

Abschlussbericht

INTELLIGENTE TEMPERATURBASIERTE VERBRENNUNGSREGELUNG ZUR SCHADSTOFFMINDERUNG UND EFFIZIENZERHÖHUNG IN HANDBESCHICKTEN BIOMASSEFEUERUNGEN GEMÄß DIN EN 13240, DIN EN 13229 UND DIN EN 12815

von

Dr.-Ing. Mohammad Aleysa, Prof. Dr. Philip Leistner

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Förderkennzeichen: L75 19008

Laufzeit: 15.11.2019 – 31.08.2022

Finanziert aus Landesmitteln, die der Landtag Baden-Württemberg beschlossen hat.

September 2022



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Inhaltsverzeichnis

1	Thematischer Hintergrund	8
2	Ziel und Inhalt des Projekts	12
3	Stand der Wissenschaft und der Technik	14
3.1	Allgemeines	14
3.2	Immissionsschutzrechtliche Anforderungen an Einzelraumfeuerungsanlagen in Deutschland und Europa	16
3.3	Emissionsanforderungen gemäß „Blauer Engel“	18
3.4	DIN/TS 18843 Häusliche Feuerstätten für feste Brennstoffe mit Verbrennungslufteinrichtung	21
3.4.1	DIN/TS 18843-1 Teil 1: Elektrisch betriebene, temperaturgeführte Verbrennungslufteinrichtungen	21
3.4.2	DIN/TS 18843-4 Teil 4: Zusatzfunktionen von Verbrennungslufteinrichtungen	22
3.5	Grundlagen zur Verbrennung und Schadstoffbildung	23
3.5.1	Thermochemische Umwandlung fester Brennstoffe	23
3.5.2	Schadstoffbildung und primäre Reduktionsmöglichkeiten	26
3.6	Überblick über Einzelraumfeuerungsanlagen und ihre betrieblichen Besonderheiten	31
3.6.1	Betriebliche und konzeptionelle Besonderheiten von Einzelraumfeuerungsanlagen	31
3.6.2	Einfluss des Schornsteins auf den Betrieb der handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen in der Praxis	35
3.6.3	Problematik bei handbeschickten Einzelraumfeuerungen für eine vollständige Verbrennung	36
3.6.4	Abbrand- und Verbrennungsluftzufuhrkonzepte bei handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen	39
3.7	Vermeidung und Maßnahmen zur Verminderung von Emissionen in Einzelraumfeuerungsanlagen	42
3.7.1	Präventive Emissionsminderungstechnologien	43
3.7.2	Primäre bzw. integrierte Emissionsminderungstechnologien	44
3.7.3	Sekundäre bzw. nachgeschaltete Abgasbehandlungstechnologien	47
3.8	Stand der Technik im Bereich der Verbrennungsregelung	47
4	Verbrennungslufteinrichtung des Fraunhofer IBP nach DIN EN 13240	51
4.1	Funktionsprinzip der Verbrennungslufteinrichtung des Fraunhofer IBP	51
4.2	Technischer Aufbau der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP	55
4.3	Charakteristika und Besonderheiten der Verbrennungslufteinrichtung des Fraunhofer IBP	62

5	Übertragung der Verbrennungsregelung auf weitere handbeschickte Einzelraumfeuerungsanlagen gemäß DIN EN 13240, DIN EN 13229, DIN EN 12815 – bauliche Maßnahmen	63
5.1	Prototyp Kamineinsatz nach DIN EN 13229 (Kalfire – 15 kW – 3 Luftströme)	64
5.2	Prototyp Holzherd nach DIN EN 12815 (Universal-Brennraum – 10 kW – 3 Luftströme)	67
5.3	Freistehender Raumheizer nach DIN EN 13240 (Fa. Max Blank Typ: KO2-S2 – Modell Atlanta WF – 10 kW – 1 Belimomotor – 2 Luftströme)	70
6	Übertragung der Abbrand-Regelung auf weitere handbeschickte Einzelraumfeuerungsanlagen gemäß DIN EN 13240, DIN EN 13229, DIN EN 12815 – softwareseitige Anpassung bzw. Parametrierung	72
6.1	Technische Messeinrichtungen zur Versuchsdurchführung	79
6.2	Parametrierung und erzielte Ergebnisse mit einem freistehenden Raumheizer nach DIN EN 13240 mit integrierter Abbrand-Regelung (Fa. Max Blank Typ: KO2-S2 – Modell Atlanta WF – 10 kW – 1 Belimomotor – nur 2 Luftströme)	80
6.3	Parametrierung und erzielte Ergebnisse mit einem Kamineinsatz nach DIN EN 13229 mit integrierter Abbrand-Regelung (Kalfire – 15 kW – 3 Luftströme)	83
6.4	Parametrierung und erzielte Ergebnisse mit einem Holzherd nach DIN EN 12815 mit integrierter Abbrand-Regelung (Universal-Brennraum – 10 kW – 3 Luftströme)	85
6.5	Übertragung der Verbrennungslufteinrichtung auf einen Speicherofen nach DIN EN 15250	90
7	Verwertung der Forschungsergebnisse und Ausblick	91
8	Zusammenfassung	95

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Primärenergieverbrauch in Deutschland 2018 [Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen 2019].	9
Abbildung 2:	Vereinfachte Form für die thermische Umwandlung biogener Festbrennstoffe mit der Schadstoffbildung.	27
Abbildung 3:	Betriebliche, verbrennungstechnische und konzeptionelle Besonderheiten von Einzelraumfeuerungsanlagen hinsichtlich der Auslegung von integrierten Technologien zur Schadstoffminderung.	32
Abbildung 4:	Parameter für eine vollständige Verbrennung.	36
Abbildung 5:	Schematische Darstellung der Abbrandprinzipien mit den Möglichkeiten für die Luftzufuhr bei handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen.	41
Abbildung 6:	Hierarchie zu einer ökonomischen und ökologischen Reduzierung von Schadstoffemissionen.	42
Abbildung 7:	Intelligent Heat System (IHS) der Firma HWAM [Quelle: http://hwam.de/vorteile/autopilot+ihs+--automatic/autopilot+ihs].	49
Abbildung 8:	Gesamtluft-Regelklappe der Firma Kutzner und Weber GmbH [Quelle: http://www.shk-profi.de/imgs/101083731_d8667d1462.jpg].	50
Abbildung 9:	Schematische Darstellung des Regelungskonzepts der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP zur Regelung und Bewertung des Verbrennungsprozesses.	55
Abbildung 10:	Verbrennungsluftverteilungssystem des Fraunhofer IBP.	57
Abbildung 11:	Verbrennungsluftverteilungssystem bzw. Grundplatte inklusive der Komponenten der Abbrand-Regelung.	57
Abbildung 12:	Temperatursensoren mit unterschiedlichen Längen.	58
Abbildung 13:	Eingesetzter Servomotor-Typ.	58
Abbildung 14:	Ofencontroller-Platine KSB.207.26 (links: Platine; rechts: Beschreibung der Bestückung der Platine).	59
Abbildung 15:	Schnitt einer Konstruktionszeichnung eines freistehenden Raumheizers nach DIN EN 13240 mit integrierter Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP zur Regelung von drei separaten Verbrennungsluftströmen (Rostluft=RL= von der Unterseite in das Glutbett kommend; Scheibenspülluft=SSL= von oben nach unten entlang der Sichtscheibe kommend; Sekundärluft=SL= von der Rückwand des Verbrennungsraumes kommend).	61
Abbildung 16:	Abbrand-Regelung für unterschiedliche Einzelraumfeuerungsanlagentypen (freistehende Raumheizer nach DIN EN 13240, Kamineinsätze nach DIN EN 13229, Holzherde nach DIN EN 12815).	63
Abbildung 17:	Umbaumaßnahmen für eine sachgemäße und funktionale Integration der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP in einen Kamineinsatz gemäß DIN EN 13229.	65
Abbildung 18:	Neugestaltung und Anordnung der Verbrennungsluftströme zur Installation der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP basierend auf einer CAD-Konstruktionszeichnung (SSL – räumlich getrennter	

	Scheibenspülluftzufuhrkanal; RL – räumlich getrennter Rostluftzufuhrkanal; SL – räumlich getrennter Sekundärluftkanal).....	66
Abbildung 19:	Kamineinsatz nach DIN EN 13229 Prototyp 2.0 mit integrierter vertikal angeordneter Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP.	67
Abbildung 20:	Neugestaltung und Anordnung der Verbrennungsluftströme zur Installation der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP basierend auf einer CAD- Konstruktionszeichnung (SSL – räumlich getrennter Scheibenspülluftzufuhrkanal; RL – räumlich getrennter Rostluftzufuhrkanal; SL – räumlich getrennter Sekundärluftkanal).....	68
Abbildung 21:	Prototypen Holzherd DIN EN 12815.	69
Abbildung 22:	Neuartige bzw. angepasste Verbrennungsluftverteilungsbox mit der Regelung der einströmenden Verbrennungsluft über Schieber mit einem Belimomotor.....	70
Abbildung 23:	Montage der Abbrand-Regelung an den freistehenden Raumheizer nach DIN EN 13240 mit nur zwei Luftströmen.....	71
Abbildung 24:	Optimale Positionierung des Thermoelements ca. 10 cm im ersten Abgaszug in verschiedenen Einzelraumfeuerungsanlagen.	76
Abbildung 25:	Visualisierung für eine zielgerichtete Entwicklungsarbeit, mit welcher die wichtigsten Parameter der Abbrand-Regelung und des aktuellen Verbrennungsprozesses anschaulich dargestellt werden.	81
Abbildung 26:	Erste Abbrände auf dem Teststand mit integrierter Abbrand-Regelung (Belimo-Version) des Fraunhofer IBP in die Verbrennungsanlage von Max Blank (nur zwei Luftströme).	82
Abbildung 27:	Integration der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP in einen Holzherd gemäß DIN EN 12815 (links: Inbetriebnahme bzw. erste Abbrände in der Versuchsanlage mit Abbrand-Regelung und Funktionstest der Herdplatte; rechts: auf der Rückseite integrierte Grundplatte mit parametrierter Abbrand-Regelung).....	86
Abbildung 28:	Wärmebild der Herdplatte zur Visualisierung der Wärmeverteilung auf dem Kochfeld.....	87

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1:	Verläufe mittlerer Temperaturen im Feuerraum sowie in der Abgasanlage (Tripelpunkttemperatur) einer handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlage im Nennlastbetrieb.	34
Diagramm 2:	Typisches Abbrandverhalten in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen.	38
Diagramm 3:	Verlauf der Abgastemperatur eines Abbrands in einer Einzelraumfeuerungsanlage mit fixer bzw. manueller Lufteinstellung.	52
Diagramm 4:	Verlauf der Abgastemperatur eines Abbrands in einer Einzelraumfeuerungsanlage ohne und mit geregelter Lufteinstellung.	53
Diagramm 5:	Für die Berechnung des Sauerstoffgehalts eingesetzte Korrekturfaktoren bzw. Darstellung der Abhängigkeit und Auswirkung auf die Sauerstoffberechnung.	73
Diagramm 6:	Aufgezeichnete Abgastemperatur eines Abbrands mit Thermoelementen an unterschiedlichen Positionen in einem Kaminofen.	75
Diagramm 7:	Sauerstoffgehalt im Abgas SOLL/IST-Vergleich vor der Parametrierung.	78
Diagramm 8:	Sauerstoffgehalt im Abgas SOLL/IST-Vergleich nach der Parametrierung.	79
Diagramm 9:	Aufgezeichneter Emissionsverlauf während eines Betriebs über insgesamt acht Brennstoffauflagen mit einem Kamineinsatz gemäß DIN EN 13229 mit integrierter Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP.	85
Diagramm 10:	Aufgezeichneter Emissionsverlauf während eines Betriebs über insgesamt sieben Brennstoffauflagen mit einem Holzherd gemäß DIN EN 12815 ohne Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP bzw. mit fixer Lufteinstellung.	89
Diagramm 11:	Aufgezeichneter Emissionsverlauf während eines Betriebs über mehrere Brennstoffauflagen mit einem Holzherd gemäß DIN EN 12815 mit integrierter parametrierter Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP bzw. bedarfsgerechter Verbrennungsluftzufuhr.	90

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Unterschiedliche Arten von Einzelraumfeuerstätten gemäß Anlage 4 der 1. BImSchV.....	14
Tabelle 2:	Emissionsgrenzwerte und Mindestwirkungsgrad bei Einzelraumfeuerungsanlagen gemäß der ersten und zweiten Stufe der 1. BImSchV.....	17
Tabelle 3:	Emissionsgrenzwerte und Jahresnutzungsgrad bei Einzelraumheizgeräten für feste Brennstoffe gemäß Ökodesign-Richtlinie.	18
Tabelle 4:	Maximalwerte für Emissionen und Prüfmethode des Umweltzeichens „Blauer Engel“.	19
Tabelle 5:	Kopplungsbedingtes Verhältnis beider Klappen zueinander.	56
Tabelle 6:	Ergebnistabelle der gemessenen Leistungs- und Emissionsparameter beim Einsatz ohne und mit integrierter parametrierter Abbrand-Regelung in einem freistehenden Raumheizer nach DIN EN 13240 mit zwei Luftströmen.....	82
Tabelle 7:	Ergebnistabelle der gemessenen Leistungs- und Emissionsparameter beim Einsatz ohne und mit integrierter parametrierter Abbrand-Regelung in einem Kamineinsatz nach DIN EN 13229.	84
Tabelle 8:	Ergebnistabelle der gemessenen Leistungs- und Emissionsparameter beim Einsatz ohne und mit integrierter parametrierter Abbrand-Regelung in einem Holzherd nach DIN EN 12815.	88

1 Thematischer Hintergrund

Die Bereitstellung von ökonomischen und ökologischen Quellen zur sicheren Energieversorgung in Deutschland ist ein wesentliches politisches Ziel und stellt eine der höchsten Prioritäten der Energiewirtschaft in Deutschland dar. Regenerative Energiequellen, vor allem Windkraft, Photovoltaik und Biomasse, sollen einen großen Beitrag zur Deckung des Energiebedarfs besonders angesichts der kommenden Energiewende in Deutschland leisten. Von den genannten Energiequellen ist die Biomasse der vielseitigste erneuerbare Energieträger mit weitentwickelter Infrastruktur. Biomasse lässt sich in fester, flüssiger und gasförmiger Form energetisch verwerten, wodurch die Biomasse als Bestandteil der zukünftigen Energiebereitstellung aktiv zum Klimaschutz und zur Realisierung der nationalen Nachhaltigkeitsziele beitragen kann.

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. Aktuell und mit der Änderung des Klimaschutzgesetzes beschlossen sollen gleichzeitig die Ziele für den Klimaschutz bzw. die Minderung von Treibhausgasemissionen um mindestens 65 % bis zum Jahr 2030 und 88 % bis zum Jahr 2040 eingehalten werden. Bis zum Jahr 2045 soll für Deutschland eine Treibhausgasneutralität erreicht 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 deutlich unter 2°C, möglichst jedoch auf 1,5°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau 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.

Der Ausbau der thermischen Verwertung der Biomasse durch Biomassefeuerungen stellt eine wichtige Methode bzw. Technik dar, die für die Versorgung von Haushalten und vielen Gewerbebetrieben mit Wärme und Warmwasser verwendet wird. Vom gesamten Primärenergieverbrauch (ca. 13,1 EJ) in Deutschland lassen sich etwa 13,8 % (entspricht ca. 1,8 EJ) auf erneuerbare Energien zurückführen. Der Hauptanteil bzw. 46 % der verbrauchten erneuerbaren Primärenergie basiert auf fester und gasförmiger Biomasse [BMWi 2019], wie in Abbildung 1 dargestellt. Im gesamten Wärmemarkt und speziell im Gebäudebereich beträgt der Anteil der Biomasse an den erneuerbaren Energien fast 90 %, wovon ein großer Anteil aus biogenen Festbrennstoffen

stammt [BMWi 2015]. Da die Nutzung von Biomasse für die Wärmebereitstellung sowohl im privaten als auch industriellen Sektor eine Schlüsselrolle einnimmt, soll der Ausbau der energetischen Nutzung von Biomasse auch zukünftig gestärkt werden.

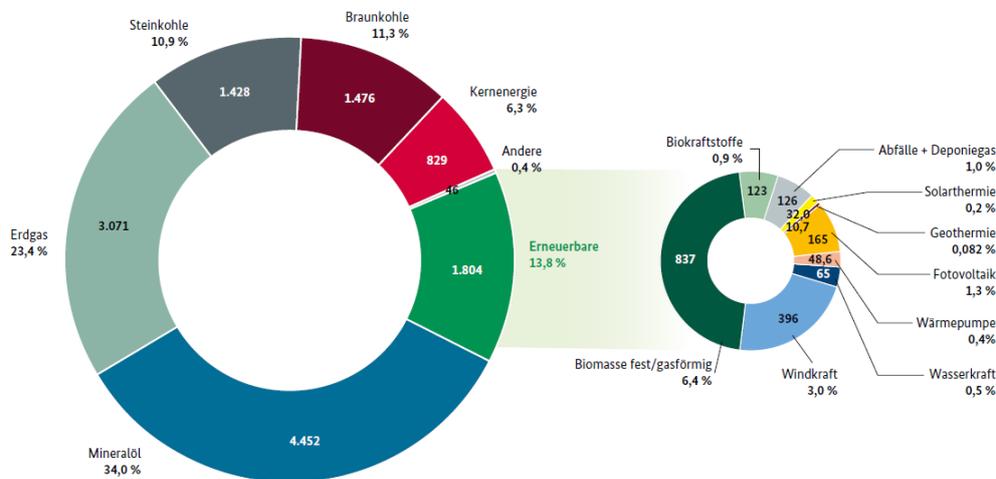


Abbildung 1: Primärenergieverbrauch in Deutschland 2018 [Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen 2019].

Im Zuge der nicht vorhersehbaren und aktuell andauernden Ukraine-Krise wurde die energiepolitische Situation in Deutschland wesentlich beeinflusst. Die Energieversorgung in deutschen Haushalten ist im Rahmen der angespannten energiepolitischen Situation nicht auf die Krisenzeiten vorbereitet und die Anzahl an Holzverbrennungsanlagen im Haushaltsbereich erfährt dadurch aktuell einen sehr starken Zuwachs. Gemäß den Angaben des Bundesverbands der Deutschen Heizungsindustrie (BDH) ist die Nachfrage nach Biomassegeräten (Pellet-, Scheitholz- und Hackschnitzelöfen) bereits im Zuge der Corona-Krise im Jahr 2021 gegenüber dem Vorjahr um 41 % gestiegen. Im Jahr 2022 wird mit einer noch höheren Nachfrage zu rechnen sein, die einerseits durch die näher rückende Übergangsfrist der ersten Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) im Jahr 2024, die den Austausch alter Feuerungsanlagen weiter vorantreibt und andererseits mit der aktuellen Ukraine-Krise, die immer mehr Verbraucher dazu bewegt sich mit dem Thema Versorgungssicherheit zu befassen um Alternativen für das Heizen mit den sich durch die Krise stark verteuerten konventionellen fossilen Energieträgern wie Gas und Öl zu finden, zu begründen ist.

Wesentliche Vorteile bei der energetischen Nutzung von Biomasse bestehen darin, dass bei einer thermischen Umwandlung nur so viel Kohlenstoffdioxid emittiert wird, 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. Durch den Einsatz von Biomasse lassen sich 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.

Es gilt zu beachten, dass der Einsatz von Biomasse einerseits viele Vorteile bieten kann, jedoch andererseits bei unsachgemäßer Nutzung toxikologisch relevante Luftschadstoffe bei der Verbrennung entstehen, welche für die Menschen und die Umwelt gefährlich sein können. Eine vermehrte Nutzung von Biomasse sollte nicht zu einer Erhöhung der Schadstoffemissionen in unserer Atmosphäre bzw. zu einer Verschlechterung der Luftqualität führen. Zur Vermeidung von negativen Wechselwirkungen auf die Gesundheit und die Umwelt durch die Konzentrierung von Luftschadstoffen wurden im Rahmen der sogenannten NEC-Richtlinie (EU) 2016/2284 (National Emission Ceilings Directive) bestimmte Verpflichtungen zur Minderung einiger Luftschadstoffe (Schwefelverbindungen (angegeben als SO₂), Stickstoffoxide (NO_x), Ammoniak (NH₃), flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC) und Feinstaub (PM_{2,5})) an die Mitgliedstaaten der europäischen Union gestellt. Die Bundesrepublik Deutschland hat mit der Einführung der 43. BImSchV die NEC-Richtlinie (EU) 2016/2284 in nationales Recht überführt. Damit besteht beispielsweise die Verpflichtung, die Emissionen an NO_x um 65 %, an PM_{2,5} um 43 % und an NMVOC um 28 % gegenüber dem Jahr 2005 zu verringern. Die Mitgliedstaaten müssen außerdem in regelmäßigen Abständen über die Entwicklung der Luftschadstoffemissionen in ihren Ländern berichten. Spezifische Emissionsgrenzwerte und technische Anforderungen werden u.a. durch die europaweit geltenden Ökodesign-Verordnungen (z.B. EU 2015/1185 für die umweltgerechte Gestaltung von Festbrennstoff-Einzelraumheizgeräten) definiert.

