führt zu einem bemerkbaren Wärmeverlust im Praxisbetrieb.

9.2 Ergebnisse zur Emissionsüberwachung und Betriebsbewertung

Herkömmlicherweise werden Biomasseheizkessel mit festen in der Regelung hinterlegten Sauerstoffbereichen im Abgas geregelt. Das Konzept herkömmlicher Regler ist im Abschnitt 5.1 ausführlich erläutert. Bei der Regulierung mit herkömmlichen Reglern wird davon ausgegangen, dass die Verbrennung bei sachgemäßer Bedienung bzw. beim Einsatz geeigneter Brennstoffe und mit der entsprechenden zugelassenen Verbrennungstechnik effizient und mit niedrigen Emissionen stattfindet sowie die von den Herstellern in der Aufstell- und Betriebsanweisung angegebenen Emissionen und Wirkungsgrade erreicht werden können. Die Sachmäßigkeit der Verbrennung lässt sich allerdings über den Sauerstoffgehalt im Abgas nicht feststellen, sodass die Schadstoffbelastungen durch Biomasseheizkessel in Wohngebieten mit den bisherigen Technologien nicht ermittelt und abgeschätzt werden können.

Das VREM-System des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP wurde entwickelt, um die Verbrennung in Biomasseheizkesseln kontinuierlich zu überwachen und um höhere Wirkungsgrade durch die sogenannte Emissionskantenregelung zu erreichen. Sowohl die Überwachung als auch die verbesserte Regelung lassen sich nur durch den Einsatz des zusätzlichen CO_e-Signals bzw. einer CO_e-Sonde umsetzen, welche in dem VREM-System des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP verwendet wird.

Hinsichtlich der Überwachung ist zwischen der Emissions- und Betriebsüberwachung bzw. Betriebsbewertung (Abschnitt 9.2.2) zu unterscheiden. Bei der Emissionsüberwachung wird überprüft, ob der CO_e-Grenzwert entweder über einen längeren Zeitraum überschritten (z. B. 400 mg/Vm³ über einen Zeitraum von 20 Minuten) oder starke Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen auftreten (z. B. mehr als fünf Grenzwertüberschreitungen in einem Zeitraum von 15 Minuten). Bei der Betriebsüberwachung werden nicht nur die CO_e-Konzentrationen, sondern die gesamten Parameter aus Sensoren, Aktoren und Verbrennungsrechnung sowie deren Zusammenwirken betrachtet und bewertet, um nicht nur die Fehler, sondern auch die entsprechenden Ursachen festzustellen.

9.2.1 Ergebnisse zur Emissionsüberwachung durch das VREM-System

Bei der Emissionsüberwachung handelt es sich um die einfachste Methode zur Bewertung der Verbrennung und Fehlererkennung in Biomasseheizkesseln, da hier lediglich die Einhaltung von bestimmten Grenzwerten für die CO_e-Konzentrationen (z. B. 400 mg/Vm³) überwacht

und entsprechende Informationen an den Nutzer oder Externe (beispielsweise Umweltbehörden, Servicedienstleister usw.) versendet werden können. Bei der Emissionsüberwachung sind die folgenden Fälle zu unterscheiden:

- Fluktuationen um einen CO_e-Grenzwert:
  Die CO_e-Konzentrationen können während des Betriebs um einen im VREM-System definierten Grenzwert fluktuieren. Für diesen Fall wurden in den Algorithmen spezielle Zähler entwickelt, mit denen die Fluktuationen sowie deren Anzahl während des Betriebs über einen bestimmten Zeitraum ermittelt und dem Nutzer bzw. Externen mitgeteilt werden. Außerdem wird beim Auftreten der Fluktuationen der Mittelwert der CO_e-Konzentrationen berechnet, sodass die Auswirkungen durch die Störungen im Biomasseheizkessel entsprechend bewertet werden können.

- Überschreitung eines Grenzwerts über längere Betriebszeit:
  Der Grenzwert für die CO_e-Konzentrationen kann beim Auftreten von Störungen über längere Betriebszeit (z. B. länger als 20 Minuten) überschritten werden. Für diesen Fall sind in dem VREM-System spezielle Zeitzähler hinterlegt, welche den Zeitraum der Überschreitung der CO_e-Konzentrationen überprüfen. Wird der Grenzwert für die CO_e-Konzentration über den in der Überwachung definierten Zeitraum überschritten (hier länger als 20 Minuten), wird diese Überschreitung entsprechend gemeldet.

Um die Funktionalität der Emissionsüberwachung feststellen zu können, wurde Biomasse mit schwierigen verbrennungstechnischen Eigenschaften bzw. Pappeln eingesetzt, welche in der Regel zur Bildung hoher Konzentrationen an nicht verbrannten Bestandteilen mit starken Fluktuationen neigen. Pappeln sind Weichhölzer aus der Familie der Weidengewächse. Bei den Pappeln handelt es sich um eine sehr schnellwachsende Baumart, welche häufig als nachwachsender Rohstoff beispielsweise für die energetische Nutzung in großen Verbrennungsanlagen angebaut wird. Zukünftig ist zu erwarten, dass Pappeln aufgrund der zahlreichen ökologischen Vorteile vermehrt für die energetische Nutzung eingesetzt werden. Ähnlich wie viele Weichhölzer (z. B. Fichte und Birke) neigen Pappeln zu einer starken Vergasung und zu einer schlechten Glutbettbildung. Da für eine stabile Vergasung im Vergaserkessel ein ausreichend hohes Glutbett vorhanden sein muss, können Pappelscheithölzer gemäß den Erfahrungen im Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP nur eingesetzt werden, wenn die Verbrennungstechnik für den Einsatz von Pappeln geeignet und die Verbrennungsanlagen alternierend bzw. abwechselnd mit Harthölzern (z. B. Buchenscheithölzer) und Pappeln betrieben werden. Durch den alternierenden Betrieb soll ein ausreichend hohes Glutbett im Vergaserkessel beibehalten bleiben. Ansonsten können durch das geringe Glutbett beim Nachbeschicken eine schwache Zündung mit hohen Konzentrationen an Schadstoffen entstehen.

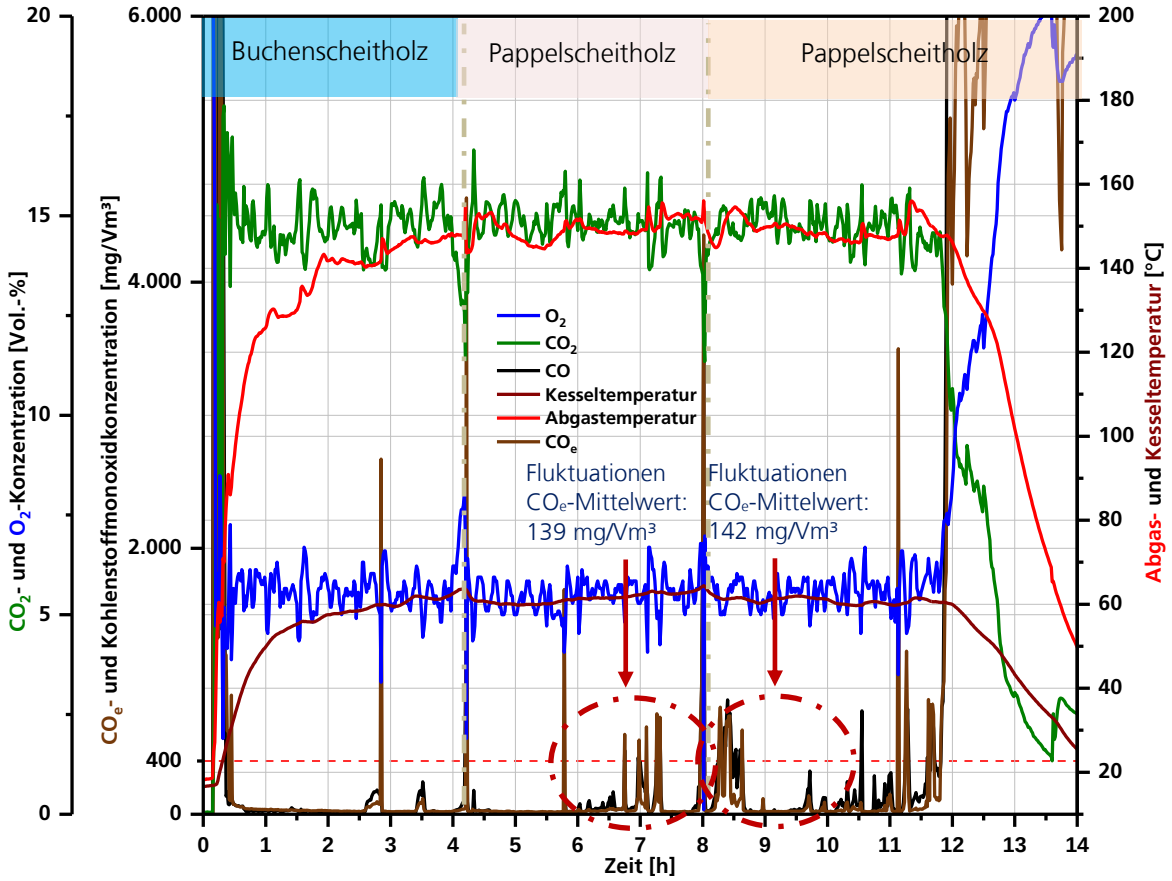

Diagramm 25: Erkennung von CO_e-Fluktuationen durch das VREM-System bei der Verbrennung von Pappelscheithölzern.

In dem Diagramm 25 sind die Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid, CO_e und der Sauerstoffgehalt im Abgas mit den Abgas- und Kesseltemperaturen bei der Verbrennung von sehr trockenem Buchenscheitholz und Pappelscheitholz dargestellt. In dem Diagramm 25 ist zu sehen, dass die CO_e-Konzentrationen bei der Verbrennung von Buchenscheitholz nach einer kurzweiligen Anfahrbetriebsphase deutlich unter dem Grenzwert von 400 mg/Vm³ liegen. Etwa nach der dritten Betriebsstunde wird der Grenzwert der CO_e-Konzentrationen einmalig überschritten. Diese Überschreitung des CO_e-Grenzwerts wird durch das VREM-System registriert. Außerdem wird beobachtet, ob in einem bestimmten Zeitraum (z. B. 20 Minuten) weitere Überschreitungen des CO_e-Grenzwerts auftreten und, ob der Mittelwert der CO_e-Konzentrationen über den entsprechenden Zeitraum eingehalten wird. Die kurze Schwankung lässt sich mit einem kurzweiligen Mangel an Sauerstoff im Abgas begründen, welcher bei trockenem Holz durch plötzlich auftretende starke Vergasung auftreten kann. Da nach der ersten Schwankung der CO_e-Konzentrationen bis zum Ende der Verbrennung keine weiteren Überschreitungen des CO_e-Grenzwerts auftreten, werden der Nutzer bzw. Externe in diesem Fall nicht über den kurzzeitigen Ausreißer der CO_e-Konzentrationen informiert.

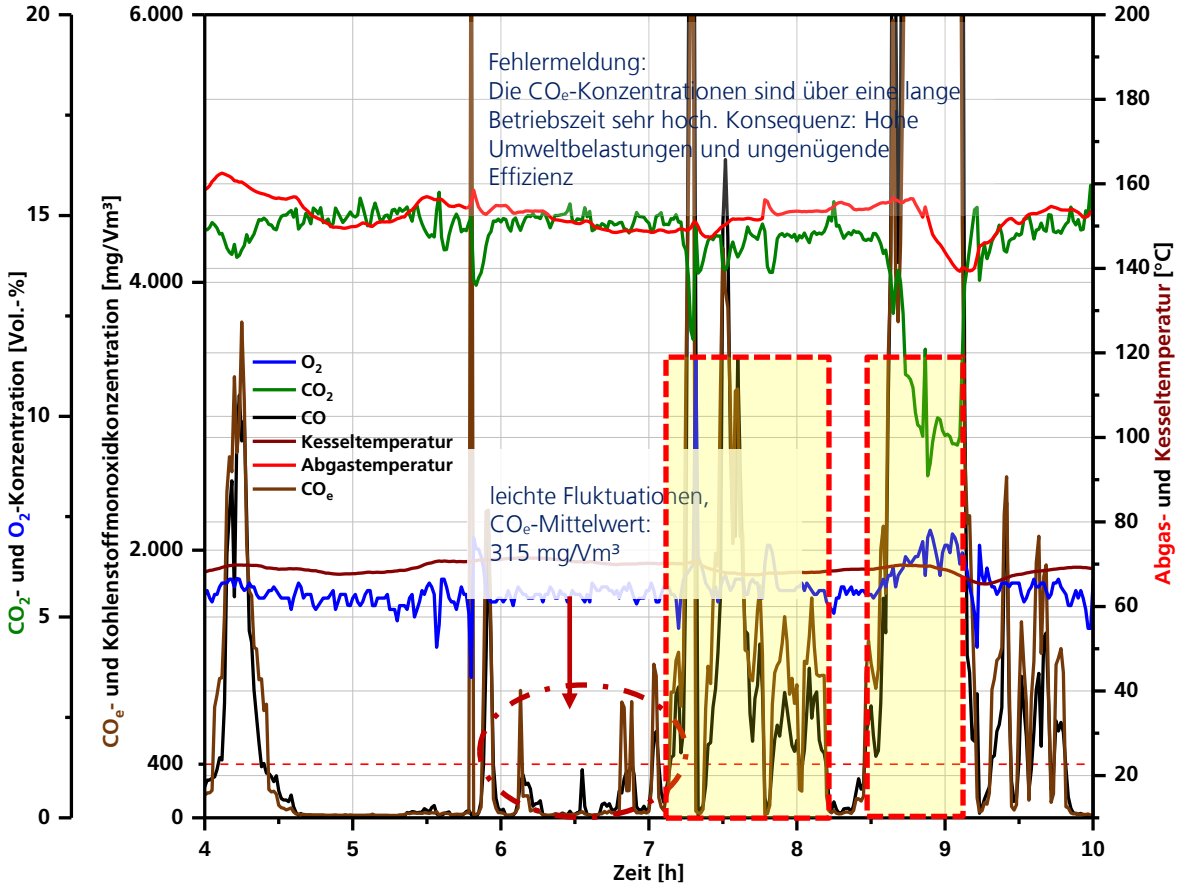

Diagramm 26: Erkennung von CO_e-Fluktuationen durch das VREM-System bei der Verbrennung von feuchten Pappelscheithölzern.

In dem Diagramm 25 ist außerdem zu sehen, dass die CO_e-Konzentrationen nach dem Nachbeschicken mit Pappelscheithölzern zunächst stabil verlaufen und deutlich unter dem Grenzwert von 400 mg/Vm³ liegen. Sobald das Glutbett in der Vergasungskammer vollständig ausgebrannt ist, entstehen aufgrund unkontrollierter Vergasung starke Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen. Hier werden durch die O_2/CO_e-Sonde eine bestimmte Anzahl von Unter- und Überschreitungen des CO_e-Grenzwerts registriert und der CO_e-Mittelwert während dieser Überschreitungen ermittelt. Anschließend werden durch das VREM-System sowohl Informationen über die Überschreitungen des CO_e-Grenzwerts durch Fluktuationen als auch über die CO_e-Konzentrationen in dem entsprechenden Zeitraum der Überschreitungen per E-Mail und SMS versendet. In dem Diagramm 25 ist auch dargestellt, dass die Schwankungen der CO_e-Konzentrationen nach dem zweiten Nachbeschicken von Pappelscheitholz zunehmen. Auch hier sind die zunehmenden Fluktuationen mit dem mangelnden Glutbett in der Vergasungszone zu begründen, wodurch keine stabile Vergasung des Brennstoffs gewährleistet werden kann.

In dem Diagramm 26 sind die Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid, CO_e und der Sauerstoffgehalt im Abgas mit den Abgas- und Kesseltemperaturen bei der Verbrennung von feuchtem

Pappelscheitholz in der Verbrennungsversuchsanlage dargestellt. Diesem Diagramm ist zu entnehmen, dass die CO_e-Konzentrationen bei der Verbrennung von feuchten Pappelscheithölzern sowohl starke Fluktuationen aufweisen, als auch über längere Betriebszeit (> 20 Minuten) deutliche Überschreitungen der CO_e-Konzentrationen auftreten. In diesem Fall werden von dem VREM-System sowohl Nachrichten über die Fluktuationen als auch über die längere Überschreitung der CO_e-Konzentrationen mit den Angaben über die CO_e-Konzentrationen versendet.

9.2.2 Ergebnisse zur Bewertung des Betriebs von Heizkesseln

Bei der Betriebsüberwachung wurden die folgenden Betriebsbewertungsaspekte berücksichtigt und die Software des VREM-Systems für diese Überwachungs- bzw. Bewertungsbausteine geschrieben:

- Erkennung der Betriebsphasen (Anfahrbetriebsphase, Regelbetrieb, Ausbrand, Teillastbetrieb).
- Erkennung von praxisrelevanten Betriebsfehlern und technischen Störungen.

Die beiden Betriebsbewertungsaspekte wurden ausführlich für die verwendete Versuchsanlage bzw. für den Vergaserkessel betrachtet sowie für die Heizkessel bei der Praxiserprobung gemäß dem Abschnitt 10 angepasst und entsprechend erprobt. In den folgenden Abschnitten werden die Untersuchungsergebnisse zu den oben erwähnten Betriebsbewertungsaspekten ausführlich geschildert.

9.2.2.1 Erkennung der Betriebsphasen

Bei der Verbrennung ist zwischen den fünf Betriebsphasen Anfahrbetriebsphase, Regelbetriebsphase, Teillast und Ausbrand bzw. Gluthaltebetrieb zu unterscheiden. Es gilt, dass die Emissionskantenregelung (O_2/CO_e-Regelung) des VREM-Systems nur in der Regelbetriebsphase angewendet werden kann. Sowohl in der Anfahrbetriebsphase als auch im Ausbrand entstehen zwangsläufig hohe Konzentrationen an Schadstoffen bzw. eine nicht sachgemäße Verbrennung, welche zwar durch konstruktive (z. B. durch den Einsatz von innovativen Verbrennungsluftzufuhrsystemen wie z. B. das Drei-Gebläse-Verbrennungsluftzufuhr- und Abgasfördersystem des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik) [Aleysa et al. 2017] und regelungstechnische Maßnahmen zeitlich verkürzt, jedoch nicht vollständig vermieden werden kann. Eine Veränderung des Sauerstoffgehalts im Abgas führt zu einem instabilen Betrieb, bei dem eine schnelle Störung des Verbrennungsprozesses wie im Fall von Sauerstoffmangel auftreten kann. Die drei Betriebsphasen bei der Verbrennung im Biomasseheizkessel werden durch die folgenden Eigenschaften charakterisiert und durch das VREM-System erkannt:

- **<u>Anfahrbetriebsphase:</u>**

  Die Anfahrbetriebsphase beginnt mit der Anzündung des Brennstoffs und dauert je nach Qualität der Verbrennungstechnik und dem

eingesetzten Brennstoff bzw. der Bedienung von wenigen bis zu 90 Minuten. Bei einer sachgemäßen Anzündung sinkt der Sauerstoffgehalt innerhalb von wenigen Minuten auf den Sollwert und wird um diesen Wert geregelt. In dieser Phase können aufgrund niedriger Temperaturen trotz der Einstellung eines optimalen Sauerstoffgehalts hohe Konzentrationen an nicht verbrannten Schadstoffemissionen entstehen. Die Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid sowie die Kessel- und Abgastemperaturen nehmen aufgrund der Wärmefreisetzung der im Brennstoff enthaltenen Energie zu. Die Anfahrbetriebsphase gilt als beendet, wenn die Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid bzw. CO_e unter den Grenzwert der 1. BImSchV von 400 mg/Vm³ absinken und die Abgastemperatur oberhalb des Taupunktes von ca. 100 °C steigt.

Betriebsüberwachung in der Anfahrbetriebsphase:

In der Anfahrbetriebsphase können technische Fehler wegen falscher Anzündung vor allem bei handbeschickten bzw. manuell angezündeten Heizkesseln auftreten, wobei nicht nur sehr hohe Emissionen an nicht verbrannten staub- und gasförmigen Bestandteilen, sondern auch eine sehr niedrige Verbrennungseffizienz aufgrund der chemischen Verluste zustande kommen. Um in möglichst kurzer Zeit eine sachgemäße Verbrennung im Biomasseheizkessel zu erreichen, sollen nach dem Anzünden schnellstmöglich hohe Abgas- und Kesseltemperaturen sowie niedrige CO_e-Konzentrationen durch entsprechende Regelmechanismen wie beispielsweise Zufuhr großer Mengen an Primärluft erreicht werden. Außerdem sollen der Gehalt an Kohlenstoffdioxid und der Sauerstoffgehalt im Abgas im entsprechenden Sollbereich geregelt werden. Zum Erreichen dieser Einstellungen, müssen durch die Regelung des Biomasseheizkessels während der Anfahrbetriebsphase große Mengen an Primärluft zugeführt werden. Gleichzeitig wird der Sauerstoffgehalt im Abgas über den Sekundärluftaktor so geregelt, dass der in der Regelung hinterlegte Sauerstoffsollwert schnellstmöglichst eingestellt werden kann.

Mit dem VREM-System werden die Wechselbeziehungen zwischen den Sensoren und Aktoren während der Betriebsphasen überwacht. Wenn in einem Zeitraum von 30 Minuten keine ausreichend hohen Abgas- und Kesseltemperaturen sowie niedrige CO_e-Konzentrationen (beispielsweise CO_e < 1.000 mg/Vm³) erreicht wurden, werden von dem VREM-System entsprechende Mitteilungen per SMS und E-Mail versendet. Eine nicht sachgemäße Zündung lässt sich hier entweder auf den eingesetzten Brennstoff (z. B. wenig Zündholz, falscher oder feuchter Brennstoff usw.) oder auf Fehler in der Verbrennungstechnik (beispielsweise geöffnete Bypassklappe) im Biomasseheizkessel zurückführen. Für eine genauere Ursachenanalyse gibt es in dem VREM-System weitere Algorithmen, wodurch die Fehlerursachen genauer untersucht werden können. Wenn in der Anfahrbetriebsphase beispielsweise durch die Regelung über lange Betriebszeit hohe Mengen an Primärluft sowie geringe Mengen an Sekundärluft zugeführt werden und die Abgastemperatur dennoch nicht

ansteigt (z. B. in fünf Minuten nicht mehr als 8 °C), lässt sich die schwache Zündung auf den Brennstoff zurückführen. Hier kann es sich beispielsweise um einen sehr feuchten Brennstoff handeln, wobei der Brennstoff trotz großer zugeführter Mengen an Primärluft nicht sachgemäß vergast werden kann. Bei der Verwendung von Brennstoffen, welche zu einer starken Vergasung neigen (z. B. Weichhölzer oder Brennstoffe mit großer Oberfläche wie beispielsweise feine Hackschnitzel) und für die entsprechende Verbrennungstechnik nicht geeignet sind, können besonders in der Anfahrbetriebsphase trotz Zufuhr der maximal möglichen Sekundärluftmengen durch den Sekundärluftaktor (z. B. über 85 % der Förderleistung) starker Sauerstoffmangel mit erhöhten Emissionen auftreten.

Ein typisches Anzeichen für eine nicht sachgemäße Anzündung sind außerdem starke Druckschwankungen, welche besonders während der Anfahrbetriebsphase bei der Verbrennung von feuchten Brennstoffen entstehen können. Die starken Druckschwankungen im Heizkessel sind meistens auf eine schlechte Zündung der Brenngase in der Nachbrennkammer durch schlechte Brenngasqualität (z. B. hoher Feuchte- bzw. geringem Energiegehalt) zurückzuführen.

Wenn die Abgastemperaturen sowie die Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid während der Anfahrbetriebsphase absinken und bestimmte Grenzwerte unterschreiten sowie der Sauerstoffgehalt im Abgas während der Anfahrbetriebsphase ansteigt, kann davon ausgegangen werden, dass die Regelbetriebsphase aufgrund von fehlerhafter Zündung zu spät erreicht wird. Auch in diesem Fall werden entsprechende Informationen an die für die Überwachung autorisierten Personen versendet, sodass diese zur schnellen Fehlerbehebung bzw. zur Einstellung einer sachgemäßen Verbrennung aktiv werden können.

- **Regelbetriebsphase:**

  Die Regelbetriebsphase beginnt nach der Anfahrbetriebsphase, wobei die Abgastemperatur oberhalb des Taupunktes vom Abgas und die Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid bzw. CO_e unterhalb des Grenzwerts liegen. Dabei wird der Sauerstoffgehalt um den Sollwert geregelt. Zum Beginn dieser Betriebsphase wird ein gewisses Glutbett gebildet, welches zu einer stabilen Vergasung und somit Verbrennung führt. Diese Stabilität lässt sich an den Einstellungen der Primär- und Sekundärluftaktoren (Luftgebläse- oder Klappensysteme) sowie den Verläufen der Temperaturen, des Kohlenstoffmonoxids, des Sauerstoffgehalts im Abgas und des Kohlenstoffdioxids erkennen. Die Regelbetriebsphase gilt als beendet, wenn die Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid und der Sauerstoffgehalt im Abgas ansteigen und die Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid sowie die Abgastemperaturen parallel dazu sinken. Eine regelungstechnische Charakteristik für das Ende der Regelbetriebsphase beruht darauf, dass große Mengen an Primärluft und geringe Mengen an Sekundärluft durch die Aktoren (Luftklappen- oder Gebläsesystem) zugeführt werden.

Betriebsüberwachung in der Regelbetriebsphase:

Für die einfache Emissionsüberwachung während des Betriebs sind die Informationen über die CO_e-Konzentrationen, welche mit der O_2/CO_e-Sonde ermittelt werden, aufgrund der normalerweise hohen Verbrennungs- und Betriebsstabilität ausreichend. Bei einer nicht sachgemäßen Verbrennung im Biomasseheizkessel können die CO_e-Konzentrationen entweder über einen längeren Zeitraum einen bestimmten Grenzwert überschreiten (z. B. CO_e-Konzentrationen über einen Zeitraum von mehr als 20 Minuten größer als 400 mg/Vm³) oder um einen bestimmten Grenzwert fluktuieren (z. B. in einem Zeitraum von einer Stunde mehr als fünf Überschreitungen eines CO_e-Grenzwerts von 400 mg/Vm³). Ähnlich wie in der Anfahrbetriebsphase hängt die Verbrennung und somit das Regelverhalten während des Betriebs maßgeblich von dem eingesetzten Brennstoff ab. Hier können die folgenden Fälle unterschieden werden:

- Der Sauerstoffsollwert wird während des Betriebs über einen längeren Zeitraum unterschritten, obwohl die maximale Einstellung des Sekundärluftaktors erreicht wurde. In diesem Fall kann davon ausgegangen werden, dass ein Brennstoff verwendet wird, der zu einer intensiven bzw. starken Vergasung neigt und für die Verbrennung im Vergaserkessel nicht eingesetzt werden sollte. Eine starke Vergasung kann beispielsweise bei der Verbrennung von sehr trockenen und feinen Brennstoffen stattfinden.
- Der Sauerstoffsollbereich wird während des Betriebs über einen längeren Zeitraum trotz minimal möglicher Einstellung des Sekundärluftaktors überschritten. Hier kann es sich entweder um eine Leckage im Heizkessel nach der aktiven Reaktionszone oder um einen nicht geeigneten Brennstoff handeln, welcher Brenngase in geringen Mengen oder mit ungünstigen verbrennungstechnischen Eigenschaften aufgrund des geringen Energiegehalts bildet.
- Der Sauerstoffsollwert kann zwar eingehalten werden, jedoch wird der CO_e-Grenzwert über einen längeren Zeitraum überschritten. Dieser Fall tritt auf, wenn der Verbrennungsprozess gestört ist bzw. die Oxidationsreaktionen nur zum geringen Teil stattfinden. Dabei erfolgt die Einstellung des Sauerstoffs durch die Verdünnung des Abgases mit Sekundärluft und nicht durch den Verbrauch vom Sauerstoff. Dieser Fall kann sowohl in der Regelbetriebsphase als auch in der Anfahrbetriebsphase auftreten und führt zu regelungstechnischen Komplikationen sowie zu einem unsicheren Betrieb. Bei der Entwicklung des VREM-Systems wurde dieser Betriebsfall registriert und regelungstechnisch entsprechend berücksichtigt.

- **Teillastbetrieb und Gluthalten:**

  Der Teillastbetrieb tritt auf, wenn die Kesselwassertemperatur über die von dem Hersteller festgelegte Kesselwassersolltemperatur (in der Regel 85 °C) aufgrund der geringen Wärmeabnahme ansteigt. Dabei versucht

der Kessel sowohl die Brennstoff- als auch Primärluftzufuhr bis hinzu bestimmten minimalen Einstellgrenzen zu reduzieren, welche die Einstellung des Teillastbetriebs beschreiben. Diese Einstellgrenzen sind in der Regel für optimale Brennstoffe ermittelt, mit dem der Heizkessel auf dem Prüfstand problemlos funktioniert. Im Praxisbetrieb und aufgrund der Änderung der Brennstoffqualität sowie Umgebungs- und Betriebsparameter verschieben sich diese Grenzen, sodass im Teillastbetrieb eine unsachgemäße Verbrennung mit hohen Schadstoffemissionen stattfindet. Wenn die Kesseltemperatur trotz der minimalen möglichen Einstellung der Brennstoff- bzw. Verbrennungsluftzufuhr weiter ansteigt, wird der Kessel automatisch abgeschaltet und sich im Gluthaltemodus befinden. Diese Betriebsphase lässt sich durch eine hohe Kesseltemperatur (> 85 °C) und relativ geringe bzw. absinkende Abgastemperaturen mit gleichzeitig hohen Werten an Kohlenstoffmonoxid erkennen.

- **Ausbrandbetriebsphase:**

  Die Ausbrandbetriebsphase beginnt nach der Regelbetriebsphase, wobei der Brennstoff in dieser Phase fast vollständig thermisch umgesetzt ist. In der Ausbrandbetriebsphase steigt der Sauerstoffgehalt mit den CO_e-Konzentrationen im Abgas sukzessiv an, wobei gleichzeitig die Abgastemperaturen sowie Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid und somit die freigesetzte Wärme abnehmen. Prinzipiell bleibt in dem Vergasungsraum bzw. auf dem Rost nur ein Glutbett, welches durch eine gezielte Primärluft effektiv abgebrannt werden kann. In dieser Phase nimmt der Primärluftaktor eine maximale Einstellung an, wobei der Sekundärluftaktor die minimale mögliche Einstellung aussucht.

Die Überwachungsalgorithmen des VREM-Systems wurden auf Basis der jahrelangen Erfahrungen im Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP mit der Prüfung und dem Betrieb von unterschiedlichen Biomasseheizkesseln so universal entwickelt, dass sie unabhängig von der Art und Konstruktion vom Heizkessel für die Bewertung des Betriebs eingesetzt werden können. Der Vorteil des VREM-Systems beruht außerdem darauf, dass die bestehenden von den Herstellern eingesetzten Regelsoftwares nicht vollständig geändert, sondern lediglich ergänzt werden müssen. Aus einer technischen Sicht soll die Verbrennungstechnik mit der O_2/CO_e-Sonde statt der Lambda-Sonde ausgerüstet werden.

Die Untersuchung zur Erkennung von den jeweiligen Betriebsphasen des Heizkessels sind im Diagramm 27 und im Diagramm 28 dargestellt. Dabei sind die wichtigsten Parameter bzw. Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid (gemessen durch die Gasanalyse), der CO_e-Wert als Summenparameter der nicht verbrannten Abgasbestandteile (gemessen durch die O_2/CO_e-Sonde), der Sauerstoffgehalt im Abgas und die Abgastemperaturen bei der Verbrennung von Buchenscheitholz dargestellt. Wie dem Diagramm 27 zu entnehmen ist, steigen die Abgastemperatur sowie die Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid und CO_e in der Anfahrbetriebsphase schnell an, wobei gleichzeitig der Sauerstoffgehalt im Abgas von 21 Vol.-% auf ca. 5,4 Vol.-%

absinkt. Der schnelle Anstieg bzw. die Absenkung dieser Parameter deutet auf eine erfolgreiche Anzündung bzw. guten Start der Verbrennung hin, wodurch die Anfahrbetriebsphase klar erkannt wird. Die Anfahrbetriebsphase gilt als beendet, wenn Kohlenstoffmonoxid bzw. der CO_e-Wert unter den Grenzwert der 1. BImSchV von 400 mg/Vm³ sinken sowie sich die Abgastemperatur über 100 °C einstellt sowie in 5 Minuten nicht mehr als 5 °C ansteigt. Beim Erreichen dieser Bedingungen wird die Regelbetriebsphase erkannt, wobei die O_2/CO_e-Regelung beginnt.

In der Regelbetriebsphase wird außerdem die Stabilität der Verbrennung bzw. Effektivität der Regelung überwacht, wobei eine kontinuierliche Analyse des CO_e-Werts, des Sauerstoffgehalts sowie der Abgas- und Kesselwassertemperaturen mit den dazugehörigen verbrennungstechnischen Parametern durchgeführt sowie das Einstellverhalten der Primär- und Sekundärluftaktoren mitbetrachtet werden. Das Verhalten von den Primär- und Sekundärluftaktoren hängt sowohl von dem Verbrennungskonzept als auch von dem eingesetzten Brennstoff, der Regelung des Verbrennungsprozesses sowie der Dynamik der Wärmeabnahme ab. In der Regel beginnt die Verbrennung bzw. die Anfahrbetriebsphase mit der Zugabe hoher Primärluftmengen, um die Verbrennung in Gang zu bringen bzw. einen Sollwert der Kesselwassertemperatur möglichst schnell zu erreichen. Dabei wird je nach Energiegehalt des Brennstoffs und somit des produzierten Brenngases die Sauerstoffmenge für eine vollständige Verbrennung zugeführt bzw. angepasst. In der Regelbetriebsphase hängt die Einstellung der Primärluft und somit der Sekundärluft von der abgeführten Wärme und den bestehenden Druckverhältnissen im gesamten Heizkessel ab, wobei die Förderleistungen der Primär- und Sekundärluftmengen entsprechend schwanken. Im Gegensatz dazu nimmt die Förderleistung des Sekundärluftaktors beim Beginn der Ausbrandbetriebsphase sukzessiv ab und stellt sich nach einer gewissen Zeit auf eine minimal mögliche Förderleistung ein. Parallel dazu nimmt die Förderleistung des Primärluftaktors für die Intensivierung der Verbrennung zu. Sollte diese Phase erreicht werden, muss der Brennstoff entweder manuell oder mechanisch zugeführt werden.

Ein typisches Verhalten der Primär- und Sekundärluftaktoren eines Vergaserkessels ist durch die eingestellten Primär- und Sekundärluftmengen während des Abbrands im Diagramm 28 zu erkennen. Bei automatisch beschickten Heizkesseln ist zwar ein ähnliches Verhalten festzustellen, jedoch laufen die Betriebsphasen je nach Beschickungsregime (off/on-Zeit des Schneckenförderers) über Zeiträume von wenigen Minuten.

Zwar kann man die Betriebsphasen ohne die Berücksichtigung des Einstellverhaltens von Primär- und Sekundärluftaktoren erkennen, allerdings liefern sie wichtige Informationen, welche zu einer genaueren Erkennung führen.

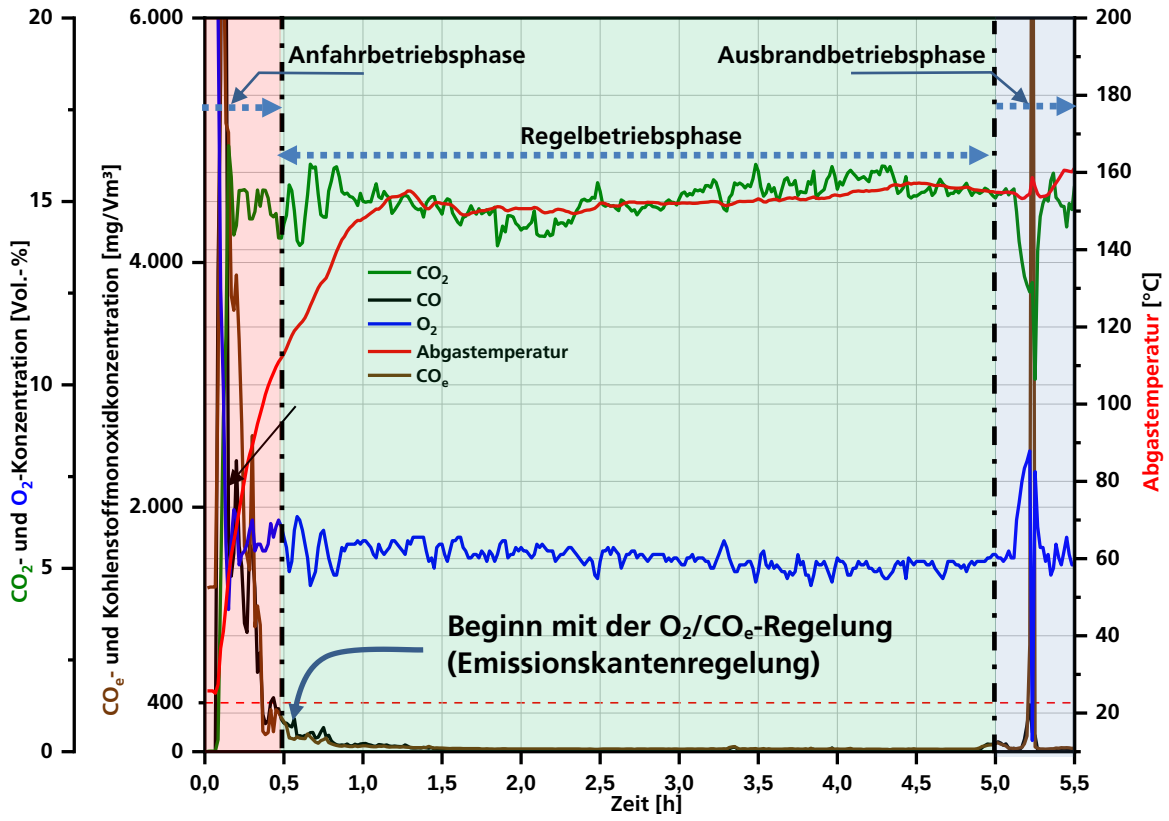

Diagramm 27: Typische Betriebsphasen beim Einsatz des VREM-Systems.

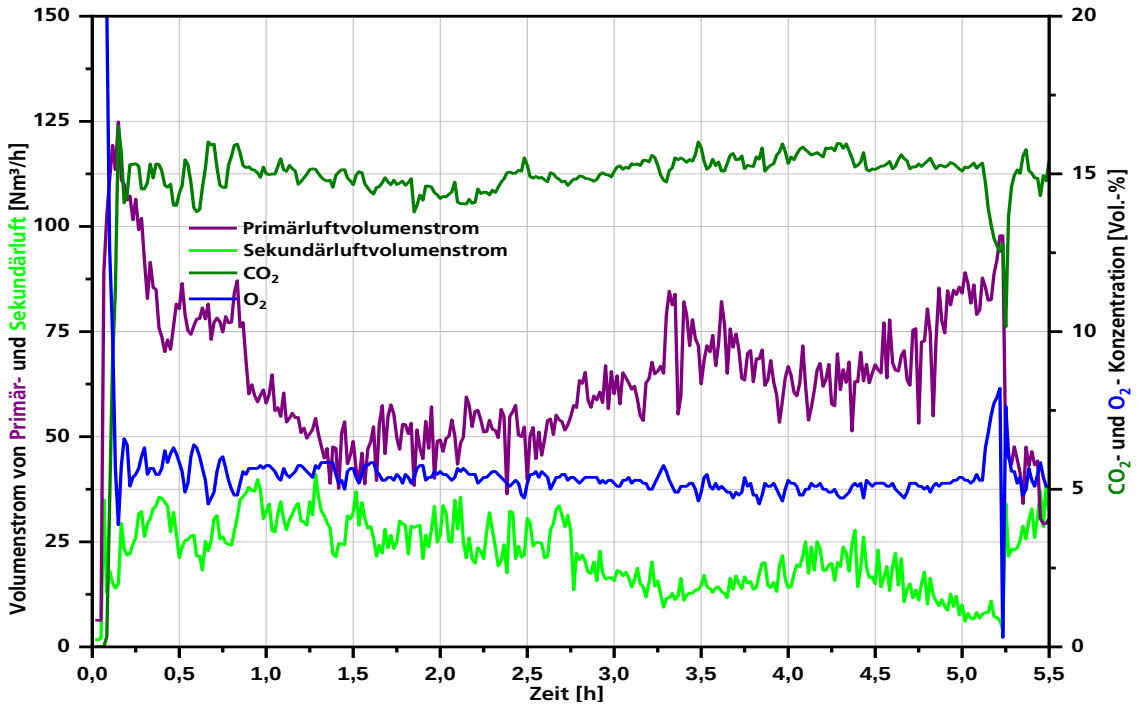

Diagramm 28: Verhalten der Primär- und Sekundärluft beim Einsatz des VREM-Systems.

9.2.2.2 Erkennung von praxisrelevanten Betriebsfehlern

Zur Bewertung des Betriebs spielen nicht nur sicherheitstechnische Aspekte, sondern auch praxisrelevante Betriebsfehler mit den jeweiligen Ursachen eine große Rolle. Außerdem sind dabei Faktoren und Kenngrößen zu berechnen, mit denen der Betrieb aus einer ökologischen und ökonomischen Sicht bewertet werden kann.

Die Überwachung von sicherheitsrelevanten Größen im Biomasseheizkessel hat die oberste Priorität. Die Anforderungen an die Betriebssicherheit sind in der DIN EN 303-5 sowie der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG geregelt und wurden im Rahmen der Entwicklung des VREM-Systems entsprechend berücksichtigt. In dem Abschnitt 5.1.3 sind die Aspekte der Betriebssicherheit für die Regelung ausführlich beschrieben.

Zur Einstellung eines sachgemäßen Betriebs dürfen hohe Konzentrationen an gasförmigen nicht verbrannten Bestandteilen sowie bestimmte Temperaturen und Drücke im gesamten Verbrennungssystem nicht überschritten werden. Eine ungünstige Einstellung dieser Größen kann sich unmittelbar negativ auf den Betrieb des Biomasseheizkessels auswirken.

Eine große Gefahr für die Sicherheit besteht beispielsweise, wenn ein sehr hoher Gehalt an nicht verbrannten Bestandteilen (ca. > 5 Vol.-%) bei gleichzeitig geringem Sauerstoffgehalt im Abgas sowie hohe Überdrücke im Biomasseheizkessel auftreten. Ein solcher gefährlicher Betriebszustand kann beispielsweise bei der Nutzung von nicht geeigneten Brennstoffen (z. B. bei der Verbrennung von feinen Brennstoffen wie z. B. Holzspänen) entstehen und zu starken Verpuffungsreaktionen bis hin zur Explosion führen. Regelungstechnisch wird dieser gefährliche Betriebszustand durch die Abschaltung der Primärluft sowie Erhöhung der Förderleistung des Abgassaugzuggebläses erreicht. Dadurch soll die Verbrennung bzw. die Vergasung gebremst und ein ausreichend hoher Unterdruck im Heizkessel eingestellt werden.

Im Praxisbetrieb können unterschiedliche technische Fehler beim Betrieb von Heizkesseln auftreten, welche sowohl auf die Verbrennungstechnik als auch auf die Bedienungsqualität zurückgeführt werden können. Im Folgenden werden zwei typische Fehler beschrieben, welche durch eine falsche Bedienung des Vergaserkessels zu einem unsachgemäßen Betrieb mit erhöhten Schadstoffemissionen führen.

<u>Betriebsfehler durch eine falsche Bedienung durch die Anwendung eines ungeeigneten Beschickungsregimes:</u>

Eine falsche Bedienung von Vergaserkesseln durch die Anwendung eines ungeeigneten Beschickungsregimes kommt häufig in der Praxis vor und führt zu einem hohen Schadstoffausstoß sowie zu einer niedrigen Verbrennungseffizienz aufgrund hoher chemischer Verluste. Dabei ist mit CO-Konzentrationen von über 4 Vol.-% zu rechnen. Eine falsche Anwendung kommt beispielsweise bei dem Verzicht auf Kleinholz bzw.

einer entsprechenden Anzündschicht vor, welche die Verbrennung in Gang bringen soll.

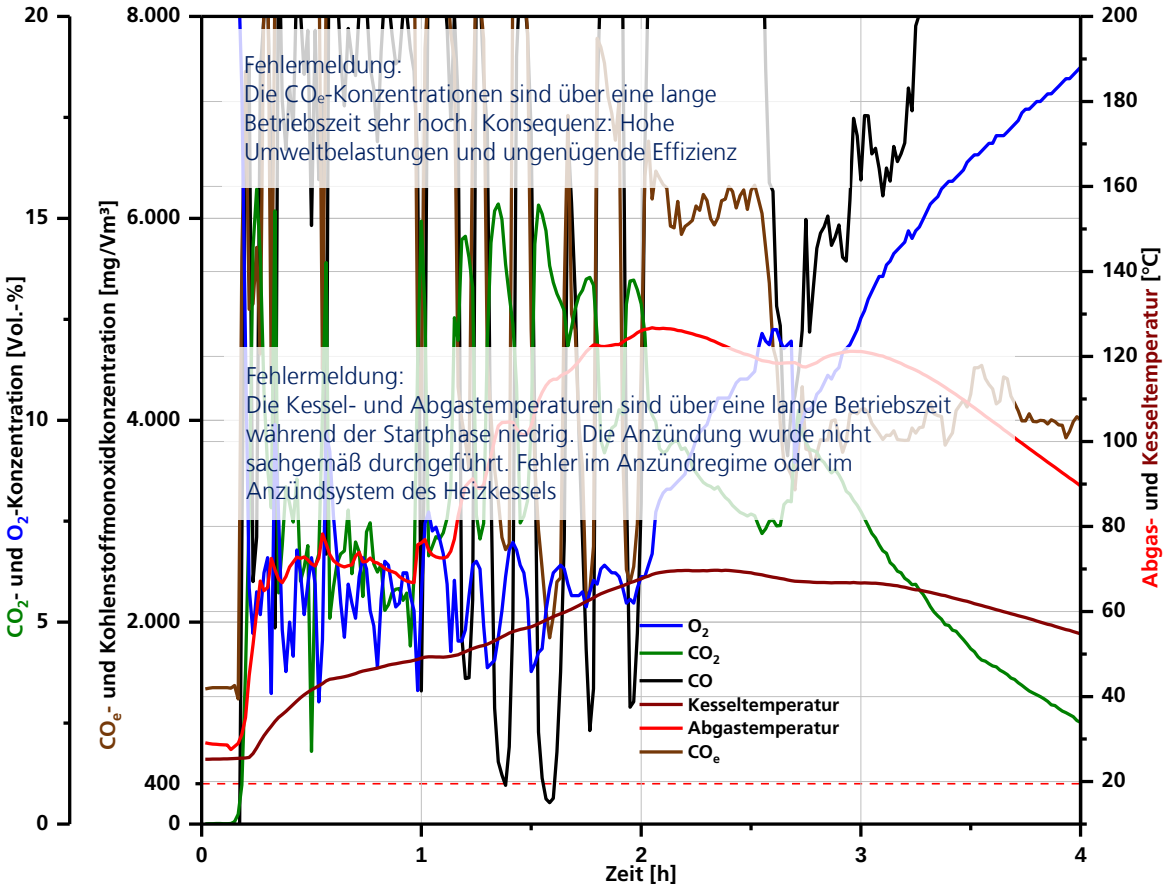

Diagramm 29: Verbrennungsverhalten bei einer fehlerhaften Zündung aufgrund eines ungünstigen Anzündregimes im Biomasseheizkessel.

Im Diagramm 29 sind beispielhaft die Konzentrationen an CO_e, Kohlenstoffmonoxid sowie Kohlenstoffdioxid mit den Kessel- und Abgastemperaturen bei einer fehlerhaften Zündung in der Verbrennungsversuchsanlage dargestellt, welche durch geringe Mengen an Zündhölzern bzw. einem ungünstigen Zündregime verursacht wurde. Dem Diagramm 29 ist zu entnehmen, dass die Abgastemperatur in der Anfahrbetriebsphase über einen Zeitraum von mindestens einer Stunde deutlich unter 90 °C geblieben ist, wobei Kohlenstoffmonoxid über lange Zeiträume bei über 6.000 mg/Vm³ liegt und stark schwankt. Außerdem ist zu erkennen, dass der Sauerstoffgehalt im Abgas in diesem Betriebsfall nicht im Sollbereich geregelt werden kann. Durch die geringen Mengen an Kleinhölzern fehlt die Energie für die Gewährleistung und Fortsetzung der Vergasung, wobei ein Brenngas mit ungünstigen verbrennungstechnischen Eigenschaften produziert wird.

Dank der Überwachungsalgorithmen des VREM-Systems werden die niedrigen Abgas- und Kesseltemperaturen sowie der flache Anstieg dieser Temperaturen mit den hohen CO_e-Konzentrationen über einen bestimmten

Zeitraum registriert und programmintern verarbeitet. Über den Verlauf der Temperaturen und Konzentrationen kann das VREM-System erkennen, dass die fehlerhafte Zündung in diesem Betriebsfall entweder auf den Brennstoff oder auf einen Fehler in der Verbrennungstechnik zurückzuführen ist. Der Nutzer wird anschließend durch entsprechende Benachrichtigungen über den Fehler, die möglichen Fehlerursachen sowie über die ökologischen sowie ökonomischen Auswirkungen informiert. Die durch das System getätigten Benachrichtigungen sind im Diagramm 29 dargestellt.

Betriebsfehler durch die Verwendung von feuchtem Brennstoff:

Eines der häufigsten Betriebsfehler bei der Bedienung von Biomasseheizkesseln tritt durch die Nutzung von ungeeigneten Brennstoffen auf. Ein großes Problem in der Praxis besteht darin, dass viele Nutzer die für ihre Heizkessel ungeeigneten Brennstoffe (z. B. sehr feucht oder trocken) häufig nicht kennen und dadurch unbewusst einen unsachgemäßen Betrieb verursachen. Beispielsweise ist beim Einsatz von feuchten Brennstoffen (Feuchtegehalt > 18%) in Form von Scheiten im Vergaserkessel immer mit einer unsachgemäßen Verbrennung unabhängig von der Qualität der verwendeten Verbrennungstechnik zu rechnen, wie beispielsweise dem Diagramm 30 bei der zweiten Auflage (Verwendung von feuchtem Brennstoff) zu entnehmen ist. Im Rahmen der Untersuchung der Funktionalität des VREM-Systems wurden feuchte Hölzer verwendet und das Verbrennungsverhalten entsprechend analysiert (Diagramm 30).

Das Diagramm 30 stellt eine beispielhafte Verbrennung von Buchenscheitholz dar, wobei bei der ersten Auflage Holzscheite mit einem Feuchtegehalt von ca. 16 Ma.-% eingesetzt wurden. Bei der zweiten Auflage im gleichen Diagramm wurde Buchenscheitholz mit einem Feuchtegehalt von über 22 Ma.-% nachbeschickt. Dabei ist ersichtlich, dass bei der ersten Auflage eine sachgemäße Verbrennung stattgefunden hat, wobei bei der zweiten Auflage trotz der Anwesenheit eines Glutbetts mit einer Höhe von ca. 12 cm eine unsachgemäße Verbrennung erfolgte. Die Verwendung von feuchten Holzscheiten wurde durch das VREM-System erkannt. Etliche Betriebsfehler wurden einem simulierten Nutzer per E-Mail gemeldet bzw. sind im Diagramm 30 entsprechend dargestellt.

In dem Diagramm 30 lässt sich auch ablesen, dass bei der zweiten Auflage zusätzlich zu den erhöhten Emissionen starke Druckschwankungen aufgetreten sind. Diese starken Druckschwankungen deuten sowohl auf den Einsatz von sehr feuchten, als auch sehr trockenen Brennstoffen hin. Der einzige Unterschied dabei ergibt sich daraus, dass bei trockenen Brennstoffen ein starker Sauerstoffmangel auftritt, wobei bei feuchtem Holz der Sauerstoff in einem günstigen Bereich geregelt werden kann. Bei einer fehlerhaften Programmierung des Verbrennungsprozesses, wie bei vielen Reglern bzw. herkömmlichen Heizkesseln festzustellen ist, erfolgt die Einstellung des Sauerstoffs in diesem Betriebsfall (Einsatz eines feuchten Brennstoffs) durch die starke Verdünnung des Abgases, wobei die Oxidationsreaktionen aufgrund niedriger Temperaturen bzw. ungünstiger

verbrennungstechnischer Eigenschaften des Brenngases nur zu einem geringen Teil stattfinden können.

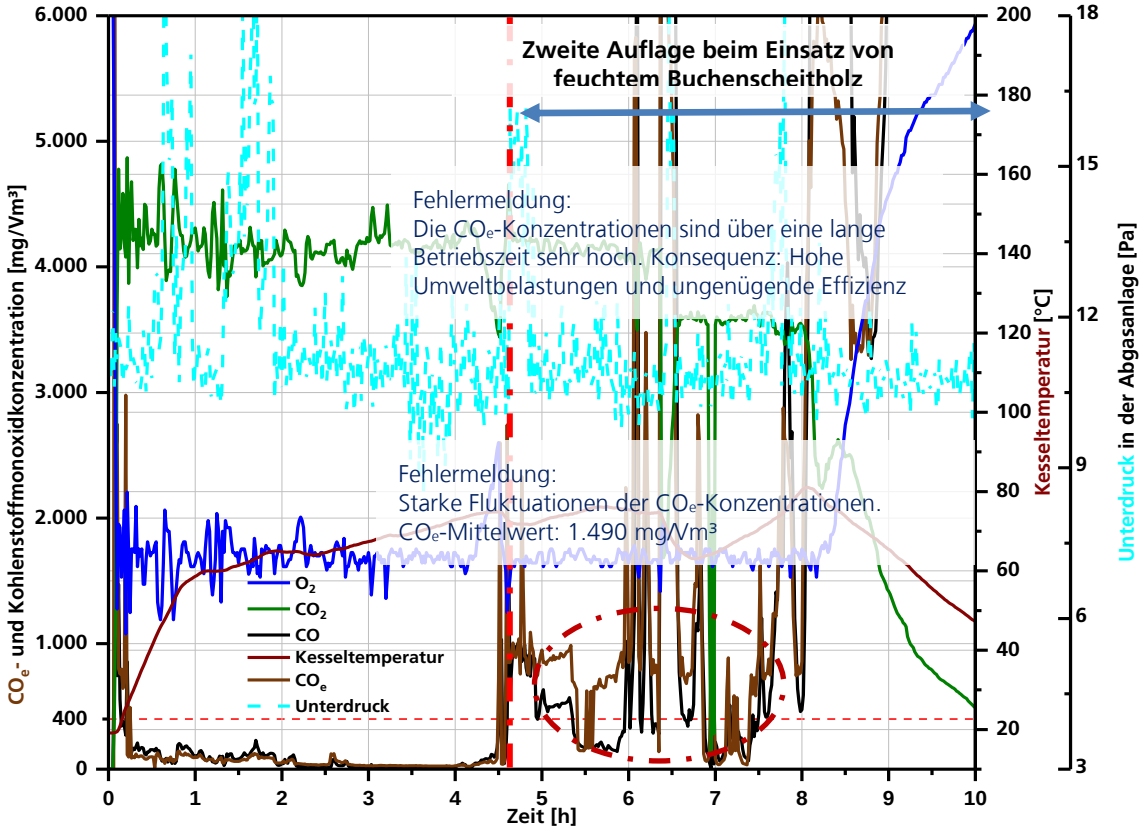

Diagramm 30: Verbrennungsverhalten beim Einsatz von feuchtem Buchenscheitholz (2. Auflage).

Verbrennung von trockenen/feinen Brennstoffen:

Das Vergasungsverhalten bzw. die Vergasungsintensität ist eine maßgebliche verbrennungstechnische Eigenschaft von Brennstoffen und beschreibt die Umwandlungsgeschwindigkeit eines festen Brennstoffs zu Brenngas in Anwesenheit von Wärme und unter Zugabe eines Vergasungsmittels (z. B. Umgebungsluft oder Sauerstoff). Das Vergasungsverhalten eines Brennstoffs hängt maßgeblich von der Dichte, den morphologischen Eigenschaften, der Feuchte und der Oberfläche ab. Es gilt, je geringer die Dichte, größer die Oberfläche und niedriger der Feuchtegehalt im Brennstoff sind, desto intensiver findet die Vergasung statt. In Biomasseheizkesseln lässt sich die Vergasung regelungstechnisch durch die Zufuhr von Primärluft regulieren, wobei die Vergasung bei höheren Primärluftmengen stärker stattfindet als bei geringeren Mengen.

Ein großes Problem beim Einsatz von Brennstoffen mit starker Vergasung in Verbrennungstechnologien ergibt sich daraus, dass bereits bei geringen Mengen an Primärluft große Brenn- und Abgasmengen gebildet werden. Außerdem stellt die schlagartige Vergasung des Brennstoffs eine große Herausforderung für das Verbrennungsluftzufuhrsystem sowie für die

Nachbrennkammer dar. Hier müssen nicht nur das Volumen der Nachbrennkammer (zweite Verbrennungsstufe), sondern auch die Förderleistung des Sekundärluftaktors (Gebläse oder Luftklappen) bzw. des Saugzuggebläses entsprechend ausgelegt sein, sodass ausreichend Verweilzeit sowie Sauerstoff für eine vollständige Oxidation eingestellt sowie die Verbrennungsprodukte aus dem Heizkessel sicher abgeführt werden können.

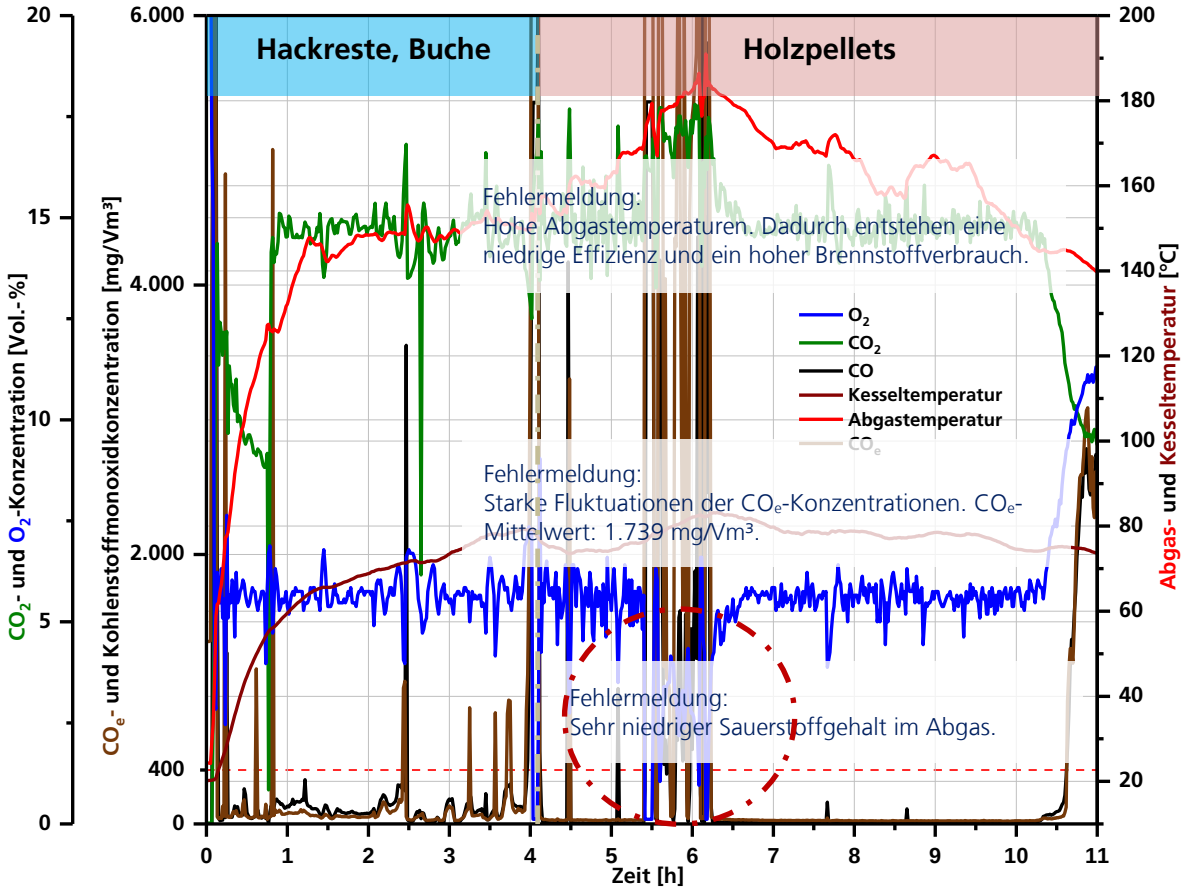

Diagramm 31: Verbrennungsverhalten beim Einsatz von feinen und trockenen Brennstoffen.

Beim Betrieb von Heizkesseln mit feinen und trockenen Brennstoffen tritt meistens eine intensive schlagartige Vergasung mit einem energiereichen Brenngas auf, wobei die Primär- und Sekundärluft vor allem beim Einsatz von trägen Aktoren (wie z. B. Luftklappen) nicht ausreichend schnell für die Einstellung einer sachgemäßen Verbrennung eingestellt werden können.

In dem Diagramm 31 sind der Sauerstoffgehalt, das Kohlenstoffmonoxid (gemessen durch die Gasanalyse), der CO$_e$-Wert (gemessen durch die O$_2$/CO$_e$-Sonde) sowie die Abgas- und Kesseltemperaturen bei der Verbrennung von trockenen Hackresten aus Buchenholz (erste Auflage) und Pellets (zweite Auflage) dargestellt. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass bei der ersten Auflage relativ hohe Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid mit vielen Schwankungen trotz eines hohen Heizwerts aufgetreten sind. Diese

Schwankungen sind mit dem ungünstigen Vergasungsverhalten zu begründen. Zwar wird bei dieser Auflage der CO-Grenzwert von 400 mg/Vm^3 gemäß der 1. BImSchV problemlos eingehalten, aber das Verbrennungsverhalten ist dabei nicht als optimal zu bewerten bzw. mit der Verbrennung von günstigem Buchenscheitholz zu vergleichen (siehe Diagramm 27).

Bei der zweiten Auflage bzw. bei der Beschickung von Holzpellets (relativ feiner und trockener Brennstoff) sinkt der Sauerstoffgehalt schlagartig von etwa 7 Vol.-% auf weniger als 1 Vol. % aufgrund von starkem Sauerstoffverbrauch ab, was aus einer Vergasung bzw. der Produktion einer großen Brenngasmenge mit einem hohen Heizwert resultiert. Dem Diagramm 31 ist außerdem zu entnehmen, dass der Sauerstoffgehalt im Abgas nicht stabil eingestellt werden kann, wobei von Zeit zu Zeit ein Sauerstoffmangel mit hohen Konzentrationen an nicht verbrannten Bestandteilen auftreten kann. Direkt nach der Beschickung der Holzpellets erreichen die Verbrennungsluftaktoren mit der Regelung ihre Grenzen (Sekundärluft mit einer maximalen Einstellung, Primärluft mit einer minimalen Einstellung) und es tritt ein starker Sauerstoffmangel über ca. 30 Minuten auf. Dieser ungünstige Betriebsfall wurde durch das VREM-System registriert und dem virtuellen Nutzer per E-Mail gemeldet bzw. entsprechend im Diagramm 31 dargestellt.