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. Handbeschickte Einzelraumfeuerungsanlagen zur Bereitstellung von Wärme und Warmwasser in deutschen Haushalten stellen ca. 92 % der Gesamtfeuerungsanlagen (ca. 11 Mio. Anlagen) dar und zählen zu den Hauptquellen für unterschiedliche toxikologische und klimarelevante Schadstoffe bzw. staub- und gasförmige Schadstoffemissionen wie z. B. Feinstaub, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, flüchtige organische Verbindungen, Kohlenstoffmonoxid und sonstige Schadstoffe. Diese Schadstoffe können sich gesundheits- und klimagefährdend auf die Umwelt bzw. auf das gesamte Ökosystem auswirken. Besonders wichtig dabei sind die nicht verbrannten staub- und gasförmigen Emissionen, welche aufgrund ihrer hohen biologischen Reaktivität zu einer Vielzahl von negativen Umweltauswirkungen sowie Gesundheitsgefährdungen führen können.

In handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen entstehen die Schadstoffe und die klimarelevanten Emissionen überwiegend durch eine unvollständige Verbrennung, welche meistens durch eine Fehlbedienung der Feuerungsanlagen verursacht werden. Die Fehlbedienung in diesem Zusammenhang ergibt sich

hauptsächlich aus einer falschen Einstellung der Verbrennungsluftzufuhr oder aus dem Einsatz ungünstiger Brennstoffe sowie aus einer Missachtung der empfohlenen Angaben der Hersteller, die nur für ein bestimmtes Beschickungsregime (Brennstoffart, Anzahl, Größe und Anordnung der Scheite im Brennraum usw.) gelten. Auch bei einer sachgemäßen Bedienung der Feuerungsanlage gemäß Herstellerangaben lässt sich eine schadstoffarme und effiziente Verbrennung aufgrund fehlender Regelung des Verbrennungsprozesses bzw. der Verbrennungsluftzufuhr nur bedingt und in einem engen Betriebsbereich erreichen.

Neue nationale Umsetzungen von EU-Emissionsrichtlinien für Biomassefeuerungsanlagen (Ökodesign-Richtlinie für Kleinfeuerungen) sowie neu eingeführte Umweltzeichen wie z. B. „Blauer Engel“ werden mittelfristig zu deutlich strengeren Emissionsanforderungen führen. Der Ausstoß von Partikeln (Feinstaub) und Kohlenstoffmonoxid, aber auch weiteren Schadstoffen wie NO_x und gasförmigen organischen Kohlenstoffverbindungen (OGC) muss weiter reduziert werden, um Umweltvorgaben zu erfüllen und drohende kommunale Feuerungsverbote für holzfeuernde Kleinfeuerungsanlagen zu vermeiden. Für eine effektive und nachhaltige Schadstoffminderung in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen bzw. nachhaltige Verbesserung des Verbrennungs- und Emissionsverhaltens sind konzeptionelle, konstruktive und regelungstechnische Maßnahmen gemäß dem Stand der Technik zu praktizieren. Steuer- und Regelungslösungen zur Verbesserung des Brennverlaufes bzw. des Abbrands in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen stellen in Kombination mit den konzeptionellen und konstruktiven Maßnahmen sowie integrierten Technologien eine neuartige Lösung bzw. Primärmaßnahme zur Verbesserung des Verbrennungs- und Emissionsverhaltens dar.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde eine Abbrand-Regelung von einem individuellen Einsatz für einen universellen Einsatz in unterschiedlichen Typen von Einzelraumfeuerungsanlagen weiterentwickelt und erprobt. Die durch das Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelte T2O_2 -Abbrand-Regelung wurde sowohl softwareseitig parametrisiert, als auch hardwareseitig adaptiert, sodass die intelligente temperaturbasierte Abbrand-Regelung zur Schadstoffminderung und Effizienzerhöhung auch in unterschiedlichen Typen von handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen einsetzbar ist. Dadurch wird eine Kompatibilität mit nahezu allen verfügbaren Feuerungsanlagen im Marktsegment der Einzelraumfeuerungsanlagen ermöglicht.

2 Ziel und Inhalt des Projekts

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts wurde ein bereits bestehendes individuelles Abbrand-Regelsystem ausschließlich für Raumheizer nach DIN EN 13240, die sogenannte T2O₂-Regelung, welche auf der Grundlage der Energiebilanzmethode basiert und bereits Teil einer Entwicklung aus vorangegangenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist, für einen universellen und breiten Einsatz in unterschiedlichen Anlagentypen von Einzelraumfeuerungsanlagen weiterentwickelt. Die intelligente temperaturbasierte Abbrand-Regelung wurde für den Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen weiterentwickelt und in verschiedenen Typen von handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen erprobt. Die universelle und parametrierbare Abbrand-Regelung gewährleistet sowohl eine schadstoffarme, als auch eine effiziente und vor allem sichere Energieerzeugung sowie –nutzung. Folgende Arbeitsschritte sind zur Erreichung des Projektziels notwendig:

- Für eine erfolgreiche Umsetzung wurde zunächst eine bestehende Einzelraumfeuerungsanlage so modifiziert bzw. umgebaut, sodass die Abbrand-Regelung mit allen dafür notwendigen Sensoren integriert werden konnte. Im Anschluss daran, wurde die Versuchseinrichtung (Versuchsanlage, Messsysteme, Datenerfassung usw.) unter Beachtung der Anforderungen der jeweiligen Normen aufgebaut, d. h. der Teststand wurde gemäß DIN EN 13240, DIN EN 13229, DIN EN 15250 sowie DIN EN 12815 errichtet. Auf diese Weise konnten die Verbrennungsversuche und die dazugehörigen Untersuchungen unter bekannten und reproduzierbaren Betriebsbedingungen mit hoher Vergleichbarkeit durchgeführt werden.
- Nach einer technischen Analyse der Konstruktionen sowie der Verbrennungskonzepte der auf dem Markt vorhandenen handbeschickten Feuerungsanlagen wurden Faktoren bestimmt, welche den Verbrennungsprozess mit den Betriebsrahmenbedingungen beschreiben und eine schnelle und intuitive Anpassung der Software ohne Änderung der Programmierung ermöglichen. Hierbei wurde die Struktur der Software sowie die parametrierbaren Algorithmen mit den Kalibrierkurven festgelegt. Anschließend ist eine weitere Präzisierung und Entwicklung der Software unter Beachtung der jeweiligen Kalibrierkurven für die unterschiedlichen Feuerungsanlagentypen erfolgt, womit speziell Betriebsbesonderheiten und –bedingungen berücksichtigt wurden.
- Abschließend wurde die universelle parametrierbare Abbrand-Regelung in vier unterschiedliche Arten von Einzelraumfeuerungsanlagen gemäß DIN EN 13240, DIN EN 13229, DIN EN 15250 und DIN EN 12815 integriert und sowohl auf dem Prüfstand unter Berücksichtigung der Prüfnormen der jeweilig eingesetzten Einzelraumfeuerungsanlagen als auch unter praxisnahen Bedingungen im Technikum des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP untersucht. Dabei (sowohl auf dem Prüfstand als auch im praxisnahen Betrieb) sind experimentelle Untersuchungen zum Abbrandverhalten, zum Verbrennungsverhalten, zum

strömungstechnischen Verhalten, zur Effizienz und zum Emissionsverhalten durchgeführt worden. Nach der Präzisierung und Anpassung der Software an die Feuerungsanlagentypen und anhand der gesammelten Erfahrungen und Messdaten aus dem praxisnahen Betrieb wurde die Software weiterentwickelt und optimiert, sodass die im Praxisbetrieb beobachteten technischen Fehler (soft- und hardwaretechnisch) beseitigt und eine vollständige Funktionsfähigkeit gewährleistet werden kann.

3 Stand der Wissenschaft und der Technik

In diesem Kapitel werden Einzelraumfeuerungsanlagen generell beschrieben, die immissionsschutzrechtlichen Anforderungen an Einzelraumfeuerungsanlagen in Deutschland und Europa dargestellt und die Grundlagen der Biomasseverbrennung und der Schadstoffbildung mit den primären Reduzierungsmöglichkeiten, Problematiken in handbeschickten biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen und die bisher bekannten integrierten Technologien zur Schadstoffminderung und Effizienzerhöhung veranschaulicht.

3.1 Allgemeines

Bei den in Deutschland zum Einsatz kommenden Einzelraumfeuerungsanlagen handelt es sich um vielfältige Arten von Feuerungen, die primär zur Erwärmung eines einzelnen Wohnraumes konzipiert sind. Sie fallen unter die Vorschriften der Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen (1. BImSchV), sofern deren thermische Nennwärmeleistung weniger als 1 MW beträgt. Traditionell kommt als Brennstoff für die meisten Einzelraumfeuerungsanlagen vor allem Scheitholz zum Einsatz. Ausgenommen hiervon sind beispielsweise die speziell für die Verfeuerung von Pellets konzipierten Pelletöfen. Unabhängig von der Art der Feuerung verfügen Einzelraumfeuerungsanlagen über eine eher primitive bzw. einfache Verbrennungstechnik. Primäres Ziel dieser Feuerungen ist es, die frei werdende Wärme direkt an die Umgebung, also an die Raumluft, abzugeben. Hierfür ist eine wesentlich einfachere Technik ausreichend, als für die Funktion von Heizkesseln notwendig ist. Über eine etwas komplexere Konzeption verfügen die wassergeführten Einzelraumfeuerungen, welche mit Hilfe eines integrierten Wärmetauschers und Anschluss an das Heizungssystem als eine Art Mischung aus Heizkessel und Einzelraumfeuerung fungieren können. Die Wärmebereitstellung für das ganze Gebäude ist in der Regel aufgrund der im Vergleich zu Heizkesseln niedrigeren thermischen Leistungen nicht bzw. nur bei kleinen Gebäuden möglich. Allerdings können wassergeführte Einzelraumfeuerungen sehr wohl für die Warmwassererzeugung im Gebäude verwendet werden.

Den Einzelraumfeuerungen wird eine große Bandbreite an unterschiedlichen Feuerstättenarten zugeordnet. Diese unterscheiden sich insbesondere in ihrer Betriebsweise (Zeitbrand-, Dauerbrandfeuerstätte), ihrer Nutzungsart (z. B. Speicherfeuerstätte, Herd) und ihrer technischen Konstruktion sowie ihrer Brennstoffeignung (z.B. Scheitholz, Holzpellets) voneinander. Für jede Feuerstättenart finden spezifische technische Regeln Anwendung. Gemäß den derzeit gültigen Normen lassen sich die Einzelraumfeuerungsanlagen wie in Tabelle 1 dargestellt differenzieren.

Tabelle 1: Unterschiedliche Arten von Einzelraumfeuerstätten gemäß Anlage 4 der 1. BImSchV.

Aktuelle Prüfnorm	Feuerstättenart	Folgenorm	
		Norm	Gültigkeit
DIN EN 13240	Raumheizer (Zeitbrand) Raumheizer (Dauerbrand)	DIN EN 16510-2-1	Entwurf
DIN EN 15250	Speichereinzelfeuerstätte	-	-
DIN EN 13229	Kamineinsätze	DIN EN 16510-2-2	Entwurf
DIN EN 12815	Herde	DIN EN 16510-2-3	Entwurf

Am häufigsten werden in der Praxis Kamineinsätze nach DIN EN 13229 und Kaminöfen bzw. Raumheizer nach DIN EN 13240 verwendet. In den letzten Jahren ist ebenfalls der Trend zur verstärkten Nutzung von Pelletöfen nach DIN EN 14785 zu verzeichnen. Der Vorteil an der Verwendung von Pelletöfen bzw. Pellets als Brennstoff gegenüber dem dominierenden Biomassebrennstoff Scheitholz sind zum einen die Möglichkeit der automatischen Zufuhr von Brennstoff gegenüber dem manuellen Nachlegen von Brennstoff bei der Nutzung von Scheitholz, zum anderen verfügen Holzpellets über eine bessere Qualität, was auch in einer besseren Verbrennungsqualität resultiert. Eine detailliertere Klassifizierung der Feuerstätten ist anhand der jeweils geltenden Norm möglich:

- DIN EN 13240:2005-10: Nicht mechanisch beschickte Feuerstätten mit offenen oder geschlossenen Feuerraumtüren zur Beheizung des Aufstellraums, die entweder freistehend aufgestellt oder eingebaut werden ohne notwendige funktionale Änderungen. Eine funktionale Änderung stellt dabei eine Änderung an der Feuerstätte dar, die den Verbrennungsprozess beeinflusst. Modifikationen der äußeren Verkleidung des Ofens fallen hingegen nicht darunter. Anlagen mit einem verbauten Verbrennungsluftgebläse werden von der Norm nicht erfasst.
- DIN EN 13229:2005-10: Handbeschickte Feuerstätten, auch ohne Feuerraumtür, zur Beheizung des Aufstellraums, deren Verkleidung fest mit dem Gebäude verbunden ist oder die freistehend bzw. als Einsatz in einer Feuerstätten-Nische oder eine Verkleidung eingestellt sind. Anlagen mit einem verbauten Verbrennungsluftgebläse werden von der Norm nicht erfasst.
- DIN EN 15250:2007-06: Handbeschickte Feuerstätten mit Wärmespeicherung, die Wärme über einen bestimmten Zeitraum nach Erlöschen des Feuers an den Aufstellraum abgeben. Die Speicherfeuerstätte muss entweder als fertig montierte Feuerstätte oder als modulare Einheit aus vorgefertigten Bauteilen gemäß Herstellerangaben am Einsatzort aufgestellt werden.
- DIN EN 12815:2005-09: Handbeschickte Feuerstätten, deren Funktion primär das Kochen und sekundär die Beheizung des Aufstellraums ist. Heizungsherde dienen ebenfalls der Erwärmung von Brauchwasser sowie Wasser für zentrale Heizungsanlagen. Anlagen mit Beschickung aus einem

Vorratsbehälter, mechanischem Betrieb oder Verbrennungsluftgebläse werden von der Norm nicht erfasst.

- DIN EN 14785:2006-09: Freistehende oder eingebaute mechanisch beschickte Raumheizer für Holzpellets mit einer Nennwärmeleistung von bis zu 50 kW zur Raumbeheizung und ggf. der Brauchwassererwärmung, die bei natürlichem Förderdruck oder in Verbindung mit einem Verbrennungsluftgebläse betrieben werden. Als Brennstoff sind nur Holzpellets geeignet, die bei geschlossener Feuerraumtür verbrannt werden. Nicht mechanisch beschickte Feuerstätten werden von der Norm nicht erfasst.

Neben der genauen Charakterisierung der Feuerstätten werden in den jeweiligen Normen außerdem u. a. Anforderungen an eine konstruktive Auslegung, Sicherheit und ein Leistungsvermögen (Wirkungsgrad und Emissionen), Kennzeichnung sowie die dazugehörigen Prüfverfahren im Zuge der Konformitätsprüfung festgelegt. Derzeit ist die Normenreihen EN 16510 in Bearbeitung, welche die Nachfolgenormen für die DIN EN 13229:2005-10, DIN EN 13240:2005-10, DIN EN 12815:2005-09 sowie DIN EN 14785:2006-09 umfassen und entsprechend die genannten Normen vollständig ersetzen soll. Die Normenreihe besteht aus einem Teil 1 (DIN EN 16510-1:2018-11), der die allgemeinen Anforderungen und Prüfverfahren für die zugehörigen Feuerstättenarten beinhaltet sowie einem Teil 2, der die spezifischen technischen Regeln für jeden Feuerstättentyp festlegt (z.B. DIN EN 16510-2-1:2021-04 für Raumheizer).

3.2 Immissionsschutzrechtliche Anforderungen an Einzelraumfeuerungsanlagen in Deutschland und Europa

In Deutschland sind ca. 11 Mio. Einzelraumfeuerungsanlagen installiert, die mit Biomasse, vor allem naturbelassenem Holz, betrieben bzw. dezentral in Wohnräumen zur Bereitstellung von Wärme und Warmwasser eingesetzt werden. Bei ca. 92 % davon handelt es sich um handbeschickte Scheitholzfeuerungen, die bislang ohne jegliche Regelung betrieben werden bzw. für schlechte Luftqualität aufgrund ihrer primitiven Verbrennungstechnik verantwortlich sind. Die Errichtung und Unterhaltung der Kleinf Feuerungsanlagen in Deutschland erfolgt durch die Bestimmungen der 1. BImSchV, in der außerdem die zugelassenen Brennstoffe (sogenannte Regelbrennstoffe) sowie die Emissionsgrenzwerte in Abhängigkeit vom Brennstoff und der Anlagenleistung festgelegt sind.

Vor dem Inverkehrbringen müssen Einzelraumfeuerungsanlagen nach bestimmten Normen (freistehende Raumheizer: DIN EN 13240, Kamineinsätze und Kachelöfen: DIN EN 13229, Speicherfeuerstätten: DIN EN 15250 usw.) von einer unabhängigen Prüfstelle wie z. B. der Prüfstelle Feuerstätten und Abgasanlagen des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP (DAkS Akkreditierung D-PL-11140-11-03) geprüft werden. Einzelraumfeuerungsanlagen unterliegen im Gegensatz zu den zentral betriebenen Feuerungsanlagen keiner wiederkehrenden Emissionsüberwachung durch den Schornsteinfeger. Während der Typprüfung müssen Einzelraumfeuerungsanlagen bestimmte Emissionsgrenzwerte und

Mindestwirkungsgrade einhalten. Die Tabelle 2 zeigt die Anforderungen an Emissionen sowie an den Mindestwirkungsgrad gemäß der ersten und zweiten Stufe der 1. BImSchV.

Die in Tabelle 2 dargestellten Konzentrationen beziehen sich auf den Vergleichszustand (Abgas trocken, im Normzustand bezogen auf einen Volumengehalt von Sauerstoff in Höhe von 13 Vol.-%). Die Normanforderungen regeln lediglich das Inverkehrbringen von Feuerungsanlagen auf dem europäischen Markt, sodass solche Anlagen im Haushalt sicher betrieben werden können. In EU-Ländern, in denen keine immissionsschutzrechtlichen Anforderungen vorhanden sind, müssen bisher nur die Emissionsgrenzwerte der europäisch harmonisierten Prüfnormen eingehalten werden. In allen europäisch harmonisierten Prüfnormen soll bei der Typprüfung lediglich ein Grenzwert (1 Vol.-% entspricht 10.000 ppm) für Kohlenstoffmonoxid auf dem Prüfstand eingehalten werden. Andere Schadstoffe wie z. B. Feinstaub, Kohlenwasserstoffe und Stickstoffoxide werden bisher nicht berücksichtigt. In der Zukunft müssen durch neue Regelungen die immissionsschutzrechtlichen Anforderungen in Europa bzw. die Vorgaben der Ökodesign-Richtlinie erfüllt werden. In der Tabelle 3 sind die Emissionsanforderungen der neuen Ökodesign-Richtlinie für alle EU-Länder dargestellt, deren Emissionsvorgaben seit dem 1. Januar 2022 eingehalten werden müssen. Die Tabelle 2 zeigt die Emissionsgrenzwerte für Staub und Kohlenstoffmonoxid und den Mindestwirkungsgrad bei Einzelraumfeuerungsanlagen gemäß der ersten und zweiten Stufe der 1. BImSchV und Tabelle 3 die Emissionsgrenzwerte und den Jahresnutzungsgrad bei Einzelraumheizgeräten für feste Brennstoffe gemäß der Ökodesign-Richtlinie.

Tabelle 2: Emissionsgrenzwerte und Mindestwirkungsgrad bei Einzelraumfeuerungsanlagen gemäß der ersten und zweiten Stufe der 1. BImSchV.

Feuerstätten	Prüfnormen	1. Stufe, Errichtung seit 22.03.2010		2. Stufe, Errichtung seit 31.12.2014		1. und 2. Stufe, Errichtung seit 22.03.2010
		CO	Staub	CO	Staub	Mindestwirkungsgrad
		[g/Vm ³]	[g/Vm ³]	[g/Vm ³]	[g/Vm ³]	
Freistehende Raumheizer	DIN EN 13240	2,00	0,075	1,25	0,04	73
Raumheizer mit Füllfeuerung	DIN EN 13240	2,50	0,075	1,25	0,04	70
Speicherfeuerstätten	DIN EN 15250	2,00	0,075	1,25	0,04	75
Kamineinsätze (geschlossen)	DIN EN 13229	2,00	0,075	1,25	0,04	75
Kachelofeneinsätze (Flachfeuerung)	DIN EN 13229	2,00	0,075	1,25	0,04	80
Kachelofeneinsätze (Füllfeuerung)	DIN EN 13229	2,50	0,075	1,25	0,04	80
Herde	DIN EN 12815	3,00	0,075	1,50	0,04	70
Heizungsherde	DIN EN 12815	3,50	0,075	1,50	0,04	75
Pelletöfen ohne Wassertasche	DIN EN 14785	0,40	0,05	0,25	0,03	85
Pelletöfen mit Wassertasche	DIN EN 14785	0,40	0,03	0,25	0,02	90

--	--	--	--	--	--	--

Tabelle 3: Emissionsgrenzwerte und Jahresnutzungsgrad bei Einzelraumheizgeräten für feste Brennstoffe gemäß Ökodesign-Richtlinie.