9.3 Übertragbarkeit der O_2/CO_e-Regelung auf automatisch beschickte Heizkessel

Automatisch beschickte Heizkessel weisen ein ähnliches Verbrennungsverhalten wie handbeschickte Heizkessel auf. Der einzige Unterschied ergibt sich dadurch, dass die Einzelabbrände bei automatisch beschickten Heizkesseln aufgrund der kleinen beschickten Brennstoffmenge im Minutenbereich (in der Regel < als 15 Minuten) liegen, wie dem Diagramm 32 zu entnehmen ist. Dabei sinkt der Sauerstoffgehalt direkt nach der Brennstoffbeschickung für eine kurze Zeit auf unter 5 Vol.-% ab und steigt anschließend wieder auf bis 12 Vol.-% an. Sowohl am Anfang des Abbrandes als auch am Ende treten erhöhte Emissionen an nicht verbrannten Bestandteilen auf, wobei der CO-Grenzwert von 400 mg/Vm^3 bei diesem Betrieb problemlos eingehalten werden kann.

Trotz des guten Verbrennungsverhaltens dieses automatisch beschickten Heizkessels liegt der Sauerstoffüberschuss im Durchschnitt bei ca.9,5 Vol.-%. Durch die Regelung mit der O_2/CO_e-Sonde bzw. durch den Einsatz des VREM-Systems lässt sich der Sauerstoffüberschuss auf Dauer auf 5 Vol.-% reduzieren bzw. regeln, ohne die Verbrennungsqualität negativ zu beeinflussen. Dadurch ist eine Reduzierung der Abgaswärmeverluste von ca. 21,5 % bzw. eine Effizienzerhöhung von mindestens 3,4 % zu gewährleisten. Bei einer thermischen Leistung von 200 kW können jährlich ca. 3 Tonnen Brennstoff und somit Kosten von ca. 180 € beim Einsatz von hochqualitativem Hackgut bzw. bis zu 600 € beim Einsatz von Holzpellets eingespart werden.

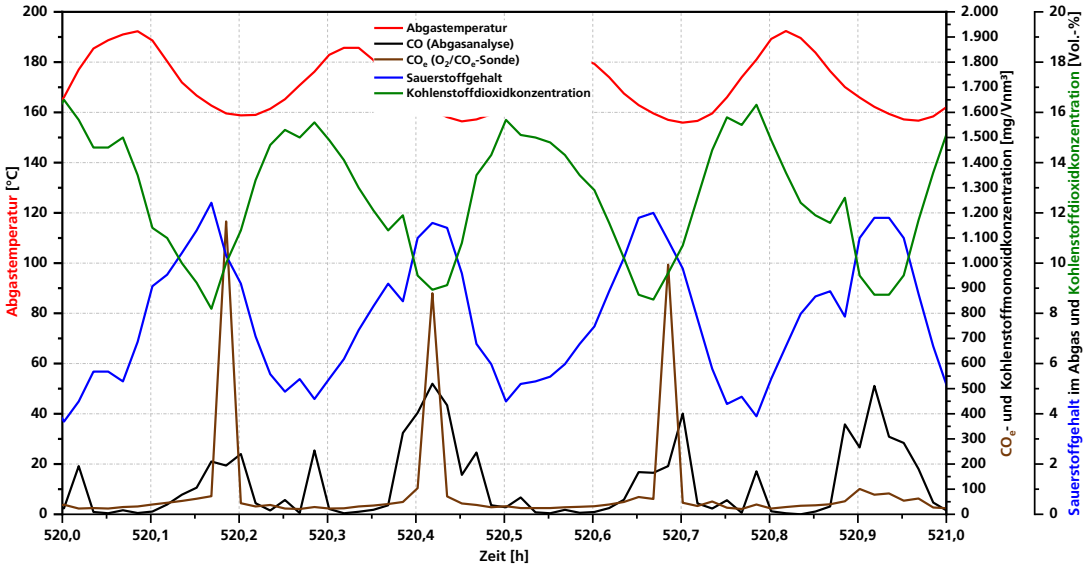

Diagramm 32: Verbrennungsverhalten von automatisch beschickten Heizkesseln.

Das Potential bei dem Einsatz der O_2/CO_e-Sonde bzw. des VREM-Systems ergibt sich nicht nur durch die Reduzierung des Sauerstoffüberschusses und somit der Abgaswärmeverluste, sondern auch durch die Optimierung des Beschickungsregimes. Dabei können on/off-Zeiten des Schneckenförderers so variabel und automatisch eingestellt werden, dass eine schadstoffarme sowie hocheffiziente Verbrennung unabhängig von den physikalischen und verbrennungstechnischen Eigenschaften des eingesetzten Brennstoffs gewährleistet werden können. Die on/off-Zeiten des Schneckenförderers werden gemäß dem Stand der Technik festgestellt und der Heizkessel entsprechend geprüft. Jede Abweichung in der Brennstoffqualität, für die die on/off-Zeiten des Schneckenförderers ausgesucht sind, führt zu einer entsprechenden Änderung in der Verbrennungsqualität. Der Einfluss der Änderung der Brennstoffqualität ist im Diagramm 37 (Betriebsstunden 500 h bis 600 h) zu erkennen. Der Betreiber des Heizkessels hat von einer neuen Brennstofflieferung mit ungünstiger Qualität berichtet. Hier gilt, je schlechter der Brennstoff, umso höher sind die Schwankungen des Kohlenstoffmonoxids.

10 Ergebnisse der Erprobung des VREM-Systems im Praxisbetrieb

Zur Überprüfung der Übertragbarkeit der auf dem Prüfstand erreichten Ergebnisse im Praxisbetrieb sowie der Praxistauglichkeit wurde das VREM-System in zwei unterschiedliche Heizkessel integriert und über eine Heizperiode dauererprobt. Bei den eingesetzten Heizkesseln handelt es sich um die folgenden zwei automatisch betriebenen Heizkessel:

- Ein automatisch beschickter Heizkessel (Typ HDG M) für die Verbrennung von Pellets und Hackschnitzel (Abbildung 13). Dieser Kessel besitzt eine thermische Leistung zwischen 175 kW bis 240 kW.
- Ein hand- und automatisch beschickter Heizkessel (Typ F-Kessel) für die Verbrennung von Scheithölzern und Holzpellets (Abbildung 14). Dieser Kessel verfügt über eine thermische Leistung zwischen 15 kW und 50 kW.

Die beiden Biomasseheizkessel sind auf dem Markt freikäuflich verfügbar und werden in zahlreichen Haushalten eingesetzt. Für die Dauererprobung des VREM-Systems wurde eine spezielle mobile Überwachungsstation konstruiert und aufgebaut, welche zusätzlich zu dem VREM-System über eine mobile Abgasanalyse (Typ AO 2020 der Firma ABB Ltd) sowie entsprechende Sensoren für die Erfassung der Abgas- und Kesseltemperaturen verfügt.

Abbildung 13: Automatisch beschickter Heizkessel der Firma HDG (Typ HDG M).

Abbildung 14: Bei der Praxiserprobung eingesetzter handbeschickter Vergaserkessel (Typ F-Kessel) der Firma HDG GmbH.

Zum Vergleich und zur Überprüfung der durch das VREM-System bzw. der O_2/CO_e-Sonde gemessenen CO_e-Konzentrationen mit dem tatsächlichen Gehalt an Kohlenstoffmonoxid im Abgas wurde zusätzlich eine hochgenaue kaltextraktive Gasanalyse (Typ ABB AO 2020) verwendet.

Zur Versendung von Betriebsinformationen wie z. B. Informationen über die Qualität der Verbrennung und über die Betriebsfehler ist das Überwachungssystem über ein LAN-Kabel mit dem Internet verbunden. Über den in der SPS installierten SMS/SMTP-Server können der Nutzer jederzeit per E-Mail informiert und die Daten online einsehen werden. Der Nutzer und die Projektbeteiligten haben zudem die Möglichkeit den Betrieb verschlüsselt über ein Fernüberwachungs- bzw. Wartungsprogramm der Firma TeamViewer GmbH zu überwachen.

10.1 Dauererprobung in einem handbeschickten Vergaserkessel

Die handbeschickten Feuerungsanlagen sind die am häufigsten eingesetzten Feuerungsanlagen für Biomasse in deutschen Privathaushalten [Kaltschmitt 2009]. Bei den mit Scheitholz betriebenen Vergaserkesseln handelt es sich um eine spezielle Form der handbeschickten Feuerungsanlagen, bei denen die Vergasung und Nachverbrennung räumlich getrennt erfolgen. Die Vergasung des festen Brennstoffs findet bei Vergaserkesseln in einer sogenannten Vergasungskammer statt. In der Vergasungskammer wird der Brennstoff unter Zufuhr von Primärluft vergast bzw. zu Brenngas umgewandelt. Das in der Vergasungskammer erzeugte Brenngas wird anschließend in einer Nachbrennkammer vollständig verbrannt. Das bei der Verbrennung generierte Abgas wird anschließend

über die Abgasanlage nach der Wärmeübertragung in die Umgebung geleitet. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde ein in einem Privathaushalt befindlicher handbeschickter Vergaserkessel über eine Heizperiode mit dem VREM-System überwacht. Im Diagramm 33 sind die Überwachungsergebnisse bzw. der Verlauf der Verbrennung über die gesamte Überwachungszeit dargestellt.

Tabelle 6: Mittelwerte vom Kohlenstoffmonoxid (gemessen mit der Gasanalyse) und CO_e –Werte (gemessen mit der O_2/CO_e-Sonde) im Praxisbetrieb eines Vergaserkessels.

Praxisbetrieb	Anfahrbetriebsphase		Regelbetriebsphase		Ausbrand	
	Gasanalyse	O_2/CO_e-Sonde	Gasanalyse	O_2/CO_e-Sonde	Gasanalyse	O_2/CO_e-Sonde
Datum	CO	CO_e	CO	CO_e	CO	CO_e
	mg/Vm³	mg/Vm³	mg/Vm³	mg/Vm³	mg/Vm³	mg/Vm³
28.11.2017	4.195	4.784	1.659	2.724	4.114	5.078
30.11.2017	556	785	97	121	4.442	5.822
08.12.2017	409	553	281	473	9.890	10.137
13.12.2017	3.607	4.020	713	1.184	9.965	9.028
25.12.2017	138	154	91	151	4.485	4.802
28.12.2017	474	541	1.228	1.309	2.412	4.116
30.12.2017	733	755	185	619	2.129	4.923
01.01.2018	222	290	745	895	4.249	4.403
02.01.2018	327	332	217	539	3.626	4.541
03.01.2018	1.188	1.201	379	709	3.992	5.336
15.01.2018	645	711	153	223	9.856	10.735
18.01.2018	3.324	3.434	530	515	6.171	6.834
19.01.2018	1.039	1.129	55	142	5.631	5.829
20.01.2018	226	224	150	267	5.762	6.737

Um die Korrelation sowie die Übereinstimmung des durch die Gasanalyse gemessenen Kohlenstoffmonoxids mit dem CO_e-Wert der O_2/CO_e-Sonde analysieren zu können wurden beispielhafte Betriebstage ausführlich ausgewertet und in der Tabelle 6 dargestellt. Die Werte der Tabelle 6 beziehen sich auf trockenes Abgas und einen Bezugssauerstoffgehalt von 13 Vol.-%. Dabei ist zu erkennen, dass die CO_e-Werte höher als die Werte des Kohlenstoffmonoxids sind, welche durch die Gasanalyse ermittelt wurden. Dieser Unterschied ist damit zu begründen, dass die O_2/CO_e-Sonde nicht nur das Kohlenstoffmonoxid, sondern auch sonstige brennbare gasförmige Bestandteile mit unterschiedlicher Sensitivität detektiert.

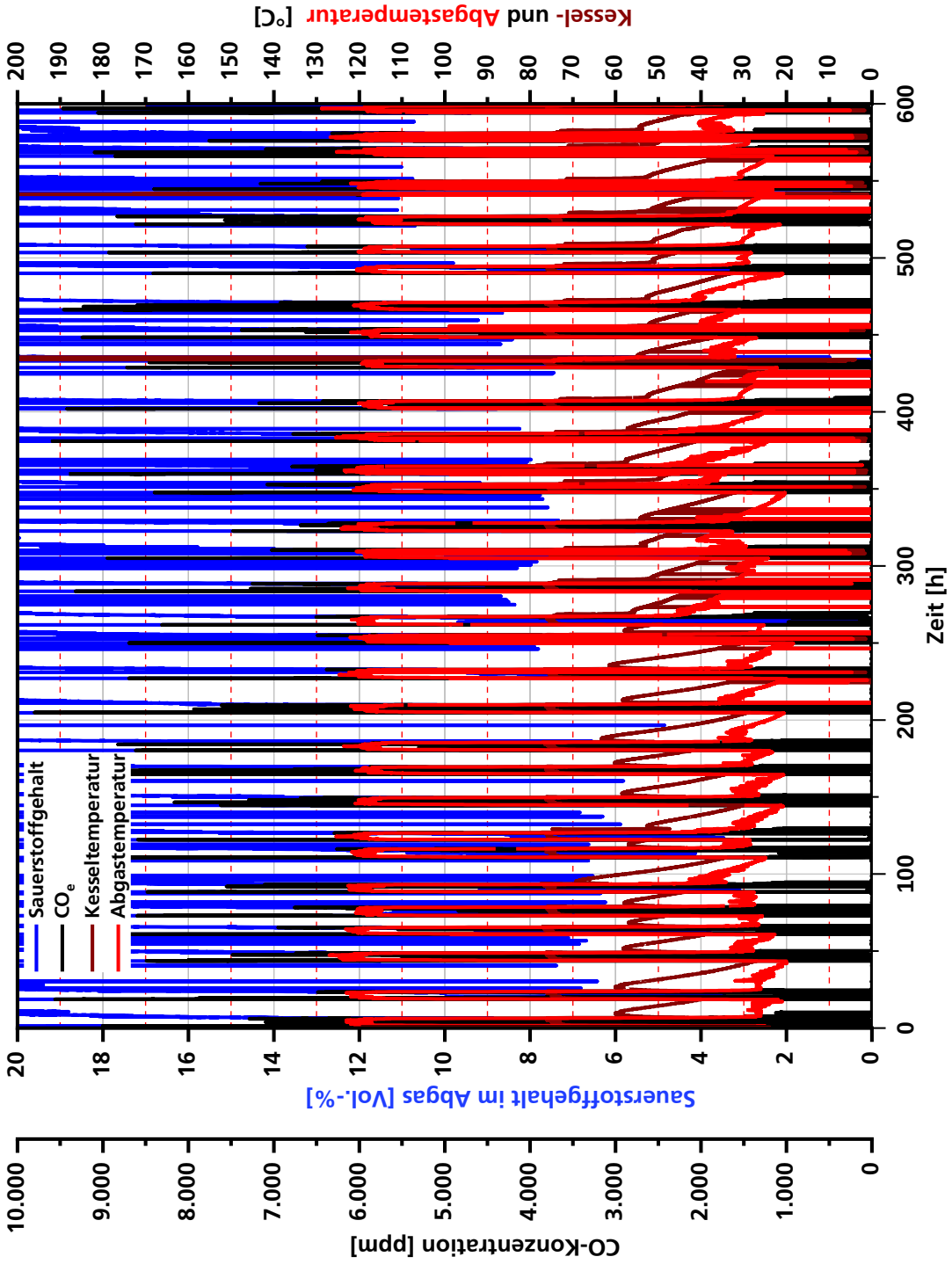

Diagramm 33: Ergebnisse bei der Überwachung eines handbeschickten Vergaserkessels im Praxisbetrieb.

Um das Verbrennungsverhalten des Vergaserkessels in der Praxis zu zeigen, wurden beispielhafte Betriebstage bei der Überwachung mit dem VREM-System ausgesucht und in den folgenden Abschnitten dargestellt, wobei zwischen einem sachgemäßen Betrieb und einem unsachgemäßen Betrieb aufgrund von Fehlbedienung des Heizkessels durch den Einsatz ungünstiger Brennstoffe unterschieden wird.

Sachgemäßer Betrieb im Vergaserkessel

Eine sachgemäße Verbrennung im Vergaserkessel lässt sich nur erreichen, wenn die Anlagentechnik durch den Nutzer gemäß der Aufstell- und Bedienungsanweisung bedient wird, keine Fehler in der Verbrennungstechnik vorliegen und geeignete Brennstoffe im Vergaserkessel eingesetzt werden.

Das Diagramm 34 zeigt einen sachgemäßen Betrieb des im Rahmen der Praxiserprobung des VREM-Systems eingesetzten Vergaserkessels. Dabei sind die Abgas- und Kesseltemperaturen sowie das Kohlenstoffmonoxid (gemessen durch die Gasanalyse), der CO_e-Wert und der Sauerstoffgehalt im Abgas dargestellt. Dem Diagramm 34 ist zu entnehmen, dass die Anfahrbetriebsphase durch die schnelle erfolgreiche Zündung in kurzer Zeit überwunden wird, wobei die Abgas- und Kesseltemperaturen sowie die Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid schnell ansteigen bzw. die Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid sowie des CO_e -Werts in der gleichen Zeit entsprechend deutlich unter den Grenzwert von 400 mg/Vm³ absinken. Die kurzweilige Anfahrbetriebsphase sowie die sehr gute Verbrennung in der Regelbetriebsphase lassen sich hauptsächlich auf die gute Qualität der Verbrennungstechnik sowie auf eine sachgemäße Bedienung (Einsatz von qualitativen Holzscheiten und Vorbereitung eines günstigen Beschickungsregimes) des Vergaserkessels zurückführen.

Bei der Ausbrandbetriebsphase steigt das Kohlenstoffmonoxid verbrennungskonzeptbedingt (Chargenbetrieb) für eine kurze Zeit bis zu 6.000 mg/Vm³ und sinkt nach einer vollständigen Verbrennung des verbleibenden Glutbettes bis unter 2.000 mg/Vm³. Der im Diagramm 34 dargestellte Abbrand lässt sich bei guter Verbrennungstechnik bzw. bei Vergaserkesseln mit unterem Abbrand häufiger in der Praxis erreichen als bei Vergaserkessels mit seitlichem Abbrand. Ein konzeptioneller Nachteil bei dem unteren Abbrand besteht in den erhöhten Feinstaubemissionen, welche sich durch die Durchströmung des Glutbetts während der Verbrennung ergeben.

Durch das VREM-System werden nicht nur negative bzw. Fehlermeldungen, sondern auch positive Meldungen bei einem optimalen Betrieb an die Nutzer gesendet. Bei dem im Diagramm 34 dargestellten Abbrand wurden die positiven Meldungen von dem VREM-System zusammengefasst, welche in der Tabelle 7 ausführlich dargestellt sind. Dabei wurde die Bewertung explizit für jede Betriebsphase durchgeführt.

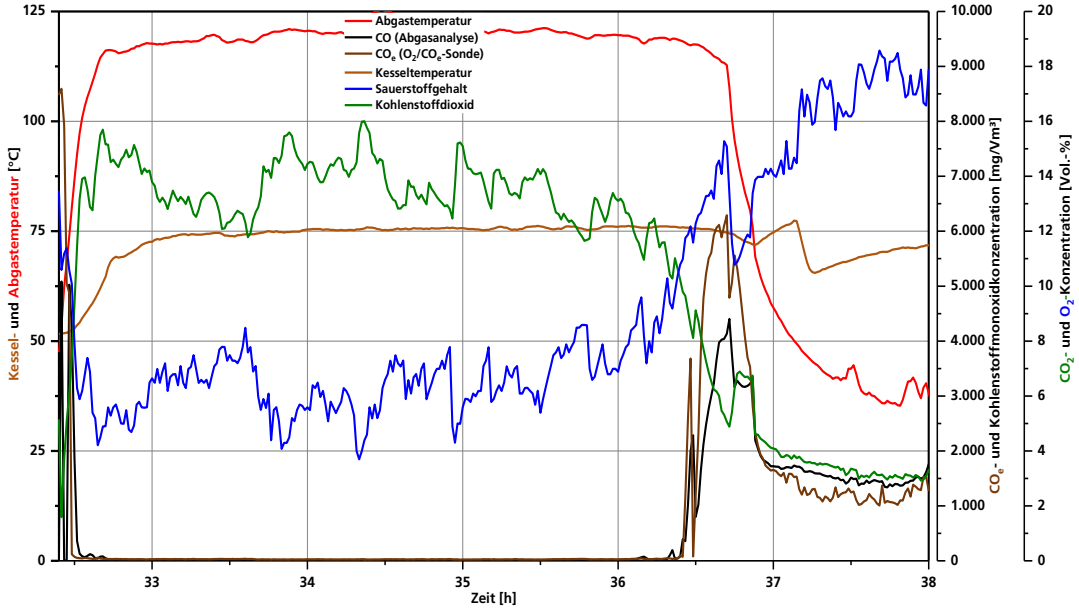

Diagramm 34: Darstellung eines sachgemäßen Betriebs eines Vergaserkessels bei der Praxiserprobung des VREM-Systems.

Tabelle 7: Meldungen durch das VREM-System bei einer sachgemäßen Verbrennung.

Datum, Uhrzeit	Betriebsstunde	Meldung
24.12.2018, 22:40 Uhr	32,4	Anlage wurde gestartet
25.12.2018, 00:01 Uhr	32,7	Die Startbetriebsphase/Anfahrbetriebsphase wurde erfolgreich beendet. Der Mittelwert der CO_e-Konzentrationen in der Startbetriebsphase liegt bei 138 mg/Vm³.
25.12.2018, 03:57 Uhr	36,6	Im Ausbrand.
25.12.2018, 03:57 Uhr	36,6	Kesselwirkungsgrad in der Regelbetriebsphase: 93 %; CO_e-Mittelwert in der Regelbetriebsphase: 114 mg/Vm³. Optimaler Betrieb.
25.12.2018, 05:27 Uhr	38,1	CO_e-Mittelwert im Ausbrand: 1.305 mg/Vm³, gute Ausbrandphase!
25.12.2018, 05:27 Uhr	38,1	Der Betrieb hat ökonomisch und ökologisch stattgefunden.
25.12.2018, 05:27 Uhr	38,1	Im Standby.

Der Tabelle 7 ist zu entnehmen, dass die Algorithmen zur Erkennung der Betriebsphasen trotz fehlender Informationen von den Regelaktoren sehr gut funktioniert haben. Diese Funktion wurde nicht nur bei diesem Abbrand (Diagramm 34) sondern bei allen Abbränden während der Überwachung im Praxisbetrieb festgestellt.

Unsachgemäßer Betrieb des Heizkessels aufgrund der Fehlbedienung des Vergaserkessels

Ein Beispiel für eine unsachgemäße Bedienung bzw. Beschickung des Heizkessels ist im Diagramm 35 dargestellt, wobei eine fehlerhafte Zündung bzw. ein ungünstiges Zündregime zu erkennen ist. Dabei sind Kohlenstoffmonoxid, der CO_e-Wert, der Sauerstoffgehalt sowie die Abgastemperaturen dargestellt, welche bei der fehlerhaften Zündung der Scheithölzer im Vergaserkessel entstanden sind. Im Diagramm 35 ist ersichtlich, dass die Abgastemperaturen in der ersten halben Stunde zunächst auf ca. 100 °C angestiegen und anschließend über einen Zeitraum von ca. 20 Minuten in diesem Temperaturbereich geblieben sind. Dieses Verhalten der Abgastemperaturen lässt sich damit begründen, dass die Zündhölzer zu diesem Zeitpunkt verbraucht wurden und die darauf gelegten großen Holzscheiten mit einer schwachen Vergasung begonnen haben, wobei die nötige Wärme für die Begünstigung bzw. Fortsetzung der Vergasungsvorgänge nicht vorhanden war. Der Heizkessel benötigte bei dem verwendeten Beschickungsregime über drei Stunden, um ein Glutbett für eine stabile Vergasung aufzubauen. In diesem dreistündigen Zeitraum lagen das Kohlenstoffmonoxid und die CO_e-Werte deutlich über dem CO-Grenzwert (400 mg/Vm³) gemäß der 1. BImSchV. Die Verwendung eines ungünstigen Beschickungsregimes hat nicht nur in der Anfahrbetriebsphase, sondern auch in der Regelbetriebsphase negative Auswirkungen auf die Verbrennungsqualität. Beim Start bzw. in den ersten drei Betriebsstunden findet eine Vergasung statt, aus der ein Brenngas mit schlechten verbrennungstechnischen Eigenschaften produziert wird und sich nicht vollständig verbrennen lässt. In diesem Fall entsteht aufgrund der extrem hohen chemischen Verluste zwangsläufig eine unsachgemäße Verbrennung mit einer besonders niedrigen Effizienz.

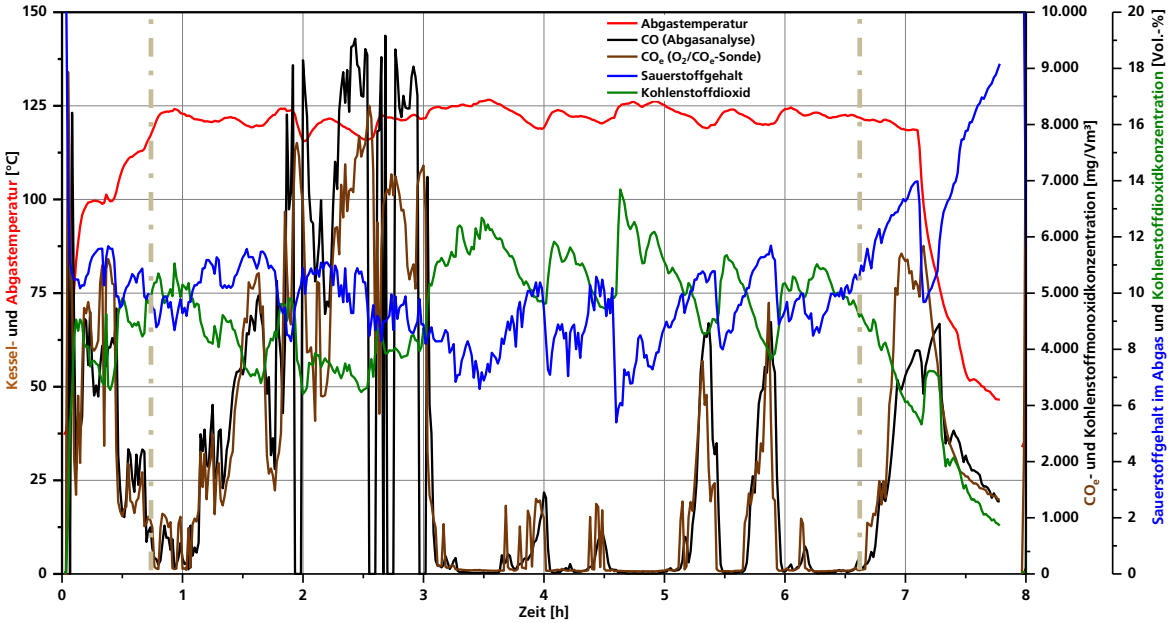

Diagramm 35: Betriebsverhalten bei unsachgemäßer Beschickung des Vergaserkessels.

Die oben geschilderten Betriebskomplikationen wurden durch das VREM-System erkannt, wobei mehrere Fehlermeldungen mit einer ausführlichen Fehlerursachenanalyse bzw. mit dem Hinweis auf eine unsachgemäße Bedienung des Heizkessels sowie auf eine ungünstige Anzündung des Brennstoffs beim Start des Heizkessels versendet wurden. In der Tabelle 8 sind die Fehlermeldungen aufgelistet, welche durch das VREM-System während des Betriebs ermittelt wurden.

Tabelle 8: Meldungen durch das VREM-System bei fehlerhafter Zündung.

Datum, Uhrzeit	Betriebsstunden	Meldung
28.11.2018, 13:04 Uhr	0,00	Anlage wurde gestartet.
28.11.2018, 13:24 Uhr	0,33	Die Abgastemperatur ist über eine lange Betriebszeit während der Startphase niedrig. Die Anzündung wurde nicht sachgemäß durchgeführt. Fehler im Anzündregime oder im Anzündsystem des Heizkessels.
28.11.2018, 14:02 Uhr	0,76	Die Startbetriebsphase ist beendet. Der Mittelwert der CO_e-Konzentrationen in der Startbetriebsphase liegt bei 2.232 mg/Vm³ und ist als sehr hoch zu bewerten.
28.11.2018, 14:08 Uhr	0,87	Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas.
28.11.2018, 14:34 Uhr	1,30	Der Grenzwert für die CO_e-Konzentrationen ist seit längerer Zeit überschritten.
28.11.2018, 16:31 Uhr	3,25	Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas, unsachgemäßer Verbrennungsverlauf.
28.11.2018, 17:08 Uhr	3,87	Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas, unsachgemäßer Verbrennungsverlauf.
28.11.2018, 18:25 Uhr	5,15	Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas, unsachgemäßer Verbrennungsverlauf.
28.11.2018, 18:38 Uhr	5,37	Der Grenzwert für die CO_e-Konzentrationen ist seit längerer Zeit überschritten, unsachgemäßer Betrieb.
28.11.2018, 19:06 Uhr	5,83	Der Grenzwert für die CO_e-Konzentrationen ist seit längerer Zeit überschritten, unsachgemäßer Betrieb.
28.11.2018, 20:10 Uhr	6,90	Im Ausbrand.
28.11.2018, 21:18 Uhr	8,00	CO_e-Konzentrationen im Ausbrand: 2.789 mg/Vm³.
28.11.2018, 20:10 Uhr	6,90	Durchschnittlicher Kesselwirkungsgrad von 78,8 %; CO_e-Mittelwert in der Regelbetriebsphase: 1.862 mg/Vm³, unsachgemäßer Betrieb. Brennstoffverlust beträgt 13 %.
28.11.2018, 21:18 Uhr	8,00	Im Standby.

Im Diagramm 35 ist deutlich zu sehen, dass am Ende der Verbrennung die Abgastemperaturen schnell absinken, wobei gleichzeitig der Sauerstoffgehalt im Abgas sowie das Kohlenstoffmonoxid bzw. der CO_e-Wert ansteigen. Dieser Trend wird durch die Algorithmen des VREM-Systems registriert und eine entsprechende Information darüber versendet, dass der Ausbrand erreicht wurde. Der Nutzer erhält anschließend Informationen über den durchschnittlichen Kesselwirkungsgrad und die CO_e-Konzentrationen während des Betriebs. Bei dem im Diagramm 35 dargestellten Betrieb beträgt der Kesselwirkungsgrad in der Regelbetriebsphase etwa 78,8 %, wobei der Mittelwert der CO_e-Konzentrationen bei 1.862 mg/Vm³ und somit deutlich über dem CO-Grenzwert (400 mg/Vm³) gemäß der 1. BImSchV liegt. Der Betrieb wird dementsprechend als qualitativ schlecht bewertet.

Eine Fehlbedienung kann sich nicht nur aus der Verwendung eines ungünstigen Verbrennungsregimes, sondern auch aus dem Einsatz ungünstiger Brennstoffe ergeben. In der Praxis werden häufig nicht nur hochqualitative, sondern unterschiedliche verfügbare Brennstoffe eingesetzt. Ein Beispiel für den Einsatz von minderwertigen Restbrennstoffen sind Althölzer, welche deutlich schlechtere verbrennungstechnische Eigenschaften aufweisen als die hochqualitativen Holzscheite, für die in der Regel Vergaserkessel ausgelegt und entsprechend geprüft bzw. zugelassen werden. Aus ökonomischen Gründen ist die Nutzung von Althölzern in Vergasertechnologien für viele Nutzer attraktiv. Gemäß der Verordnung über die Anforderungen an die thermische Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung – AltholzV) werden Althölzer in vier Kategorien eingeteilt:

- Kategorie A I: Naturbelassenes oder ausschließlich mechanisch bearbeitetes Altholz, welches nicht mit holzfremden Stoffen verunreinigt ist,
- Kategorie A II: Verleimtes, gestrichenes, lackiertes oder anderweitig behandeltes Altholz ohne halogenorganische Verbindungen in der Beschichtung, keine Verwendung von Holzschutzmitteln,
- Kategorie A III: Altholz mit halogenorganischen Verbindungen in der Beschichtung und ohne Holzschutzmitteln,
- Altholzkategorie A IV: Mit Holzschutzmitteln behandeltes Altholz (wie z. B. Bahnschwellen, Leitungsmasten usw.), welches aufgrund des hohen Schadstoffgehalts nicht zu den anderen Holzkategorien zugeordnet werden kann (ausgenommen PCB-Altholz).