Einzelraumheizgeräte	Ökodesign-Richtlinie ab dem 01.01.2022				
	CO	NO _x	OGC	Staub	Jahresnutzungsgrad
	[mg/Vm ³]	[mg/Vm ³]	[mg/Vm ³]	[mg/Vm ³]	[%]
Einzelraumheizgerät (offene Brennkammer)	2.000	200	120	50	30
Einzelraumheizgerät (geschlossene Brennkammer)	1.500	200	120	40	65
Einzelraumheizgerät (geschlossene Brennkammer) mit Pellets	300	200	60	20	79
Herde	1.500	200	120	40	65

In der Tabelle 3 ist ersichtlich, dass neue Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Einzelraumheizgeräten in allen europäischen Ländern gelten müssen. Es sind Grenzwerte für Kohlenstoffmonoxid, Feinstaub, organische Kohlenwasserstoffe und Stickstoffoxide vorgeschrieben und einzuhalten.

3.3 Emissionsanforderungen gemäß „Blauer Engel“

Das Heizen mit Holz verursacht auch bei einem sachgemäßen Betrieb im direkten Vergleich mit den Brennstoffen Heizöl und Erdgas deutlich mehr luftverschmutzende Emissionen und kann im Rahmen einer hohen Nutzungsdichte und zeitgleicher für den Luftaustausch nachteiligen Wetterlage in einem Wohngebiet zu erhöhten Feinstaubbelastungen und weiteren Konzentration an Luftschadstoffen führen. Laut der Weltgesundheitsorganisation werden deren im Vergleich zu den festgelegten EU-Grenzwerten für PM10 strengeren Grenzwerte in Deutschland flächendeckend überschritten. Besonders Menschen in Städten und stadtnahen Gebieten sind erhöhten Feinstaubkonzentrationen über einem gesundheitlich unbedenklichen Niveau ausgesetzt. Das Augenmerk liegt dabei auf den bei der Verbrennung von Holz entstehenden besonders gesundheitsschädlichen sehr feinen Partikel (kleiner als 0,1 µm).

Seit dem Jahr 2020 können sich Kaminöfen mit dem neu eingeführten freiwilligen Umweltzeichen „Blauer Engel“ schmücken, die sich besonders durch Feinstaubminderung, reduzierte Emissionen und Bedienerfreundlichkeit auszeichnen. Für die Vergabekriterien kommen sowohl Kaminöfen mit einer primären Emissionsminderungstechnik, als auch Kaminöfen in Verbindung mit einer integrierten oder nachgeschalteten (sekundären) Emissionsminderungstechnik in Frage. Das freiwillige Umweltzeichen soll vor allem Hersteller von Feuerungsanlagen motivieren effiziente und emissionsarme Geräte auf den Markt zu bringen und somit Kunden mit den sich bietenden

Umweltvorteilen auf diesem Weg zu überzeugen. Mit Hilfe dieses Umweltzeichens für Kaminöfen soll eine nachhaltige Verbesserung der Luftqualität durch eine deutliche Reduzierung der Staub- und sonstigen Abgasemissionen gegenüber konventionellen Kaminöfen erreicht werden und gleichzeitig bei der Anschaffung als Entscheidungshilfe zur Minderung von Luftschadstoffen dienen. Die Kaminöfen die sich mit dem Umweltzeichen „Blauer Engel“ auszeichnen lassen wollen, müssen zusätzlich zu den geltenden gesetzlichen Vorgaben der Typprüfung weitere Anforderungen wie beispielsweise deutlich niedrigere Staub- und CO-Werte einhalten, die emissionsreiche Startphase, welche üblicherweise nicht mitbewertet wird, wird in diesem Fall mitbetrachtet. Des Weiteren gelten Grenzwerte für organische Schadstoffe (OGC) und Stickstoffoxide (NO_x). In der nachfolgenden Tabelle 4 werden die durch das Umweltzeichen „Blauer Engel“ geforderten Maximalwerte für die Emissionen und Prüfmethode tabellarisch aufgeführt.

Tabelle 4: Maximalwerte für Emissionen und Prüfmethode des Umweltzeichens „Blauer Engel“.

Parameter	Prüfmethode für Messvorschrift gemäß Anhang B	Maximalwert Emissionen ⁽¹⁾	Maximalwert Emissionen ⁽¹⁾
Staub-Massegehalt	DIN EN 16510-1:2018 (2)	0,015 g/m ³	0,040 g/m ³
Staub-Partikelanzahl	Siehe Anhang C (Messung ist ab 1.1.2020 verpflichtend)	ab 1.1.2024: 5 x 10 ⁶ /cm ³	Keine Vorgabe
CO-Massegehalt	DIN EN 16510-1:2018 (2)	0,50 g/m ³	0,50 g/m ³
OGC-Massegehalt	DIN EN 16510-1:2018 (2)	0,07 gC/m ³	0,07 gC/m ³
NO _x -Massegehalt	DIN EN 16510-1:2018 (2)	0,18 g/m ³	0,18 g/m ³

(1) Bezogen auf trockenes Abgas, normiert auf 0 °C, 1013 mbar, 13 Vol.-% Sauerstoff.

(2) Häusliche Heizgeräte für feste Brennstoffe - Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Prüfverfahren.

Durch den Erhalt bzw. die Zertifizierung der Feuerungsanlagen mit dem Umweltzeichen „Blauer Engel“ können sich Hersteller von Feuerungsanlagen Marktanteile gegenüber den Konkurrenzunternehmen verschaffen sowie bestimmte Sonderrechte, wie z. B. das Betreiben der Feuerungsanlagen in restriktiven Stadtgebieten oder während eines Feinstaubalarms, für den Endverbraucher gewährleisten. Die hohen Emissionsanforderungen, insbesondere bezüglich der CO- und Staubemissionen, sind jedoch nur in Verbindung mit geeigneten Emissionsminderungsmaßnahmen erfüllbar. Hierzu ist eine intensivere Entwicklung von sachgemäßen und praxistauglichen Emissionsminderungsmaßnahmen unbedingt erforderlich. Ohne die erfolgreiche Entwicklung neuer Technologien für den Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen werden die strengen Emissionsanforderungen nicht einzuhalten sein.

Um die außerordentliche Qualität einer Feuerungsanlage zertifizieren zu lassen, gibt es europaweit verschiedene Gütesiegel, welche strengere Vorgaben an die Effizienz wie auch an die Grenzwerte der Schadstoffemissionen stellen als die

gesetzlichen Vorschriften. Zur Einhaltung der strengen Emissionsanforderungen müssen die Feuerstätten in der Regel mit Staubabscheidern ausgestattet sein. Dies gilt insbesondere für Einzelraumfeuerungsanlagen. Das aktuelle Prüfverfahren des Blauen Engel für Einzelraumfeuerungen basiert auf der Typprüfung gemäß DIN EN 13240 bzw. DIN EN 16510, erweitert die Prüfanforderungen jedoch deutlich. Der Prüfablauf schließt die Anzünd-, Nennlast- sowie Teillastphase mit ein und umfasst mindestens 7 Abbrände, wobei Emissionsmessungen vorzunehmen sind [DE-UZ 212 2020]:

- Auflage 1 – 2 (Anzündphase, 1 gravimetrische Staubmessung): Die Feuerstätte wird bei Raumtemperatur und Naturzug mit der ersten Auflage in Betrieb genommen, danach erfolgt eine zweite Auflage von Brennstoff bei Nennwärmeleistung. Die Staubmessung beginnt unmittelbar nach dem Zündvorgang und endet nach dem Abbrand der zweiten Auflage.
- Auflage 3 – 5 (Nennlastphase, 3 gravimetrische Staubmessungen): Die Anlage wird über 3 Auflagen bei einem Schornsteinzug von 12 Pa (+/- 2 Pa) mit maximaler thermischer Leistung betrieben. Die Staubmessungen mit einer Dauer von 30 Minuten werden 3 Minuten nach jeder Brennstoffauflage gestartet.
- Auflage 6 – 7 (Teillastphase, 2 gravimetrische Staubmessungen): Während der 6. Auflage (5. Staubmessung) wird der Schornsteinzug von 12 Pa auf 6 Pa (+/- 1 Pa) reduziert. Die Anlage wird mit der kleinsten einstellbaren Leistung betrieben, sofern der Hersteller Angaben hierzu macht. Ansonsten werden die Auflagen bei Nennwärmeleistung durchgeführt. Hierbei sind die beiden Staubmessungen unmittelbar im Anschluss an die Nennlastphase durchzuführen.

Während des gesamten Prüfzeitraums werden die Konzentrationen der Schadstoffe Kohlenstoffmonoxid (CO), gasförmiger organischer Kohlenstoffbestandteile (OGC = Organic Gaseous Carbon) und Stickstoffoxide (NO_x) gemessen. Darüber hinaus wird der Gehalt an Sauerstoff (O₂) und Kohlenstoffdioxid (CO₂) erfasst, um die Güte bzw. Vollständigkeit der Verbrennung zu bewerten. Die CO₂-Konzentration im Abgas wird ebenfalls als Kriterium für das Nachlegen von Brennstoff herangezogen. Demnach wird die Feuerstätte bei Unterschreiten eines CO₂-Gehalts von 4 Vol.-% (+/- 0,5 Vol.-%) nachbeschickt. Der Messzeitraum bzw. die Prüfung endet dann, wenn beim Abbrand der 7. Auflage ebenfalls der vorgegebene CO₂-Gehalt unterschritten wird.

Nach dem Prüfverfahren des Blauen Engel werden nicht nur Anforderungen an die Feuerstätten, sondern auch Vorgaben für die Effizienz von Staubabscheidern festgelegt. Dabei werden erstmals auch Anforderungen und ein Grenzwert für die Partikelanzahl gestellt. Staubabscheider, die bei Holzkaminöfen zum Einsatz kommen, sollen beispielsweise hinsichtlich des Abscheidegrades mindestens 75 % bezogen auf die Staubmasse sowie ab 01.01.2024 mindestens 90 % der Partikelanzahl verringern. In der Prüfung des Blauen Engels ist hierfür allerdings kein eigenes Prüfverfahren vorgegeben. Da es für die Partikelanzahlmessung an

Einzelraumfeuerungsanlagen kein standardisiertes Messverfahren gibt, ist dieses im Anhang C der Vergabegrundlage beschrieben.

Für die Bestimmung der Partikelanzahl und Ermittlung der Abscheideleistung von gezählten Staubpartikeln kann nach der Prüfmethode des Blauen Engels die Partikelzählung im Wechsel jeweils vor und nach dem Abscheider durchgeführt werden. Eine Akkreditierung ist für die Durchführung der Messung der Partikelanzahl bisher nicht erforderlich. Kann die Einhaltung der Grenzwerte für Partikel nur in Kombination mit Staubabscheidern erreicht werden, dürfen die Einzelraumfeuerungsanlagen nur in Kombination mit den entsprechenden Abscheidersystemen vermarktet werden.

Zur Prüfung von Staubabscheidern wird derzeit ein eigenes Prüfverfahren (DE-UZ-222) entwickelt, mit dem Ziel, Staubabscheider unter realitätsnäheren Betriebsbedingungen der Feuerungsanlage zu prüfen. Der Hintergrund ist, dass das Prüfverfahren der DIN SPEC 33999 einen sehr aufwendigen und nicht praxisnahen Prüfumfang umfasst. Zudem geben Hersteller von Abscheidern mitunter Abscheidegrade an, die nur unter perfekten Bedingungen realisiert und im Alltagsbetrieb in der Regel nicht erreicht werden können.

3.4 DIN/TS 18843 Häusliche Feuerstätten für feste Brennstoffe mit Verbrennungslufteinrichtung

Grundsätzlich werden Feuerstätten mit Verbrennungslufteinrichtung (VLE) bzw. einer Abbrand-Regelung in den aktuell harmonisierten Produktnormen des CEN/TC 295, dem europäischen Normungsgremium „Häusliche Feuerstätten für feste Brennstoffe“, und auch in der DIN EN 16510-1 und in den zukünftigen Teilen 2 der Normenserie DIN EN 16510 behandelt. Das Dokument dient zur Vereinheitlichung der Bewertung von Feuerstätten mit VLE und soll zur Bewertung von automatischen Steuerungen und Regelungen für Einzelraumfeuerstätten für feste Brennstoffe, die als Funktionseinheit mit der Feuerstätte zu sehen sind und gemeinsam mit der Feuerstätte geprüft werden, herangezogen werden.

3.4.1 DIN/TS 18843-1 Teil 1: Elektrisch betriebene, temperaturgeführte Verbrennungslufteinrichtungen

Im Sinne dieses Dokumentes übernimmt eine VLE die Funktionen der Verbrennungslufteinstellung selbsttätig über den gesamten Abbrand ohne dass der Eingriff des Betreibers notwendig ist, d. h. von der Brennstoffauflage (Auflege- bzw. Nachlegevorgang) bis zum Ende des letzten Abbrandzyklus. Die Einflussnahme des Ofenbetreibers reduziert sich dabei bis auf die eigentliche Brennstoffauflage. Durch den Einsatz einer VLE soll erzielt werden, dass ein Abbrand durch die permanente Anpassung des Verbrennungsluftvolumenstroms auf die aktuelle Verbrennungssituation reproduzierbar und emissionsarm gestaltet werden kann und sich damit die Verbrennungsqualität nicht nur auf dem Prüfstand, sondern auch in der Praxis positiv beeinflussen lässt. Folgende Anforderungen werden bei der Entwicklung einer VLE gemäß der Vornorm DIN/TS 18843-1 gestellt:

- Abbrand muss durch VLE über die Anpassung des Verbrennungsluftvolumenstroms reproduzierbar geregelt werden, sodass der Einfluss des Betreibers reduziert werden kann
- VLE haben hohen Einfluss auf die Verbrennungsqualität, daher Berücksichtigung bei der Typprüfung notwendig.
- VLE muss gesamten Abbrand (von Auflegen bis zum Nachlegen inklusive der Anzündphase) selbstständig Regeln können ohne dass jegliches Eingreifen des Betreibers erforderlich wird.
- Der aktuelle Betriebszustand der VLE sowie ein evtl. auftretender Komplettausfall muss signalisiert und für den Betreiber eindeutig wahrnehmbar sein sowie darüber hinaus in der Aufstell- und Bedienungsanleitung detailliert dokumentiert werden.
- Durch den Ausfall von technischen Komponenten bei der Verbrennung dürfen keine sicherheitskritischen Betriebszustände ausgelöst werden. Entsprechende Handlungshinweise für spezielle Situationen sind zu geben und zu dokumentieren.
- Eine vollumfängliche Funktionsbeschreibung der VLE für den Betreiber muss in der Aufstell- und Bedienungsanleitung enthalten sein.
- Für die Funktion und Sicherheit wesentliche technische Komponenten müssen für die Wartung leicht zugänglich sein.
- Die Regel-Software der VLE muss manipulationssicher sein.
- Der Beginn sowie das Ende eines Abbrandes muss durch die VLE selbstständig erkannt werden und bei Nicht-Betrieb eine von Hersteller Seite vorgegebene Mindestöffnung der Verbrennungsluft automatisch eingestellt werden.
- Eingesetzte Bauteile und Komponenten müssen thermisch, chemisch und mechanisch beständig sein
- Erstellung einer Risikobeurteilung
- Die Feuerstätte muss bei einem Stromausfall im sogenannten Notbetrieb auch ohne VLE weiterbetrieben werden können und im Anschluss daran wieder selbstständig in Funktion gehen.
- Der Ausfall der VLE darf nicht zu sicherheitskritischen Betriebszuständen führen.

Die durch Teil 1 der Norm gestellten Anforderungen wurden bei der Entwicklung der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP bereits berücksichtigt.

3.4.2 DIN/TS 18843-4 Teil 4: Zusatzfunktionen von Verbrennungslufteinrichtungen

Der Inhalt von Teil 4 beschreibt die Zusatzfunktionen von Einrichtungen zur automatischen Regelung der Verbrennungsluftversorgung. Diese Zusatzfunktionen haben keinen direkten Einfluss auf die Qualität der Verbrennung, sondern liefern dem Betreiber aktuelle Informationen des Abbrandes und sollen sich positiv auf das Betreiberverhalten auswirken. Folgende Anforderungen werden bei der Entwicklung einer VLE gemäß der Vornorm DIN/TS 18843-4 gestellt:

- Eine nicht bestimmungsgemäß nach Herstellerangabe nicht vollständig geschlossene Feuerraumtür muss durch die VLE erkannt und innerhalb

von 5 min durch ein akustisches Signal an den Betreiber gemeldet werden.

- Eine fehlgeschlagene Anheizphase, bsp. durch eine zu geringe Temperaturentwicklung, muss erkannt und dem Betreiber automatisch gemeldet werden.
- Mindestens optische Inkenntnissetzung des Betreibers über einen optimalen Nachlegezeitraum (einmaliges kurzzeitiges Nachlegesignal ist nicht zulässig).
- Meldung eines ungünstigen Betriebszustands (zu niedrige Verbrennungstemperatur). Dies kann auf einen Bedienfehler hinweisen beispielsweise durch auflegen von zu wenig Holz, zu feuchtem Holz oder zu großstückigem Holz oder auch durch die Feuerstätte selbst ausgelöst werden.
- Meldung einer Überlastung der Feuerstätte durch erfasste zu hohe Temperaturen im Brennraum durch zu trockenes Holz, zu viel Holz oder zu kleinstückiges Holz. Da dieser Fehler gleichzeitig eine Sicherheitsrelevanz besitzt wird ein zusätzliches akustisches Signal an den Betreiber empfohlen.
- Speicherung von Betriebsdaten über mindestens eine Heizsaison (mind. 180 Tage).
- Nach Möglichkeit Gewährleistung einer Variante mit interner Stromversorgung.
- Alle Meldungen müssen in der Aufstell- und Bedienungsanleitung zur VLE dokumentiert sein, sodass klar hervorgeht welcher Fehler aufgetreten ist. Zusätzlich müssen Maßnahmen zur Fehlerbehebung beschrieben sein.

Die durch Teil 4 der Norm gestellten Anforderungen wurden bei der Entwicklung der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP bereits berücksichtigt.

3.5 Grundlagen zur Verbrennung und Schadstoffbildung

3.5.1 Thermochemische Umwandlung fester Brennstoffe

Die thermochemische Umwandlung von Brennstoffen ist in vier unterschiedliche Phasen - Trocknung, Entgasung, Vergasung und Oxidation - unterteilt. Die Umwandlungsphasen unterscheiden sich teilweise durch den Temperaturbereich, in dem sie ablaufen können, und wesentlich durch die dem Prozess zugeführte Sauerstoffmenge. Die beiden Parameter Temperatur und Sauerstoffkonzentration bestimmen die physikalischen und chemischen Umwandlungsreaktionen und infolgedessen die Prozessprodukte. Im Folgenden werden die Umwandlungsphasen näher beschrieben [Marutzky 2002, Urban 2010].

Aufheizung und Trocknung

Der Umwandlungsprozess beginnt mit der Erwärmung der feuchten Brennstoffmasse. Wenn sie eine Temperatur von über 65 °C erreicht, beginnt das im Brennstoff vorhandene freie und gebundene Wasser zu verdampfen [Kaltschmitt et al. 2009]. Bei einer Temperatur von bis zu etwa 200 °C wird in der Regel das Wasser vollständig aus der Brennstoffmasse ausgetrieben [Kaltschmitt

et al. 2009]. Die für diesen Vorgang benötigte Energie entspricht der Energie, die für die Erwärmung der Brennstoffmasse sowie zur Verdampfung des vorhandenen Wassers nötig ist. Bei der Trocknung können bei einer Temperatur von über 150 °C Spuren organischer Komponenten wie z. B. Essig- und Ameisensäure sowie Kohlenstoffmonoxid mit freigesetzt werden [Marutzky 2002]. Bei nicht ausreichend hohen Temperaturen, wie beispielsweise in der Anfahrbetriebsphase der Biomassefeuerungen, werden diese Komponenten emittiert und in die Umwelt getragen.

Pyrolytische Zersetzung (Entgasung)

Die pyrolytische Zersetzung bzw. die Entgasung von festen Biomassen beginnt bei einem Temperaturbereich von 150 °C bis 200 °C und endet je nach Brennstoffart und Umgebungsbedingungen bei einer Temperatur von 500 °C bis 600 °C. Dabei werden die Makromoleküle, aus denen sich der Brennstoff zusammensetzt, durch die Wärmeeinwirkung aufgebrochen, irreversibel zerstört und in Form von Brenngasen und Dämpfen (wie z. B. CO₂, H₂, CH₄, H₂O und CH₃OH) sowie anderen dampfförmigen Kohlenwasserstoffverbindungen (z. B. Teere) freigesetzt [Marutzky 2002, Urban 2010]. Da die Entgasung ein endothermer Prozess ist, muss Energie zugeführt werden. Diese Energie kann, je nach Verfahren, entweder extern oder durch Teilverbrennung bereitgestellt werden. Bei einer weiteren Erwärmung der Biomasse (ab etwa 500 °C bis 600 °C) entstehen keine kondensierbaren oder gasförmigen Komponenten mehr, da in diesem Temperaturbereich die organischen Makromoleküle bereits vollständig freigesetzt worden sind. Es können jedoch aufgrund des sich im Brennstoff befindenden Sauerstoffs auch Sekundärreaktionen zwischen den freigesetzten Gasen untereinander und mit dem verbliebenen Kohlenstoff stattfinden und dadurch weitere Gase wie CO und CO₂ gebildet werden. Bei der pyrolytischen Zersetzung werden, je nach Brennstoff, zwischen 60 % (wie z. B. bei Gärrestpellets) und 85 % (wie z. B. bei Holzpellets) des organischen Anteils abgebaut. Nach der pyrolytischen Zersetzung verbleibt ein Rückstand, der überwiegend aus Kohle und Asche besteht [Marutzky 2002]. Der Verlauf der pyrolytischen Zersetzung und die verbrennungstechnischen Eigenschaften der produzierten Brenngase sind von der Art und Zusammensetzung des Brennstoffs, der maximalen Entgasungstemperatur, der Aufheizgeschwindigkeit, der wirksamen Verweilzeit und der Katalysatoren abhängig [Urban 2011]. Die Qualität der produzierten Brenngase spielt eine ausschlaggebende Rolle, sodass dadurch die gesamte Verbrennung und infolgedessen die Auslegung der Feuerungskonstruktion beeinflusst werden können.

Vergasung

Die Vergasung findet nach Abschluss der pyrolytischen Zersetzung als exothermer Prozess, d. h. unter Energiefreisetzung, statt. Dabei werden die bei der pyrolytischen Zersetzung entstehenden gasförmigen, flüssigen und vor allem festen Produkte durch weitere Wärmeeinwirkung infolge der Anwesenheit von sauerstoffhaltigen Vergasungsmitteln (wie z. B. Luft, Wasserdampf, Kohlenstoffmonoxid sowie reiner Sauerstoff) zu weiteren nutzbaren Brenn- und Synthesegasen umgewandelt. Die Vergasungsmittel müssen dem Prozess so zugeführt werden, dass während der Vergasung immer unterstöchiometrische Bedingungen gewährleistet werden können. Zu den bei der Vergasung

produzierten Komponenten zählen CO, CO₂, H₂, CH₄ sowie N₂, sofern Luft als Vergasungsmittel verwendet wird [Marutzky 2002]. Die Zusammensetzung des Pyrolysegases wird wesentlich durch die Zusammensetzung und die morphologischen Eigenschaften des Eingangsmaterials, der Menge und Art des Vergasungsmittels, Reaktionsbedingungen (wie Temperatur, Druck und Verweilzeit) und durch das Vergasungsverfahren beeinflusst.

Vergasungsreaktionen sind Gleichgewichtsreaktionen. Je nach Temperaturbereich verschieben sich die Gleichgewichtslagen. Beispielsweise entsteht bei einer Temperaturerhöhung von 800 °C bis 1.000 °C mehr Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff, hingegen weniger Methan [Marutzky 2002, Urban 2009].

Bei Biomassefeuerungen mit gestufter Verbrennung wird Luft als Vergasungsmittel eingesetzt. Dabei finden die Entgasung und die Vergasung parallel in einem Reaktionsraum (Vergasungszone) statt. Die Entgasung findet dabei trotz der Anwesenheit von Sauerstoff statt, da die bei diesem Entgasungsvorgang entstehenden Brenngase aus dem Brennstoff nach außen ausgetrieben werden und den in der Umgebung befindlichen Sauerstoff verdrängen, sodass der Zersetzungsprozess bis zum Abschluss ohne Sauerstoff ablaufen kann. Die bei der Vergasung entstehenden Brenngase werden aus der Vergasungszone (Vergasungskammer) in den Feuerraum weitergeleitet und dort unter Zugabe von Sekundärluft (Sauerstoff) oxidiert [Marutzky 2002].

Oxidation

Das bei der Vergasung entstehende Brenngas wird mit Sauerstoff unter Wärmefreisetzung zu CO₂ und H₂O oxidiert. Zudem können bei der Oxidation, je nach elementarer Zusammensetzung des Brennstoffs vor allem auch NO, NO₂, SO₂, HCl und HF sowie staubförmige Schadstoffemissionen wie Schwermetalle, Metalloxide und organische sowie anorganische Stäube gebildet und freigesetzt werden. Hinzu kommen bei unvollständiger Oxidation Kohlenstoffmonoxid, Wasserstoff und Kohlenwasserstoffe. Für eine vollständige Oxidation müssen folgenden Bedingungen realisiert werden [Marutzky 2002, Joos 2006]:

- Es muss genügend Sauerstoff (Sekundärverbrennungsluft) der Verbrennungskammer zugeführt werden. Bei Kleinfeuerungsanlagen liegt die Luftüberschusszahl (λ) normalerweise zwischen 1,7 und 2,0. Das entspricht einer Sauerstoffkonzentration im Abgas zwischen 9 und 11 Vol.-%. Eine zu starke Verbrennungsluftzufuhr hat die Kühlung der Flamme und somit eine Verschlechterung der Verbrennung zur Folge.
- Es muss sichergestellt werden, dass die Temperatur in der Brennkammer hoch genug ist, um das Brenngas aufoxidieren zu können. Die für eine gute Oxidation nötige Temperatur liegt, je nach Verweilzeit und Qualität der Durchmischung, zwischen 600 °C und 850 °C.
- Der in die Brennkammer zugeführte Sauerstoff muss sehr gut mit den Brenngasen durchmischt werden. Dabei spielt die Bauart der Brennkammer sowie die Art der Verbrennungsluftzufuhr eine große Rolle. Die Abgasviskosität steigt mit der Temperatur an, was zur Verschlechterung der Durchmischung führen kann.
- Die Brenngase müssen mit dem Sauerstoff für eine ausreichende Zeit in der Brennkammer verweilen und in Kontakt gebracht werden. Die

minimale Verweilzeit der Brenngase in der Brennkammer hängt von der Mischung, der verfügbaren Sauerstoffmenge und der Temperatur ab. Bei einer Brennkammertemperatur von größer als 850 °C kann eine sehr gute Oxidation bei einer Verweilzeit von 0,5 Sekunden erreicht werden. Sinkt die Temperatur auf 600 °C, nimmt die notwendige Verweilzeit um 2 bis 4 Sekunden, ausgehend von den gleichen Durchmischungsverhältnissen, zu.

Die vier genannten Einflussgrößen hängen sehr stark voneinander ab. Nur bei einer optimalen Einstellung dieser Einflussgrößen kann eine emissionsarme Verbrennung gewährleistet werden [Marutzky 2002, Urban 2010].

3.5.2 Schadstoffbildung und primäre Reduktionsmöglichkeiten

Bei der thermochemischen Umsetzung von Festbrennstoffen entsteht eine Vielzahl völlig unterschiedlicher Schadstoffe. Diese Schadstoffe lassen sich in gas- und staubförmige Emissionen unterteilen. Abbildung 2 zeigt eine vereinfachte Darstellung des Abbrandverhaltens bei der thermischen Umwandlung biogener Brennstoffe mit den wichtigsten möglichen chemischen Reaktionen.

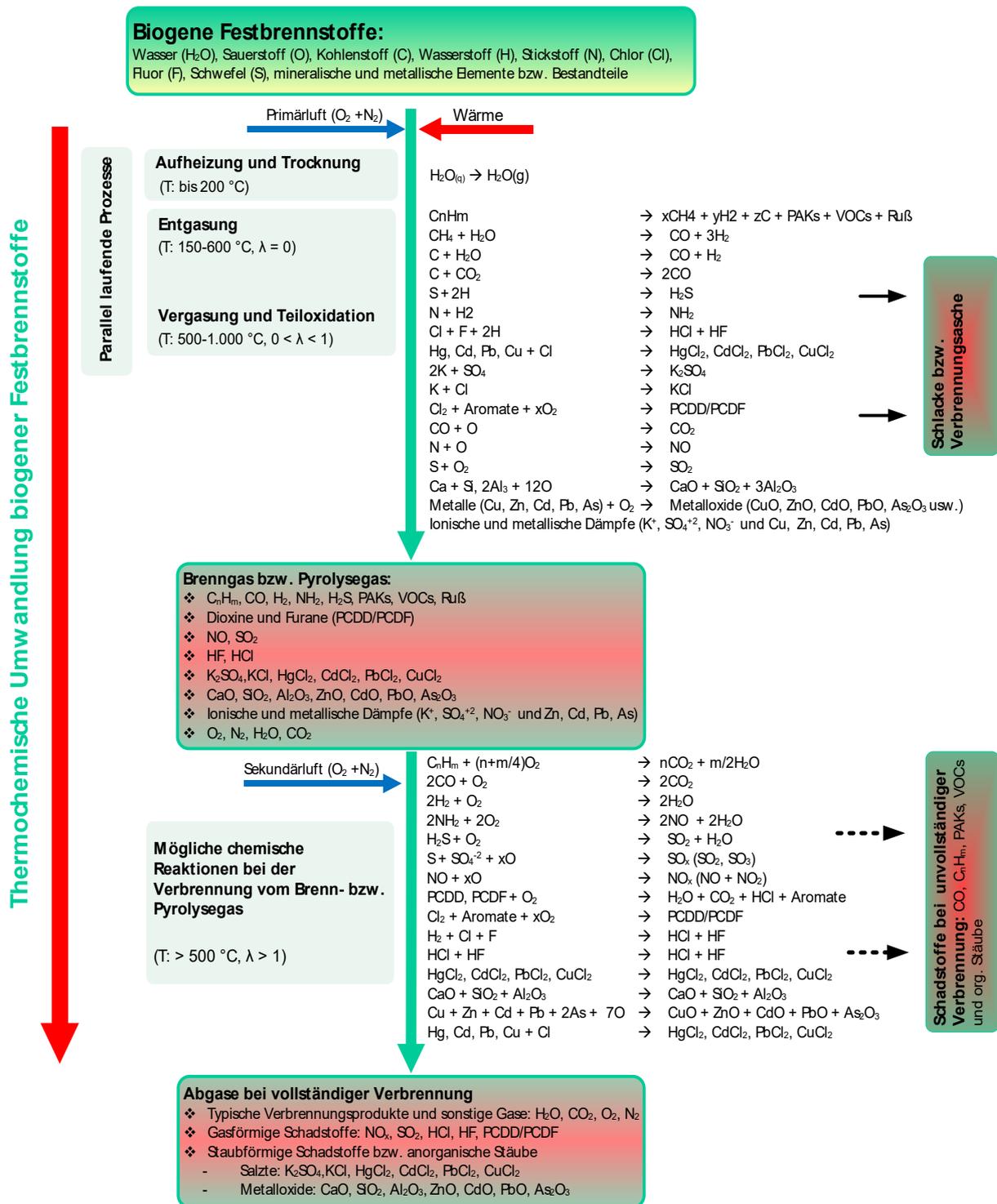


Abbildung 2: Vereinfachte Form für die thermische Umwandlung biogener Festbrennstoffe mit der Schadstoffbildung.

Schadstoffemissionen aus vollständiger Verbrennung

Zusätzlich zu typischen Verbrennungsprodukten (Kohlenstoffdioxid, Wasserdampf) können bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz staub- und gasförmige Schadstoffemissionen auf primäre und sekundäre Entstehungswege produziert werden.

Gasförmige Schadstoffe aus vollständiger Verbrennung:

Zu gasförmigen Schadstoffemissionen zählen im Allgemeinen Stickstoff-, Schwefel-, Chlor-, Fluor- und Kaliumverbindungen sowie Dioxine und Furane. Bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz in Einzelraumfeuerungsanlagen sind nur die Stickstoffoxide von Bedeutung. In manchen Regionen in Deutschland wie z. B. in Regensburg sowie gemäß der europäischen gültigen Ökodesign-Richtlinie sind Grenzwerte für Stickstoffoxide bei der Verbrennung in Einzelraumfeuerungsanlagen festgelegt. Andere Abgasverbindungen (SO₂, HCl, HF und PCDD/PCDF) können nur zu einem sehr geringen irrelevanten Anteil produziert werden.

Staubförmige Schadstoffe aus vollständiger Verbrennung:

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

- Schwerflüchtige, mineralische Aschebestandteile (z. B. CaO, Al₂O₃, SiO₂),
- Ascheverbindungen, die durch Verdampfung und Kondensation oder Neubildung in der Feuerung entstehen (z. B. KCl, K₂SO₄, Sulfate und Nitrate usw.),
- Schwermetalle und Schwermetallverbindungen aus dem Brennstoff oder aus Verunreinigungen. Diese können in metallischer, oxidischer oder chloridischer Form entstehen. Schwermetalle und Schwermetallverbindungen können bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz nur zu einem sehr geringen Anteil entstehen.

Die Konzentration von anorganischen Feinstäuben lässt sich in einer mehrstufigen Verbrennung reduzieren. In der ersten Verbrennungsstufe bzw. in der Vergasungszone muss die Temperatur niedriger eingestellt werden als die Verdampfungs- oder Mobilisierungstemperatur dieser Stäube. Außerdem tragen die Verteilung und Regulierung der Verbrennungsluft maßgeblich zur Reduzierung dieser Stäube bei. Dabei müssen günstige Strömungsverhältnisse in dem Glutbett gewährleistet werden, sodass diese Stäube durch die Begrenzung des Sauerstoffangebotes nicht entstehen können bzw. durch niedrige Strömungsgeschwindigkeiten in der Vergasungszone nicht mit dem Rauchgasstrom mitgerissen und anschließend emittiert werden. Zudem lässt sich der Anteil der schwerflüchtigen, mineralischen Aschebestandteile durch den Einsatz von rindefreien Hölzern bzw. mit Erde und Sand unbelasteten Hölzern sehr gut mindern [Marutzky 2002].

Schadstoffemissionen aus unvollständiger Verbrennung

Zusätzlich zu den Schadstoffemissionen aus vollständiger Verbrennung können bei der unvollständigen Verbrennung von festen Brennstoffen folgende

Schadstoffe produziert werden, welche auch in staub- und gasförmige Schadstoffemissionen zu unterteilen sind. Schadstoffe aus unvollständiger Verbrennung sind nicht nur gesundheitsgefährdend sowie klimarelevant, sondern auch energiereich (Kohlenstoffmonoxid: 2,8 kWh/kg, Propan: 12,9 kWh/kg, Methan: 13,7 kWh/kg, Ruß: 7,8 kWh/kg). Ihre Entstehung führt zur bedeutsamen Reduzierung der Verbrennungseffizienz.

Gasförmige Schadstoffe aus unvollständiger Verbrennung:

Kohlenstoffmonoxid und andere diverse Kohlenwasserstoffverbindungen, die bei der thermischen Zersetzung von Biomasse entstehen, stellen die typischen gasförmigen Schadstoffemissionen aus unvollständiger Verbrennung dar.

Kohlenstoffmonoxid ist ein farb- und geruchloses Gas, das sich 220-mal stärker an Hämoglobin bindet als Sauerstoff und die Sauerstoffversorgung des Körpers bis zum Eintritt des Todes beeinträchtigen kann [Lüllmann et al. 2003].

Kohlenstoffmonoxid kann durch eine unvollständige Oxidation von Kohlenstoff oder der Pyrolyseprodukte entstehen. Kohlenstoffmonoxid kann außerdem aus einer Rückreaktion vom Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoff bei höheren Temperaturen (Boudouard-Gleichgewicht) gebildet werden. Die Bildung kann sowohl durch endotherme als auch exotherme Reaktionen erfolgen, wobei der Abbau des Kohlenstoffmonoxids stark von der Temperatur abhängt. Die Kinetik ist bei Temperaturen > 800 °C bereits sehr hoch. Bei handbeschiedenen Feuerungsanlagen kann eine konstante Temperatur in diesem Temperaturbereich nicht immer gewährleistet werden, weshalb die Durchmischung der Abgase mit längeren Aufenthaltszeiten sehr entscheidend für den Oxidationsvorgang ist.

Die Schadwirkung der Kohlenwasserstoffverbindungen ist so vielfältig wie die verschiedenen Arten der Verbindungen, in denen sie auftreten können [Guderian 2000]. In den meisten Fällen handelt es sich dabei um farblose Gase, die einen stark stechenden Geruch besitzen, Atemwege reizen und bis zur Bewusstlosigkeit führen können [Fuhrmann 1999]. Zu den Kohlenwasserstoffverbindungen zählen Alkohole, Aldehyde und zahlreiche organische Säuren [Lüllmann et al. 2003]. Von besonderer Relevanz sind in diesem Zusammenhang die polyzyklisch aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAKs). Bezüglich der Wirkung auf den anthropogenen Treibhauseffekt ist beispielsweise Methan durch ein 25-fach höheres Global-Warming-Potential (GWP) als CO₂ von besonderer Relevanz [Hesselbach 2010].

Staubförmige Schadstoffe aus unvollständiger Verbrennung:

Hierunter werden nicht verbrannte Kohlenstoffverbindungen verstanden, die kohlenstoffhaltige fest oder nach der Abkühlung der Reaktionsprodukte entstehende 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 an flüchtigen Bestandteilen im Brennstoff freigesetzt werden können. Ihre Bildung wird durch ungünstige Verbrennungsbedingungen wie z. B. ungenügend Sauerstoff, zu kurze

Verweilzeiten, unzureichende Oxidationstemperatur im Brennraum und schlechte Durchmischung begünstigt. Die kohlenstoffhaltigen kondensierten Syntheseprodukte, wie z. B. Ruß, werden in der Flamme durch Agglomeration kleinster Kohlenstoff-Cluster freigesetzt. Ihre Bildung wird durch ungenügende Luftzufuhr, ungleichmäßige Entzündung und schlechte Durchmischung von Brennstoff und Luft begünstigt. Hinzu kommen auch organische Verbindungen, wie PAKs, die durch eine Synthese aus thermischen Zersetzungsprodukten bei hohen Temperaturen gebildet werden können [Marutzky 2002, Kaltschmitt et al. 2009]. Die staubförmigen Emissionen aus unvollständiger Verbrennung können durch die Verbesserung der Brennstoffeigenschaften wie z. B. beim Einsatz von trockenen Brennstoffen (Feuchtegehalt zwischen 12 Gew. % und 17 Gew. %) 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 folgenden Maßnahmen umgesetzt werden:

- Kontinuierliche Beschickung: Bei chargenweise beschickten Feuerungsanlagen (wie bei Holzvergaserkesseln) findet aufgrund der Verbrennungskonstruktion eine intensive Trocknung bzw. eine intensive pyrolytische Zersetzung der gesamten im Brennstoffraum befindlichen Brennstoffmasse statt. Dadurch werden in der Anfahrbetriebsphase Brenngase mit schlechten Verbrennungseigenschaften freigesetzt. Dies führt zu hohen Konzentrationen organischer Feinstäube in der Anfahrbetriebsphase. Durch eine kontinuierliche Beschickung werden Brenngase mit ähnlicher Zusammensetzung und guten Verbrennungseigenschaften während des Betriebs bzw. Verbrennungsvorgangs produziert.
- Regelung der Verbrennungsluftzufuhr.
- Optimierung der Konstruktion (Form, Abmessungen und Werkstoffwahl) des Feuerraumes sowie der Verteilung der Primär- und Sekundärverbrennungsluft, sodass eine gute Durchmischung gewährleistet und kalte Zonen im Feuerraum vermieden werden können.

Stäube aus unvollständiger Verbrennung müssen definitiv durch Primärmaßnahmen gemindert werden, da sie einen erheblichen negativen Einfluss auf die nachgeschalteten Entstaubungssysteme haben. Diese Stäube können beispielsweise bei Elektroabscheidern eine klebrige Schicht auf den Sprühelektroden bilden, sodass die Ionisation und somit die Abscheideleistung gemindert wird. 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 bzw. Durchlässigkeit besitzt und sich nur schwierig abreinigen lässt.

Emissionen aus nicht vollständiger Verbrennung sind aus toxikologischer Sicht besonders relevant, da sie aufgrund der nicht vollständigen Verbrennung organische Substanzen enthalten, die eine hohe biologische Reaktivität aufweisen können [Klippel et al. 2006].

3.6 Überblick über Einzelraumfeuerungsanlagen und ihre betrieblichen Besonderheiten

In diesem Abschnitt werden die betrieblichen und konzeptionellen Besonderheiten der Einzelraumfeuerungsanlagen sowie die Problematik in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen geschildert.

3.6.1 Betriebliche und konzeptionelle Besonderheiten von Einzelraumfeuerungsanlagen

Bei der Auslegung der Abbrand-Regelung spielen die Rahmen- und Betriebsbedingungen des Prozesses eine entscheidende Rolle. Im Folgenden werden die wichtigsten betrieblichen und konzeptionellen Besonderheiten von Einzelraumfeuerungsanlagen dargestellt und beschrieben (Abbildung 3):

Volumenstromschwankungen des Abgases während des Betriebs

Während der Verbrennung in Einzelraumfeuerungsanlagen treten starke Volumenstromschwankungen auf. Der produzierte Abgasvolumenstrom ist aufgrund einer fehlenden automatischen Verbrennungsluftregelung stark von dem Förderdruck in der Abgasanlage abhängig. Es gilt, je höher der Förderdruck in der Abgasanlage, umso mehr Verbrennungsluft wird dem Feuerraum zugeführt und desto größer ist die produzierte Abgasmenge. Das hat großen Einfluss auf die Verweilzeit des Abgases und somit auf die Qualität der Verbrennung. Einzelraumfeuerungsanlagen werden gemäß den Prüfnormen bei einem konstanten Förderdruck von 12 ± 2 Pascal und bestimmten Verbrennungslufteinstellungen geprüft. Dieser Förderdruck tritt im Praxisbetrieb nur selten auf. Je nach Schornsteinsystem (wirksame Höhe, Querschnitt usw.) und Witterungsverhältnissen (Außentemperaturen und Druckverhältnisse) können Unterdrücke in der Abgasanlage zwischen 8 Pascal und 80 Pascal erzeugt werden. In der Praxis werden mechanische Zugbegrenzer verwendet, um den Unterdruck im Kamin einigermaßen zu reduzieren bzw. im groben Bereich einzustellen.