Da es sich bei den Betreibern von häuslichen Vergasertechnologien meistens nicht um Fachpersonal handelt, wird die Qualität der eingesetzten Althölzer häufig nicht überprüft, wodurch zwangsweise hohe Konzentrationen an Schadstoffen bei der Verbrennung im Vergaserkessel entstehen.

Das Diagramm 36 zeigt einen typischen Betrieb des Vergaserkessels beim Einsatz von Althölzern der Kategorie A I bzw. A II. Dem Betreiber des Vergaserkessels war bewusst, dass andere Kategorien des Altholzes für den

Einsatz in häuslichen Heizkessel nicht geeignet bzw. eingesetzt werden dürfen. Dadurch sind nicht nur hohe Umweltbelastungen, sondern auch direkte Schäden an dem gesamten Verbrennungssystem zu erwarten. Althölzer der Kategorie A I bzw. A II weisen unterschiedliche Qualitäten auf, wodurch eine besonders gute Verbrennungstechnik erforderlich ist, um eine sachgemäße Verbrennung über die gesamte Bandbreite der verfügbaren Qualitäten zu erreichen. Die Qualität der verwendeten Althölzer beim Betrieb des Vergaserkessels war nicht bekannt. Der Betreiber hat von alten trockenen Holzstücken unterschiedlicher Größen und Formen berichtet, welche eine große Herausforderung für die Vergaserkessel darstellen.

Dem Diagramm 36 ist zu entnehmen, dass die Anfahrbetriebsphase deutlich über eine Stunde andauert, wobei die Abgas- und Kesseltemperaturen nur langsam ansteigen. Kohlenstoffmonoxid sowie die CO_e-Werte lagen über einen langen Zeitraum deutlich über dem CO-Grenzwert von 400 mg/Vm³ gemäß der 1. BImSchV. Auch in der darauffolgenden Regelbetriebsphase wurde der CO-Grenzwert über eine längere Betriebszeit überschritten. Diese häufige Überschreitung ist mit dem Sauerstoffmangel aufgrund der schwierigen Einstellung des Sekundärluftaktors durch die ungleichmäßige schlagartige Vergasung des trockenen Brennstoffs zu begründen. Bei diesem Brennstoff bzw. Vergasungsverhalten war die Verbrennungstechnik überfordert.

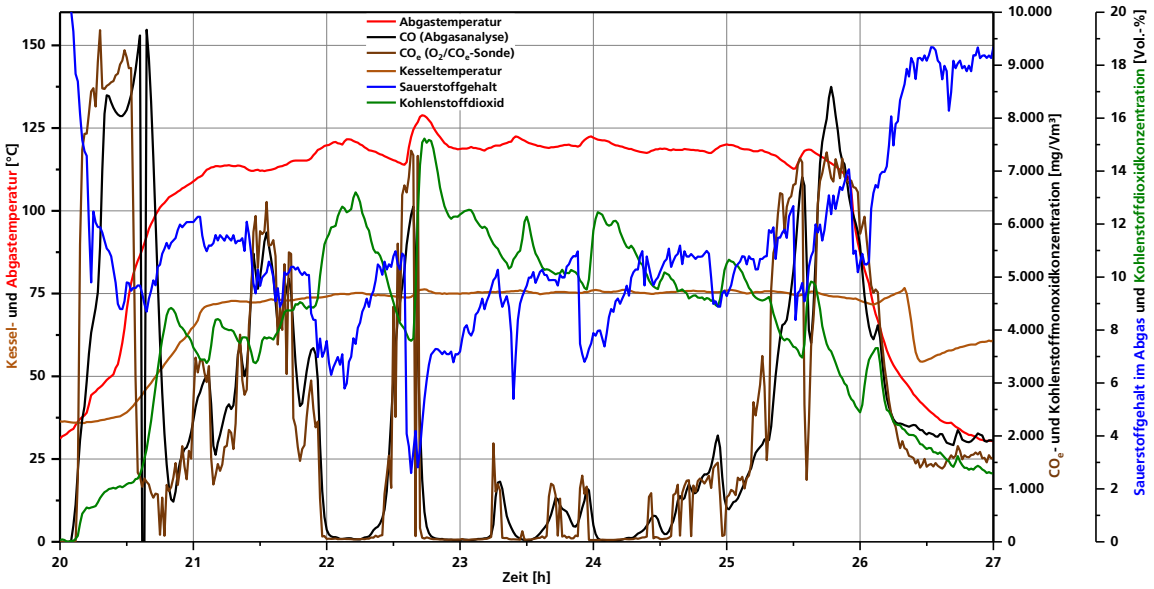

Diagramm 36: Beispiel für den Betrieb (Abbrandverhalten) des Vergaserkessels mit Altholz.

Das Verbrennungsverhalten in diesem Betrieb wurde durch das VREM-System erfolgreich analysiert und entsprechend bewertet. Eine ausführliche Analyse des gesamten Abbrands ist in der Tabelle 9 dargestellt. Am Ende des Abbrands erreicht der Heizkessel bei diesem Betrieb einen Kesselwirkungsgrad von 82 %, wobei das Kohlenstoffmonoxid bzw. der CO_e-Wert im Mittel mit 1.127 mg/Vm³ deutlich über dem Grenzwert gemäß

der 1. BImSchV lag und die Verbrennung im Vergaserkessel entsprechend negativ bewertet wird.

Tabelle 9: Meldungen durch das VREM-System bei der Verbrennung von Althölzern.

Datum, Uhrzeit	Betriebsstunde	Meldung
13.12.2018, 17:16 Uhr	20,00	Anlage wurde gestartet.
13.12.2018, 17:26 Uhr	20,10	Die Abgastemperatur ist über eine lange Betriebszeit während der Startphase niedrig. Die Anzündung wurde nicht sachgemäß durchgeführt. Fehler im Anzündregime oder im Anzündsystem des Heizkessels.
13.12.2018, 17:46 Uhr	20,50	Die Abgas- und Kesseltemperaturen haben in der Startphase eine geringe Steigung. Die Anzündung wurde nicht sachgemäß durchgeführt. Fehler im Anzündsystem des Vergaserkessels oder im Anzündregime. Prüfen Sie Ihren Brennstoff.
13.12.2018, 19:16 Uhr	22,00	Die Startbetriebsphase ist beendet. Der Mittelwert der CO_e-Konzentrationen in der Startbetriebsphase liegt bei 2.424 mg/Vm³ und sind als sehr hoch zu bewerten.
13.12.2018, 19:48 Uhr	22,53	Der Grenzwert für die CO_e-Konzentrationen ist seit längerer Zeit überschritten.
13.12.2018, 22:07 Uhr	24,85	Der Grenzwert für die CO_e-Konzentrationen ist seit längerer Zeit überschritten.
13.12.2018, 22:25 Uhr	25,15	Der Grenzwert für die CO_e-Konzentrationen ist seit längerer Zeit überschritten.
13.12.2018, 22:42 Uhr	25,43	Im Ausbrand.
13.12.2018, 22:42 Uhr	25,43	Kesselwirkungsgrad in der Regelbetriebsphase: 82 %; CO_e-Mittelwert in der Regelbetriebsphase: 1.127 mg/Vm³, unsachgemäße Verbrennung.
14.12.2018, 23:34 Uhr	26,31	Im Standby.

Bei der Erprobung des VREM-Systems in der Praxis beim Einsatz des Vergaserkessels wurde zusätzlich zur Funktionalität der Überwachungsalgorithmen eine große Übereinstimmung zwischen dem durch die Gasanalyse gemessenen Kohlenstoffmonoxid und den CO_e-Werten aus der O_2/CO_e-Sonde über die gesamte Überwachungszeit unabhängig von der Abbrandqualität festgestellt. Nach der Erprobung des VREM-Systems in dem Vergaserkessel wurde das System an einem automatisch beschickten Heizkessel der Firma HDG Bavaria GmbH angeschlossen und über 600 Betriebsstunden bzw. bis zum Ende der Heizperiode erfolgreich erprobt.

Zusätzlich zu dem E-Mailkonto (Abbildung 16) wurde eine Cloud-Anwendung für die Speicherung und Überwachung mit entsprechender

Visualisierung für die sich im Praxisbetrieb befindlichen und je nach Betriebsort zu überwachenden Heizkessel erstellt, wie in der Abbildung 15 ersichtlich ist. Durch diese Anwendung werden nicht nur die Betriebsdaten kontinuierlich erfasst und entsprechend gespeichert, sondern auch die Betriebsverläufe zu jedem Betriebspunkt abgebildet, wobei die relevanten Betriebsparameter dargestellt werden können. Außerdem können in dieser Cloud-Anwendung die Bewertung des Betriebs sowie der Verbrennungsqualität für jeden Betriebstag vorgenommen und entsprechend gezeigt werden.

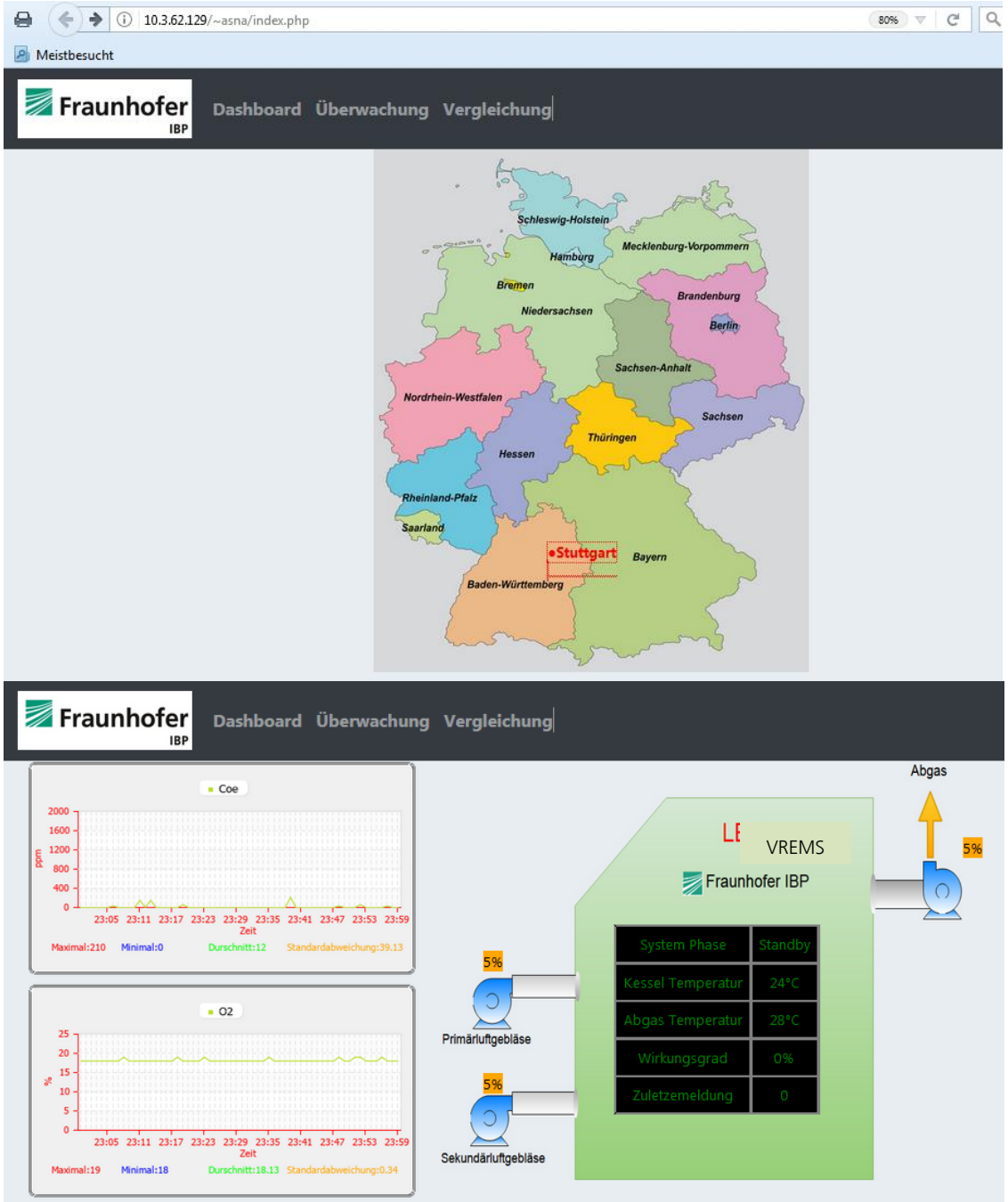

Abbildung 15: Visualisierung der Betriebsdaten aus der Cloud-Anwendung.

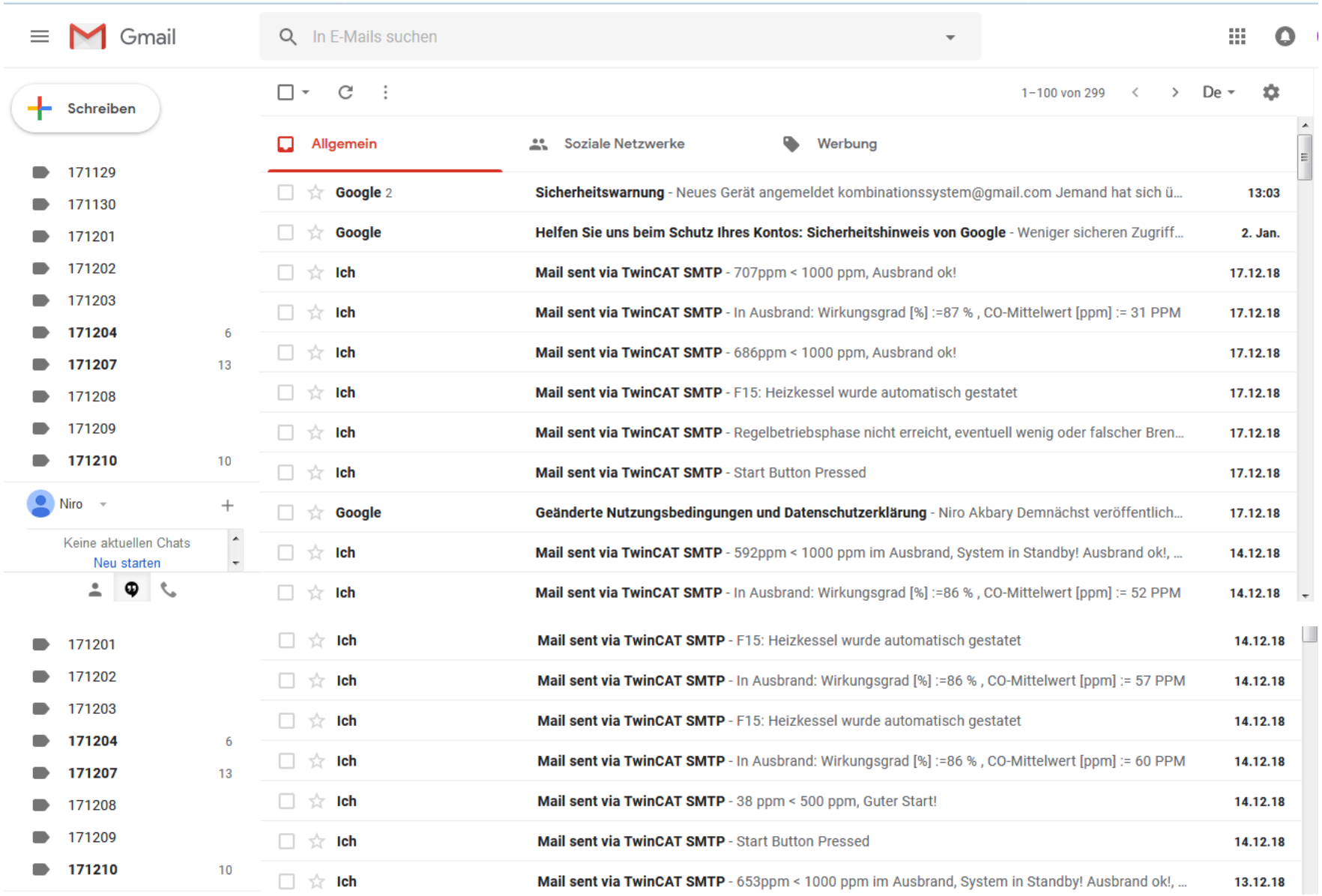

Abbildung 16: Screenshot von dem E-Mailkonto für die Betriebsmeldungen durch das VREM-System im Praxisbetrieb.

10.2 Dauererprobung in einem automatisch beschickten Heizkessel

In automatisch beschickten Biomasseheizkesseln wird der Brennstoff über Beschickungseinrichtungen (z. B. Schneckenförderer) in den Feuerraum der Verbrennungsanlagen zugeführt. Im privaten und gewerblichen Bereich werden sogenannte Unterschubfeuerungen oder Feuerungen mit seitlichem Einschub eingesetzt. Bei der Unterschubfeuerung wird der Brennstoff unterhalb der Brennkammer über die Beschickungseinrichtung nach oben in die Brennkammer zugeführt. Bei dem Konzept mit seitlichem Einschub erfolgt die Beschickung des Brennstoffs in die Brennkammer über eine seitliche Öffnung der Verbrennungsanlagen. In der Brennkammer kann die Verbrennung sowohl mit als auch ohne Rosttechnologien (beispielsweise Vorschubrost) erfolgen. In automatisch beschickten Biomasseheizkesseln werden Brennstoffe mit großer Oberfläche wie beispielsweise Hackschnitzel oder Pellets eingesetzt. Gemäß dem Stand der Technik werden keine automatisch beschickten Scheitholzvergaserkessel auf dem Markt angeboten. Im Gegensatz zu den handbeschickten Verbrennungssystemen erfolgt die Regelung der thermischen Leistung in automatisch beschickten Verbrennungssystemen nicht nur über die Einstellung der Primärluftmenge, sondern auch über die zugeführte Brennstoffmenge pro Zeitintervall. Die Brennstoffzufuhr wird nicht wie in vielen Fachliteraturen fälschlicherweise beschrieben kontinuierlich, sondern in bestimmten Zeitintervallen durchgeführt, welche in der Regel von den Herstellern je nach thermischer Leistung festgelegt sind. Da in den Feuerraum von automatisch beschickten Feuerungsanlagen jeweils nur geringe Mengen an Brennstoff beschickt werden, kann eine Modulation der thermischen Leistung in den automatisch beschickten Feuerungsanlagen leichter umgesetzt werden als bei den handbeschickten Feuerungsanlagen.

Nach der praktischen Erprobung des VREM-Systems in einem handbeschickten Biomasseheizkessel wurde die Überwachungstechnologie in einem automatisch beschickten Biomasseheizkessel mit einer thermischen Leistung von ca. 100 kW eingesetzt und über 600 Betriebsstunden erprobt (Abbildung 13). Dieser Biomasseheizkessel wird ganzjährig für die Bereitstellung von Wärme und Warmwasser in den Gebäuden eines mittelständischen Unternehmens in Bayern betrieben. Dabei wird Hackgut mit unterschiedlichen Qualitäten eingesetzt.

Im Diagramm 37 sind die bei der Überwachung im Praxisbetrieb erfassten Betriebsdaten dargestellt. Dabei sind Kohlenstoffmonoxid, CO_e-Wert, Sauerstoff, Abgas- und Kesseltemperatur über einen Zeitraum von 700 Stunden dargestellt. Die bei der Überwachung durch das VREM-System erfassten Meldungen sind in der Tabelle 10 chronologisch aufgelistet.

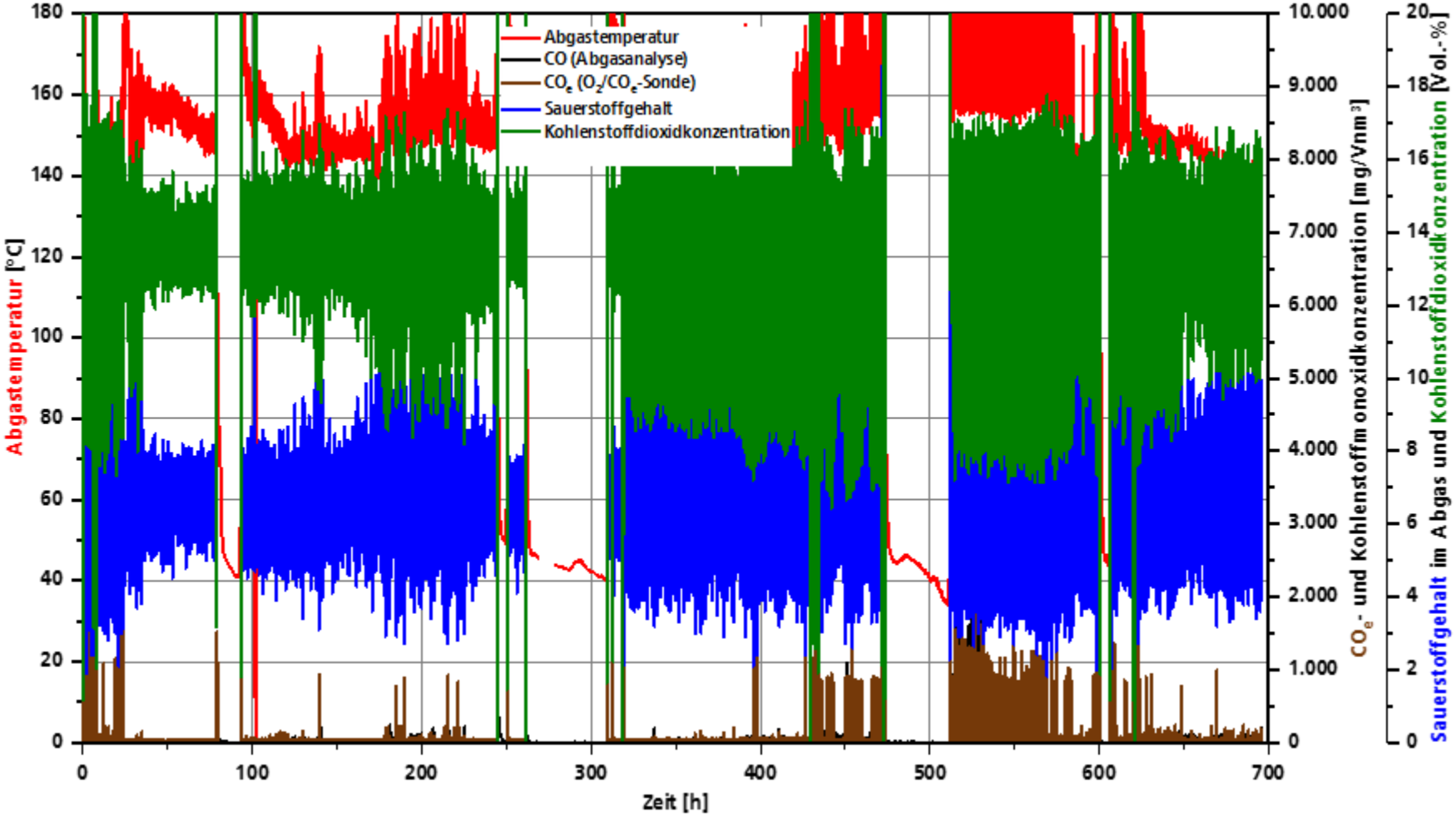

Diagramm 37: Sauerstoffgehalt im Abgas, Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid und CO_e sowie Kessel- und Abgastemperaturen beim Betrieb einer automatisch beschickten Hackschnitzelfeuerungsanlage in der Praxis mit unterschiedlicher Brennstoffqualität.

Tabelle 10: Meldungen durch das VREM-System bei automatischer Beschickung.

Datum, Uhrzeit	Betriebsstunde	Meldung
05.02.2018, 15:02	0,0	Der Biomasseheizkessel wurde gestartet.
01.02.2018, 15:11	6,2	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 194 mg/Vm³.
04.02.2018, 16:46	79,8	Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 616 mg/Vm³.
05.02.2018, 15:02	102,6	Der Abgastemperaturfühler ist defekt. Bitte prüfen Sie den Temperaturfühler.
11.02.2018, 14:22	244,8	Der Grenzwert für die CO_e-Konzentrationen ist seit längerer Zeit überschritten.
12.02.2018, 07:12	261,7	Der Grenzwert für die CO_e-Konzentrationen ist seit längerer Zeit überschritten.
19.02.2018, 07:22	429,9	Der Grenzwert für die CO_e-Konzentrationen ist seit längerer Zeit überschritten.
19.02.2018, 10:29	432,9	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 232 mg/Vm³.
19.02.2018, 13:40	436,1	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 167 mg/Vm³.
19.02.2018, 17:21	439,8	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 199 mg/Vm³.
19.02.2018, 20:13	442,7	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 121 mg/Vm³.
20.02.2018, 06:45	453,2	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 102 mg/Vm³
20.02.2018, 07:44	454,2	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 215 mg/Vm³.
20.02.2018, 09:46	456,3	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 81 mg/Vm³.
20.02.2018, 11:30	457,9	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 101 mg/Vm³.
20.02.2018, 21:26	467,7	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 150 mg/Vm³.
20.02.2018, 21:26	469,7	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 115 mg/Vm³
21.02.2018, 00:39	470,9	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 92 mg/Vm³.
21.02.2018, 00:39	470,9	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 92 mg/Vm³.
21.02.2018, 02:15	472,6	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen:

		267 mg/Vm³
22.02.2018, 20:46	515,0	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 224 mg/Vm³.
22.02.2018, 21:57	516,3	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 202 mg/Vm³.
22.02.2018, 22:42	517,0	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 230 mg/Vm³.
22.02.2018, 23:29	517,8	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 264 mg/Vm³.
23.02.2018, 00:41	518,9	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 174 mg/Vm³.
23.02.2018, 02:07	520,4	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 152 mg/Vm³.
23.02.2018, 03:54	522,2	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 163 mg/Vm³.
23.02.2018, 05:09	523,4	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 238 mg/Vm³.
23.02.2018, 06:09	524,5	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 204 mg/Vm³.
23.02.2018, 07:10	525,5	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 221 mg/Vm³.
23.02.2018, 08:08	526,5	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 320 mg/Vm³.
23.02.2018, 09:06	527,4	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 272 mg/Vm³.
23.02.2018, 10:08	528,4	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 278 mg/Vm³.
23.02.2018, 11:10	529,4	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 282 mg/Vm³.
23.02.2018, 12:13	530,5	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 283 mg/Vm³.
23.02.2018, 13:13	531,7	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 244 mg/Vm³.
23.02.2018, 15:11	533,5	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 95 mg/Vm³.
23.02.2018, 16:12	534,5	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 225 mg/Vm³.
23.02.2018, 20:02	538,3	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen

		im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 122 mg/Vm³.
23.02.2018, 21:32	539,8	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 106 mg/Vm³.
24.02.2018, 00:20	542,6	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 106 mg/Vm³.
24.02.2018, 06:51	548,1	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 95 mg/Vm³.
24.02.2018, 08:50	551,1	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 151 mg/Vm³.
24.02.2018, 11:49	554,0	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 179 mg/Vm³.
24.02.2018, 12:54	555,2	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 192 mg/Vm³.
24.02.2018, 15:48	558,1	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 125 mg/Vm³.
24.02.2018, 17:58	560,2	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 110 mg/Vm³.
24.02.2018, 19:38	561,9	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 152 mg/Vm³.
24.02.2018, 21:08	563,5	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 181 mg/Vm³.
24.02.2018, 23:01	565,2	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 181 mg/Vm³
24.02.2018, 23:01	567,2	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 120 mg/Vm³.
25.02.2018, 15:59	582,2	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 107 mg/Vm³.
25.02.2018, 10:18	600,6	leichte Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 164 mg/Vm³.
26.02.2018, 16:34	606,7	starke Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 724 mg/Vm³.
26.02.2018, 17:45	608,2	starke Fluktuationen der CO_e-Konzentrationen im Abgas. Mittelwert der CO_e-Konzentrationen: 724 mg/Vm³.

Um die Verläufe der erfassten Parameter (Kohlenstoffmonoxid, CO_e-Wert, Sauerstoffgehalt sowie die Abgas- und Kesseltemperaturen) während der Überwachung beschreiben zu können, wurden das Diagramm 38, das Diagramm 39 und das Diagramm 40 erstellt. Diese Diagramme stellen drei

Abschnitte der gesamten Überwachungszeit dar und beschreiben drei beispielhafte Betriebsphasen. Das Diagramm 38 zeigt eine Regelbetriebsphase mit einer optimalen Verbrennung, wobei das Kohlenstoffmonoxid im Durchschnitt unter 30 mg/Vm³ lag. Der Sauerstoffgehalt im Abgas stellte sich bei ca. 6,2 Vol.-% bei Abgastemperaturen von unter 160 °C ein, welches auf eine schadstoffarme und effiziente Verbrennungsphase hindeutet bzw. nur beim Einsatz entsprechend hochqualitativer Brennstoffe mit guter Verbrennungstechnik zu erreichen ist.

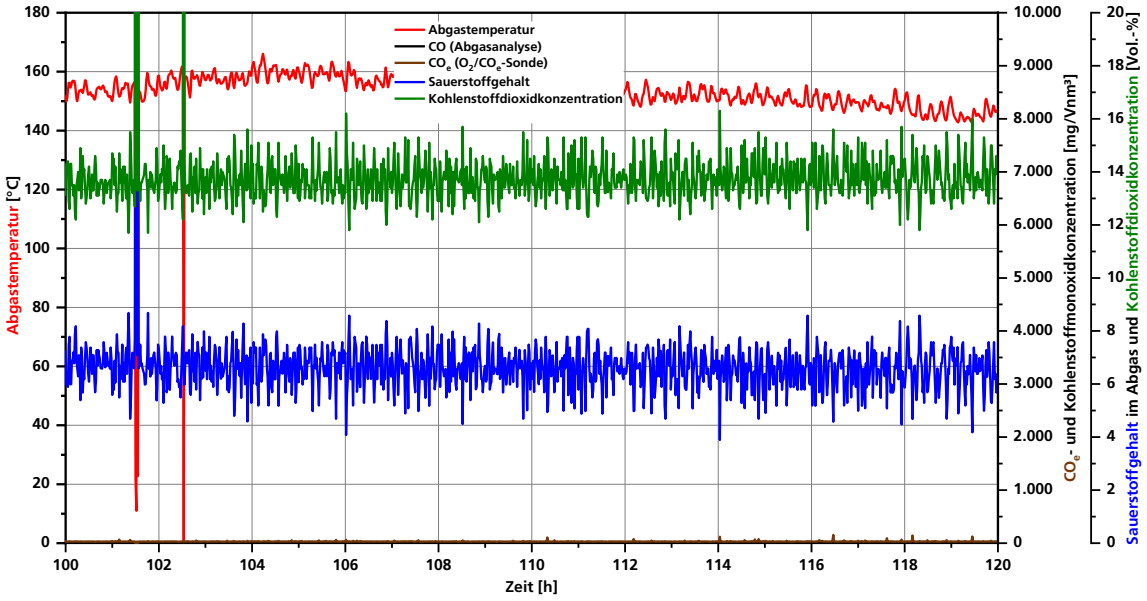

Diagramm 38: Verbrennungsverhalten im automatisch beschickten Heizkessel im Regelbetrieb bei der Erprobung des VREM-Systems in der Praxis.

Im Gegensatz zu dem Diagramm 38 zeigt das Diagramm 39 eine Betriebsphase, bei der sich der Heizkessel im Teillastbetrieb befindet bzw. zwischen Teillastbetrieb und Gluthaltung wechselt. Es ist deutlich zu sehen, dass in dieser Betriebsphase erhöhte Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid ohne Überschreitung des CO-Grenzwerts im Mittel auftreten. Außerdem ist zu erkennen, dass der Sauerstoffgehalt im Abgas deutlich höher ist als im Nennlastbetrieb, wodurch trotz niedriger Abgastemperaturen relativ hohe Abgaswärmeverluste entstehen können.

Die Änderung des Brennstoffs hat ebenfalls einen großen Einfluss auf das Verbrennungsverhalten, wie dem Diagramm 40 zu entnehmen ist. Obwohl die Verbrennung hierbei im Nennlastbetrieb stattgefunden hat, sind deutlich erhöhte Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid mit vielen Schwankungen zu erkennen.