**betriebliche,
verbrennungstechnische und
konzeptionelle Besonderheiten der
Einzelraumfeuerungsanlagen
hinsichtlich der Auslegung von
integrierten Technologien zur
Schadstoffminderung**

- Volumenstromschwankungen des Abgases während des Betriebs
- Variierung der Beladungen des Abgases mit brennbaren staub- und gasförmigen Bestandteilen während der Verbrennung
- Schwankung der Mengen und der Verteilung des Sauerstoffs in der aktiven Reaktionszone während der Verbrennung
- Schwankungen der Druck- und Strömungsverhältnisse
- Temperaturschwankungen während der Verbrennung
- Anteil der anorganischen nicht oxidierbaren Bestandteile im Abgas

Abbildung 3: Betriebliche, verbrennungstechnische und konzeptionelle Besonderheiten von Einzelraumfeuerungsanlagen hinsichtlich der Auslegung von integrierten Technologien zur Schadstoffminderung.

Variierung der Beladungen des Abgases mit brennbaren staub- und gasförmigen Bestandteilen während der Verbrennung

In der Anfahrbetriebsphase sowie Ausbrandphase ist grundsätzlich mit einer höheren Schadstoffbildung (bis 1,5 Vol.-% in der Anfahrbetriebsphase und 0,35 Vol.-% in der Ausbrandphase) zu rechnen als in der Regelbetriebsphase. In dieser Phase fehlen aufgrund des Chargenbetriebs die nötigen Temperaturen für eine vollständige Oxidation. Außerdem haben das Nutzerverhalten sowie die Brennstoffqualität und -art einen großen Einfluss auf die gesamte Verbrennungsqualität und somit auf die Schadstoffbeladung während der Verbrennung.

Schwankung der Menge und Verteilung des Sauerstoffs in der aktiven Reaktionszone während der Verbrennung

Der Sauerstoffbedarf beim Chargenbetrieb variiert über die Betriebszeit. Die Verbrennungsluft wird nicht geregelt, sondern nur manuell gemäß den Angaben der Herstellerbedienungsanleitung fest eingestellt. Beim Chargenbetrieb ist der Sauerstoffbedarf oder -verbrauch nicht gleichmäßig. Direkt nach dem Auflegen der Holzscheite findet eine starke Vergasung der gesamten Brennstoffmenge statt. Das führt zu einem schnellen und hohen Sauerstoffverbrauch in dieser Phase, welche ca. 0,2 % bis 0,3 % der gesamten Abbranddauer ausmacht und in der die meisten Schadstoffe entstehen. Mit der Verbrennungszeit sinkt der Sauerstoffverbrauch aufgrund abnehmender Vergasungsintensität bzw. der Abnahme der produzierten Brenngasmenge. Der Betrieb mit hoher Lambda-Zahl (Sauerstoffüberschuss im Abgas) führt zur starken Kühlung der Flamme sowie des Feuerraums und somit zur Verschlechterung der Verbrennung.

Für eine sachgemäße Verbrennung ist nicht nur die Sauerstoffmenge sondern auch die Sauerstoffverteilung von großer Bedeutung. Die Sauerstoffverteilung in der aktiven Reaktionszone hängt von dem Verbrennungsluftzufuhrsystem ab. Hier

spielen die Art der Primärluftzufuhr (als Rostluft oder Scheibenspülluft) sowie die Platzierung und die Verteilung der Sekundär- und Tertiärluftzufuhröffnungen eine entscheidende Rolle. Für eine günstige Sauerstoffverteilung und somit gute Mischung des Sauerstoffs mit den brennbaren Bestandteilen ist eine minimale Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsform im Feuerraumbereich sowie in der Nachoxidationszone (Nachoxidationskammer) erforderlich. Die Sauerstoffverteilung und –menge im Feuerraumbereich bestimmen die Gleichmäßigkeit, die Intensität und die Stabilität der Verbrennung, wobei die Vollständigkeit der Verbrennung in der Nachoxidationszone dadurch direkt beeinflusst wird.

Druck- und Strömungsverhältnisse in Einzelraumfeuerungsanlagen

Der Unterdruck in der Abgasanlage bestimmt die Menge sowie die Eintrittsgeschwindigkeit der Verbrennungsluft in den Feuerraum. Dadurch werden die Strömungsform und die Strömungsverhältnisse in der Feuerungsanlage bestimmt. Bei handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen, die bisher ohne automatische Steuerung oder Regelung sowie ohne jegliche Stromversorgung betrieben werden, haben die Druck- und Strömungsverhältnisse einen großen Einfluss auf die Verbrennungsqualität, Betriebsstabilität sowie auf die Betriebssicherheit im Wohnbereich. Zusätzlich zur zugeführten Verbrennungsluftmenge wird die Verteilung des Sauerstoffs innerhalb des Feuerraums und in der Nachoxidationskammer direkt beeinflusst. Hoher Unterdruck in der Abgasanlage führt meistens zu einer intensiven, unkontrollierten Verbrennung mit hohem Schadstoffausstoß in der Startphase nach dem Holzauflegen bzw. nach der Holzbeschickung. In der Regelbetriebsphase und in der Ausbrandphase hat der hohe Unterdruck in der Abgasanlage, aufgrund der großen dem Feuerraum zugeführten Verbrennungsluftmenge, eine schnelle Abkühlung der Flamme und folglich eine Verschlechterung der Verbrennung zur Folge. Hohe Abgasgeschwindigkeiten führen zur Verkürzung der aktiven Verweilzeit und dadurch zu einer Verschlechterung der Verbrennung sowie der Effizienz.

Temperaturschwankungen während der Verbrennung

Bei Einzelraumfeuerungsanlagen nimmt die Abgastemperatur mit der Höhe der Anlage aufgrund der Wärmeabgabe im Wohnraum sowie mit der Zeit wegen des Brennstoffverbrauchs während des Abbrandes ab, d. h. die aktive Verweilzeit (Reaktionszeit, in der sowohl ausreichend lokaler Sauerstoff als auch hohe Oxidationstemperaturen vorhanden sind) wird während der Verbrennung stark beeinflusst bzw. entsprechend verkürzt. Zur Verbesserung der Oxidation werden normalerweise Umlenkplatten eingesetzt. Die Umlenkung des Abgases erfolgt kurz nach dem Verlassen des Feuerraums. Dadurch wird die Durchmischung des Sauerstoffs mit den nicht verbrannten Bestandteilen verbessert und somit eine bessere Oxidation gewährleistet. Bei der Abgasumlenkmethode wird das Abgas mit der Zeit und der Strömungshöhe abgekühlt. Das hat zur Folge, dass die Oxidationsleistung entsprechend abnimmt bzw. ab einer bestimmten Höhe die Oxidation nicht mehr gewährleistet wird.

Das Diagramm 1 zeigt die Verläufe mittlerer Temperaturen im Feuerraum sowie in der Abgasanlage (Tripelpunkt) einer handbeschickten Biomassefeuerung. Es ist ersichtlich, dass die Temperatur mit der Höhe der Anlage sowie mit der Zeit während des Abbrandes abnimmt, d. h. die aktive Verweilzeit wird während der

Verbrennung beeinflusst bzw. entsprechend verkürzt. Es ist zu erwähnen, dass die im Diagramm 1 dargestellten Temperaturkurven im Nennlastbetrieb ermittelt wurden. Im Überlastbetrieb ist mit höheren Temperaturen zu rechnen als im Nenn- oder Teillastbetrieb. Im Überlastbetrieb ist je nach zugeführter Verbrennungsluftmenge mit Abgastemperaturen im Feuerraumbereich von bis zu 1.100 °C zu rechnen.

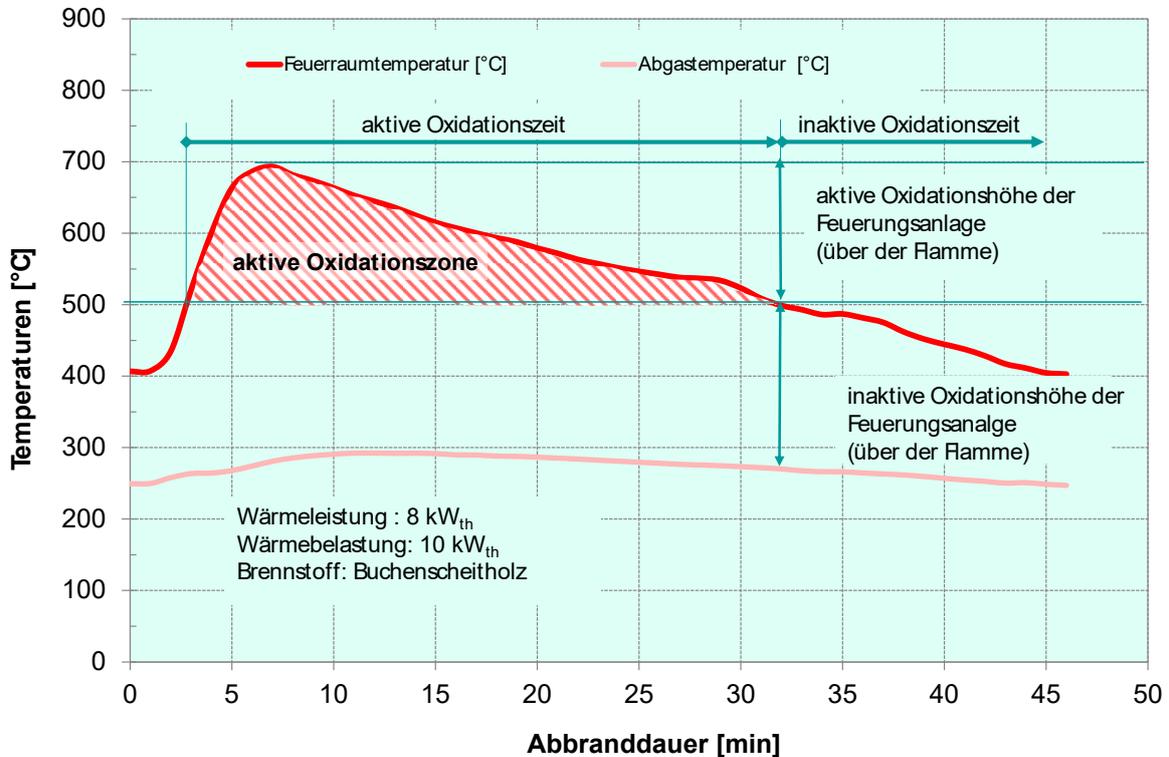


Diagramm 1: Verläufe mittlerer Temperaturen im Feuerraum sowie in der Abgasanlage (Tripelpunkttemperatur) einer handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlage im Nennlastbetrieb.

Anorganische Bestandteile im Abgas

Bei der Verbrennung von festen Brennstoffen entstehen nicht nur organische Bestandteile, sondern auch anorganische Komponenten, die sich thermisch nicht behandeln lassen. Die beim Betrieb von Einzelraumfeuerungsanlagen entstehenden staubförmigen Emissionen bestehen zum großen Teil (> 95 %) aus organischen Feinstäuben (< 1 µm). Solche Stäube lassen sich mechanisch, ohne weitere Konditionierung, durch die Filtration oder Sedimentation nicht abscheiden. Grobe Flugasche entsteht bei der Verbrennung in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen nur zum geringen Teil. Bei hohem Abgasförderdruck und direkt durchströmtem Glutbett ist mit erhöhtem Ascheanteil im Abgas zu rechnen. Bei feinen nicht-deterministischen Strukturen führt die hohe Aschebelastung zur Blockierung der Abgaswege und folglich zur Erhöhung des Druckverlustes.

3.6.2 Einfluss des Schornsteins auf den Betrieb der handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen in der Praxis

Um eine Einzelraumfeuerungsanlage gemäß DIN EN 13240, DIN EN 13229 oder DIN EN 15250 problemlos und optimal betreiben zu können, muss zwangsläufig das Abgasabfuhrsystem bzw. der Schornstein mit betrachtet werden. Zwischen dem Schornstein und der daran angeschlossenen Feuerstätte besteht eine starke Wechselwirkung, welche einen großen Einfluss auf die Funktion des Gesamtsystems (Feuerstätte/Schornstein) und folglich auf die Verbrennungsqualität sowie die Verbrennungseffizienz hat. Bei Feuerstätten wie z. B. handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen, die bisher ohne Regelung bzw. Steuerung betrieben werden, ist der Einfluss des Schornsteins auf den Betrieb von großer Bedeutung. Diese Wechselwirkung zwischen Schornstein und Feuerungsanlage wird bisher sowohl bei Entwicklungs- und Forschungsarbeiten, als auch in der gängigen Praxis nicht ausreichend berücksichtigt. Das Hauptaugenmerk bei der Behandlung der Emissionsproblematik wird in der Regel auf die Verbesserung des Verbrennungsverhaltens der Feuerungsanlage ohne Berücksichtigung des Einflusses des Abgasabfuhrsystems auf den Betrieb gelegt.

Die Wechselwirkung zwischen dem Abgasabfuhrsystem und der Feuerstätte verstärkt sich während des Betriebs. Infolge der zugeführten Wärme aus der Verbrennung haben Abgase eine höhere Temperatur als die Außenluft. Innerhalb des Schornsteins entstehen variierende Auftriebskräfte, die den Abtransport der Abgase bewirken und einen schwankenden Unterdruck im Schornstein sowie in der Feuerstätte erzeugen. Dabei spricht man von sogenannten Naturzugsystemen, bei denen die Druckverhältnisse in der Feuerstätte über den gegenwärtigen Unterdruck im Schornstein beeinflusst werden. Hier soll durch die Konstruktion der Feuerstätte oder Strömungsregler eine Strömungsstabilisierung unabhängig von Unterdruckschwankungen gewährleistet werden, sodass sowohl die Verbrennungsluftzufuhr als auch die Abgasabfuhr sichergestellt wird.

Für eine optimale Auslegung und einen sachgemäßen Betrieb einer Feuerstätte sollen alle am Verbrennungsprozess beteiligten Komponenten im Rahmen eines Gesamtsystems konzeptionell und konstruktiv berücksichtigt werden. Eine moderne Feuerstätte ist nur in Verbindung mit einem geeigneten Schornsteinsystem emissionsarm und effizient zu betreiben. Hierbei ist es außerordentlich wichtig, dass die Komponenten wie Feuerungsanlage, Verbindungstück und Schornstein aufeinander abgestimmt werden, ansonsten sind langfristig keine stabilen Betriebsverhältnisse erzielbar. Darüber hinaus können Planungsfehler Problematiken wie z. B. eine unvollständige Verbrennung sowie Verrußung von Feuerstätte und Schornstein mit der Gefahr eines unkontrollierten Rußbrandes hervorrufen. Des Weiteren besteht bei falscher Auslegung, wie z. B. durch Abgasaustritt aus der Feuerstätte, eine Gefährdung für die Nutzer. Die zur sicheren Funktion von Feuerungsanlagen erforderlichen Druck- und Temperaturbedingungen sind in der Norm DIN EN 13384-1-3 beschrieben.

3.6.3 Problematik bei handbeschickten Einzelraumfeuerungen für eine vollständige Verbrennung

Für eine vollständige Verbrennung sind eine wirksame Temperatur und ausreichend lokaler Sauerstoff notwendig. Die brennbaren gasförmigen Bestandteile müssen in der aktiven Reaktionszone (Zone mit ausreichend hoher Temperatur und lokalem Sauerstoff) für eine bestimmte Zeit verweilen, um sie vollständig oxidieren zu können. Diese Zeit wird als aktive Verweilzeit bezeichnet. Die Verbrennungsparameter (wirksame Temperatur, lokaler Sauerstoff und ausreichend aktive Verweilzeit) sollten zu jedem Zeitpunkt des Verbrennungsprozesses ausreichend gewährleistet sein, da sonst eine unvollständige Verbrennung mit diversen staub- und gasförmigen Schadstoffemissionen entsteht. Ausgehend von dem Stand der Technik der handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen werden die oben erwähnten Verbrennungsparameter im Praxisbetrieb aufgrund einfacher Konstruktion sowie fehlender Regelung des Verbrennungsprozesses nur bedingt eingehalten.

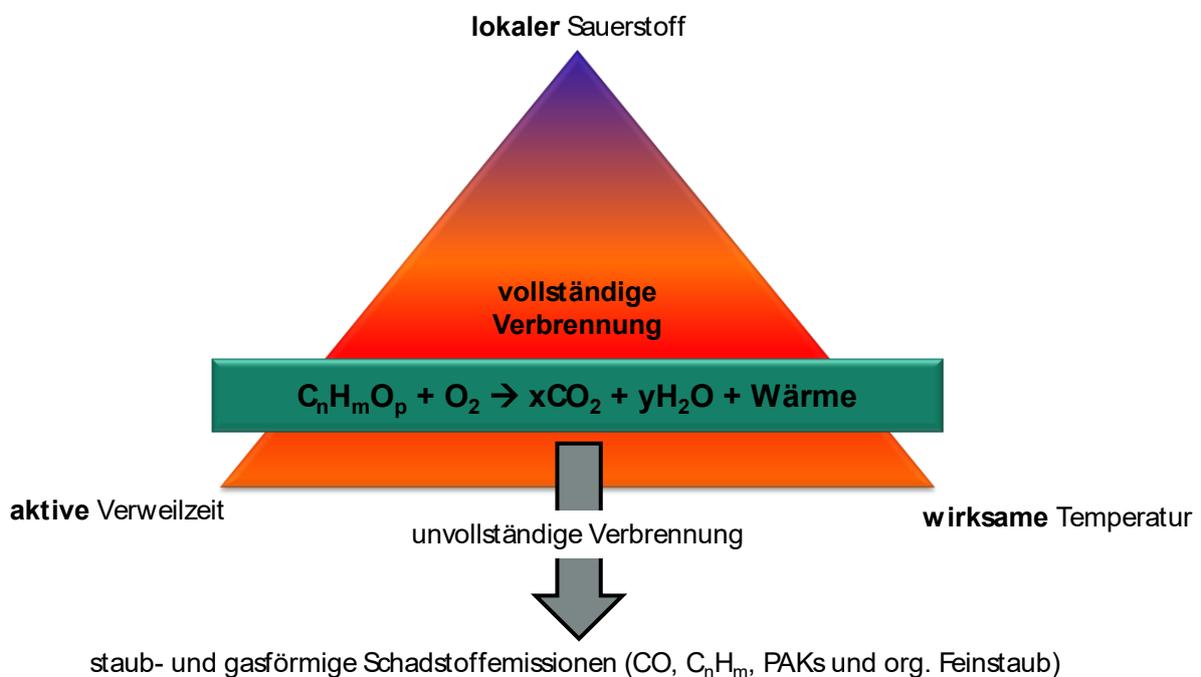


Abbildung 4: Parameter für eine vollständige Verbrennung.

Handbeschickte Einzelraumfeuerungsanlagen werden bisher aus vermarktungs- und wirtschaftlichen Gründen ohne Stromversorgung sowie ohne jegliche Art automatischer Steuerung oder Regelung betrieben. Daher ist der Einfluss des Betreibers auf das Verbrennungs- und somit auf das Emissionsverhalten sehr ausschlaggebend. Aufgrund der primitiven Konstruktion bzw. Gestaltung des Verbrennungsprozesses können handbeschickte Einzelraumfeuerungsanlagen nur unter speziellen Betriebsbedingungen eine emissionsarme Verbrennung gewährleisten, welche meistens durch die Hersteller im Rahmen der Entwicklung oder bei der Typprüfung festgelegt und in der Bedienungs- und Aufstellanleitung der Feuerungsanlagen angegeben und vom Betreiber eingehalten werden

müssen. Im Folgenden sind die wichtigsten von dem Betreiber ausgehenden Einflussfaktoren auf den Betrieb von handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen dargestellt:

- Beschickungsregime der Feuerungsanlage,
 - Brennstoffauswahl (Art und verbrennungstechnische Eigenschaften - vor allem Feuchtegehalt),
 - Brennstoffmenge pro Auflage,
 - Anzahl, Größe, Länge und Form der beschickten Holzscheite,
 - Zeitpunkt und Dauer der Beschickung,
 - Ordnung bzw. Stapelung der Holzscheite im Feuerraum.
- Einstellung der Verbrennungsluft und des Naturzugs.
- Wartung und Pflege der Feuerungsanlage.

In der Praxis werden die Betriebsangaben des Herstellers durch den Betreiber nur selten eingehalten, wodurch sich ein sachgemäßer (emissionsarmer und effizienter) Betrieb nur bedingt erreichen lässt. Fehlbedienungen der Einzelraumfeuerungsanlagen haben eine unvollständige Verbrennung und somit erhöhte Schadstoffemissionen in Wohngebieten zur Folge.

Um wissensbasierte Maßnahmen und Technologien zur Verbesserung des Emissions- und Verbrennungsverhaltens in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen zu entwickeln, wurde im Rahmen der Forschungs- und Prüfaktivitäten des Fachgebiets Verbrennungs- und Umweltschutztechnik des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP die Problematik in handbeschickten biomassebetriebenen Einzelraumfeuerungsanlagen durch intensive Untersuchungen mehrerer handelsüblicher Einzelraumfeuerungsanlagen systematisch erforscht. Das Diagramm 2 zeigt die Verläufe der mittleren Werte des Sauerstoffs (gemessen im Abgas), der Temperaturen im Feuerraumbereich (nach der Sekundärluftzugabe bzw. vor der Oxidationskammer) und des Kohlenstoffmonoxids als Indikator für die Verbrennungsqualität.