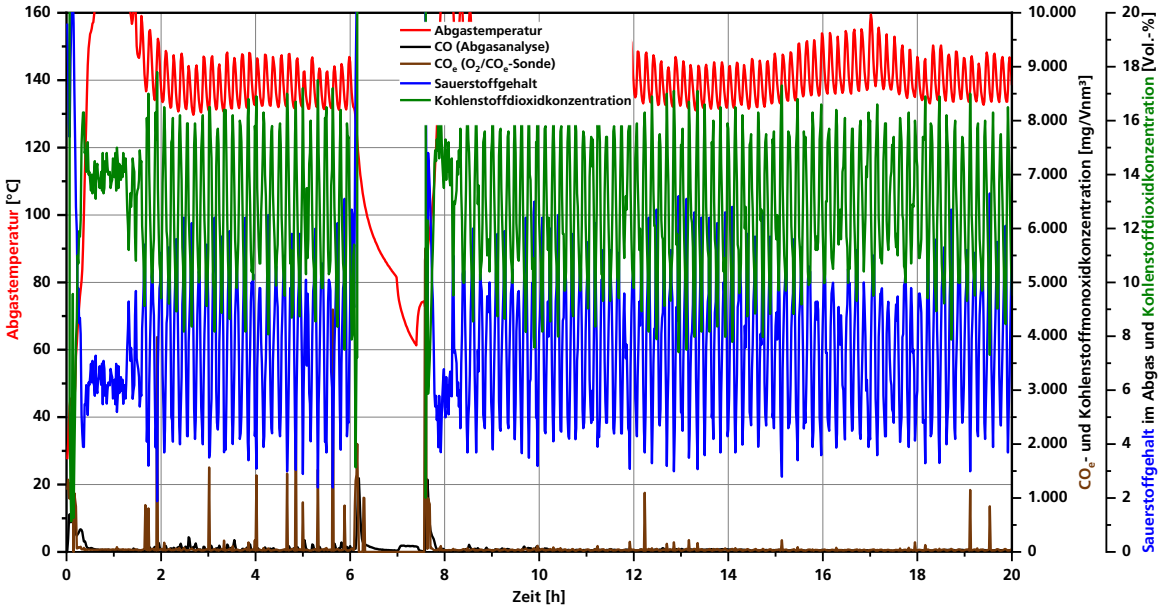

Diagramm 39: Verbrennungsverhalten im automatisch beschickten Heizkessel im Teillastbetrieb bei der Erprobung des VREM-Systems in der Praxis.

Nach etwa 420 Stunden wurde ein neuangelieferter Brennstoff verwendet. In dem Diagramm 40 ist dargestellt, dass die CO_e-Konzentrationen nach der Beschickung mit der neuen Brennstoffcharge stark schwanken bzw. zeitweise deutlich über 1.000 mg/m³ liegen. Die nicht sachgemäße Verbrennung lässt sich in diesem Fall eindeutig auf die Qualität des Brennstoffs zurückführen. Durch das VREM-System werden entsprechende Nachrichten über die Fluktuationen und die mittleren CO_e-Konzentrationen beim Auftreten der Fluktuationen mit entsprechender Bewertung versendet. Die Nachrichten sind in der Tabelle 10 aufgelistet.

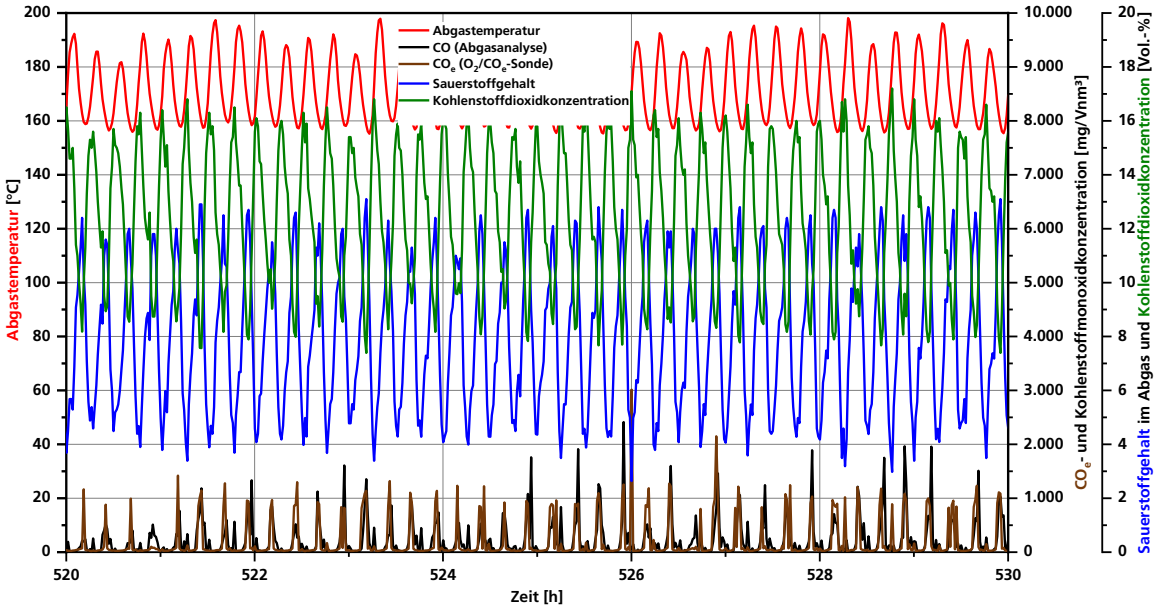

Diagramm 40: Verbrennungsverhalten in einem automatisch beschickten Heizkessel im Regelbetrieb nach der neuen Brennstofflieferung.

Bei der gesamten Überwachungszeit wurde eine starke Korrelation und Übereinstimmung des mit der Gasanalyse gemessenen Kohlenstoffmonoxids mit den CO_e-Werten der O_2/CO_e-Sonde festgestellt. Die CO_e-Werte lagen um ca. 5 % bis 10 % höher als die Werte des Kohlenstoffmonoxids. Dabei gilt, je vollständiger die Verbrennung stattfindet, desto näher liegen die CO- und die CO_e-Werte beieinander.

10.3 Ergebnisse zur Funktionalität der O_2/CO_e-Sonde im Dauerbetrieb

Nach den Entwicklungs- und Untersuchungsarbeiten auf dem Prüfstand wurde die gleiche O_2/CO_e-Sonde in zwei unterschiedliche Heizkessel eingesetzt und über eine Heizperiode erprobt, wie im Abschnitt 10.1 sowie im Abschnitt 10.2 ausführlich beschrieben wurde.

Das Diagramm 41 sowie das Diagramm 42 stellen den ersten und den letzten Betrieb des eingesetzten Heizkessels mit dem VREM-System bzw. mit der O_2/CO_e-Sonde dar, wobei die O_2/CO_e-Sonde zusätzlich zu der Einsatzzeit auf dem Prüfstand mehr als 1.200 Stunden im Praxisbetrieb eingesetzt wurde. In den beiden Diagrammen ist eine sehr gute Übereinstimmung sowie Korrelation zwischen den CO-Werten der Gasanalyse mit den CO_e-Werten der O_2/CO_e-Sonde zu erkennen. Die CO_e-Werte der O_2/CO_e-Sonde lagen meistens bis zu 10 % höher als die CO-Werte der Gasanalyse. Das ist damit zu begründen, dass durch die O_2/CO_e-Sonde nicht nur Kohlenstoffmonoxid, sondern auch andere brennbare Abgasbestandteile mit unterschiedlichen Sensitivitäten detektiert werden können. Es wurde außerdem in vielen Betriebsfällen beobachtet, dass je sachgemäßer bzw. vollständiger die Verbrennung stattfindet, umso geringer sind die Abweichungen zwischen den CO_e- und CO-Werten.

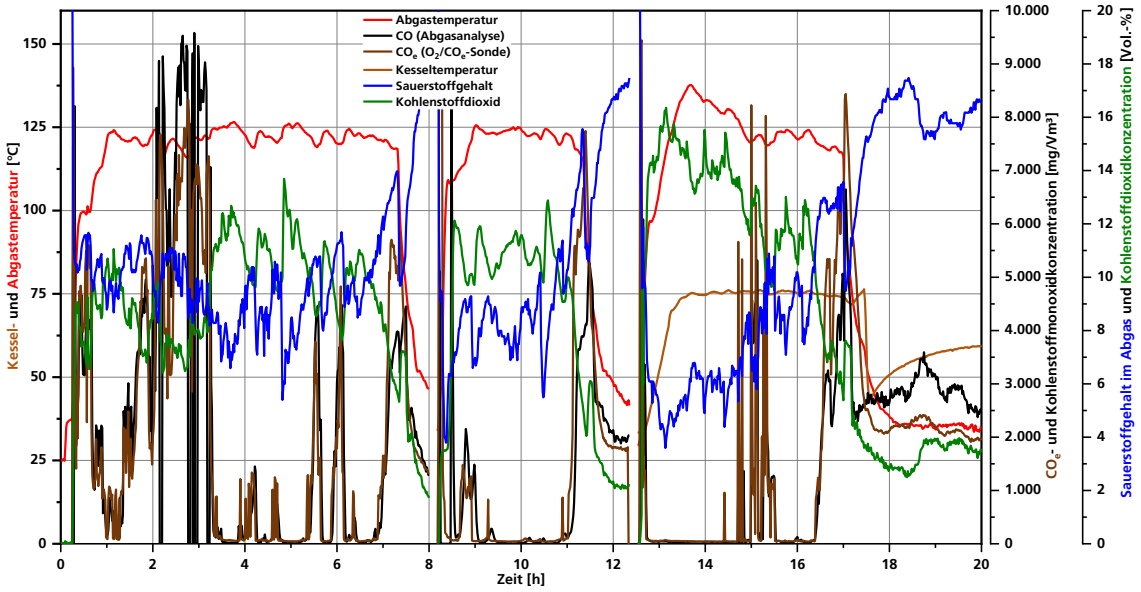

Diagramm 41: Erster Betriebstag des VREM-Systems in der Praxis beim Einsatz in einem Vergaserkessel.

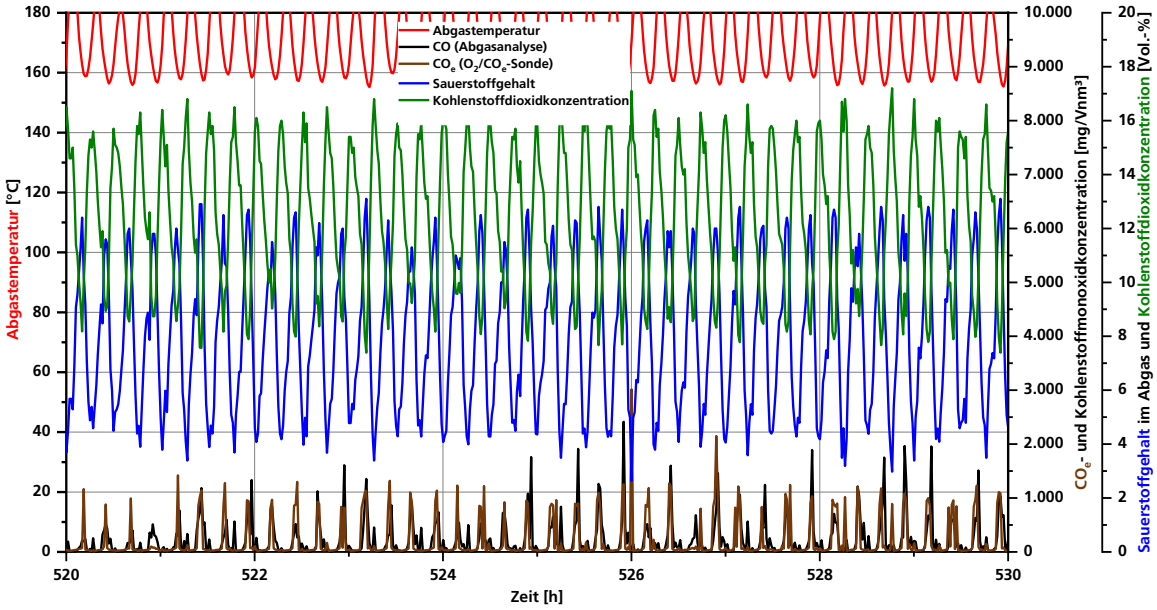

Diagramm 42: Der letzte Betrieb des VREM-Systems in der Praxis beim Einsatz in einem automatisch beschickten Heizkessel.

Im Rahmen des Projekts wurde die O_2/CO_e-Sonde über 2.700 Stunden bei der Verwendung unterschiedlicher Brennstoffe eingesetzt. Ein Nachlass bzw. eine Änderung in der Sensitivität wurde nicht festgestellt. Bisher befindet sich das VREM-System mit der gleichen O_2/CO_e-Sonde im Praxisbetrieb bzw. in einer realen Anwendung, wobei der Einfluss der Verbrennungsqualität auf das Abscheideverhalten bzw. –leistung eines Staubabscheiders der Firma Kutzner und Weber GmbH zwecks Optimierungsentwicklungen untersucht wird, wie im Abschnitt 10.4 ausführlich beschrieben ist.

10.4 Anwendungsbeispiel für das VREM-System in der Praxis

In diesem Abschnitt wird eine reale Anwendung des VREM-Systems in der Praxis dargestellt. In dieser Anwendung hat die Firma Kutzner und Weber GmbH das VREM-System in einem sich in der Praxis befindlichen Heizkessel mit einem nachgeschalteten Staubabscheider integriert (Abbildung 17), um den Einfluss der Verbrennungsqualität auf den Betrieb und das Abscheideverhalten von ihren Staubabscheidern zu untersuchen. Die Hauptfragestellung bei diesen Untersuchungen besteht darin, die Abhängigkeit zwischen der Verbrennungsqualität und der Entwicklung der Hochspannung sowie der Stromstärke während der unterschiedlichen Verbrennungsphasen, vor allem im Teillastbetrieb, zu untersuchen und entsprechende technische Maßnahmen für die Optimierung ihrer Staubabscheider herzuleiten. Außerdem war die Entwicklung einer Methode für die Überwachung der Funktionalität sowie der Betriebsstabilität im Fokus dieser Untersuchungen.

Das Diagramm 43 sowie das Diagramm 44 zeigt das Verbrennungsverhalten über mehrere Betriebstage. Dabei sind die Abgastemperatur, CO_e-Werte sowie der Sauerstoffgehalt dargestellt.

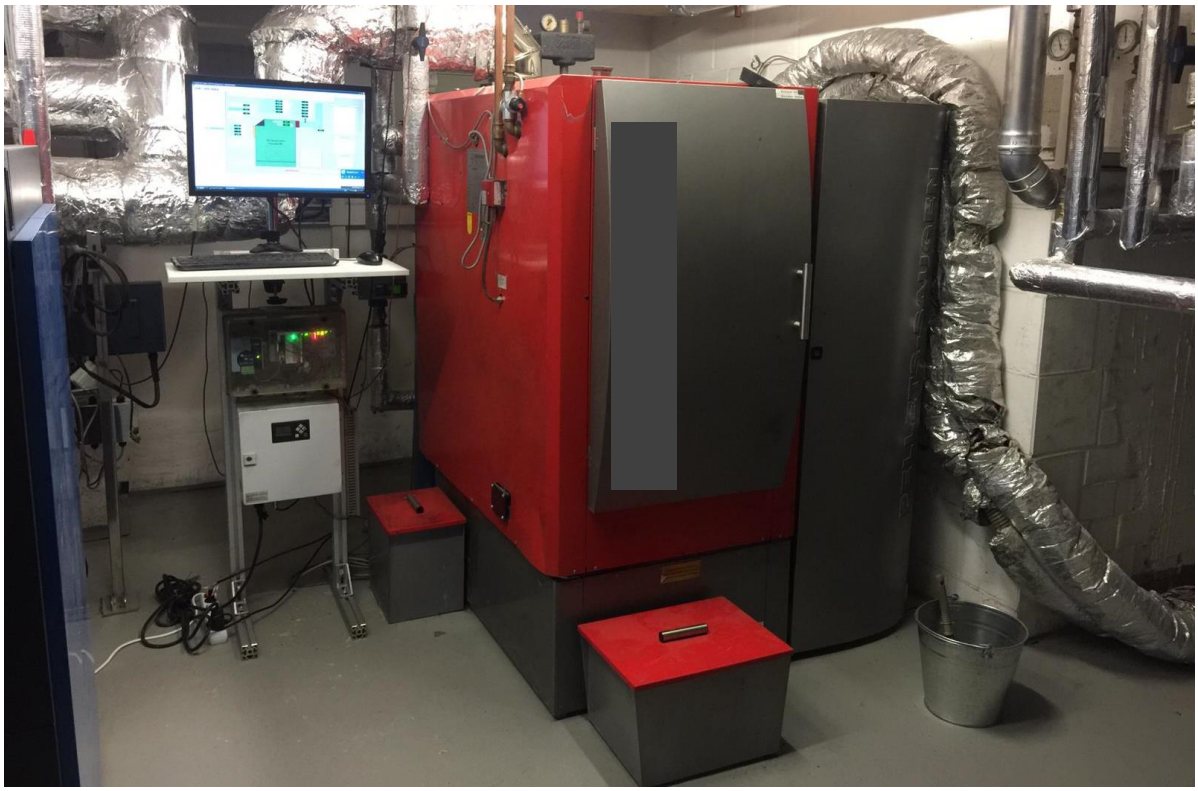

Abbildung 17: Anlagen zur Untersuchung des Einflusses der Verbrennungsqualität auf den Betrieb und die Abscheideleistung von Staubabscheidern in der Praxis.

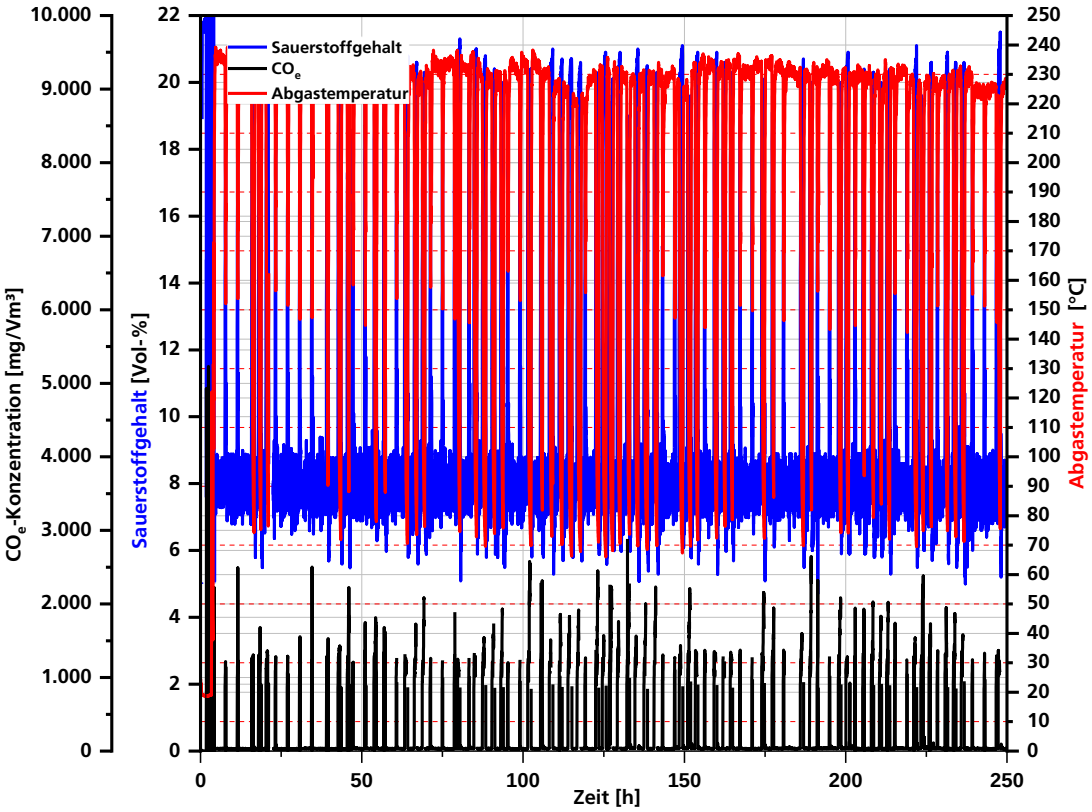

Diagramm 43: Verbrennungsverhalten bei einem automatisch beschickten Heizkessel in der Praxis.

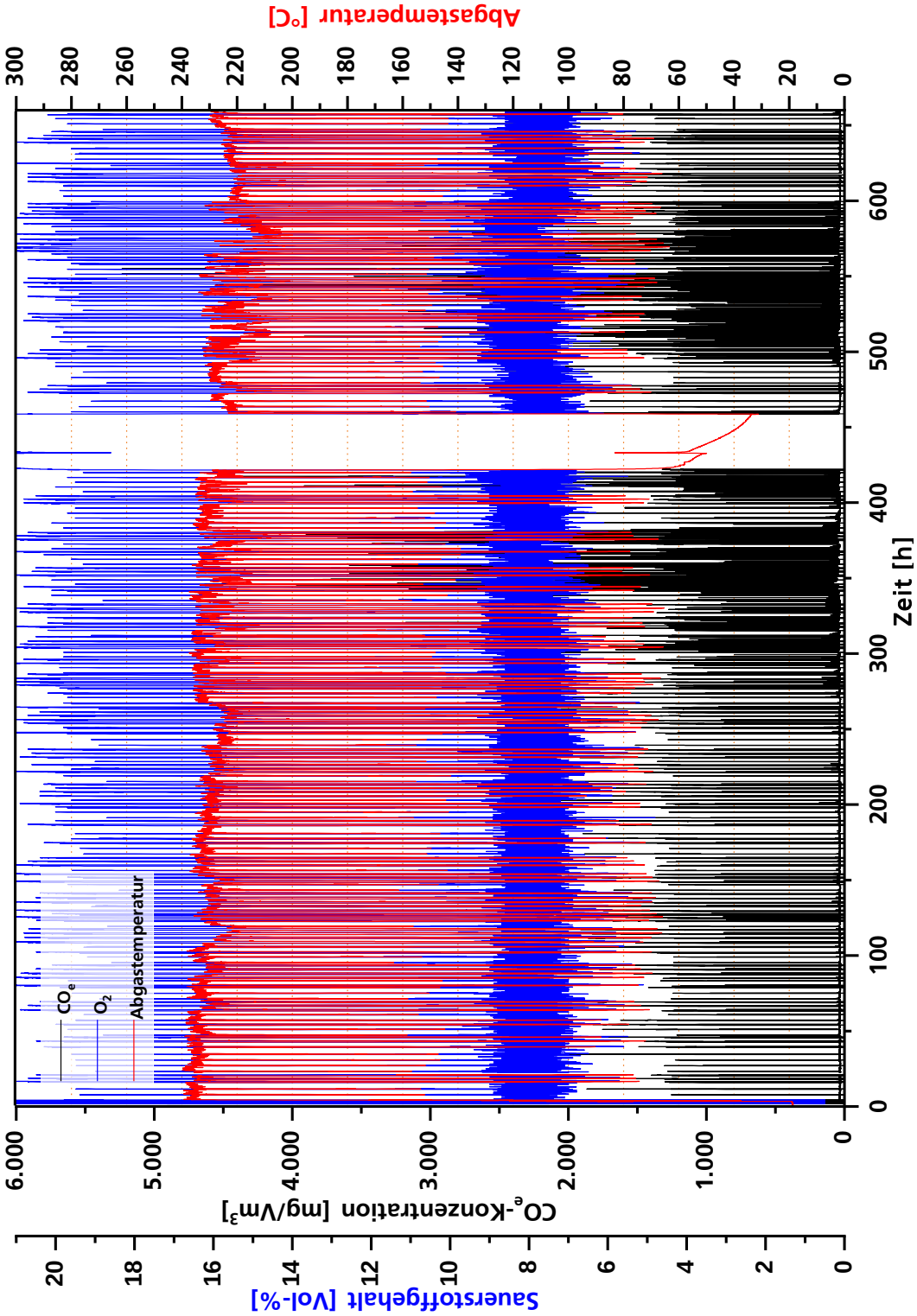

Diagramm 44: Verbrennungsverhalten über eine längere Betriebszeit bei einem automatisch beschickten Heizkessel in der Praxis, wobei zwischen den Betriebsstunden 300 h bis 600 h ein anderes Betriebsverhalten zu erkennen ist.

Aus einer verbrennungstechnischen Seite wurde bei diesen Praxisuntersuchungen festgestellt, dass sich der Heizkessel über 20 % der gesamten Betriebszeit im Gluthaltungsbetrieb mit erhöhten Emissionen an nicht verbrannten Bestandteilen und einer niedrigen Verbrennungseffizienz befindet. Außerdem wurde beobachtet, dass der Heizkessel nicht

modulationsfähig ist. Dabei wird der Verbrennungsprozess entweder im Nennlastbetrieb bei sehr hohen Abgastemperaturen (ca. 230 °C) betrieben oder komplett abgeschaltet. Dieses Verbrennungsverhalten stellt eine sehr große Herausforderung für jede nachgeschaltete Abgasbehandlungstechnologie in der Praxis dar.

Das VREM-System liefert bei dieser speziellen Anwendung reale Betriebsdaten aus Heizkesseln in der Praxis, welche für die Auslegung und Entwicklung von Staubabscheidern und sonstigen nachgeschalteten Systemen von großer Bedeutung sind.

11 Ökologische und ökonomische Bewertung des VREM-Systems

Bei dem VREM-System handelt es sich um eine neue Technologie für den Einsatz in Biomasseheizkesseln, wodurch die Verbrennung regelungstechnisch optimiert und permanent überwacht werden kann. Der regelungstechnische Vorteil des VREM-Systems beruht darauf, dass sich sowohl die Regelungs- als auch Überwachungsalgorithmen des VREM-Systems in die bestehenden Regler integrieren lassen, wodurch keine vollständige Neuentwicklung von Reglern notwendig ist. In diesem Abschnitt wird das VREM-System ganzheitlich bzw. aus ökologischer, ökonomischer sowie technischer und gesellschaftlicher Sicht bewertet.

Ökologische Bewertung

Die ökologischen Vorteile des VREM-Systems ergeben sich aus der Steigerung der Verbrennungseffizienz sowie aus der hohen Flexibilität zum Einsatz von unterschiedlichen Brennstoffen, insbesondere von biogenen und Restbrennstoffen, in gleichen Biomasseheizkesseln, ohne die Regelparameter des Verbrennungsprozesses anpassen zu müssen. Im Praxisbetrieb weisen Biomasseheizkessel einen deutlich geringeren Wirkungsgrad (ca. 78 %) auf als beim Betrieb auf dem Prüfstand. Das ist hauptsächlich auf die Qualitätsunterschiede der eingesetzten Brennstoffe, Bedienungsqualität der Verbrennungstechnik sowie auf die Dynamik der Wärmeproduktion sowie die Wärmenutzung zurückzuführen. Während die Verbrennungseffizienz durch den Einsatz des VREM-Systems bis zu 94 % im Dauerbetrieb gesteigert werden kann, lässt sich eine bedarfsgerechte Wärmeproduktion vor allem bei hoher Wärmenutzungsdynamik nicht erreichen und erfordert die Entwicklung entsprechender Systeme.

Um die ökologischen Vorteile des VREM-Systems quantitativ zu erklären wird die folgende Hochrechnung der Energie- und CO_2-Ersparnisse durchgeführt. Dabei wird angenommen, dass die mittlere thermische Leistung der in Deutschland eingesetzten Biomasseheizkessel etwa 35 kW bis 50 kW beträgt, wobei sie im Durchschnitt etwa 2.600 Stunden pro Jahr betrieben werden. In dem Diagramm 45 sind Szenarien für die CO_2-Einsparungen in Abhängigkeit von der thermischen Leistung im Praxisbetrieb von Biomasseheizkesseln bei unterschiedlichen mittleren Kesselwirkungsgraden (78 % + 5 %, 78 % + 10 %, 78 % + 15 %) dargestellt, welche mit dem VREM-System erreicht werden können. Mit

zunehmender thermischer Leistung steigen die CO_2-Einsparungen an, wobei bei einer Wirkungsgradsteigerung von 15 % sowie einer mittleren thermischen Leistung von 50 kW etwa 7,8 Millionen Tonnen CO_2 pro Jahr eingespart werden können. Diese Einsparungen an Kohlenstoffdioxid machen 5 % bis 7 % der gesamten CO_2-Emissionen aus, die im Haushaltsbereich in Deutschland anfallen bzw. ca. 113 Millionen Tonnen pro Jahr betragen [Statista 2018].

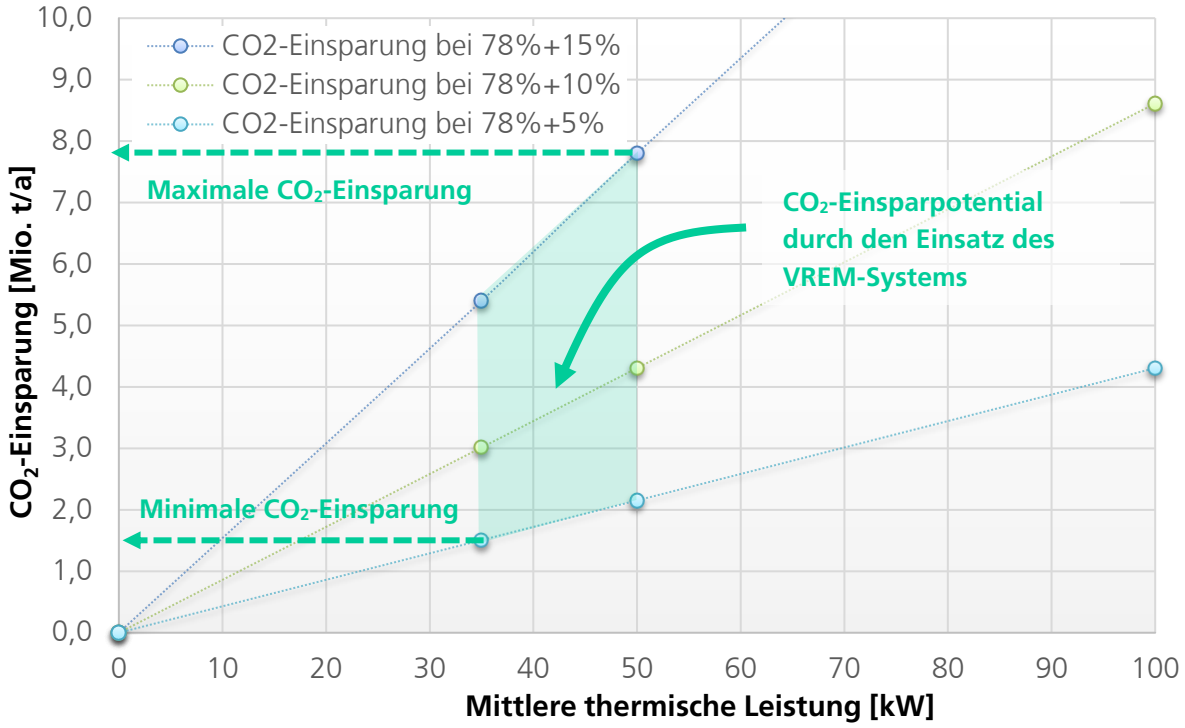

Diagramm 45: Szenarien für die Einsparungen an Kohlenstoffdioxid bei unterschiedlichen mittleren thermischen Leistungen durch eine breite Anwendung des VREM-Systems.

Eine weitere CO_2-Einsparung ergibt sich aus der Substitution von fossilen Energieträgern durch den Einsatz der Biomasse sowie sonstigen biogenen und Restbrennstoffen, welche jährlich etwa 29 Millionen Tonnen CO_2 beträgt. Bei der Berechnung wurde angenommen, dass etwa 92 g CO_2/MJ [BAFU 2015] bei der Verbrennung von Biomasse und ca. 73,7 g/MJ bei der Verbrennung von Heizöl entstehen.

Die thermische Nutzung von Biomasse steht in der Öffentlichkeit nicht nur durch die Entstehung von Schadstoffen bei nicht sachgemäßer Verbrennung, sondern auch durch die Flächenkonkurrenz in der Kritik. In Deutschland gibt es 11,4 Millionen Hektar Waldfläche [SDW 2018], wobei große Mengen an qualitativ hochwertigen Hölzern für die stoffliche und thermische Nutzung verwendet werden. Für einen nachhaltigen Ausbau der thermischen Nutzung von Biomasse sollte nicht nur auf die qualitativ hochwertigen Brennstoffe wie z. B. Buchenscheitholz, sondern auch auf biogene Brenn- und Reststoffe sowie effiziente Nutzpflanzen wie

beispielsweise Kurzumtriebsplantagen zurückgegriffen werden, welche in großen Mengen verfügbar sind und bisher nicht ausreichend für die Energiebereitstellung genutzt werden. Solche Brennstoffe lassen sich nur durch den Einsatz innovativer Verbrennungstechnologien wie z. B. dem VREM-System ökologisch und ökonomisch verwerten.

Ökonomische Bewertung

Bei der ökonomischen Bewertung sind betriebliche und volkswirtschaftliche Aspekte zu berücksichtigen. Betriebswirtschaftlich spielen die Kosten für Soft- sowie Hardware (O_2/CO_e-Sonde, Elektronik usw.) des VREM-Systems über den gesamten Lebenszyklus bzw. im gesamten Wirtschaftskreis (Hersteller, Dienstleister, Händler, Endverbraucher) eine entscheidende Rolle.

In der Tabelle 11 sind die spezifischen und Gesamtkosten (Euro/Stück) für das VREM-System je nach Anlagenzahl aufgelistet. Dabei sind die Kosten für die O_2/CO_e-Sonde im Vergleich zu der LS 2 Lambda-Sonde, für die Elektronik sowie die Lizenzgebühren für die Verwendung der Software einzeln dargestellt. Die Preise der O_2/CO_e-Sonde sind aus der Preisliste von der Firma LAMTEC GmbH & Co. KG entnommen. Die Preise für die O_2/CO_e-Sonden sollen bei einer zukünftig steigenden Nachfrage weiter sinken, wie es zu erwarten ist bzw. der Sales Manager der Firma LAMTEC GmbH & Co. KG berichtet hat. Zusätzlich zu den Kosten der O_2/CO_e-Sonde sind weitere Kosten für die Elektronik zu berechnen, welche aktuell vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP in Kooperation mit der Firma SABO Elektronik GmbH sowie der Firma LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co KG im Rahmen eines ZIM-Projekts entwickelt wird. Für die Nutzung der Software des VREM-Systems sind spezifische Kosten für die Lizenzeinnahmen zu kalkulieren.

Tabelle 11: Spezifische Kosten und Gesamtkosten (Euro/Stück) für das VREM-System.

Menge	pro Stück	50 Stück	100 Stück	500 Stück	1.000 Stück	2.000 Stück	5.000 Stück
	Spezifische und Gesamtkosten [€]						
Lambda-Sonde (LS 2)	160	143	133	118	101	97	90
O_2/CO_e-Sonde (KS1D)	168	156	147	128	114	112	107
Elektronik	150	150	150	125	85	75	50
Software	50	50	40	30	25	20	15
Gesamtkosten [€/Stück]	**368**	**356**	**337**	**283**	**224**	**207**	**172**

Wie der Tabelle 11 zu entnehmen ist, sind die Kosten beim Einsatz der O_2/CO_e-Sonde vergleichbar mit den Kosten beim Einsatz der herkömmlichen Lambda-Sonde. Dadurch werden die Gesamtkosten für den Regler des Heizkessels kaum erhöht. Das Gleiche soll für die Wartungs- bzw. Betriebskosten gelten. Der einzige Unterschied ergibt sich daraus, dass beim Einsatz der Lambda-Sonde nur bedingt Kostenersparnisse erzielt werden können. Beim Einsatz des VREM-Systems ist je nach thermischer Leistung

des Heizkessels und dem eingesetzten Brennstoff mit einer jährlichen spezifischen Kosteneinsparung zwischen 3,25 € bis 10,30 € pro Kilowatt Anlagenleistung zu rechnen. Das heißt bei einem Heizkessel mit einer thermischen Leistung von 50 kW sind Brennstoffkosten zwischen 160 € und 515 € im Jahr einzusparen. Im Diagramm 46 sind die jährlichen Kosteneinsparungen pro Anlage durch die Nutzung des VREM-Systems im Heizkessel in Abhängigkeit von der thermischen Leistung für drei Szenarien der Effizienzsteigerung dargestellt. Im Gegensatz zur Regelung mit der Lambda-Sonde lässt sich die Regelung des Heizkessels im Durchschnitt nach weniger als drei Jahren amortisieren.

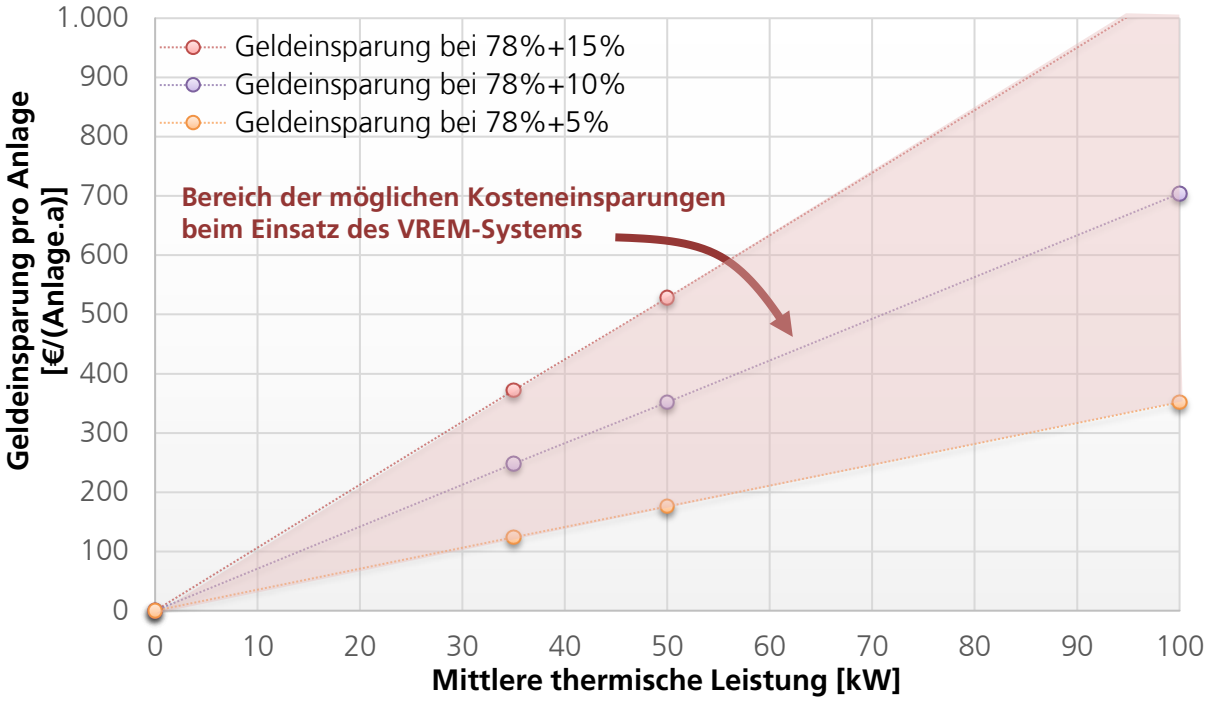

Diagramm 46: Szenarien für die finanziellen Einsparungen für den Nutzer bei unterschiedlichen Leistungsstufen durch die Anwendung des VREM-Systems.

Aus einer volkswirtschaftlichen Sicht haben innovative Technologien im Allgemeinen einen positiven Effekt auf die Stärkung des Arbeitsmarkts sowie des Exports innerhalb und außerhalb von Europa. Bei dem VREM-System handelt es sich um eine neuartige Technologie, die einen großen Beitrag zum Erreichen der politischen Klimaschutzziele (CO_2-Senkung), zur Minderung von Schadstoffemissionen in Wohngebieten und zur Senkung der Energiekosten leistet. Diese besonderen Vorteile führen zur Steigerung des Interesses an dem VREM-System sowohl bei den Herstellern als auch bei den Endverbrauchern sowie bei allen Ländern, bei denen die Biomasse als wichtiger Energieträger gilt. Im Hinblick auf die zukünftigen europäisch gültigen Anforderungen an die Effizienz und die Emissionen bei der Verbrennung in Biomasseheizkesseln ist die Entwicklung von neuen effizienteren und schadstoffarmen Technologien nicht nur in Deutschland, sondern auch international von großer Bedeutung.

12 Umsetzbarkeit des VREM-Systems in der Praxis

Bei der Umsetzung des VREM-Systems ist zwischen der Regelungs-, Betriebsbewertung- und Emissionsüberwachungsfunktion in Analogie zu großen Verbrennungsanlagen zu unterscheiden.

Durch die Regelung mit dem VREM-System bzw. mit der O_2/CO_e-Sonde werden nicht nur die Schadstoffemissionen im Praxisbetrieb massiv reduziert, sondern auch die Verbrennungseffizienz sowie der Wirkungsgrad des Heizkessels unabhängig von dem eingesetzten Brennstoff merklich erhöht. Die Umsetzung der Regelungsfunktion ist technisch möglich sowie für die Anlagenhersteller und Kunden vorteilhaft, da es zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des gesamten Wärmesystems führt. Aus einer ökologischen Sicht lässt sich durch dieses System aufgrund der Effizienzerhöhung und Emissionsminderung ein großer Beitrag zum Klima- und Umweltschutz leisten. Die permanente Bewertung des Betriebs bzw. das Prozess-Monitoring kann von den Anlagenherstellern als zusätzliche Dienstleistung für die Kunden zwecks Fernbeobachtung der technischen Funktionalität des Heizkessels bzw. der Verbrennung in der Praxis angeboten werden. In diesem Fall können beispielsweise die Betriebsstörungen automatisch bei den Anlagenherstellern oder bei ihren zuständigen Dienstleistern über ein spezielles Portal gemeldet und entsprechend zwecks einer zügigen Problembehebung überprüft werden. Diese Option ist für die Anlagenhersteller, vor allem in der Gewährleistungszeit des Produkts wichtig, da besonders kostengünstige Dienstleistungen beim Auftreten von technischen Fehlern oder Betriebsstörungen realisiert werden können. Die permanente Überwachung der Emissionen in Analogie zu großen Verbrennungsanlagen ist Dank der innovativen O_2/CO_e-Sonde sowohl technisch als auch wirtschaftlich realisierbar. Die Umsetzung in der Praxis hängt hierbei von der Gesetzgebung ab. Solange es keine gesetzlichen Regelungen zur permanenten Überwachung von Kleinfeuerungsanlagen gibt, können solche Systeme nur hinsichtlich der Verbesserung der Dienstleistung auf Hersteller- und Kundenwunsch ausgeführt werden. Bezüglich des technischen Entwicklungsstands von Kleinfeuerungsanlagen lässt sich die permanente Überwachung sehr gut in alle automatisch geregelten und betriebenen Feuerungsanlagen bzw. Heizkessel integrieren.

Die Kombination der emissionstechnischen Überwachung mit der Optimierung der Verbrennung von Biomasseheizkesseln soll als präventive Maßnahme weiter zunehmend an Bedeutung gewinnen, da hier durch eine angemessenere Bewertung/Kontrolle im Vergleich zum heutigen Stand der Technik bzw. zur heutigen Kontrolle gemäß der 1. BImSchV erreicht werden kann. Anhand dieser Kombination sind folgende Ziele zu erreichen:

- Stabiler, emissionsarmer und zuverlässiger Betrieb durch die Regelung mit einer Größe (CO_e-Signal), welche direkte Aufschlüsse über die Qualität der Verbrennung gibt,

- umweltfreundlicher / -bewusster Betrieb von Kleinfeuerungsanlagen durch die Entwicklung des technischen Bewusstseins beim Betreiber bzw. beim Nutzer,
- umweltbewusster Betrieb führt zur effizienten und umweltverträglichen Energiebereitstellung bei der thermischen Umsetzung von Biomasse. Das hat die Reduzierung des Brennstoffverbrauchs und somit des spezifischen CO_2-Ausstoßes zur Folge,
- Vermeidung von Fehlbedienung sowie des Einsatzes ungünstiger Brennstoffe (wie z. B. feuchtes Holz, Abfälle usw.) in der Praxis,
- Minderung der Schadstoffemissionen in Wohngebieten durch präventive Maßnahmen,
- Minderung der Treibhausgase wie z. B. CH_4, die bei unvollständiger Verbrennung, beim Einsatz ungünstiger Brennstoffe oder im Falle von Fehlbedienung durch den Betreiber entstehen,
- konsequente Überwachung und sachgemäße Bewertung von Kleinfeuerungsanlagen.

Die kontinuierliche Überwachung des Betriebs bzw. der Emissionen durch das VREM-System soll nicht nur die Arbeiten der Schornsteinfeger mit ihren wiederkehrenden Messungen sinnvoll ergänzen, sondern sie auch technisch intensiver in den gesamten Betriebs- und Monitoringprozess von Heizkesseln integrieren. Der Schornsteinfeger stellt in diesem Zusammenhang ein wichtiges Organ für die Überprüfung der technischen Funktionalität des gesamten Verbrennungssystems dar und bleibt wie bisher die einzige berechtigte Stelle für die Bewertung der Heizkessel in der Praxis. Der einzige Unterschied ergibt sich daraus, dass er seine Beurteilung bzw. Entscheidung auf den Betrieb des Heizkessels auf Basis ausführlicher betrieblicher Messdaten aufbaut, wodurch eine sachliche Bewertung bzw. Kontrolle erzielt werden kann.

Zusammenfassend: Durch die Entwicklung bzw. Umsetzung eines solchen intelligenten VREM-Systems kann im Speziellen mit Hilfe der Emissionsüberwachung ein hohes Umweltschutzniveau gewährleistet werden. Die Vorteile dieses Systems ergeben sich nicht nur für die Kontrolleure, sondern auch für die Betreiber und Anlagenhersteller. Ein solches System existiert bisher nicht und kann erstmals konkrete Daten über das Betriebsverhalten von Heizkesseln in der Praxis und eine deutlich aussagekräftigere Abschätzung des tatsächlichen Schadstoffpotentials dieser Verbrennungsanlagen erheben. Da es sich bei der permanenten Überwachung nicht um eine stichprobenartige Messung - wie bei der Überwachung durch den Schornsteinfeger - sondern um eine permanente Ermittlung der Verbrennungsqualität über den gesamten Betrieb handelt, kann eine im Vergleich zur heutigen Kontrolle gemäß der 1. BImSchV angemessene, konsequente Überwachung und somit eine realistische Bewertung von Heizkesseln erreicht werden.

13 Verwertung der Forschungsergebnisse

Für eine erfolgreiche Verwertung der erreichten Forschungsergebnisse sind noch Herausforderungen zu bewältigen, die hier aus einer wissenschaftlichen, technischen, wirtschaftlichen und markttechnischen Sicht dargelegt werden.

13.1 Wissenschaftliche und technische Herausforderungen

Im Rahmen dieses vorliegenden Projekts wurden sehr positive und erfolgsversprechende Ergebnisse sowohl hinsichtlich der Regelung als auch der permanenten Überwachung der Verbrennungsqualität in Biomasseheizkesseln mit der O_2/CO_e-Sonde (KS1D) der Firma LAMTEC GmbH & Co. KG erreicht, welche eine hohe Stabilität bei der Verbrennung unterschiedlicher Brennstoffe über ca. zwei Jahre bzw. über die Projektdauer aufgewiesen hat. Mit dem entwickelten VREM-System und dank der ausgesuchten Regelphilosophie kann sowohl eine effiziente saubere Verbrennung als auch ein sicherer Betrieb gewährleistet werden. Im Rahmen der Entwicklung wurde eine Software auf Basis einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) geschrieben und erfolgreich für die Regelung und Überwachung von Verbrennungsprozessen in Biomasseheizkesseln getestet. Mit der entwickelten Software wurden zwei handbeschickte Vergaserkessel mit seitlichem und unterem Abbrandprinzip geregelt. Die Entwicklung der Regelung auf Basis des VREM-Systems für automatisch beschickte Heizkessel (Hackschnitzelkessel, Pelletkessel usw.) war kein Gegenstand des Projekts und steht noch aus. Die Überwachung des Verbrennungsprozesses wurde unabhängig von der Art und vom Verbrennungskonzept des Heizkessels entwickelt und im Praxisbetrieb bei automatischen und handbeschickten Heizkesseln (Vergaserkessel und Hackschnitzelkessel) erfolgreich erprobt. Für eine optimale Bewertung des Betriebes und Erkennung der Fehlbedienungsursachen ist es erforderlich, die Regelglieder der Heizkessel für die Bewertung heranzuziehen, die mit ihrer Einstellung und ihrem Einstellverhalten direkte Aufschlüsse über den Verlauf des Verbrennungsprozesses sowie über die Verbrennungsqualität liefern können. Außerdem sollte die Analyse und Parametrierung der regelungstechnischen Einstellungen der Regelglieder mit einer entsprechenden Anwendung in der Regelung zu einer früheren Fehlererkennung und folglich Vermeidung von ungünstigen Betriebszuständen in der Praxis führen.

Für die Umsetzung und die Verwertung der Projektergebnisse ist eine Dauererprobung der O_2/CO_e-Sonde zwecks der Sicherstellung der technischen Stabilität sowie der Funktionalität über eine längere Betriebszeit (länger als drei Jahre) von großer Bedeutung. Ein Prototyp des VREM-Systems befindet sich noch in der Dauererprobung bei der Firma HDG Bavaria GmbH. Dabei wurde ein kombinierter Pellet-Hackschnitzelheizkessel mit einer thermischen Leistung von 200 kW_{th} eingesetzt. Diese Dauererprobung in der Praxis wird außerhalb der Projektplanung von der Firma HDG Bavaria GmbH aufgrund ihres großen Interesses an der Verwertung der Projektergebnisse initiiert. Außerdem ist für eine

erfolgreiche Umsetzung der Projektergebnisse eine entsprechende Elektronik für eine einfache und kostengünstige Integration der O_2/CO_e-Sonde in die bestehenden Regelplatinen der Heizkessel notwendig und zu entwickeln. Die originale Elektronik der O_2/CO_e-Sonde der Firma LAMTEC GmbH & Co. KG ist für große Gas- und Ölfeuerungen konzeptioniert und entsprechend zugelassen. Bei solchen großen Feuerungsanlagen sollen scharfe betriebliche Sicherheitsanforderungen eingehalten werden, welche für den Betrieb von Biomasseheizkesseln nicht relevant sind und zu einer exorbitant aufwendigen und folglich teuren Elektronik führen. Sollte eine entsprechende für den Einsatz in Biomasseheizkesseln angepasste Elektronik entwickelt werden, werden die Kosten für den Einsatz der O_2/CO_e-Sonde in der Größenordnung wie bei den heutigen Lambdasonden in Biomasseheizkesseln sein. Das Fachgebiet Verbrennungs- und Umweltschutztechnik des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP arbeitet seit November 2017 im Rahmen eines ZIM-Projekts (FKZ: ZF4109003CL7 und ZF4478501CL7) mit der Firma Sabo Elektronik GmbH sowie mit der Firma LAMTEC GmbH & Co. KG an der Entwicklung einer kompakten und kostengünstigen Elektronik für die O_2/CO_e-Sonde (Typ KS1D) zusammen. Der Hauptinitiator und Anlass dieses ZIM-Projekts ist, das VREM-System an interessierte Unternehmen bzw. Kesselhersteller sicher und schnell zu vermarkten.

Die Lambda-Sonde kalibriert und überprüft sich selbst auf ihre Funktionalität im Praxisbetrieb und setzt dafür die Umgebungsluft mit einem Sauerstoffgehalt von 21 Vol.-% als Prüfmittel bzw. Kalibriermittel ein. Aufgrund der einfachen mathematischen Abhängigkeitslinearität des Spannungssignals/Sauerstoffgehalt bzw. der Sauerstoffkalibrierkurve, welche sich mit zwei Kalibrierpunkten (0 Vol.-% und 21 Vol.-%) beschreiben lässt, klappt das Wiederkalibrieren mit der Lambda-Sonde in der Praxis reibungslos. Diese Art dieser Wiederkalibrierung klappt bei der O_2/CO_e-Sonde nur beim Sauerstoff in Analogie zur herkömmlichen Lambda-Sonde. Die Wiederkalibrierung der O_2/CO_e-Sonde bezüglich des Kohlenmonoxid-Äquivalentes (CO_e) in Analogie zum Sauerstoff ist aufgrund der komplexen mathematischen Funktionen der Kalibrierkurve (Kalibrierebenen) sehr schwierig und in der Praxis aufwendig durchzuführen. Hier werden mehrere Kalibrierpunkte bzw. mehrere Kalibriergase benötigt, um verwendbare Kalibrierergebnisse zu erzielen. Für solche Kalibrierungen sind nicht nur entsprechende technische Equipments, sondern auch eine gute Kompetenz notwendig. Aus der oben dargelegten Situation ist zu empfehlen, eine einfache Einrichtung (Mehrkammerprüfgaspatrone mit einer intuitiven Bedienung) für die Überprüfung der Funktionalität der O_2/CO_e-Sonde in der Praxis zu entwickeln, welche automatisch oder direkt vom Betreiber oder vom Schornsteinfeger erfolgen kann. Sollte die Funktionalität der O_2/CO_e-Sonde bei der Überprüfung nicht bestätigt werden, kann die Sonde für den Austausch, für die Wiederkalibrierung oder Regenerierung zurück zum Hersteller gesendet werden. Im Rahmen dieses Projekts wurden mehrere Sonden (Typ: KS1D) der Firma LAMTEC GmbH & Co. KG eingesetzt. Diese haben eine sehr gute Stabilität und über die Projektdauer von ca. zwei Jahren bei der Verbrennung unterschiedlicher Hölzer und biogener

Brennstoffe aufgewiesen. Im Normalfall und gemäß den Angaben der Firma LAMTEC GmbH & Co. KG kann dieser Sondentyp (KS1D) über mindestens fünf Jahre eine hohe Stabilität bzw. Signalqualität zeigen.

Ein großer Vorteil des VREM-Systems besteht in der technischen Möglichkeit für die Nachrüstung in allen bestehenden Biomasseheizkesseln, die mit der Lambda-Sonde geregelt werden. Die Software des VREM-Systems ist so universell und sicher geschrieben, dass die Heizkessel auch beim Ausfall des CO_e-Signals ohne jegliche Gefahr weiterbetrieben werden können. Für die Nachrüstung sollen die Hersteller eine entsprechende Risikoanalyse für jeden Heizkessel-Typ durchführen. Eine regelungstechnische Änderung in Heizkesseln ohne entsprechende Risikoanalyse ist nicht erlaubt.

13.2 Wirtschaftliche und markttechnische Herausforderungen

Die meisten Biomassekesselhersteller gehören zu den klein- und mittelständischen Unternehmen (KMUs), die hauptsächlich (mehr als 89 % des gesamten Umsatzes) Heizkessel als einziges Produkt herstellen und zusätzlich dazu Handelsprodukte wie z. B. Pufferspeicher mit vermarkten. Aufgrund der einfachen Struktur und kleinen Firmengröße hängt ihre finanzielle Situation stark von der Entwicklung und der Fluktuation des Energiemarkts in Deutschland sowie in Europa ab. Beispielsweise haben die schlagartig (mehr als 30 %) gesunkenen Heizölpreise seit dem Jahr 2014 trotz staatlicher BAFA-Förderung (BAFA: Das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle) zu einer sinkenden Nachfrage an Biomassefeuerungen geführt. Einen großen Einfluss auf den Markt der Biomassefeuerungsanlagen haben außerdem die verschärften bzw. die neuen Emissionsvorschriften gemäß der 1. BImSchV bzw. der Ökodesign-Richtlinie sowie die schweren pauschalisierten Vorwürfe an Biomassefeuerungen im Allgemeinen für die Verschlechterung der Luftqualität durch den Feinstaub verantwortlich zu sein. Diese haben in der letzten Zeit zu drastischen Maßnahmen wie z. B. Feuerungsverboten geführt, welche von manchen Gemeinden in Deutschland ergriffen wurden bzw. werden und eine große Unsicherheit bei den Kunden hinsichtlich der künftigen Investitionen in Biomasseheizkessel zur Folge haben. Ähnliche nicht vernachlässigbare Einflussfaktoren stellen die Änderung der Biomasseförderungen in manchen europäischen Ländern wie z. B. in England sowie die großen Preisunterschiede zwischen den Anlagen in Europa dar. Beispielsweise können Heizkessel mit einer entsprechenden schlechteren Qualität für die Hälfte des deutschen und österreichischen Preises aus Osteuropa wie z. B. Polen, Slowakei erworben werden, sodass die BAFA-Förderung aufgrund der relativ niedrigen Fördersumme und des dazu gehörigen höheren bürokratischen Aufwands für viele Kunden nicht interessant ist. Das führt dazu, dass sich niederqualitative Produkte mit einer in der Regel unsachgemäßen Funktionalität im Dauerbetrieb in der Praxis verbreiten. Es ist zu erwähnen, dass sich sowohl die BAFA-Förderung als auch das Inverkehrbringen von Heizkesseln in den europäischen Raum ausschließlich auf die Prüfstandsmesswerte beziehen, wobei die Dauerhaftigkeit der Produkte nicht geprüft wird und in der Praxis bisher nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Sowohl die niederen Preise fossiler Energieträger als auch die großen Preisunterschiede der Biomasseheizkessel im europäischen Raum führen zu einem instabilen Geschäft für Biomasseheizkessel in Deutschland. Viele Unternehmen haben versucht, diese Marktinstabilität durch die Preissenkung bzw. Rabattierung der Produkte auszugleichen, wodurch die Mittel für die Forschung und Entwicklung bzw. für die Umsetzung neuer Konzepte bei vielen Unternehmen stark reduziert wurden. Die Optimierung der Produkte für eine nachhaltige und sichere Emissions- und CO_2-Reduzierung sowie Effizienzerhöhung im Praxisbetrieb stellt bisher keinen Aspekt für das Inverkehrbringen der Heizkessel auf dem Markt sowie für die BAFA-Förderung dar.

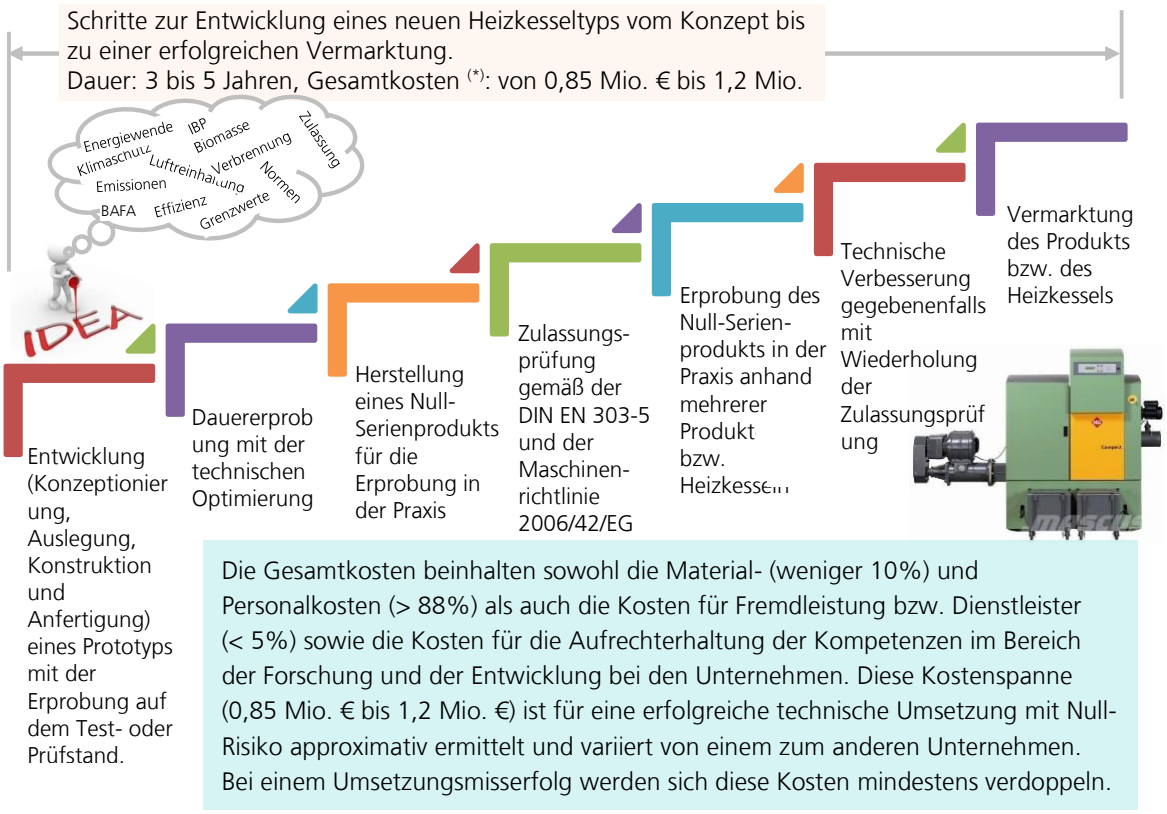

Abbildung 18: Schritte zur Entwicklung eines neuen Biomasseheizkesseltyps vor der Markteinführung.

Die technische Umsetzung neuer Konzepte bzw. Vermarktung neuer Verbrennungstechnologien hat einen bedeutsamen finanziellen Einfluss auf die meisten Biomassekesselhersteller bzw. kleineren und mittleren Unternehmen. Die Forschungs- und Entwicklungsschritte für einen Heizkesselprototyp vom Konzept bis zur Vermarktung mit den approximativen Kosten sind schematisch in der Abbildung 18 dargestellt. Aus diesem Grund versuchen viele Unternehmen ihre bestehenden Produkte ausschließlich so anzupassen, dass die normativen und rechtlichen Anforderungen anhand einer Typprüfung bzw. Prüfstandsmessung für das Inverkehrbringen der Produkte auf den Markt eingehalten werden können. Die Funktionalität und Dauereinhaltung der Anforderungen an niedrige

Emissionen und hohe Verbrennungseffizienz spielen bisher nur eine untergeordnete Rolle.

Die Einführung neuer Technologien auf dem Markt hängt außerdem von den Lebenszyklen der Produkte bzw. sich in der Vermarktung befindlichen Heizkessel in den Unternehmen ab. Ein bestimmter Lebenszyklus (Einführung, Wachstum, Reife, Sättigung, Degeneration) sollte aus wirtschaftlichen und vermarktungstechnischen Gründen eingehalten werden. Die Unternehmen versuchen ein Gleichgewicht zwischen den neuesten und bestehenden Produkten innerhalb eines günstigen wirtschaftlichen Lebenszyklus beizubehalten, so dass sie sich gegenseitig aus einer vermarktungstechnischen Sicht nicht negativ beeinflussen sollen. Die Einführung eines neuen Produkttyps auf den Markt erfolgt nur beim Erreichen der Sättigungs- bzw. Degenerationsphase oder bei der Änderung der Rahmenbedingungen, wodurch das bestehende Produkt die rechtlichen bzw. gesetzlichen Anforderungen nicht mehr einhalten kann. Eine ausschlaggebende Rolle bei der Verwendung der Biomasseheizkessel spielen die Heizungsbauer, welche in der Regel ein wichtiges Durchführungsorgan in der Praxis darstellen und einen großen Einfluss auf die Auswahl der Energiebereitstellungsanlagen (Gas-, Heizölfeuerungen, Wärmepumpe, Biomasseheizkessel usw.) haben. Eine hohe Akzeptanz für Biomasseheizkessel bzw. für neue Technologien von den Heizungsbauern sowie von den Kunden erfolgt nur, wenn sie über diese Technologien mit den aktuellen rechtlichen und gesetzlichen Anforderungen und Einsatzbedingungen Informiert sind. Besonders wichtig dabei ist es, eine technische Schulung in der Auslegung des gesamten Heizsystems im Kontext mit Biomasseheizkesseln, der Installation und der Inbetriebnahme sowie der Beseitigung von technischen Fehlern anzubieten. Da die Installation von Biomasseheizkesseln deutlich aufwendiger ist als Gas-, Heizölfeuerungen und gute fachliche und technische Kompetenzen sowie gute Kenntnisse in vielen technischen sowie rechtlichen Regularien erfordert, sollten die Heizungsbauer nicht nur geschult, sondern auch entsprechend gefördert werden, sodass sie ihr Wissen und ihre Kompetenzen aufrechterhalten und über das entsprechende Fachpersonal verfügen können.