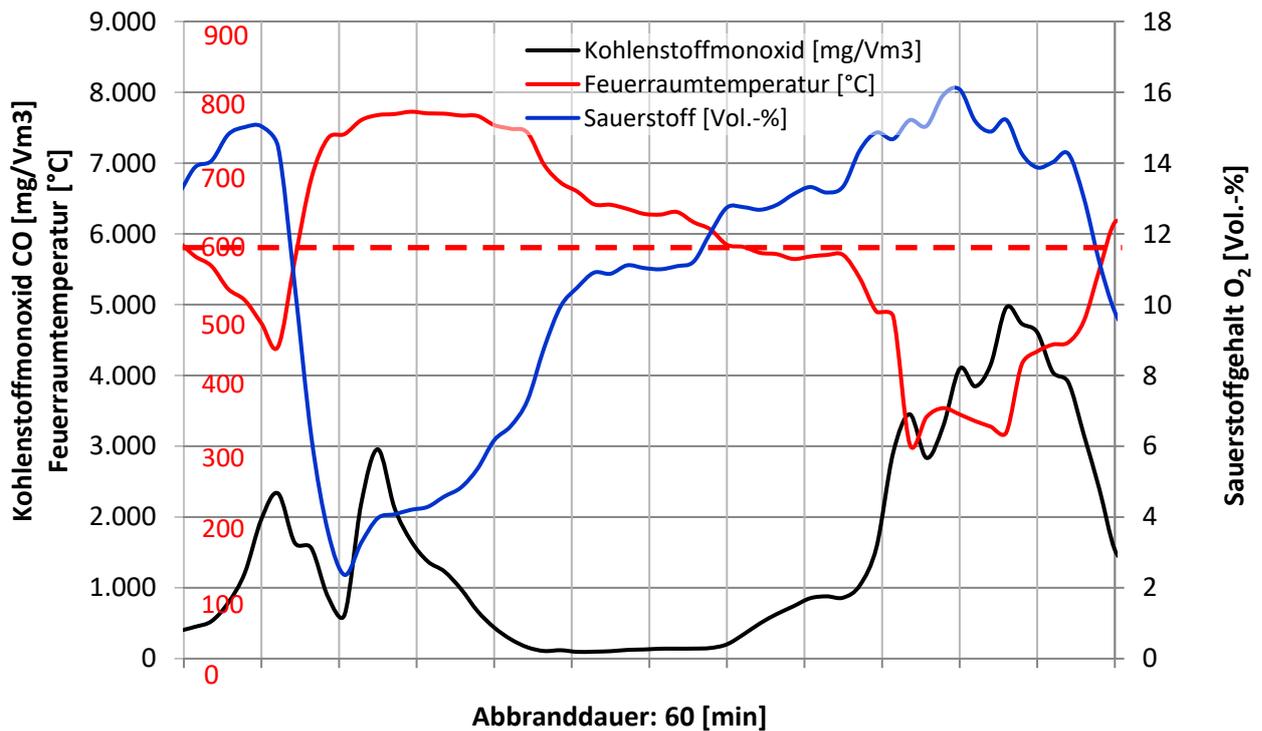


Diagramm 2: Typisches Abbrandverhalten in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen.

Anhand des Betriebs der oben erwähnten Einzelraumfeuerungsanlagen wurden folgende Erkenntnisse und Erfahrungen erworben, welche auch dem Stand der Technik der Einzelraumfeuerungsanlagen entsprechen:

- Trotz ausreichend hoher Temperaturen im Feuerraumbereich und genügend hohem Sauerstoffgehalt im Abgas (Luftüberschusszahl bzw. Lambda zwischen 1,8 und 4,0) fand eine unvollständige Verbrennung statt. Eine Abgasverweilzeit in einer aktiven Reaktionszone von ca. 1,8 Sekunden sollte für eine vollständige Oxidation sowohl von staub- als auch gasförmigen Emissionen ausreichend sein. Die unvollständige Verbrennung ist auf eine ungünstige Sauerstoffverteilung zurückzuführen (Diagramm 2).
- In der Startphase findet eine sehr intensive Verbrennung mit hohen Temperaturen und hohem Ausstoß an Schadstoffen statt. Je intensiver die Verbrennung in der Startphase erfolgt, umso schlechter ist die Verbrennungsqualität in den Regel- und Ausbrandbetriebsphasen.
- Im Feuerraumbereich war die Verteilung der Temperaturen über den gesamten Querschnitt sehr ungleichmäßig. Dort haben die Abgastemperaturen während des Betriebs zwischen 380 °C und 920 °C fluktuiert. Je ferner der Messpunkt vom Kern des Abgasstroms liegt, desto niedriger sind die Abgastemperaturen.
- Direkt nach der Beschickung sowie am Ende der Regelbetriebsphase kann das nötige Temperaturniveau (ca. > 550 °C) für die thermische Oxidation nicht gewährleistet werden.
- Bei der festen Einstellung der Verbrennungsluft gerät die Verbrennung schnell in Sauerstoffmangel bzw. in Überlast wie beim Einsatz von trockenen

Brennstoffen und/oder bei der Beschickung großer Brennstoffmengen. Außerdem findet beim Einsatz feuchter Brennstoffe eine schwache Verbrennung mit niedrigen Temperaturen statt, welche über lange Zeit des Betriebs unter den geforderten Oxidationstemperaturen für einen emissionsarmen Betrieb liegen.

- Es wurde beobachtet, dass die kleinste Änderung des Naturzugs bzw. des Unterdrucks in der Abgasanlage einen großen Einfluss auf die Verbrennungsqualität sowie auf die Effizienz der Feuerungsanlage hat.

Die oben geschilderten Erkenntnisse und Erfahrungen haben eine wichtige wissenschaftliche und praktische Grundlage über den Betrieb von Einzelraumfeuerungsanlagen zur zielführenden Entwicklung von Maßnahmen und Technologien zur Verbesserung des Verbrennungs- und Emissionsverhaltens geliefert.

3.6.4 Abbrand- und Verbrennungsluftzufuhrkonzepte bei handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen

In diesem Abschnitt werden die Verbrennungskonzepte der Einzelraumfeuerungsanlagen mit der Verbrennungsluftzufuhr sowie die Problematik der Verbrennung in solchen technisch primitiven Feuerungstechnologien dargestellt. Dazu werden die möglichen Maßnahmen geschildert, die zur Verbesserung vom Verbrennungs- und Emissionsverhalten sowie Erhöhung der Effizienz eingesetzt werden können.

Hinsichtlich der Abbrandprinzipien und der Verbrennungsluftzufuhr in Einzelraumfeuerungsanlagen ist zwischen oberem und unterem Abbrand zu unterscheiden. Beim **oberen Abbrand** strömen die energiereichen gasförmigen Vergasungsprodukte aus dem Glutbett nach oben oder seitlich aus und werden unter Zugabe von Sekundär- und selten Tertiärluft weiter oxidiert. Die für die Vergasung nötige Verbrennungsluft wird entweder seitlich an den Brennstoff geleitet oder über einen Rost durch den Brennstoff geführt. Die Führung der Verbrennungsluft (Primärluft) durch den Brennstoff führt zu einer intensiven Vergasung und somit zu einer schwer kontrollierbaren Verbrennung mit erhöhten Schadstoffemissionen.

Beim **unteren Abbrand** (Sturzbrand) strömt das Abgas mit den Vergasungsprodukten nicht wie beim oberen Abbrand nach oben, sondern durch das Glutbett nach unten und wird anschließend unter Zugabe von Sekundär- oder auch Tertiärluft in einer Nachbrennkammer weiter oxidiert. Für die Funktion des unteren Abbrands ist die Verfügbarkeit eines ausreichend dicken Glutbetts erforderlich. Dabei wird zwar eine relativ gute Oxidation erreicht, hingegen steigt die Schadstoffbelastung aufgrund des Mitreißens (wie im Fall von Feinstaub) und der chemischen Mobilisierung von schadstoffbildenden Komponenten (Stickstoff, Salze, Metalloxide usw.) an. Die meisten handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen (über 92 % des Marktangebots) basieren auf dem oberen Abbrandprinzip, bei dem ein schönes Flammenbild und dadurch visuelle Behaglichkeit erreicht wird. Für die Entwicklung der Regelung ist wichtig, die Verbrennungsluftzufuhr zu charakterisieren, welche den einzigen regelbaren Parameter darstellt. Unabhängig von dem Abbrandprinzip unterteilt sich die

gesamte Verbrennungsluft in Rostluft, Scheibenspülluft, Sekundärluft und Tertiärluft, welche je nach Konstruktion und Abbrandprinzip unterschiedliche Rollen spielen:

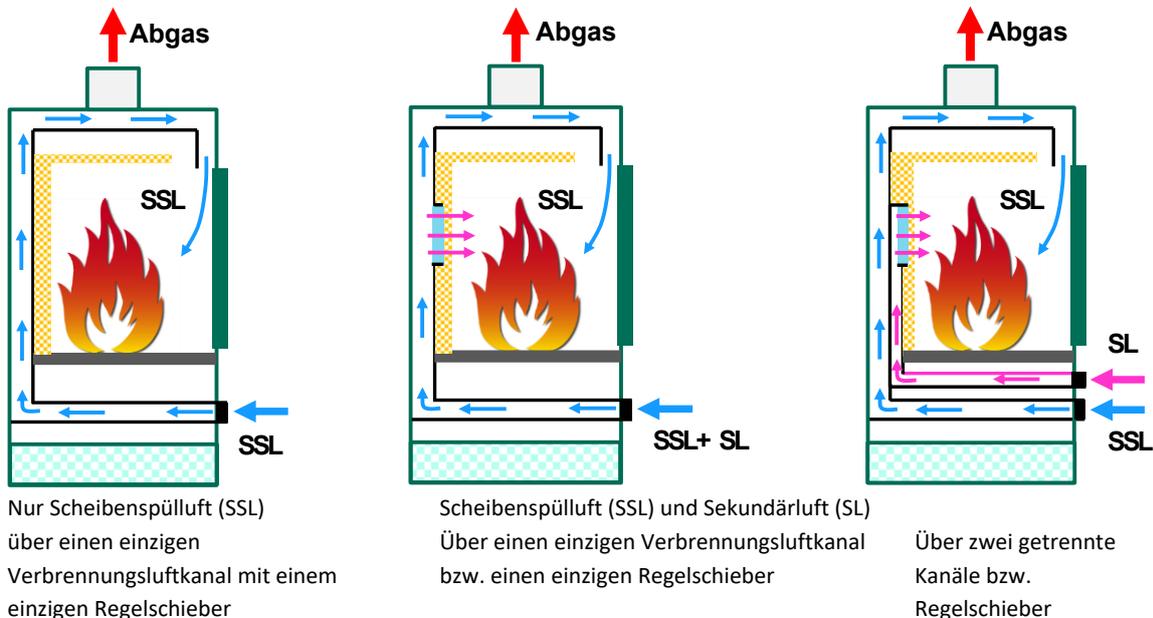
Rostluft

Die Rostluft agiert als Primärluft und wird dem Verbrennungsprozess durch den Rost in den unteren Bereich des Glutbetts zugeführt. Sie wird in der Regel bei der Verbrennung von Kohle benötigt. Bei der Verbrennung von Holz wird sie ausschließlich für die Beschleunigung der Anzündung verwendet.

Scheibenspülluft

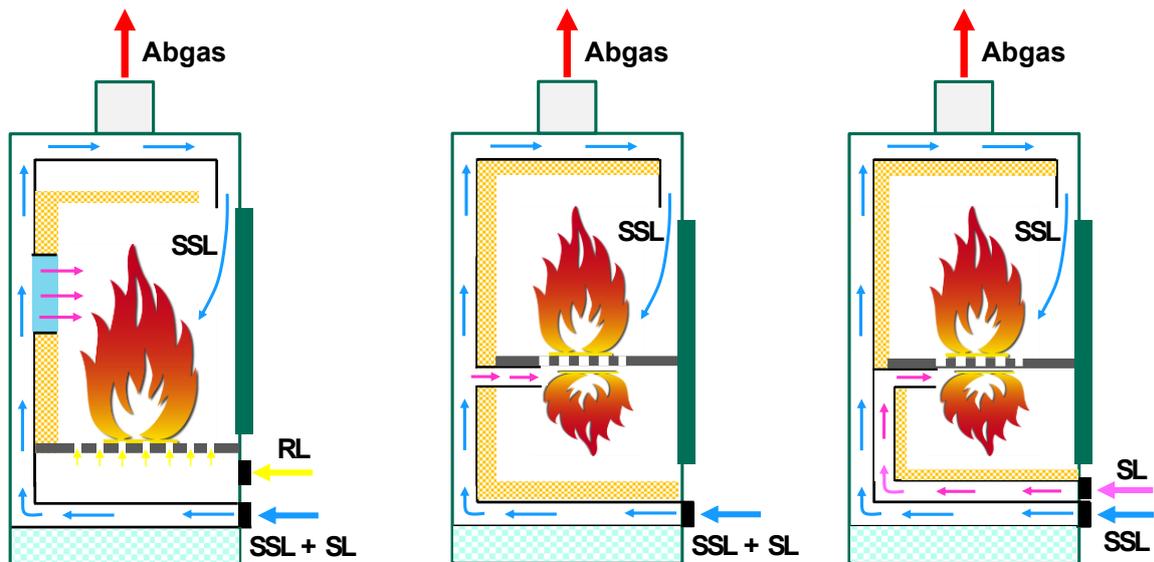
Die Scheibenspülluft wird dem Feuerraum seitlich oder frontal über die gesamte Breite der Sichtglasscheiben zugeführt und kann sowohl als Primärluft als auch als Sekundärluft agieren. Je nach technischer Ausführung bzw. Verteilung entlang der Feuerraumhöhe ist ihre Wirkung als Primär- oder Sekundärluft während der Verbrennung unterschiedlich.

Prinzip des oberen Abbrands



Prinzip des oberen Abbrands

Prinzip des unteren Abbrands



Rostluft, Scheibenspülluft und Sekundärluft: über zwei getrennte Verbrennungsluftkanäle mit zwei getrennten Regelschiebern

Scheibenspülluft mit Sekundärluft: über einen einzigen Verbrennungsluftkanal bzw. mit einem einzigen Regelschieber

Scheibenspülluft mit Sekundärluft: über zwei getrennte Kanäle bzw. zwei getrennte Regelschieber

Abbildung 5: Schematische Darstellung der Abbrandprinzipien mit den Möglichkeiten für die Luftzufuhr bei handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen.

Sekundärluft

Die Sekundärluft wird dem Verbrennungsprozess in der Regel auf Flammebene zugeführt und nimmt somit lediglich an der Oxidation und nicht an der Vergasung, wie im Fall der Rost- und Scheibenspülluft, teil. Die Sekundärluft spielt eine ausschlaggebende Rolle bei der Oxidation und lässt sich im Gegensatz zur Tertiärluft sehr gut regeln.

Tertiärluft

Bei der Tertiärluft handelt es sich um eine zusätzliche Sekundärluft, die normalerweise in die Nachbrennkammer zugegeben wird. Im Bereich der handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen wird die Tertiärluft aufgrund niedriger Temperaturen in der Nachbrennkammer über lange Zeit des Abbrands nicht nennenswert zur Oxidation beitragen können und somit selten verwendet.

Die Verbrennungsqualität hängt nicht nur von der Menge, sondern auch von der Verteilung der Verbrennungsluft im gesamten Feuerraum bzw. in der aktiven Reaktionszone ab. Hier spielen die Geometrie des Feuerraums sowie die technische Einrichtung zur Führung und Verteilung der Primärluft (Scheibenspülluft) eine große Rolle. Bisher wird die Verbrennungsluft gemäß den Angaben der Bedienungsanleitung der Hersteller eingestellt, welche nur für ein optimales Beschickungsregime bzw. für einen hochqualitativen Brennstoff mit sehr guten physikalischen und verbrennungstechnischen Eigenschaften festgelegt sind. Außerhalb des Beschickungsregimes wird die Verbrennung nur bedingt sachgemäß stattfinden.

3.7 Vermeidung und Maßnahmen zur Verminderung von Emissionen in Einzelraumfeuerungsanlagen

Emissionen aus der Verbrennung in Einzelraumfeuerungsanlagen sollen aus technischen und wirtschaftlichen Gründen durch eine gezielte Optimierung des Verbrennungsprozesses bzw. erst durch präventive und Primärmaßnahmen reduziert werden, bevor Sekundärmaßnahmen zum Einsatz kommen. Abbildung 6 stellt eine empfohlene Hierarchie zur ökonomischen und ökologischen Reduzierung von Schadstoffemissionen dar. Gemäß dieser Hierarchie sind die Emissionen zu vermeiden und zu vermindern, bevor sie behandelt werden müssen. Die Vermeidung sowie Verminderung erfolgt in der Regel vor oder im Verbrennungsprozess, während die Behandlung anhand von integrierten Technologien oder von nachgeschalteten Abgasbehandlungssystemen durchgeführt wird.

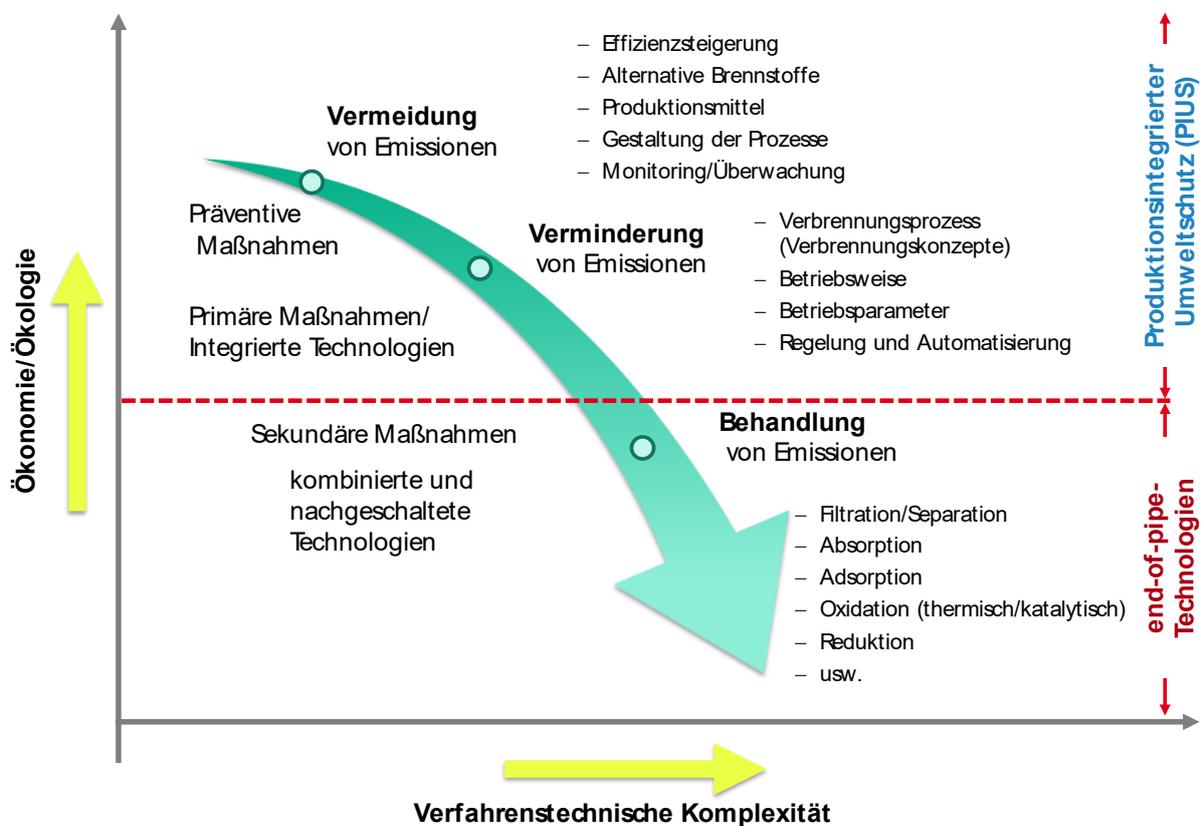


Abbildung 6: Hierarchie zu einer ökonomischen und ökologischen Reduzierung von Schadstoffemissionen.

Bei den nachgeschalteten Abgasbehandlungssystemen gilt im Allgemeinen, je höher die Konzentrationen und feiner die Staubpartikel im Abgas sind, um so technisch komplexer und schwieriger sowie teurer wird die Reduktion von Emissionen. Zu dieser technischen Komplexität trägt die Art des Betriebs der Einzelraumfeuerungsanlage maßgeblich bei, wobei die chemische Zusammensetzung und die physikalischen Eigenschaften des Abgases in Abhängigkeit von den Betriebsphasen sowie von den verbrennungstechnischen Eigenschaften des eingesetzten Brennstoffs eine ausschlaggebende Rolle spielen.

Zur Verbesserung des Verbrennungs- und Emissionsverhaltens in Einzelraumfeuerungsanlagen können sowohl verbrennungstechnische, konstruktive und regelungstechnische Maßnahmen als auch integrierte Technologien auf Basis der katalytischen und thermischen Wirkung eingesetzt werden. Im folgenden Abschnitt werden die präventiven Maßnahmen, die Primärmaßnahmen sowie die nachgeschalteten Behandlungstechnologien bzw. Sekundärmaßnahmen ausführlich dargestellt.

3.7.1 Präventive Emissionsminderungstechnologien

Alle Maßnahmen, die zu einer Vermeidung der Emissionsentstehung führen, gelten als präventive Maßnahmen. Diese werden in der Regel durch eine entsprechende Gesetzgebung anhand von Verordnungen, Normen und Richtlinien geregelt. Durch solche Maßnahmen werden die Zulassung, die Errichtung und der Betrieb von Einzelraumfeuerungsanlagen rechtlich verbindlich festgelegt. Beispielsweise stellt die 1. BImSchV klare Anforderungen an die Emissionen bei der Überwachung sowie an die Brennstoffe, welche in Biomasseverbrennungsanlagen eingesetzt werden dürfen. Außerdem verweist die 1. BImSchV auf die Zulassungsgrundlagen wie Normen und Richtlinien nach denen Einzelraumfeuerungsanlagen geprüft und in den Umlauf gebracht werden dürfen. Zusätzlich umfasst dieser Punkt die Erstellung neuer technischer und normativer Anforderung an die Verbrennungstechnik wie beispielsweise mit der Einführung der Umweltzertifizierung des Blauen Engels für besonders saubere Kaminöfen. Auch die Erstellung technischer und normativer Anforderung an die Installation der Verbrennungstechnik im Haushalt, sodass die betrieblichen Unterschiede von Prüfstand und Praxisbetrieb ausgeglichen werden können, z. B. durch den Einsatz von Zugbegrenzern und Saugzuggebläsen für die Einstellung der optimalen Verbrennungsluftzufuhr sind den präventiven Minderungsmaßnahmen zuzuordnen.

Eine der wichtigsten präventiven Maßnahmen stellt die permanente Betriebs- und Emissionsüberwachung dar, welche bislang in Großverbrennungsanlagen etabliert ist und sich dank modernster Sensor-, Regelungs-, Automatisierungs- und Vernetzungstechnologien auch stetig mehr in Einzelraumfeuerungsanlagen technisch und wirtschaftlich umsetzen lässt. Ohne solche Maßnahmen ist eine ausschlaggebende Reduzierung der Schadstoffemissionen vor allem von 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, Gluthaltestufe) entsteht und auf den sich die Effektivität der Grenzwertverschärfung bezieht. Sollten die kritischen Betriebsphasen von der Überwachung ausgeschlossen bleiben, ist eine signifikante Schadstoffreduzierung trotz verschärfter Emissionsgrenzwerte nicht unbedingt zu erreichen. Die permanente Betriebs- und Emissionsüberwachung wurde im Fraunhofer IBP im Rahmen eines vom BMWi geförderten Projekts (Kombinationssystemprojekt, FKZ: 03KB109A) erfolgreich entwickelt und dauererprobt [Aleysa et al. 2019].

Zu den präventiven Maßnahmen zählen außerdem die normativen Regelungen zur Sicherung von guten Brennstoffqualitäten. Darunter fallen vor allem DIN CERTCO zertifizierte Brennstoffe, das ENplus Qualitätszertifikat zur Sicherung der Qualitäten von Holzpellets sowie die Norm DIN EN ISO 17225-4 für Hackgut bzw. Hackschnitzel. Ebenfalls die Erstellung von Anforderungen an Brennstoffe für den Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen, beispielsweise empfehlen Prüf- und Forschungsergebnisse diesbezüglich sehr viel geringere Brennstofffeuchtegehalte zwischen min. 11 % – max. 15 % für einen optimalen Einsatz zur Verbrennung in Einzelraumfeuerungsanlagen, als die generellen Vorgaben der 1. BimschV. Auch der Einsatz von technisch vorbehandeltem Brennstoff mit veränderter Holzstruktur für verbesserte Verbrennungsbedingungen (cracking bzw. Aufspaltung) ist ein neuartiger Ansatz der ebenfalls verfolgt wird.

3.7.2 Primäre bzw. integrierte Emissionsminderungstechnologien

Unter Primärmaßnahmen sind konzeptionelle, konstruktive oder regelungstechnische Maßnahmen zu verstehen, die für die Verbesserung des Verbrennungs- und Emissionsverhaltens zu ergreifen sind. Mit der Regelung der Verbrennung bzw. der Abbrand-Regelung beschäftigt sich die vorliegende Arbeit und wird im weiteren Verlauf noch im Detail beschrieben. Zu den Primärmaßnahmen gehören außerdem die integrierten Technologien wie beispielsweise die Einbautentechnik. Die Besonderheit der Primärmaßnahmen hinsichtlich der Anwendung in Einzelraumfeuerungsanlagen liegt darin, dass sie eine sichere Funktion hinsichtlich der Minderung von Schadstoffen und der Erhöhung der Verbrennungseffizienz gewährleisten. Darüber hinaus lassen sie sich wirtschaftlicher, sicherer sowie einfacher in der Praxis implementieren und betreiben. Alle Abgasbehandlungstechnologien, die nach dem Wärmeaustausch in die Feuerungsanlage integriert werden, sind als kombinierte oder nachgeschaltete Sekundärmaßnahmen zu bezeichnen. Integrierbare Technologien zur Abgasbehandlung in Kleinfeuerungsanlagen kommen gemäß dem Stand der Technik als Filtrations- und Oxidationsverfahren zum Einsatz. Diese Verfahren werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Filtrationsverfahren

Die bisher verbreiteten Filtrationsverfahren basieren auf dem Abscheideprinzip von Oberflächen- oder Speicherfiltern. Dabei werden die Stäube mechanisch durch Sperren oder Sedimentation abgeschieden. Als Filterstruktur werden Materialschüttungen (Granulate), Schaumkeramik (in der Regel Nichtoxidkeramik) oder hochtemperaturbeständige Gewebe (Faser) verwendet. Auf und in der Filterstruktur sollen die staubförmigen Schadstoffe abgeschieden und beim Erreichen günstiger Temperaturen freigebrannt werden. Die anorganischen Bestandteile lagern sich in der Struktur ab. Das führt aufgrund der Zunahme des Strömungswiderstands zur Notwendigkeit einer ständigen manuellen Reinigung der Struktur. Das Filtrationsverhalten hängt von vielen Faktoren ab wie z. B. der Geometrie, der Porengröße und der Filterflächenbelastung.

Die Problematik bei solchen Strukturen (Schüttung, Drahtgestrick oder Schaumkeramik) liegt darin, dass eine schnelle Verstopfung beim Einsatz ungünstiger Brennstoffe oder bei niedrigem Unterdruck in der Abgasanlage

erfolgt. Dies tritt bei Granulat-Schüttungen schneller auf als bei der Schaumkeramikstruktur, da die Schaumkeramikstruktur über einen größeren Porenanteil (> 70 %) als die Granulat-Schüttung (< 35 %) verfügt. Das führt dazu, dass die Filterplatten oder Filterkassetten meistens im Praxisbetrieb durch die Nutzer ausgebaut und die Feuerungsanlagen ohne die Filtereinrichtung weiterbetrieben werden. Zusätzlich dazu zeigt die Schaumstruktur aus Nichtoxidkeramik aufgrund der ständigen und großen Temperaturwechsel während des Betriebs keine hohe mechanische Stabilität. Nichtoxidkeramik kennzeichnet sich durch geringe Duktilität und hohe Sprödigkeit aus. Im Praxisbetrieb der Einzelraumfeuerungsanlagen können die Schaumkeramikplatten bei der Reinigung durch die Nutzer beschädigt bzw. zerbrochen werden. Aufgrund fehlender rechtlicher Überwachungs- bzw. Austauschregelung werden die Filterplatten anschließend nicht mehr ersetzt. Gemäß den Praxiserfahrungen werden die Betriebsangaben der Hersteller (wie z. B. Auflageregime, Wartungsintervalle, Lufteinstellung, Filteraustausch usw.) vom Anlagenbetreiber nicht berücksichtigt.

Oxidationsverfahren

Bei den Oxidationsverfahren ist zwischen katalytischen und thermischen Verfahren zu unterscheiden. In den letzten Jahren wurden viele katalytische Verfahren für den Einsatz in biomassebetriebenen Kleinfeuerungsanlagen entwickelt und eingesetzt. Thermische Oxidationsverfahren wurden erst im Rahmen von Untersuchungen im Fachgebiet Verbrennungssysteme des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP entwickelt und im Rahmen dieses Projekts erforscht. Sie besitzen ein hohes Potential für eine sichere und nachhaltige Schadstoffminderung und gewährleisten eine bedeutsame Effizienzerhöhung. Im Folgenden werden die katalytischen und thermischen Oxidationsverfahren und deren Wirkmechanismen genauer erläutert.

▪ **Katalytische Oxidationsverfahren**

Bei den katalytischen Oxidationsverfahren wird das Abgas in die katalytisch beschichtete Struktur (Granulat-Schüttung, Schaumstruktur aus Oxid- und Nichtoxidkeramik, Waben, Drahtgewebe bzw. Drahtgestrick) geleitet. Die im Abgas enthaltenen, brennbaren Schadstoffe wie z. B. Kohlenstoffmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoffe (C_nH_m , VOCs, PAKs) kommen mit der katalytisch-aktiven Oberfläche des Katalysators in Kontakt. In Anwesenheit von Sauerstoff können die Oxidationsreaktionen durch den Katalysator bereits bei einer Temperatur größer als 300 °C stattfinden. Diese Schadstoffe werden durch Oxidation in Stoffe wie Wasser und Kohlendioxid überführt und dadurch toxikologisch gemildert. Der Katalysator nimmt an den Reaktionen nicht teil bzw. wird im Zuge der Oxidation nicht verbraucht. Er gewährleistet lediglich, dass die Reaktionen bei einem niedrigeren Temperaturniveau (schon bei 300 °C statt bei 500 °C) stattfinden können. Jeder Katalysator unterliegt einem Alterungsprozess, sodass die Aktivität des Katalysators mit der Zeit abnimmt. Ursachen hierfür sind beispielsweise Stäube, die bei Ablagerungen am oder im Katalysator die aktive Oberfläche verkleinern oder die katalytische Schicht durch ihre scharfkantige Geometrie abtragen. Katalysatoren reagieren relativ empfindlich auf Überhitzungen

mit Strukturveränderungen im Molekülaufbau. Darüber hinaus vergiften Schwermetalle bzw. deaktivieren Natrium, Kalium, Magnesium und Calcium die katalytische Wirkung [Schultes 1996, Janbozorgi et al. 2010]. Beim Betrieb von Katalysatoren sind Wirksamkeitsverluste durch chemische Veränderungen, durch Wanderung von Verunreinigungen sowie mechanischen Belastungen nicht auszuschließen. Je rauer die Einsatzbedingungen des Katalysators sind, desto schneller und stärker treten solche Verluste auf [Beebe et al. 1943, Schultes 1996, nach Janbozorgi et al. 2010]. Da Einzelraumfeuerungsanlagen nur bei der Typprüfung und nicht wiederkehrend durch den Schornsteinfeger bezüglich der Emissionen überwacht werden müssen, wird die oben geschilderte Problematik mit der Beschädigung des Katalysators nicht festgestellt, folglich nicht sachgemäß und nicht rechtzeitig beseitigt. Bisher gibt es keine gesetzliche oder normative Regelung, wodurch der Ersatz oder die Regenerierung von Katalysatoren aufgrund von Alterung oder bei dem Auftreten von Funktionsschäden in der Praxis kontrolliert wird.

- **Thermische Oxidationsverfahren**

Die bislang einzig bekannte Technik, die auf Basis rein thermischer Oxidation funktioniert, ist die Einbautentechnik. Diese Technik wurde am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP erfunden [Aleysa et al. 2015]. Einbauten oder Füllkörper sind Bauteile aus Keramik, Metall oder Kunststoff, die normalerweise in der Verfahrenstechnik zur Verbesserung von Strömungsverhältnissen, zur Phasentrennung und zur Erzeugung großer Stoffaustauschflächen eingesetzt werden. Klassische Einsatzbereiche der Einbautentechnik sind z. B. der Einsatz in der biologischen Abwasseraufbereitung oder in Trennsäulen in der Chemieindustrie. Das Wirkungsprinzip der Einbautentechnik beim Einsatz in Kleinfeuerungsanlagen beruht auf der Bereitstellung günstiger Oxidationsbedingungen während der Verbrennung innerhalb eines definierten Einbautenmoduls. Dieses Modul speichert während der Verbrennung ausreichend Energie in Form von Wärme und stellt sie automatisch für die thermische Oxidation zur Verfügung, wenn die Temperaturen während der Verbrennung unter bestimmten Grenzen (Abgastemperatur < Modultemperatur) absinken. Durch seine spezielle Architektur gewährleistet das Einbautenmodul eine intensive Durchmischung der brennbaren Abgasbestandteile mit der Verbrennungsluft sowie eine Verlängerung der aktiven Verweilzeit durch eine Mehrfachumlenkung bzw. Verwirbelung der Abgase. Die gespeicherte Energie (Wärme) soll die Oxidation nicht verbrannter Bestandteile im Abgas in den ungünstigen Betriebsphasen wie z. B. beim Auflegen von Holz ermöglichen sowie zu einem stabilen Verbrennungsvorgang unabhängig von der Dynamik des Verbrennungsprozesses führen.

3.7.3 Sekundäre bzw. nachgeschaltete Abgasbehandlungstechnologien

Der Einsatz von Sekundärmaßnahmen erfolgt in der Regel über nachgeschaltete Systeme wie beispielsweise Staubabscheider, deren Betrieb meistens mit einem entsprechenden technischen und wirtschaftlichen Aufwand verbunden ist. Soll die Schadstoffminderung ausschließlich durch nachgeschaltete Abgasbehandlungssysteme (Sekundärmaßnahmen) erreicht werden, wird der Einsatz von Kleinf Feuerungsanlagentechnik zur Bereitstellung von Wärme und Warmwasser in vielen Bereichen eingeschränkt. Sekundärmaßnahmen sollten 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.

3.8 Stand der Technik im Bereich der Verbrennungsregelung

Die verbrennungstechnische Regelung von handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen stellt ein aktuelles und forschungsbedürftiges Thema dar. Die Regelung des Verbrennungsprozesses in solchen Feuerungsanlagen ist aufgrund der primitiven Konstruktion und der nicht automatisierbaren Betriebsweise sehr schwierig und erfordert die Entwicklung neuartiger Regelphilosophien und -strategien, welche eine wirtschaftliche und sichere Umsetzung von Reglern ermöglichen. Die Ausgangssituation zum Einsatz von Reglern in Einzelraumfeuerungsanlagen wird hier aus einer normativen, technischen und vertrieblichen Sicht dargestellt, welche zu einer erfolgreichen Entwicklung und Umsetzung von Reglern in der Praxis von großer Bedeutung bzw. zu betrachten sind.

Bisher gibt es keine normativen Regelungen zur Prüfung von handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen mit Reglern gemäß DIN EN 13240, DIN EN 13229, DIN EN 15250 usw. Für die Entwicklung der Regelung soll erst das Mutterverfahren bzw. die EG-Maschinenrichtlinie 2006/42/EG herangezogen werden. Die Zulassung von Einzelraumfeuerungsanlagen mit Reglern kann in Prüflaboren wie z. B. dem Prüflabor Feuerstätten und Abgasanlagen des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP durchgeführt werden, welche über eine flexible Akkreditierung im Bereich der Feuerstätten verfügen. Im Rahmen der flexiblen Akkreditierung (Kategorie II) sind die Prüflabore ohne jegliche weitere Abstimmung mit der deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) berechtigt neue Prüfverfahren zu entwickeln und anzubieten. Es ist zu erwähnen, dass sich die Grundlage für die normative Regelung des Einsatzes von Reglern in Einzelraumfeuerungsanlagen in der Bearbeitung befindet.

Aus technischer Sicht ist die Umsetzung der Regelung in Einzelraumfeuerungsanlagen möglich. Die sicherheitstechnischen Einsatz- und Rahmenbedingungen sollen noch festgelegt werden. Um eine hohe Umsetzbarkeit in der Praxis zu erreichen, sollen Konzepte für die einheitliche Verbrennungsluftzufuhr entwickelt werden, welche unabhängig von der Konstruktion und dem Design der Einzelraumfeuerungsanlagen eingesetzt werden können. Individuelle Entwicklungen von Reglern sind nicht wirtschaftlich bzw. für viele mittlere und kleine Unternehmen nicht zu leisten.

Die Integration von Reglern in handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen führt zu einer entsprechenden Erhöhung der Anschaffungskosten und erfordert ein neues Konzept für die Gewährleistungsgarantien. Bei hoher Stückzahl an Einzelraumfeuerungsanlagen führen defektanfällige Regler zu ungünstigen wirtschaftlichen Konsequenzen. Der Einsatz von empfindlichen Sensoren wie z. B. Lambda-Sonden sollte daher vermieden werden.

Ein wichtiger Punkt bei den Reglern stellt die Notwendigkeit für die Stromversorgung dar. Die Abhängigkeit der handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen vom Strom ist bisher sowohl bei den Herstellern als auch bei den Nutzern nicht erwünscht. Daher sollten solche Feuerstätten aus vermarktungstechnischen Gründen unabhängig vom Strom sein bzw. sich selbst mit der nötigen Elektrizität versorgen. Gemäß dem Stand der Technik bieten sich zwei technische Möglichkeiten an. Bei der ersten Möglichkeit wird die Elektrizität (bis 250 Watt) durch die Thermik (Thermoelektrik) erzeugt, wobei bei der zweiten Möglichkeit Solarpaneele verwendet werden. Bei beiden Möglichkeiten wird eine Speichereinheit benötigt. Beim Einsatz von Lambda-Sonden oder ähnlichen Sensoren, mit einem hohen Stromverbrauch, ist der Einsatz vom Hausstrom nicht vermeidbar.

Abbrand-Regelungen auf dem Markt

Bisher gibt es auf dem deutschen Markt keine marktausgereiften Lösungen für die Regelung von handbeschickten Biomassefeuerungen. Das einzige auf dem Markt verfügbare System (IHS: Intelligent Heat System) wurde von der Firma HWAM in Dänemark in Kooperation mit der Technischen Universität Dänemark im Rahmen des Förderprogramms (EUDP) der Dänischen Energie-Agentur entwickelt. Das IHS-System ist konstruktiv und regelungstechnisch an den Feuerungsanlagen der Firma HWAM angepasst.

Bei dem IHS-System der Firma HWAM regeln drei in einem Kunststoffgehäuse verbauten Klappen mit einer Gewindesystemtechnik die Zufuhr der Verbrennungsluft, welche in Primär-, Sekundär- und Tertiärluft geteilt wird. Die Regelung der Luft erfolgt in Bezug auf die Abgastemperaturen sowie Sauerstoffkonzentrationen im Abgas mit Hilfe einer Lambda-Sonde, wie in der Abbildung 7 links ersichtlich ist. Eine häusliche Stromversorgung soll aufgrund des hohen Stromverbrauchs der Lambda-Sonde vorhanden sein, um das IHS-System betreiben zu können. Nachteile bei diesem IHS-System sind nicht nur die hohen Anschaffungskosten (600 € bis 750 € für Endverbraucher) sondern auch die Anfälligkeit des Gewindesystems für den mechanischen Verschleiß. Außerdem stellt der Einsatz der Lambda-Sonde bei dieser Anwendung einen großen Schwachpunkt aus den folgenden Gründen dar:

- Verteuerung der Elektronik und somit des gesamten Regelungssystems,
- schnelle Vergiftungserscheinungen aufgrund hoher Belastung an Ruß und sonstigen Aerosolen bei der Verbrennung von Biomassen bzw. beim Einsatz falscher Brennstoffe wie z. B. Abfälle,
- Notwendigkeit zur Kalibrierung und Wartung,

- hoher Stromverbrauch, wodurch eine häusliche Stromversorgung vorhanden sein muss, um die Lambda-Sonde permanent auf 750 °C zu beheizen bzw. betreiben zu können.
- Aufgrund fehlender aktiver Abgasabfuhr (Saugzuggebläse) sind viele Regelstrategien mit dem Lambdasonden-Signal nicht so umzusetzen, wie es in der Regel in Heizkesseln erfolgt.

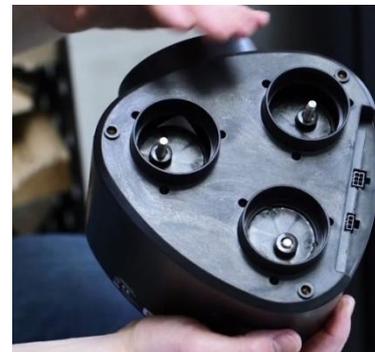
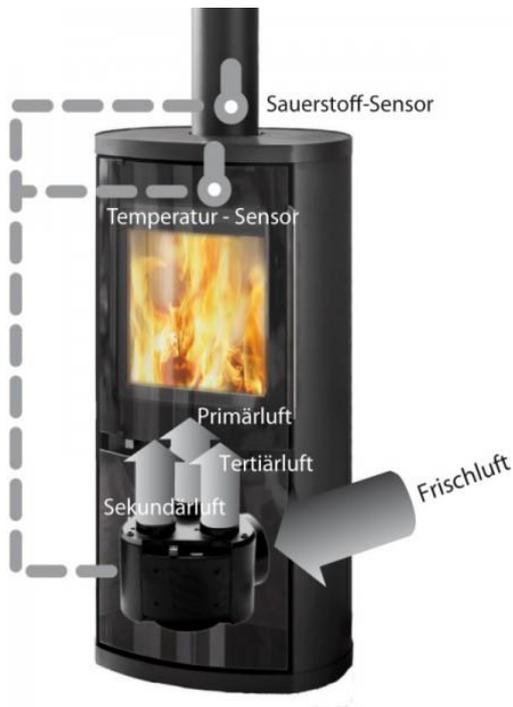


Abbildung 7: Intelligent Heat System (IHS) der Firma HWAM
 [Quelle: <http://hwam.de/vorteile/autopilot+ihs+-+automatic/autopilot+ihs>].