Aus der oben geschilderten Marktsituation lässt sich schließen, dass eine Verstärkung des Einsatzes von Biomasseheizkesseln sowie eine effektive schnelle Umsetzung neuer Verbrennungskonzepte und –technologien, wie beispielsweise das LEVS-System (FKZ: 03KB093A) und das VREM-System (FKZ: 03KB109A), nur durch entsprechende finanzielle Unterstützungen der Unternehmen wie z. B. durch eine gezielte Aufnahme solcher Technologien in der BAFA-Förderung sowie mit einer Förderung von Forschungsarbeiten, einmaligen Schubfinanzierung der Unternehmen für die Einführung des Produkts auf den Markt möglich ist. Solche innovativen Konzepte unterscheiden sich stark von dem Stand der Technik und dienen nicht nur zum Erreichen der Ziele der Bundesregierung zum Klimaschutz und zu einer sicheren effizienten Energieversorgung, sondern auch zur Sicherstellung

einer hohen Produktqualität in Deutschland und folglich zu wirtschaftlichen Vorteilen.

13.3 Empfehlungen für die Verstärkung des Einsatzes von Biomasseheizkesseln und Umsetzung innovativer Konzepte/Technologien

Die BAFA-Förderung stellt die einzige Möglichkeit für die Förderung des Einsatzes innovativer Technologien und Konzepte zum Erreichen der Ziele der Bundesregierung zum Klimaschutz sowie zu einer effizienten und sicheren Energieversorgung in Deutschland dar. Im Bereich der Biomasse sind folgende Technologien gemäß der BAFA-Förderung in Deutschland förderfähig. Eine aktuelle ausführliche Übersicht über die BAFA-Förderung ist in der Tabelle 12 zu sehen [http://www.bafa.de/DE/Energie/Heizen_mit_Erneuerbaren_Energien/Biomasse/biomasse_node.html]:

- Kessel zur Verbrennung von Biomassepellets und Hackschnitzeln,
- Pelletöfen mit Wassertasche,
- Kombinationskessel zur Verbrennung von Biomassepellets bzw. Holzhackschnitzeln und Scheitholz,
- besonders emissionsarme Scheitholzvergaserkessel,
- Nachrüstung mit einer Einrichtung zur Brennwertnutzung,
- Nachrüstung mit einer Einrichtung zur Staubminderung,
- Bereitstellung von Prozesswärme.

Darüber hinaus können von den Kunden sogenannte Zusatzförderungen als Kombinationsbonus, Gebäudeeffizienzbonus und Optimierungsmaßnahmen in Anspruch genommen werden. Der Kombinationsbonus in Höhe von 500 € kann von den Kunden in Anspruch genommen werden, wenn die Biomassefeuerungen mit Solarkollektoren, Wärmepumpenanlagen oder mit einer Anbindung an das Wärmenetz kombiniert wird. Der Gebäudeeffizienzbonus beträgt 50 % der Basis- oder Innovationsförderung und kann genutzt werden, wenn der Gebäudebestand die energetischen Anforderungen an die KfW-Effizienzhaus 55 erfüllt (Erfüllung der Anforderungen an EnEV 2013, hydraulischer Abgleich, Anpassung der Heizkurve, Online-Bestätigung eines zugelassenen Sachverständigen). Zu den Optimierungsmaßnahmen zählen Einzelmaßnahmen zur energetischen Optimierung der Heizungsanlage und der Warmwasseraufbereitung in Bestandsgebäuden. Hier können 10 % der Nettoinvestitionskosten mit Errichtung oder Rückwirkend 100 € bis maximal 200 € in Anspruch genommen werden.

Tabelle 12: Übersicht für die BAFA-Förderung im Bereich der Biomasse (Basis-, Innovations- und Zusatzförderung).

Maßnahme		**Basis-förderung**	**Innovationsförderung[3]**				
			Brennwertnutzung[4]		**Partikelabscheidung[5]**		**Nach-rüstung**
Anlagen von 5 bis max. 100,0 kW Nennwärmeleistung		**Gebäude-bestand**	**Gebäude-bestand**	**Neubau**	**Gebäude-bestand**	**Neubau**	
Pelletofen mit Wassertasche	**5 kW bis 25,0 kW**	2.000 €	-	-	3.000 € [3.1]	2.000 €	750 €
	25,1 kW bis max. 100 kW	80 €/kW					
Pelletkessel	**5 kW bis 37,5 kW**	3.000 €	4.500 € [3.1]	3.000 €	4.500 € [3.1]	3.000 €	
	37,6 kW bis max. 100 kW	80 €/kW					
Pelletkessel mit einem Pufferspeicher (neu errichtet) von mind. 30 l/kW	**5 kW bis 43,7 kW**	3.500 €	5.250 € [3.1]	3.500 €	5.250 € [3.1]	3.500 €	
	43,8 kW bis max. 100 kW	80 €/kW					
Hackschnitzelkessel mit einem Pufferspeicher von mind. 30 l/kW		pauschal 3.500 € je Anlage	5.250 € [7 3]	3.500 € [7]	5.250 €	3.500 €	
			4.500 € [8]	3.000 € [8]			
Kombinationskessel[1] automatisch beschickter Pellet- oder Hackschnitzelkessel mit einem handbeschickten Scheitholzvergaserkessel		mind. 5.000 €	mind. 7.500 €	3.000 €/ 3.500 €	mind. 6.500 €	3.000 €/ 3.500 €	
Scheitholzvergaserkessel[2] mit einem Pufferspeicher von mind. 55 l/kW		pauschal 2.000 € je Anlage	5.250 € [7]	3.500 € [7]	3.000 €	2.000 €	
			4.500 € [8]	3.000 € [8]			

- Es gelten die Bestimmungen der Richtlinie vom 11.03.2015 in Verbindung mit der Änderungsrichtlinie vom 04.08.2017.
- Gem. Änderungsrichtlinie sind ab dem 01.01.2018 alle Anträge im zweistufigen Antragsverfahren zu stellen.
- Gebäudebestand: Ein Gebäude, in dem zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme der beantragten Anlage seit mehr als zwei Jahren ein anderes Heizungs- oder Kühlsystem installiert ist.
- Die hier beschriebenen Voraussetzungen sind nicht abschließend. Die vollständigen Fördervoraussetzungen finden Sie auf der BAFA-Homepage unter der Rubrik „Energie/Heizen mit Erneuerbaren Energien“

1. Kombinationskessel erhalten für jedes Anlagenteil die jeweilige Förderung. Ausnahme: Innovationsfördertatbestand im Neubau. Hier kann nur ein Anlagenteil gefördert werden. Pelletöfen sind als Kombination nicht möglich. Für den Scheitholzvergaserkessel muss der entsprechende Mindest-Pufferspeicher nachgewiesen werden.

2. Es sind nur besonders emissionsarme Scheitholzvergaserkessel förderfähig (staubförmige Emissionen: max. 15 mg/m³).
3. Innovationsförderung: Angegeben ist der Gesamtförderbetrag. Ausnahme Pelletanlagen im Gebäudebestand 3.1.

   3.1 Pelletanlagen im Gebäudebestand: Angegeben ist der Mindestförderbetrag, ansonsten 80 €/kW.
4. Innovationsförderung Brennwertnutzung: Zusätzlich zur Biomasseanlage besteht eine Einrichtung zur bestimmungsgemäßen Nutzung der bei der Abgaskondensation anfallenden Wärme.
5. Innovationsförderung Partikelabscheidung: Zusätzlich zur Biomasseanlage besteht eine Einrichtung zur sekundären Abscheidung der im Abgas enthaltenen Partikel.
6. Nachrüstung einer unter 5) oder 5.1) beschriebenen Einrichtung für eine bereits bestehende Biomasseanlage. Angegeben ist der Innovationsförderbetrag.
7. Förderbetrag bei neu errichtetem Pufferspeicher (mind. 30 Liter/kW). Gesamtpufferspeichervolumen bei Scheitholzvergaserkessel mind. 55 Liter/kW.
8. Förderbetrag bei vorhandenem Pufferspeicher.

Für die Verstärkung des Einsatzes der Biomasseheizkessel für die Bereitstellung von Wärme und Warmwasser sollten politische sowie technische Maßnahmen getroffen werden. Im Folgenden werden Maßnahmen dargestellt, die für das Erreichen dieses Ziels dienen können:

- Es sollten alle Wirtschaftsakteure betrachtet werden, die an dem Aufbau und der Installation von Biomasseheizkesseln beteiligt sind. Beispielsweise sollten die Heizungsbauer als wichtiges Durchführungsorgan herangezogen und entsprechend mitgefördert werden. Die bestehende indirekte Förderung der Heizkesselhersteller ist zwar zielführend, aber nicht ausreichend um den Einsatz der Biomasseheizkessel zu verstärken.
- Veranstaltung von Schulungen und Bildungsmaßnahmen für die Heizungsbauer wird zur Entwicklung ihres Knowhows und technischen Bewusstseins für die Auslegung, den Aufbau und die Inbetriebnahme von auf Biomasseheizkesseln basierenden Heizungssystemen führen. Biomasseheizkessel unterscheiden sich sehr stark von den Gas- und Heizölfeuerungen bezüglich der Auslegung und des technischen Aufbaus bzw. der Installation und erfordern somit gute fachliche Kompetenzen, über die nicht alle Heizungsbauer verfügen.
- Sonstige Wirtschaftsakteure wie z. B. Ingenieurbüros, Architekten und Privatkunden stellen wichtige Entscheidungsträger dar und sollten auch über die Förderungsmöglichkeiten sowie über die Wichtigkeit und die Rolle der Biomasse bei der künftigen Energiewirtschaft in Deutschland näher informiert werden.
- Die Verbrennung von Biomasse in Kleinfeuerungsanlagen ist aufgrund der Feinstaubproblematik in vielen Wohngebieten in Deutschland negativ behaftet, wodurch sich ein negativer Trend in der Öffentlichkeit bzw. bei den Kunden bezüglich der thermischen Verwertung der Biomasse entwickelt hat. Beispielsweise haben Feuerungsverbote in manchen Gebieten in Deutschland zu einer Verunsicherung bei den Kunden geführt, wobei viele Kunden sich aufgrund der unklaren

Situation gegen die Technologien zur Wärmebereitstellung aus Biomasse entscheiden.

- Da die Verschärfung der Grenzwerte der 1. BImSchV nicht zu einer merklichen Entschärfung der Feinstaubproblematik bzw. Reduzierung des Feinstaubanteils aus Biomassefeuerungen aller Art gemäß den Angaben vom Umweltbundesamt geführt hat, sollten entsprechende technische Maßnahmen getroffen werden, sodass die thermische Verwertung der Biomasse in der Öffentlichkeit besser und gemäß ihrer wichtigen Rolle für eine nachhaltige Energiewirtschaft in Deutschland und in Europa dargestellt wird.
- Um das Vertrauen in die Kleinfeuerungsanlagentechnik für die thermische Verwertung der Biomasse bzw. Energiebereitstellung in Haushalten zu verstärken und die Debatte über die erhöhte Feinstaubbelastung aus Biomassefeuerungsanlagen in Wohngebieten zu entschärfen, welche großen negativen Einfluss auf die Öffentlichkeit und folglich die Kunden hat, sollten Biomassefeuerungsanlagen über eine funktionierende Filtertechnik unabhängig von den auf dem Prüfstand bzw. bei der wiederkehrenden Schornsteinfegermessung erreichten Werte verfügen. Die kontinuierliche Überwachung gemäß dem VREM-System bietet sich auch als neue innovative Maßnahme an, womit technische Fehler, Fehlbedienungen und ein unsachgemäßer Betrieb bzw. Einsatz ungünstiger Brennstoffe vermieden werden können, welche in der Regel einen erhöhten Ausstoß vieler staub- und gasförmiger Schadstoffemissionen verantworten. Eine gesetzliche Regelung für den verpflichteten Einsatz von Filtertechnologien mit einer entsprechend hohen staatlichen Förderung ist hier erforderlich.

Zusätzlich zu den oben dargestellten Punkten sollten weitere Maßnahmen getroffen werden, so dass neue innovative Technologien trotz der Marktsituation eingesetzt werden, welche gezielt zum Erreichen der Ziele der Bundesregierung für den Klimaschutz dienen sollten. Im Folgenden werden beispielhafte Maßnahmen aus Sicht des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP genannt:

- Aufnahme der neu erforschten innovativen Technologien zur Effizienzerhöhung und zur Emissions- bzw. CO_2-Minderung in die BAFA-Förderung, wobei solche Technologien besonders gefördert werden sollten. Hier sollte ein Gesetz für eine zusätzliche Förderung zu der bestehenden BAFA-Förderung gemäß der Tabelle 12 erlassen werden.
- Sowohl für die Entwicklung als auch Umsetzung und anschließende Einführung besonders innovativer Technologien sollten die Unternehmen mit einer entsprechenden Schubfinanzierung unterstützt werden, wobei ein Teil der Umsetzungskosten und Marktrisiken berücksichtigt werden können.
- Neugestaltung und Vereinfachung des Genehmigungsverfahrens der BAFA-Förderung, so dass nicht nur innovative Technologien besonders unterstützt, sondern auch die Biomasse immer konkurrenzfähiger gegenüber anderen fossilen Energieträgern bleiben sollte. Die BAFA-

Förderung sollte nicht fest definiert, sondern individuell kalkuliert sein und sich an einer bestimmten überschaubaren Amortisationszeit von maximal fünf Jahren orientieren. Hier gilt, je länger die Amortisationszeit und komplexer die Genehmigungsverfahren der BAFA-Förderung sind, umso geringer wird das Interesse der Kunden an dem Einsatz der Biomasse.

- Es sollten bestimmte staatliche Förderung für technologische ganzheitliche Lösungen zur Energieversorgung mit Biomasseheizkesseln und nicht nur für Einzeltechnologien des gesamten Energieversorgungssystems berücksichtigt werden. Die Optimierung eines Prozessteils führt nicht unbedingt zur Optimierung des gesamten Prozesssystems.

Aufgrund der Schlüsselposition der Heizungsbauer sollten diese die Möglichkeit bekommen sich nach einem Nachweis über entsprechende Schlüsselqualifikationen (wie beispielsweise über die Nachrüstung von Biomasseheizkesseln in Bestandsgebäuden) im Rahmen eines Umweltmanagementsystems für Heizungsbauer zertifizieren zulassen. Heizungsbauer und Kunden, die umweltzertifizierte Heizungsbauer beauftragen sollten entsprechende finanzielle Erleichterungen wie beispielsweise Steuererleichterungen erhalten. Durch diese Erleichterungen sollen mehr Heizungsbauer dazu bestrebt sein die Umweltzertifizierung zu erhalten, sodass der Ausbau von Biomassetechnologien gefördert wird. Durch die Kombination aus staatlicher Förderung und Schulungsmaßnahmen sowie Zusatzzertifizierungen für Heizungsbauer lässt sich diese Schlüsselposition leichter und schneller in die gesamte Marktsituation integrieren, sodass den Kunden vermehrt erneuerbare Wärmebereitstellungstechnologien empfohlen und angeboten werden.

Aufgrund der großen finanziellen Risiken können viele Hersteller nicht ausreichend flexibel innovative Produkte entwickeln und diese anschließend kurzfristig auf dem Markt anbieten. Für eine schnelle Vermarktung von innovativen Technologien sollte es für diejenigen Hersteller eine besondere staatliche Förderung geben, die sich im Bereich der Neuentwicklung bzw. Weiterentwicklung von Technologien engagieren. Nur durch diese Förderung werden Unternehmen neuentwickelte Innovationen schnell weiterentwickeln und in den Markt einführen, wodurch die klima- und umweltpolitischen Bestrebungen deutlich gefördert werden.

Trotz niedriger Ölpreise sowie höherer Anschaffungs-, Installations- und Betriebskosten der Biomassefeuerungen im Vergleich zu Gas- und Heizölfeuerungen lohnt es sich bisher Biomassefeuerungen mit einer nachgeschalteten Filtertechnik einzusetzen. Die verursachten Mehrkosten beim Einsatz von Biomassefeuerungen im Vergleich zu Heizölfeuerungen lassen sich beispielsweise gemäß den aktuellen Brennstoffpreisen bei Pelletheizkesseln nach ca. 16 Jahren, bei Scheitholzkesseln nach ca.10 Jahren und bei Hackgutkesseln nach ca. 6 Jahren amortisieren. Sollten die Heizölpreise auf ca. 90 Cent/Liter wie vor dem Jahr 2013 ansteigen, können die Amortisationszeiten auf mehr als 30 % bzw. ca. 7 Jahre bei

Pelletheizkesseln, auf ca. 6 Jahre bei Scheitholzkesseln und auf 4 Jahre bei Hackgutkesseln verkürzt werden.

13.4 Planung der Firma HDG Bavaria GmbH für die Umsetzung der Forschungsergebnisse

Die Firma HDG Bavaria GmbH hat sich seit mehreren Jahren mit dem Thema „Emissionsminderung und Effizienzerhöhung durch den Einsatz neuartiger Sensorik“ beschäftigt. Hauptziel der Firma HDG Bavaria GmbH war es eine sachgemäße Verbrennung unabhängig von der Änderung der Brennstoffqualität im Praxisbetrieb zu erreichen. Da die Themen vielfältig und wissenschaftlich gründlich zu behandeln waren, war es nicht möglich, gute Entwicklungsschritte in diesem Bereich zu meistern. Ein generelles Problem lag darin, dass beim Einsatz einfacher CO_e-Sensorik weder verwertbare Signale noch eine Sensordauerstabilität festgestellt werden konnte. Diese Problematik konnte von mehreren Unternehmen bestätigt werden. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde ein einfacher CO_e-Sensor (CarboSen CS1000) der Firma LAMTEC GmbH & Co. KG ohne Erfolg untersucht. Eine gute Signalqualität für die Regelung wurde nur über eine kurze Betriebszeit erreicht.

Trotz der schwierigen Marktsituation plant die Firma HDG Bavaria GmbH das Konzept des VREM-Systems zu verfolgen bzw. umzusetzen und optional für die Kunden anzubieten. Für die Umsetzung sind noch folgende technische Hindernisse zu überwinden bzw. weitere Entwicklungsarbeiten notwendig, welche vor dem Beginn dieses Projekts nicht vorhersehbar waren:

- Entwicklung einer einfachen Elektronik für die Verwertung der Sensorsignale (Sondentyp KS1D), welche sich in die bestehenden Regelplatinen der Firma HDG Bavaria GmbH sicher integrieren lässt.
- Übersetzung und Integration der entwickelten Regelalgorithmen in die bestehende Software der Firma HDG Bavaria GmbH. Die bisher entwickelte Software stellt nur einen kleinen Teil (< 50 %) einer gesamten Software dar, die die Kesselhersteller in der Regel für die Kunden anbieten. Während die entwickelte Software nur die Verbrennung hinsichtlich der Emissionsminderung und Effizienzerhöhung im Praxisbetrieb optimiert, verfügt die Software der Kesselhersteller über weitere Regelkreise z. B. für die Wärmespeicherung (Pufferspeicher), Wärme- und Warmwassereinspeisung, Kombination mit Solarthermieanlagen und sonstigen alternativen Heizkesseln.
- Dauererprobung über mindestens zwei Jahre für die Untersuchung der Praxistauglichkeit sowie für die Durchführung einer Risikoanalyse gemäß der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG zwecks Zulassungsprüfungen mit einer anschließenden Vermarktung.
- Erprobung der Technik über ca. drei Jahre anhand von Prototypen und Null-Serienprodukten bei Kunden im Praxisbetrieb.
- Zusätzlich zu den oben dargestellten Punkten sollte ein Konzept für die Nachrüstung der bestehenden Anlagen mit der neuen Regelung

bzw. dem VREM-System erarbeitet und entsprechend miterprobt werden.

Diese notwendigen Entwicklungsarbeiten lassen sich durch weitere Kooperationen mit Forschungseinrichtungen bzw. durch eine Schubfinanzierung der Firma HDG Bavaria GmbH zum Auffangen von möglichen Risiken effektiver und schneller durchführen. Außerdem wird die Vermarktung dieses Systems durch die Aufnahme solcher innovativen Technologien in die BAFA-Förderung erleichtert. Diese Technologien haben gegenüber den anderen bereits durch die BAFA förderfähigen Technologien den Vorteil, dass sie eine gezielte Minderung des CO_2-Ausstoßes und sonstiger gesundheitsrelevanter Emissionen sowie eine bedeutsame Effizienzerhöhung im Praxisbetrieb gewährleisten. Es ist zu erwähnen, dass sich bisher die technischen Anforderungen für die BAFA-Förderung nur auf die Messwerte des Wirkungsgrads sowie der Emissionen auf dem Prüfstand beziehen, welche in der Regel unter optimalen Einstell- und Betriebsbedingungen ermittelt werden. Die Funktionalität der Heizkessel im Praxis- bzw. Dauerbetrieb spielt bisher nur eine untergeordnete Rolle für die BAFA-Förderung.

Heizkessel stellen eine wichtige Methode bzw. Energietechnik für die thermische Verwertung von Biomasse zur Versorgung der deutschen Haushalte und Kleingewerbe mit Wärme und Warmwasser dar. Diese Technik wird überwiegend von kleineren und mittleren Unternehmen produziert und vermarktet. Die staatliche Unterstützung dieser Branche ist lohnenswert sowie äußerst notwendig, um diese Energietechnik weiter zu etablieren und gegenüber anderen Energietechniken fossiler Energieträger konkurrenzfähiger darzustellen.

14 Zusammenfassung und Ausblick/ Summary and Outlook

Eine nachhaltige Energieversorgung auf Basis von erneuerbaren Energien stellt ein wesentliches politisches Ziel in Deutschland dar, wobei nicht nur die Ökonomie, sondern auch die Ökologie im Vordergrund stehen. Die Biomasse leistet bereits heute einen maßgeblichen Beitrag für die Energieversorgung in Deutschland. Die durch die Biomasse bereitgestellte und genutzte Energiemenge lag im Jahr 2016 bei etwa 100 TWh [BMWi 2017]. Im Hinblick auf die energie- und klimapolitischen Ziele der Bundesregierung soll die Nutzung von erneuerbaren Energien wie beispielsweise von Biomasse künftig deutlich ausgebaut werden. Eine Beschleunigung dieses Ausbaus ist aktuell besonders notwendig, da die bisherigen verbindlichen Ziele der Bundesregierung zur Minderung der Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2020 um mindestens 40 % voraussichtlich nicht erreicht werden können. Ein besonders wichtiges Instrument für diese erforderliche Beschleunigung stellt die Förderung von innovativen Technologien von der Entwicklung bis zum Einsatz in der Praxis dar, bei denen die Energiebereitstellung einfacher, effektiver, effizienter, flexibler und mit anderen Technologien kombinierbar erfolgen kann.

Die thermische Verwertung bzw. Umwandlung von festen Brennstoffen ist im Vergleich zu flüssigen und gasförmigen Brennstoffen technisch schwieriger und anspruchsvoller. Im Gegensatz zur Heizöl- und Gasbrenntechnologien spielen hier zusätzlich zur Verbrennungstechnik, die Brennstoffvariationen sowie der Nutzer mit seinem Verhalten eine ausschlaggebende Rolle bei der Verbrennungsqualität. Diese drei Faktoren sind entscheidend, um einen sachgemäßen Betrieb mit der Verbrennungstechnik bzw. dem Heizkessel gewährleisten zu können. Aus einer gesetzlichen und normativen Sicht müssen bisher nur die Brennstoffe sowie die Verbrennungstechnik bestimmte normative und qualitative Anforderungen einhalten. Der Nutzer bleibt dabei außer Betracht, obwohl er mit seinem Verhalten den Betrieb sowohl durch die Auswahl des Brennstoffs als auch durch die Bedienung der Verbrennungstechnik massiv beeinflusst. Die normativen Anforderungen an die Verbrennungstechnik sind in der DIN EN 303-5 bzw. der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG geregelt. Die für den Einsatz in Kleinfeuerungsanlagen einzusetzenden Brennstoffe sind im § 1 der 1. BImSchV festgelegt. Qualitätsanforderungen wurden bisher für bestimmte Brennstoffe wie z. B. Pellets (DIN CERTCO zertifizierte Brennstoffe, ENplus Qualitätszertifikat für Pellets) und Hackgut (DIN EN ISO 17225-4.) erstellt. Obwohl die Verbrennungstechnik sowohl einmalig bei der Typprüfung durch eine akkreditierte Prüfstelle als auch wiederkehrend durch den Schornsteinfeger gemäß dem 4. Abschnitt der 1. BImSchV überprüft werden muss, können technische Fehler in den Zeiträumen zwischen den wiederkehrenden Überwachungen auftreten, die meistens zu einem hohen Schadstoffausstoß und zu einer niedrigen Verbrennungseffizienz führen. Weitere Betriebsfehler können durch eine fehlerhafte Installation der Verbrennungstechnik bzw. einer ungünstigen Auslegung des gesamten Wärmebereitstellungssystems zustande kommen.

Eine effiziente und schadstoffarme Energieproduktion und -nutzung durch die thermische Verwertung der Biomasse und sonstiger biogener Abfall- und Reststoffe erfordert nicht nur die Entwicklung und den Einsatz von modernen Verbrennungstechnologien, sondern auch innovativer Systeme für die Überwachung der Funktionalität dieser Technologien im Praxisbetrieb. Nur dadurch kann eine gleichzeitig ökonomische und ökologische Nutzung dieser Brennstoffe sichergestellt werden, ohne hohe Umweltbelastungen bzw. Gesundheitsgefährdungen hervorzurufen.

In diesem Forschungsprojekt wurde ein intelligentes System für eine regelungstechnische Verbesserung der Verbrennung und permanente Überwachung von Biomasseheizkesseln (das sogenannte VREM-System: Verbrennungsregelungs- und Emissionsmonitoringsystem) entwickelt. Die regelungstechnische Verbesserung gemäß dem VREM-System beruht darauf, dass der Verbrennungsprozess unabhängig von dem eingesetzten Brennstoff sowie der Verbrennungstechnik mit möglichst geringem Sauerstoffüberschuss zu betreiben ist, ohne die Verbrennungsqualität negativ zu beeinflussen. Dadurch werden die Wärmeverluste durch freie Wärme im Abgas sowie über die nicht verbrannten Bestandteile (chemische Wärmeverluste) reduziert und somit die höchstmögliche Verbrennungseffizienz erreicht. Anhand des VREM-Systems werden außerdem die Verbrennungsqualität durch die Messung und Bewertung der nicht verbrannten Abgasbestandteile (als CO-Äquivalente) permanent überwacht sowie der gesamte Betrieb des Heizkessels hinsichtlich ökonomischer, ökologischer sowie sicherheitstechnischer Aspekte kontinuierlich bewertet. Bei der Betriebsüberwachung werden zusätzlich Ergebnisse aus thermodynamischen Berechnungen sowie die Betriebswerte aus anderen Sensoren (meistens Druck- und Temperatursensoren) und Aktoren (Verbrennungsluftklappen oder –gebläse) betrachtet, welche beispielsweise die Betriebsphasen, Fehlerursachen, Wirkungsgrade sowie Aspekte der Betriebssicherheit bewertet. Im Rahmen der Untersuchungen mit dem VREM-System wurden unterschiedliche Fehler- und Betriebsszenarien simuliert (z. B. Verwendung ungeeigneter Brennstoffe, technischer Ausfall von Sensoren und Aktoren usw.), welche in den Algorithmen des VREM-Systems berücksichtigt wurden. Die Überwachungsalgorithmen mit der O_2/CO_e-Sonde wurden nach der Erprobung auf dem Prüfstand erfolgreich in zwei in der Praxis befindlichen Biomasseheizkesseln (hand- und automatisch beschickte Heizkessel für die Verbrennung von Scheitholz und Holzpellets) dauererprobt. Sowohl die O_2/CO_e-Sonde als auch die Überwachungsalgorithmen haben eine sehr gute Eignung für den Dauereinsatz in der Praxis gezeigt.

Die während des Betriebs erfassten Daten mit der Bewertung werden entweder dezentral in jedem Heizkessel oder zentral auf einem speziellen Server oder in einer Big-Data-Cloud gespeichert. Technische Fehler mit einer ausführlichen Ursachenanalyse werden nach einer bestimmten Logik per E-Mail oder SMS gemeldet und entsprechend dokumentiert. Die beiden Möglichkeiten der Datenspeicherung bzw. der Datenmeldung wurden im Rahmen des Projekts umgesetzt und erfolgreich getestet.

Technisch basiert das VREM-System hauptsächlich auf dem Einsatz einer O_2/CO_e-Sonde (KS1D-Sonde) der Firma LAMTEC GmbH & Co. KG, mit der sowohl der Sauerstoffgehalt als auch die Konzentrationen an nicht verbrannten Schadstoffen als CO-Äquivalente (CO_e) im Abgas während des Betriebs ermittelt und entsprechende Signale generiert werden können. Die O_2/CO_e-Sonde (KS1D-Sonde) wurde im Rahmen dieses Projekts gründlich anhand einer speziellen Einrichtung (Abgassimulator) im Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP auf das Driftverhalten sowie die Querempfindlichkeit untersucht und bei der Anwendung unterschiedlicher brennbarer Gase (CO, CH_4, H_2, C_3H_8) und Gasgemische kalibriert. Dabei wurden Kalibrierkurven bzw. Kalibrierebenen ermittelt, welche sich für den Einsatz in Biomasseheizkesseln eignen bzw. aussagekräftige Werte (CO_e-Signale) für die Regelung sowie für die Überwachung liefern können. Bei der Untersuchung wurde festgestellt, dass die CO_e-Signale je nach Art des Brenngases unterschiedliche Sensitivitäten aufweisen und eine nicht vernachlässigbare Querempfindlichkeit zum Sauerstoffgehalt im Abgas haben. Auf Basis der Charakterisierung wurden über statistische Berechnungsmethoden spezielle Algorithmen für Kalibrierebenen entwickelt, wodurch die Konzentrationen an nicht verbrannten Abgasbestandteilen (als CO-Äquivalente) beschrieben werden können. Zur Überprüfung der Übertragbarkeit wurden diese Funktionen der Kalibrierebenen erfolgreich in drei verschiedenen Biomasseheizkesseln und mit vier unterschiedlichen KS1D-Sonden überprüft. Es ist zu erwähnen, dass die herkömmlichen Kalibrierkurven der Firma LAMTEC GmbH & Co. KG hauptsächlich für den Einsatz in Gasfeuerungen entwickelt und nur bedingt für die Regelung des Verbrennungsprozesses in Biomasseheizkesseln anwendbar sind. Die O_2/CO_e-Sonde (Typ KS1D) hat im Gegensatz zu anderen im Rahmen des Projekts untersuchten Sonden wie z. B. die CarboSen-Sonde eine sehr hohe Messstabilität bzw. –sensitivität sowohl bei der Kalibrierung als auch bei dem Test auf dem Prüfstand sowie im Praxisbetrieb aufgewiesen. Nach mehr als 2.200 Betriebsstunden hat die O_2/CO_e-Sonde eine ähnliche Messsensitivität wie im Neuzustand gezeigt.

Nach der Charakterisierung der O_2/CO_e-Sonde wurde diese in einen handbeschickten Heizkessel integriert, mit welchem die gesamte Entwicklung des VREM-Systems anhand einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) unter Berücksichtigung der normativen Anforderungen durchgeführt wurde. Zu der Entwicklung wurden universelle Teilprogramme (Regelschleifen) für die Emissionskantenregelung sowie für die permanente Überwachung der Emissionen an nicht verbrannten Abgasbestandteilen (als CO-Äquivalente) mit einer ausführlichen Bewertung des Betriebs geschrieben und beim Einsatz unterschiedlicher Brennstoffe erfolgreich validiert. Dabei wurden sowohl hochqualitative Brennstoffe wie beispielsweise Buchenscheithölzer, als auch biogene Reststoffe wie Pferdemist, Traubentrester und Gärest verwendet.

Bei allen verwendeten Brennstoffen wurden trotz der unterschiedlichen Qualitäten und verbrennungstechnischen Eigenschaften eine stabile Regelung mit einer hohen Verbrennungseffizienz (> 94 %) erreicht, welche

hauptsächlich aus der Regelung des Verbrennungsprozesses mit niedrigerem Sauerstoffüberschuss und Vermeidung hoher Wärmeverluste über die nicht verbrannten Bestandteile sowie über die freie Wärme im Abgas erreicht wurde. Die Reduzierung der Wärmeverluste über die freie Wärme im Abgas erfolgte gemäß dem Konzept des VREM-Systems nicht nur durch die Reduzierung des Sauerstoffüberschusses bzw. der Abgasmenge, sondern auch durch die Überwachung der Abgastemperatur. Dabei wurde die möglichst minimale Abgastemperatur während des Betriebs eingestellt, so dass weder die Verbrennung noch die Funktion der Abgasanlage negativ beeinflusst werden konnten.

Bei den auf dem Prüfstand durchgeführten Untersuchungen wurden unterschiedliche praxisrelevante Betriebsstörungen simuliert bzw. generiert, wobei die Algorithmen für die Emissionsüberwachung, Betriebsbewertung und die Ursachenanalysen geschrieben und anschließend beim Einsatz unterschiedlicher Brennstoffe und Betriebsfälle erprobt wurden. Bei der Emissionsüberwachung wurden hauptsächlich die Konzentrationen an nicht verbrannten Abgasbestandteilen (als CO-Äquivalent) während des Betriebs ermittelt, wodurch die Verbrennung qualitativ und quantitativ bewertet wurde. Die Bewertung aller erfassten Parameter erfolgte integral über jede Verbrennungsphase bzw. über den gesamten Betrieb des Heizkessels. Eine weitere integrale Evaluierung der Betriebe erfolgt über ein gesamtes Kalenderjahr oder eine Heizperiode, wobei der Heizkessel gemäß ökologischer und ökonomischer und technischer Aspekte bewertet werden kann. Die simulierten Störmeldungen wurden an einen E-Mail-Server (Fraunhofer-Cloud) automatisch gesendet und chronologisch gespeichert. Für eine genaue Ursachenanalyse und Interpretation der CO_e-Werte wurden die Einstellungen sowie das Betriebsverhalten der Regelaktoren während der Entwicklung bzw. Erprobung auf dem Prüfstand mitbetrachtet, worauf bei dem Praxistest aus technischen und rechtlichen Gründen verzichtet wurde. Bei den durchgeführten Untersuchungen bzw. simulierten Betriebsfällen auf dem Prüfstand wurden die oben erwähnten Algorithmen erfolgreich getestet und entsprechend vor den Praxisuntersuchungen validiert.

Nach den Entwicklungen auf dem Prüfstand wurde das VREM-System in zwei sich in der Praxis befindlichen Biomasseheizkesseln (automatisch und handbeschickte Heizkessel) integriert und über eine Heizperiode ausschließlich hinsichtlich der Emissionsüberwachung anhand der CO_e-Werte erprobt. Bei den beiden Typen der Heizkessel hat die Emissionsüberwachung ohne die Berücksichtigung des Einstell- und Betriebsverhaltens der Regelaktoren sehr gut funktioniert. Dabei hat das VREM-System eine aussagekräftige Bewertung der Verbrennungs- und Betriebsqualität geliefert, wobei gute Rückschlüsse sowohl auf die Bedienungsqualität des Heizkessels als auch auf die verwendeten Brennstoffe gezogen werden konnten. Bei dem handbeschickten Heizkessel wurden typische Betriebsfehler bzw. Fehlbedienungen, wie z. B. durch den Einsatz ungeeigneter Brennstoffe oder die Verwendung ungünstiger Beschickungsregime erkannt und erfolgreich gemeldet. Das Gleiche gilt für den automatisch beschickten Heizkessel (Hackschnitzel- und

Pelletheizkessel), wobei die Qualität von zwei Brennstofflieferungen trotz kleiner Unterschiede in dem Verbrennungs- bzw. Betriebsverhalten gut erkannt und gemeldet werden konnten.

Die erste Anwendung für das VREM-System hat die Firma Kutzner und Weber GmbH für die Untersuchung des Einflusses der Verbrennungsqualität auf das Abscheideverhalten von ihren Staubabscheidern in der Praxis erfolgreich realisiert. Bei dem überwachten Heizkessel (Pelletheizkessel) wurde festgestellt, dass eine ungünstige Dimensionierung bzw. Auslegung des gesamten Heizsystems einen enormen Einfluss auf den Betrieb der Verbrennungstechnik und folglich auf die Verbrennungseffizienz sowie auf die Schadstoffbildung im Praxisbetrieb hat. In diesem Anwendungsbeispiel wurde eine ungünstige Taktung der Verbrennungstechnik beobachtet, bei der sich der Heizkessel über 20 % der gesamten Betriebszeit im Gluthaltungsbetrieb mit exorbitant erhöhten Emissionen befand.

Zu einer breiten Anwendung des VREM-Systems und Nutzung seiner zahlreichen ökonomischen, ökologischen, technischen und gesellschaftlichen Vorteile müssen sowohl rechtliche Rahmenbedingungen als auch finanzielle Anreize bei den Herstellern, Heizungsbauern sowie bei dem Endverbraucher geschaffen werden, welche bei den vorhandenen Förderprogrammen wie z. B. der BAFA-Förderung explizit zu berücksichtigen sind.

Das VREM-System kann sowohl als regelungstechnische Maßnahme zur Verbesserung der Verbrennungsqualität bzw. der Verbrennungseffizienz als auch als zusätzliche Maßnahmen für die Verbesserung der Kundendienstleistung angeboten werden, wobei die technische Funktionalität des Heizkessels bzw. der Verbrennung in der Praxis überwacht werden kann. Beispielsweise können durch das VREM-System die Betriebsstörungen automatisch bei den Anlagenherstellern oder bei ihren zuständigen Dienstleistern über ein spezielles Portal gemeldet und entsprechend schnell beseitigt werden. Diese Option ist für die Anlagenhersteller, vor allem in der Gewährleistungszeit des Produkts wichtig, wodurch besonders kostengünstige Dienstleistungen beim Auftreten von technischen Fehlern oder Betriebsstörungen realisiert werden können. Die permanente Überwachung der Emissionen in Analogie zu großen Verbrennungsanlagen ist zwar technisch und wirtschaftlich realisierbar, aber ihre Umsetzung in der Praxis hängt von der Gesetzgebung ab. Solange keine gesetzlichen Regelungen zur permanenten Überwachung von Kleinfeuerungsanlagen vorhanden sind, können solche Systeme nur hinsichtlich der Verbesserung der Dienstleistung auf Hersteller- und Kundenwunsch ausgeführt werden. Bezüglich des technischen Entwicklungsstands von Kleinfeuerungsanlagen lässt sich die permanente Überwachung sehr gut in alle verbrennungstechnisch automatisierten Heizkessel integrieren. Im Gegensatz zu den herkömmlichen Reglern der Biomasseheizkessel gewährleistet das VREM-System eine bemerkbare Erhöhung der Verbrennungseffizienz im Praxisbetrieb unabhängig von dem eingesetzten Brennstoff bzw. der Verbrennungstechnik, wodurch nicht nur

CO_2-Emissionen, sondern auch Brennstoff und somit Kosten bei den Nutzern eingespart werden können. Dabei ist mit einer zusätzlichen durchschnittlichen CO_2-Einsparung von ca. 4,6 Millionen Tonnen im Jahr zu rechnen, wobei die gesamte CO_2-Einsparung durch den Einsatz von Biomasseheizkesseln zur Bereitstellung von Wärme und Warmwasser im Haushaltsbereich von ca. 29,0 auf 33,6 Millionen Tonnen im Jahr gesteigert werden kann. Die einzusparenden Kosten hängen von der thermischen Leistung des Biomasseheizkessels ab. Dabei können spezifische Kosten zwischen 3,25 € bis 10,30 € pro Kilowatt Anlagenleistung und Jahr eingespart werden. Das heißt, für einen Biomasseheizkessel mit einer thermischen Leistung von 100 kW sind jährliche Kosteneinsparungen von ca. 325 €/Jahr und 1.030 €/Jahr zu erwarten. Dadurch lässt sich das VREM-System im Durchschnitt innerhalb von weniger als drei Jahren amortisieren.

Durch die Umsetzung des VREM-Systems kann im Speziellen mit Hilfe der Emissionsüberwachung ein hohes Umweltschutzniveau gewährleistet werden. Die Vorteile dieses Systems ergeben sich nicht nur für die verantwortlichen Stellen, sondern auch für die Betreiber und Anlagenhersteller. Ein solches System existiert bisher nicht und kann erstmals konkrete Daten über das Betriebsverhalten von Heizkesseln in der Praxis und eine deutlich aussagekräftigere Abschätzung des tatsächlichen Schadstoffpotentials dieser Verbrennungsanlagen erheben. Da es sich bei der permanenten Überwachung nicht um eine stichprobenartige Messung - wie bei der Überwachung durch den Schornsteinfeger - sondern um eine permanente Ermittlung der Verbrennungsqualität über den gesamten Betrieb handelt, welche die stichprobenartige Messung sinnvoll ergänzen soll, kann eine im Vergleich zur heutigen Kontrolle gemäß der 1. BImSchV vollständigere, konsequentere Überwachung und somit eine realistische Bewertung von Biomasseheizkesseln erreicht werden.

Die regelungstechnische Verbesserung der Verbrennung mit dem Einsatz des VREM-Systems (Emissionskantenregelung) wurde ausschließlich für handbeschickte bzw. Vergaserkessel entwickelt und erfolgreich auf dem Prüfstand erprobt. Die Entwicklung der Emissionskantenregelung für die automatisch beschickten Heizkessel steht noch aus und soll in weiteren Projekten durchgeführt werden. Das Gleiche gilt für die Dauererprobung der Emissionskantenregelung sowohl für automatisch als auch für handbeschickte Heizkessel in der Praxis, welche ein wichtiger Überzeugungsfaktor für die Kesselhersteller und ihre Kunden ist. Das VREM-System bietet ein großes Potential für eine umweltverträgliche sowie hocheffiziente Verbrennung und folglich Brennstoff- und Kosteneinsparungen unter praktischen Einsatzbedingungen. Weitere Ziele der Dauererprobung in der Praxis bestehen in der Weiterentwicklung der Regelalgorithmen, dem Testen einer neuen Elektronik der O_2/CO_e-Sonde, der Untersuchung der Stabilität der O_2/CO_e-Sonde über eine lange Betriebszeit und in der Durchführung einer ausführlichen Risikoanalyse. Zusätzlich dazu stellt die Weitererprobung der Emissionsüberwachung sowie der Betriebsbewertung mit einer zentralen und dezentralen Datenspeicherung,

Datenbewertung bzw. Datenübertragung ein wesentliches Ziel der Dauererprobung des VREM-Systems in der Praxis dar.

Summary and Outlook

In parallel to the economy and the environment, a sustainable energy supply on the basis of renewable energies is an important political goal in Germany, where the biomass makes a significant contribution to the supply of energy. In 2016, the energy provided by biomass amounted to around 100 TWh [BMWi 2017]. In view of the Federal Government's energy and climate policy goals, the use of renewable energies such as biomass should be significantly expanded in the future. This is currently particularly necessary in order to meet the mandatory 2020 targets of the Federal Government for which the reduction of at least 40 % of the greenhouse gas emissions is unlikely to be achieved. An essential instrument for this required expansion of biomass is the promotion of innovative technologies for which the provision of energy can be made simpler, more flexible and more efficient , as well as combinable with other technologies.

The thermal utilization or conversion of solid fuels is technically difficult and more demanding compared to liquid and gaseous fuels. In contrast to oil and gas burning technologies, fuel combustion and the user's behavior play a decisive role in combustion quality in addition to the kind of combustion technology. These three factors are crucial to ensure proper operation of the combustion technology or the boiler. From a legal and normative point of view, up to now only the combustion technology and the fuel used have had to comply with certain normative and qualitative requirements. The user remains out of consideration, although he massively influences the operation with his behavior through both the selection of the fuel and operating the combustion system. The normative requirements for the combustion technology are regulated according to DIN EN 303-5 and the Machinery Directive 2006/42/EC. The fuels to be used in small combustion plants are specified in § 1 of the 1st BImSchV, whereas the quality requirements for certain fuels were defined as following: Pellets according to (DIN CERTCO certified fuels, ENplus quality certificate for pellets) and woodchips according to DIN EN ISO 17225-4.

Although the combustion technique has to be checked once during a type-test by a special accredited test laboratory and recurrently by the chimney sweep according to the 4th section of the 1st BImSchV, technical errors may occur in the periods between the periodic inspections, which usually lead to high pollutant emissions and low combustion efficiency. Further operating errors can result from incorrect installation of the combustion technology or from an unfavorable design of the entire heat supply system.

Efficient and low-emission energy production through the thermal utilization of biomass and other biogenous waste and residues requires not only the development and use of modern combustion technologies, but also the use of innovative systems for monitoring the functionality of this technology in

practice, in order to ensure simultaneous economic and ecological use of these fuels without leading to high environmental or health hazards.

In the frame of this research project, an intelligent system (the so-called VREM-System: Combustion Control and Emission Monitoring System) has been developed for improving the combustion control and the permanent monitoring of biomass boilers. The basis of the control technology improvement according to the VREM-System is to operate the combustion system independently of the fuel used and the combustion technology with the lowest possible excess of oxygen without adversely affecting the quality of combustion. As a result, the heat losses due to free heat losses in the exhaust gas and chemical heat losses due to the non-combusted components are reduced, thus the highest possible combustion efficiency is achieved. In addition, the VREM-System also permanently monitors the quality of the combustion by measuring and assessing the non-combusted exhaust gas components (as CO_e-equivalent) and continuously evaluates the overall operation of the boiler in terms of economic, environmental and safety aspects. During the operation monitoring, additional results from thermodynamic calculations as well as operating values from other sensors (mostly pressure and temperature sensors) and other actors (combustion air flaps or blowers) are considered, through which, for example, the operating phases, errors, efficiencies and aspects of operational safety can be evaluated. In the frame of the investigations with the VREM-System, different errors and malfunctions scenarios were simulated, for example, use of unsuitable fuels, technical failures of sensors and actors. These scenarios were considered into the algorithms of the VREM-System. The monitoring algorithms with O_2/CO_e-Sensor were successfully tested on a test bench using two, in practice operated, biomass boilers, one is manually loaded with wood logs and the another is automatically loaded with woodchips. Both the O_2/CO_e-Sensor and the monitoring algorithms have proven very applicable for continuous use in practice.

The data collected during the operation is stored either decentralized in each boiler or centralized on a special server or Big-Data cloud. Technical errors or malfunctions with a detailed cause analysis are reported according to a specific logic by e-mail or SMS and documented accordingly. The two options of data storage and data reporting were implemented and successfully tested within the scope of the project.

Technically, the VREM-System is mainly based on the O_2/CO_e-Sensor (KS1D-Sensor) of the company LAMTEC GmbH & Co. KG. With this Sensor, both the oxygen content and the concentrations of unburned pollutants as CO-equivalents (CO_e) in the exhaust gas are determined during the operation and corresponding signals are generated. The O_2/CO_e-Sensor (KS1D Sensor) was thoroughly investigated for drift behavior and cross-sensitivity using a special device (exhaust gas simulator) at the Fraunhofer Institute for Building Physics IBP. It was also calibrated using different combustible gases (CO, CH_4, H_2, C_3H_8) and other gas mixtures. Calibration curves and calibration levels were determined for the use in biomass boilers. These curves can

provide meaningful data (CO_e-signals) for controlling and monitoring. During the investigation, it has been proven that the CO_e-signals show different sensitivities depending on the type of fuel gas. They have a non-negligible cross-sensitivity to the oxygen content in the exhaust gas. Special algorithms for the calibration levels were developed on the basis of the characterization by means of statistical calculation methods, whereby the concentrations of unburned exhaust gas constituents (as CO-equivalents) are described. To verify the applicability, these functions of the calibration levels were successfully tested in three different biomass boilers using four different KS1D-Sensors. It should be mentioned that the conventional calibration curves of the company LAMTEC GmbH & Co. KG are mainly developed for the use in gas firing systems and are only conditionally applicable for controlling the combustion process in biomass boilers. The O_2/CO_e-Sensor (type KS1D), in contrast to other sensors investigated during the project such as CarboSen-Sensor, has shown a very high measurement stability and -sensitivity through the calibration both on the test bench and in practice. After more than 2,200 hours of operation, the O_2/CO_e-Sensor has exhibited similar measurement sensitivity as in new state.

The O_2/CO_e-Sensor, after the characterization phase, was integrated into a manually fired boiler where the entire development of the VREM-System were carried out using a programmable logic controller (PLC), taking into account the normative requirements. In addition, universal subprograms (control loops) for the emission point control as well as for the permanent monitoring of the emissions of unburned exhaust gas constituents (as CO-equivalent) were developed with a detailed assessment of the operation and successfully validated by the use of different fuels. During the development, high-quality fuels such as beech logs, as well as biogenic residues such as horse manure, grape pomace and fermentation residues were used.

Despite the different qualities and the various combustion characteristics of the fuels used, a stable control with high combustion efficiency (> 94 %) were reached. This is mainly due to controlling the combustion process with lower oxygen excess and avoiding high heat losses via both the unburned components and heat losses in the exhaust gas. The reduction of heat losses in the exhaust gas were achieved, according to the concept of the VREM-System, not only by reducing the excess oxygen or the amount of exhaust gas, but also by monitoring the exhaust gas temperature. For this, the lowest possible exhaust gas temperature (< 180 °C) during the operation was set so that neither the combustion nor the function of the exhaust gas system were adversely affected.

During the investigations carried out on the test bench, various scenarios of operational malfunctions and disruptions were simulated or generated. Meanwhile, the algorithms for emission monitoring, operational evaluation and cause analysis were developed and then tested using different kinds of fuel and operating cases. The emissions during the operation were so monitored that mainly the concentrations of unburned exhaust constituents (as CO_e-equivalent) were determined, whereby the combustion was

qualitatively and quantitatively assessed. The assessment of all recorded parameters was carried out integrally during each combustion phase as well as over the entire operation of the boiler. A further integral evaluation can be conducted over an entire calendar year or a heating season, in which the boiler can be assessed according to ecological, economic and technical aspects. The simulated fault messages were automatically sent to an e-mail server (Fraunhofer-Cloud) and saved chronologically. For an accurate cause analysis and interpretation of the deducted CO_e-values, the settings as well as the operating behavior of the control actors were considered during the development and the investigation on the test bench, which was omitted in practice for technical and legal reasons. The above-mentioned algorithms were successfully tested during the investigations and the simulated operating cases on the test bench and validated accordingly for the use in practice.

Following to the development phase on the test bench, the VREM-System has been integrated into two biomass boilers (automatically and manually fired boilers), which were existing in practice. Over an entire heating season, both boilers had been monitored regarding the emitted emissions on the basis of CO_e-values and consequently the VREM-System had been tested. In both boilers, the emission monitoring worked very well regardless of the setting and the operating behavior of the control actuators. In addition, the VREM-System provided a meaningful assessment of the quality of combustion and operation and simultaneously good information about the service quality of the boiler and the fuels used. In the manually fired boiler, typical operating errors or incorrect operation, such as the use of unsuitable fuels or the use of unfavorable charging regime, were successfully recognized and reported. The same applies to the automatic boiler (woodchip and pellet boiler), whereby the quality of two fuel deliveries could be well recognized and reported despite small differences in the combustion and operating behavior.

The first application for the VREM-System in practice was successfully realized by the company Kutzner and Weber GmbH for investigating the influence of combustion quality on the separation behavior of the dust separator. During the monitoring of a pellet boiler, it was found that unfavorable dimensioning of the entire heating system has a huge impact on the operation of the combustion technology and consequently on the combustion efficiency as well as on the pollutant formation, in practice. In this application example, unfavorable combustion timings were observed where the boiler had been over 20 % of the total operating time in the ember bed operation modus with exorbitantly increased emissions.

For a broad application of the VREM-System and a better exploitation of its numerous economic, environmental, technical and social advantages, it is necessary to create proper legal frameworks and financial incentives for manufacturers, heating technicians and installers and the final consumers, which can be considered in the existing support programs, such as the BAFA funding program.

The VREM-System can be offered both as control measures to improve combustion quality and combustion efficiency and as additional measures to improve the customer service. In addition, the technical functionality of the boiler and the combustion process can be monitored, in practice. For example, errors and malfunctions can automatically be detected by the VREM-System and simultaneously the manufacturers, service provider or the user will be informed via a special portal and accordingly errors can be quickly eliminated. This option is important for the equipment manufacturers, especially during the warranty period of the product, and so low-cost services can be realized if technical errors or malfunctions occur. The permanent monitoring of emissions in analogy to large-scaled combustion systems is technically and economically feasible, but its implementation in practice depends on the legislations. As long as there are no legal regulations for the permanent monitoring of small-scaled combustion systems, such monitoring systems can be implemented with regard to the improvement of the service according to the manufacturer or customer request. Considering the technical development status of small-scaled combustion systems, permanent monitoring can be integrated very well into all automated boilers.

Unlike conventional controlling in biomass boilers, the VREM-System ensures a significant increase in combustion efficiency in practice, regardless of the fuel or the combustion technology used. As a result, not only CO_2-emissions but also fuel consumption are reduced and, hence, savings on costs for users. An additional CO_2-savings of approximately 4.6 million tons per year is to be expected. Moreover, the total CO_2-savings through the use in biomass boilers for the provision of domestic heat and hot water can be increased from 29.0 to 33.6 million tons per year, approximately. The costs to be saved depend on the thermal output of the biomass boiler. An average of yearly specific costs between 3.25 € and 10.30 € per kilowatt of plant output can be saved. This means, annual savings of around 325 and 1,030 €/ year can be expected in a biomass boiler with a thermal output of 100 kW. As a result, the VREM-System can be amortized in less than three years.

The implementation of the VREM-System can ensure high level of environmental protection, in particular, through emission monitoring. The benefits arise not only for the responsible authorities, but also for the operators and plant manufacturers. Such a system does not yet exist and can, for the first time, provide concrete data on the operating behavior of boilers in practice and a much more meaningful estimate of the actual pollutants potential of these combustion systems. The permanent monitoring is not carried out by using a random sample measurement as it is the case in the chimney sweep monitoring. It is a permanent determination of combustion quality during the whole operation time. Compared to today's control of the 1st BImSchV, this type of permanent monitoring can achieve a comprehensive and more consistent monitoring and thus a more realistic assessment of biomass boilers.

The technical control improvement of combustion with the use of the VREM-System (emission point control) was developed exclusively for manually fed boilers and successfully tested on the test bench. The development of the emission point control for automatically fired boilers is still pending and is to be carried out in further projects. The same applies for the endurance testing of the emissions point control for both automatically and manually fired boilers, which is an important convincing factor for boiler manufacturers and their customers for the potential of emission point control to improve combustion efficiency and hence fuel and cost savings under practical conditions. Further objectives of the endurance testing in practice are the further development of the control algorithms, the testing of new electronics of the O_2/CO_e-Sensor, the investigation of the stability of the O_2/CO_e-Sensor over a long period of operation and the execution of a risk analysis. In addition, the further testing of emission monitoring and the operational assessment with centralized and decentralized data storage, data evaluation and data transmission, respectively, constitute an essential objective of the endurance testing of the VREM-System in practice.

Literatur

Aleysa, M.; Leistner, Ph.: Low-Emission-Verbrennungssystem (LEVS) für die Verbrennung von festen Brennstoffen in Vergaserkesseln, Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (03KB093A), Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart 2017, 168 S.

Aleysa, M.; Leistner, Ph.: Verbesserung des Verbrennungs- und Emissionsverhaltens in biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen durch den Einsatz spezieller Einbauten, Abschlussbericht eines von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) geförderten Projekts, FKZ: 13NR104, Stuttgart 2016, 162 S.

Aleysa, M: Innovatives Konzept zur regelungstechnischen Optimierung der Verbrennung und permanenten Überwachung des Betriebs von Biomassekleinfeuerungsanlagen der 1. BImSchV, Anlagenbezogenes Monitoring, Neue Anforderungen - Neue Konzepte, VDI Bericht 2215/2014, ISSN 0083-5560, ISBN 978-3-18-092215-7, VDI Verlag GmbH, S. 87-115.

Aleysa, M.; Weclas, M.; Leistner, Ph.: Korrelation der Filter-ReAktoren-Architektur mit thermophysikalischen Funktionsbedingungen zur Erforschung und Entwicklung eines nicht-katalytischen 3D-porösen Filter-ReAktoren-Systems für biomassebetrieben Kleinfeuerungsanlagen, Abschlussbericht eines von der deutschen Bundesstiftung (DBU) geförderten Projekts, AZ 30550, Stuttgart 2015, 59 S.

Bruhn, K. Entwicklung der Brennstoffpreise von 2008 bis 2018 – LandSchaftEnergie, Technologie- und Förderzentrum (TFZ), TFZ-Merkblatt: 18WBBr002, Stand: Januar 2018, 2 S.

Europäische Umweltagentur (EAA): Air quality in Europe – 2017 report, EEA Report No 13/2017, European Environment Agency, Publications Office of the European Union, Luxembourg 2017,80 S.

Gedamke, R.: Alle Rohre – Feuer frei! Ursachen von Schornsteinbränden, SHKProfi Online-Portal für das SHK-Handwerk, http://www.shk-profi.de/artikel/shk_Alle_Rohrea_Feuer_frei__1485073.html, Berlin, Beitrag vom 23.11.2012, zuletzt aufgerufen am 16.08.2018

Joos, F.: Technische Verbrennung, Springer-Verlag, 1. Auflage, Berlin-Heidelberg 2006, 907 S.

Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H.: Energie aus Biomasse – Grundlagen, Technik und Verfahren, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-662-47438-2, Berlin Heidelberg 2009, 1030 S.

Klippel, N.; Nussbaumer, Th.: Feinstaubbildung in Holzfeuerungen und Gesundheitsrelevanz von Holzstaub in Vergleich zu Dieselruß, 9. Holzsymposium, Zürich 2006, S. 21-40.

Löschau, M.: Reinigung von Abgasen, TK Verlag Karl Thomé Kozmiensky, ISBN 978-3-944310-13-8, Neuruppin 2014, 476 S.

Marutzky, R; Seeger, K.: Energie aus Holz und anderer Biomasse, DRW-Verlag, Stuttgart 2002, 352 S.

N. N.: Faktenblatt Emissionsfaktoren Feuerungen, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien, Schweizer Eidgenossenschaft, 2015, 4 S.

N. N.: Erneuerbare Energien in Zahlen, Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2016, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi, München 2017, 80 S.

N. N.: Emissionsminderung bei Kleinfeuerungsanlagen, Homepage des Umweltbundesamts (UBA), https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/strategien-zur-emissionsminderung-von/emissionsminderung-bei-kleinfeuerungsanlagen#textpart-1, Beitrag vom 17.04.2018, zuletzt aufgerufen am 16.08.2018

N. N.: CO_2-Emissionen pro Kilowattstunde Strom sinken weiter, Homepage des Umweltbundesamts (UBA), https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-sinken, Beitrag vom 18.05.2018, zuletzt aufgerufen am 03.09.2018

N. N.: Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks 2017, Schornsteinfeger Handwerk - Das Magazin des Bundesverbandes 6 (2018), Zusatzmagazin des Bundesverbands des Schornsteinfegerhandwerks – Zentralverband (ZIV), 14-15

N. N.: Homepage der Statista GmbH, Angaben basieren auf den Informationen vom Umweltbundesamt, https://de.statista.com/statistik/daten/studie/12189/umfrage/co2-emissionen-durch-haushalte-in-deutschland-seit-1990/, zuletzt aufgerufen am 03.09.2018

N. N.: Wirtschaftsmotor Biogas, Homepage des Fachverbands Biogas, https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/de-wirtschaftsmotor-biogas, zuletzt aufgerufen am 31.08.2018

N. N.: Pressemitteilung vom Deutschen Biomasse Forschungszentrum DBFZ zum Leipziger Fachgespräch Feste Biomasse thematisiert die energetische Nutzung von Gärresten aus Biogasanlagen, https://www.dbfz.de/presse/pressemitteilungen-2018/leipziger-fachgespraech-feste-biomasse-thematisiert-die-energetische-

nutzung-von-gaerresten-aus-biogasanlagen.html, Beitrag vom 17.01.2018, zuletzt aufgerufen am 31.08.2018

N. N.: Homepage der Schutzgemeinschaft Deutscher Wald SDW, https://www.sdw.de/waldwissen/wald-in-deutschland/waldanteil/, zuletzt aufgerufen am 03.09.2018

Oechsner, H.; Mönch-Tegeder, M.; Frey, M.: Weiterentwicklung von Technologien zur effizienten Nutzung von Pferdemist als biogener Reststoff und Test im Praxisbetrieb, Endbericht eines vom BMWi geförderten Forschungsprojekts (FKZ: 03KB064), 189 S.

Oser, M.; Nussbaumer, Th.; Müller, P.; Mohr, M.; Figi, R.: Grundlagen der Aerosolbildung in Holzfeuerungen, Forschungsbericht, Projektnummer 26688; Bern (2003), 97 S.

Schmid, C., Baumgartner, T., Nipkow, J., Vogt, C.: Heizung/Lüftung/Elektrizität: Energietechnik im Gebäude (Bau und Energie), ISBN-10: 3728137472, Auflage 2016, 208 S.

Schultes, M.: Abgasreinigung, Verfahrensprinzipien, Berechnungsgrundlagen, Verfahrensvergleich, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996, 243 S.

Weisser, K.: Hätten Sie´s gewusst? – Interessante Zahlen rund um das Schornsteinfegerhandwerk, Fachbeitrag im Schornsteinfeger Handwerk Magazin, Ausgabe 10/2017, S. 23 – 26

Schardt, M., Hartmann, H., Höldrich, A., Zornmaier, F.: Produktionsaufwand für Scheithölzer – Analyse verschiedener Verfahren, Homepage der Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, LWF, https://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/holz/energie/lwf_produktion_scheitholz/index_DE, Beitrag vom 08.07.2016, zuletzt aufgerufen am 03.09.2018

Schubert, H.; Winkler, E.; Brendel, R.: Verbrennungslehre, Fachbuchverlag Leipzig, Berlin 1959, 251 S.

Schwister, K.: Taschenbuch der Umwelttechnik, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, Leipzig 2009, 501 S.

Wiegleb, G.: Gasmesstechnik in Theorie und Praxis – Messgeräte, Sensoren, Anwendung, Springer Vieweg, Springer Fachmedien Wiesbaden 2016, 1331 S.

Uhl, C.: Untersuchung zur Eignung von Pferdemist als Biomassebrennstoff, Dissertation, Munich School of Engineering Technische Universität München, München 2017, 207 S.

VDI-Richtlinie 4207 Blatt 2, Messen von Emissionen an Kleinfeuerungsanlagen, Messen an Anlagen für feste Brennstoffe, Juli 2016, 88 S.

Zeng, T., Lang, S., Schneider, A., von Sonntag, J., Ulbrich, T., Lenz, V.: Thermische Nutzung von Traubentresterpellets in Kleinfeuerungsanlagen < 100 kW, Abschlussbericht, Leipzig, 2012, 61 S

DIN EN 303-5:2012-10, Heizkessel für feste Brennstoffe, manuell und automatisch beschickte Feuerungen, Nennwärmeleistung bis 500 kW - Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung; Deutsche Fassung EN 303-5:2012.

DIN EN 13240:2005-10, Raumheizer für feste Brennstoffe - Anforderungen und Prüfungen, Deutsche Fassung EN 13240:2001 + A2:2004

Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt, Homepage vom Bundesamt für Wirtschaft und Energie, Stand 11.03.2015