Die Firma Kutzner + Weber GmbH bietet eine Regelklappe an (Abbildung 8, rechts), welche primär für die Regelung des Kaminzugs und sekundär für die Regelung des Abbrandes eingesetzt wird. Diese Klappe regelt die gesamte Verbrennungsluftmenge, welche der Feuerungsanlage zugeführt wird, bezüglich der Abgastemperaturen bzw. Temperaturgradienten. Die getrennte Regelung der Primär-, Sekundär- und Tertiärluft ist nicht möglich bzw. bei diesem System nicht vorgesehen.



Abbildung 8: Gesamtluft-Regelklappe der Firma Kutzner und Weber GmbH
[Quelle: http://www.shk-profi.de/imgs/101083731_d8667d1462.jpg].

Weder das IHS-System der Firma HWAM noch das Klappensystem der Firma Kutzner und Weber GmbH sind parametrierbar bzw. für den universellen Einsatz geeignet. Die beiden Systeme haben sich bisher auf dem deutschen Markt aufgrund fehlender Betrachtung der vorhandenen Verbrennungsluftzufuhrsysteme in handbeschickten Biomassefeuerungsanlagen nicht durchgesetzt.

4 Verbrennungslufteinrichtung des Fraunhofer IBP nach DIN EN 13240

Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP hat im Rahmen anderer Forschungsaktivitäten eine Verbrennungslufteinrichtung (VLE) bzw. Abbrand-Regelung für freistehende Raumheizer nach DIN EN 13240 entwickelt. Es ist zu erwähnen, dass die gezielte Entwicklung einer Abbrand-Regelung zur Verbesserung des Emissionsverhaltens in freistehenden Raumheizern nach DIN EN 13240 keinen Teil des hier vorliegenden Forschungsprojekts darstellt und bereits im Rahmen eines weiteren Forschungsprojekts durchgeführt wurde. Das vorliegende Forschungsprojekt beinhaltet die Weiterentwicklung der bestehenden spezifischen Abbrand-Regelung für einen bestimmten Anlagentyp, zu einer universell einsetzbaren Abbrand-Regelung in sehr unterschiedlichen Einzelraumfeuerungsanlagentypen. Nachfolgend wird das Funktionsprinzip sowie der grundlegende Aufbau der Abbrand-Regelung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP als Basis für die Weiterentwicklung erläutert.

4.1 Funktionsprinzip der Verbrennungslufteinrichtung des Fraunhofer IBP

Eine vollständige emissionsarme Verbrennung erfolgt bei einer bestimmten Temperatur, die ausreichend Wärme bzw. Energie für die Oxidation gewährleisten kann. Gleichzeitig begleitet eine zu hohe Temperatur eine starke Verbrennung mit einem hohen Gehalt an Staubemissionen im Abgas. Die optimale Temperatur für einen Kaminofen wird als Soll-Temperatur T_{SOLL} bezeichnet und wird experimentell ermittelt. Die Luftklappen in einer handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlage, sowohl für die Scheibenspülluft als auch die Sekundärluft, sind bei der manuellen Nutzung fest auf eine Öffnungsweite von ca. 50 % eingestellt. Die Rostluft, wenn vorhanden, wird lediglich beim Zündvorgang der Einzelraumfeuerungsanlage manuell zugeschaltet. Das Diagramm 3 stellt den Temperaturverlauf des Abgases einer handbeschickten nicht geregelten Einzelraumfeuerungsanlage während eines Abbrands dar. Hierbei werden die bisher nicht genutzten emissionsseitigen Einsparpotenziale sehr gut veranschaulicht.

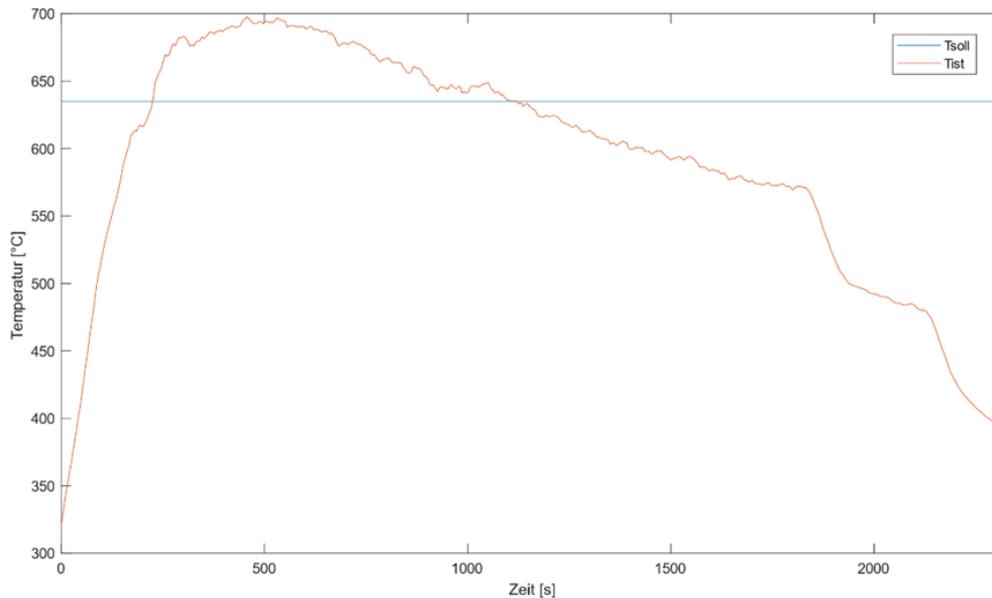


Diagramm 3: Verlauf der Abgastemperatur eines Abbrands in einer Einzelraum-feuerungsanlage mit fixer bzw. manueller Lufteinstellung.

In den ersten ca. 250 Sekunden, während der Trocknungs- und Entgasungsphase der Holzverbrennung, ist das Temperaturniveau bzw. die bereitgestellte Wärmeenergie für den Ablauf chemischer Reaktionen, wie dem Oxidationsprozess des sich bildenden Kohlenstoffmonoxids (CO), noch zu niedrig. Durch das Erreichen einer Verkürzung dieser Zeit können die Emissionen in diesem Bereich erheblich reduziert werden. Im Zeitraum von Sekunde 250 bis Sekunde 1000 findet die Brennphase der Holzverbrennung statt, bei der die Verbrennung und die damit einhergehende Vergasung sehr intensiv ist. Hierdurch entstehen einerseits hohe Staubemissionen, andererseits gerät der Verbrennungsvorgang aufgrund der zu intensiven Verbrennung in Sauerstoffmangel, d. h. es steht eine nicht ausreichende Menge an Sauerstoff für die Oxidation zur Verfügung. Dies kann durch eine gedrosselte bzw. gezieltere Zufuhr von Primärluft in den Verbrennungsraum vermieden werden, wobei der Vergasungsprozess gebremst wird. Ab etwa Sekunde 1250 ist das Ende der Verbrennung, die sogenannte Ausbrandphase, erreicht. Beim Ausbrand ist die Temperatur ähnlich niedrig wie während der Trocknungs- und Entgasungsphase und verlangsamt die Oxidation. Hier muss die Verbrennung durch eine erhöhte Primärluftzufuhr gefördert werden, um eine ausreichende Energiemenge für den Oxidationsprozess sowie eine lange Verbrennungsdauer zu sichern. Durch die Regelung der Verbrennungstemperatur bzw. der Abgastemperatur der Verbrennung kann eine vollständige emissionsarme Verbrennung erreicht werden. Das nachfolgende Diagramm 4 veranschaulicht einen direkten Vergleich der Abgastemperatur eines Abbrands ohne Abbrand-Regelung und mit integrierter Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP.

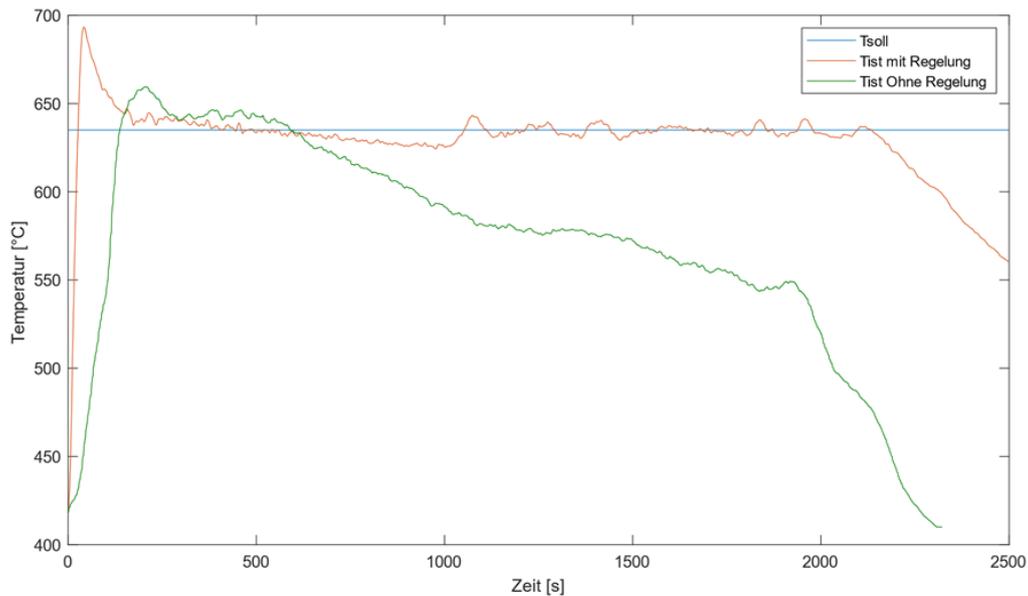


Diagramm 4: Verlauf der Abgastemperatur eines Abbrands in einer Einzelraum-feuerungsanlage ohne und mit geregelter LuftEinstellung.

Das Verbrennungsverhalten ist von vielen Faktoren abhängig wie z. B. der Verbrennungsanlage selbst, dem eingesetzten Brennstoff und der zugeführten Verbrennungsluftmenge. Dabei ist die Regelung der Zufuhr der Verbrennungsluft der einzige kontrollierbare Faktor mit dem ebenfalls die Verbrennungstemperatur geregelt werden kann. Die nachfolgenden Punkte beschreiben die Grundsätze der Temperaturregelung in einer handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlage:

- Die Rostluft sichert eine schnelle Zündung des Holzes, d.h. eine möglichst kurze Anheizphase, in welcher die Emissionen normalerweise aufgrund eines geringen Temperaturniveaus vergleichsweise hoch sind. Infolgedessen soll bei der Trocknung und Entgasung des Holzes sowohl Rostluft als auch Scheibenspülluft zugeführt werden.
- Nach Erreichen der Soll-Temperatur T_{SOLL} wird die Verbrennung ausschließlich über die Scheibenspülluft mit Verbrennungsluft versorgt. Dies gewährleistet eine ruhige Verbrennung mit stabiler Temperatur.
- Die Scheibenspülluft dient dazu, die Temperatur T_{IST} in dem definierten Toleranzbereich zu halten und ausreichend Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung zu stellen.
- Die Scheibenspülluft agiert sowohl als Primärluft als auch als Sekundärluft. Das heißt sie treibt einerseits den Vergasungsprozess an und kann gleichzeitig auch zu einem gewissen Anteil Sauerstoff für die Oxidation von Kohlenstoffmonoxid (CO) zur Verfügung stellen.
- Da die Scheibenspülluft als Sekundärluft nicht immer für eine vollständige Oxidation ausreicht, wird die Verbrennung zusätzlich mit Sekundärluft über die Sekundärluftklappe SLK versorgt.
- Die Sekundärluft wird separat in Abhängigkeit von der aktuellen Sauerstoffmenge O_{2-IST} und der optimalen Sauerstoffmenge O_{2-SOLL} geregelt.

- Die optimale Sauerstoffmenge wird für jeden Anlagentyp experimentell ermittelt.
- Zwar ist der Sauerstoff für die Oxidation sehr wichtig, jedoch kann sich eine zu große Menge an zugeführter Verbrennungsluft auch negativ auf die Verbrennung bzw. den Oxidationsprozess auswirken, da dies zu einem Kühleffekt und somit zur Minderung der Verbrennungstemperatur führen kann.

Die bereits entwickelte Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP, die sogenannte T2O₂-Regelung, wurde einerseits maßgeblich zur Regelung des Verbrennungsprozesses, wodurch eine schadstoffarme und effiziente Verbrennung durch eine sehr genaue Zufuhr der Verbrennungsluft gewährleistet wird und andererseits zur Darlegung und Monitoring des Betriebs entwickelt. Die Darlegung und das Monitoring des Betriebs sollen eine möglichst optimale Bedienung der Feuerungsanlage mit Hilfe digitaler Unterstützung sowie die Erkennung und Bewertung der Qualität der Verbrennung ermöglichen. Die optimale Bedienungsweise der Feuerungsanlage ist nicht in der Software festgelegt, sondern ergibt sich aus der aktuellen Bewertung der Verbrennungsqualität.

Die Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP basiert auf der sogenannten Energiebilanzmethode. Dabei werden im Gegensatz zu den Reglern gemäß dem Stand der Technik ausschließlich robuste und günstige Temperaturfühler im Feuerraumbereich verwendet (vgl. Abbildung 9). Durch die von dem eingesetzten Temperaturfühler generierten Signale wird über eine Energiebilanz im Feuerraum und parametrierbare Algorithmen ein virtuelles Sauerstoffsignal, vergleichbar mit einem Lambda-Wert, generiert und dadurch eine echtzeitfähige Regelung des Verbrennungsprozesses möglich. Die Entwicklung der Signale mit der Zeit beschreibt das Prozessverhalten, sodass Rückschlüsse auf die Verbrennungsqualität gezogen und Optimierungspotentiale identifiziert werden können. Die Aufgabe des Reglers besteht dann darin, die Referenzgröße in einem bestimmten Bereich einzuhalten, bei dem die Verbrennung sachgemäß, d. h. effizient und emissionsarm, stattfinden kann. Zudem sollen möglichst optimale Temperaturen im Feuerraumbereich über die dynamische Einstellung der Primärluftklappe (Rostluft, Scheibenspülluft) gewährleistet werden, wobei die Sekundärluftklappe die Zugabe der Sekundärluftmenge regelt. Die Regelung der Sekundärluftklappe erfolgt durch eine spezielle Kalibrierkurve, in Abhängigkeit des optimalen Sauerstoffbedarfs für eine vollständige Oxidation.

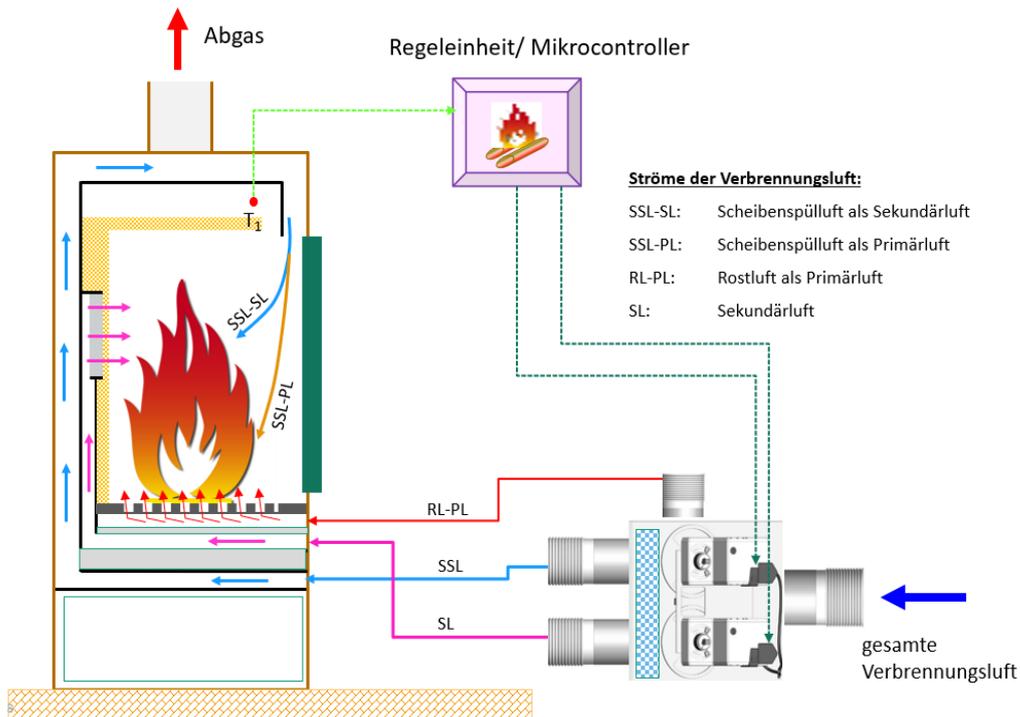


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Regelungskonzepts der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP zur Regelung und Bewertung des Verbrennungsprozesses.

Die essentielle Besonderheit der temperaturbasierten Abbrand-Regelung besteht nicht nur in der preiswerten Anschaffung sowie der Langlebigkeit, sondern auch in dem parametrierbaren Algorithmus, der eine Anpassung der Programmierung sowie einen universellen Einsatz des Reglers ermöglicht ohne die Software dabei anpassen zu müssen. Sowohl die bereits enthaltenen, auch als die noch zu entwickelnden Parametrierungsfaktoren enthalten alle relevanten Prozessspezifikationen und werden berücksichtigt.

4.2 Technischer Aufbau der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP

Das Regelkonzept des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP ist technisch so aufgebaut, dass es als herstellerübergreifende Standardanwendung bzw. als universelle Standardlösung eingesetzt werden kann. Die Abbrand-Regelung lässt sich mit vertretbarem Aufwand in Feuerungsanlagen integrieren. Darüber hinaus erfüllt die Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP alle Anforderungen der geltenden Normen und besteht aus den folgenden Komponenten:

Verbrennungsluftverteilungssystem

Zur Regelung der Verbrennungsluftzufuhr werden Luftklappen mit schrittlosen Servomotoren eingesetzt. Die Klappen regeln definierte Öffnungsweiten über Scheiben, welche an dem Lufteintritt der voneinander getrennten Luftkammern eingebaut sind. Die Klappen sind in einem Verbrennungsluftverteilungssystem verbaut, welche die gesamte Verbrennungsluft über einen Hauptkanal von der Umgebung oder vom Schornsteinsystem im Fall des raumluftunabhängigen Betriebs bezieht. Die Regelung der Primärluftklappe (PLK) im Normalbetrieb erfolgt nur über 60 % (zwischen 40 % bis 100 %) der gesamten Öffnungsweite der

Primärluft, wobei die Sekundärluftklappe (SLK) von 0 % bis 100 % in der Öffnungsweite geregelt wird. Die Regelung der Primärluft (Rostluft, Scheibenspülluft) erfolgt in Bezug auf die gewünschte Feuerungsleistung bzw. die Einstellung der Verbrennungstemperaturen im Feuerraumbereich für eine optimale Oxidation und somit für eine effiziente und emissionsarme Verbrennung. Die Besonderheit bei der Regelung der PLK besteht darin, dass mit einem Servomotor zwei verschiedene Verbrennungsluftströme bzw. der Scheibenspülluftstrom und der Rostluftstrom geregelt werden. Dies wird ermöglicht, da die Scheibenspülluftklappe (SSLK) die für die Scheibenspülluft zuständig ist, mit der Rostluftklappe (RLK) mechanisch gekoppelt ist. Solange die Öffnungsweite der SSLK gleich oder weniger als 85 % beträgt, bleibt die RLK geschlossen. Wenn die SSLK über 85 % geöffnet ist, wird die RLK durch einen mechanischen Hebelarm geöffnet. Die nachfolgende Tabelle 5 zeigt ein Beispiel, um das durch die Kopplung bedingte Verhältnis der beiden Klappen zu verdeutlichen. So bleibt die Rostluftklappe solange vollständig geschlossen (Stellung 0 %), bis die Scheibenspülluftklappe einen Öffnungsgrad von 85 % erreicht. Erst danach öffnet sich die Rostluftklappe proportional mit der Scheibenspülluftklappe. Die dritte Klappe ist die Sekundärluftklappe (SLK) und wird über einen einzelnen Servomotor gesteuert.

Tabelle 5: Kopplungsbedingtes Verhältnis beider Klappen zueinander.

Scheibenspülluftklappe [%]	Rostluftklappe [%]
50	0
85	0
85,1	0,67
90	33,35
100	100

Die Feuerraumtemperatur wird anhand eines verbauten Temperaturfühlers erfasst und als Information der Software zur Verfügung gestellt. Die dem Verbrennungsprozess zugeführte Verbrennungsluftmenge bestimmt die Intensität der thermischen Umsetzung des Brennstoffs und somit die thermische Leistung der Feuerungsanlage. Die Sekundärluft wird so zugeführt, dass der Sauerstoffgehalt im Feuerraumbereich möglichst in einem günstigen Bereich (8 Vol.-% und 11 Vol.-%) für eine optimale Nachoxidation liegt.

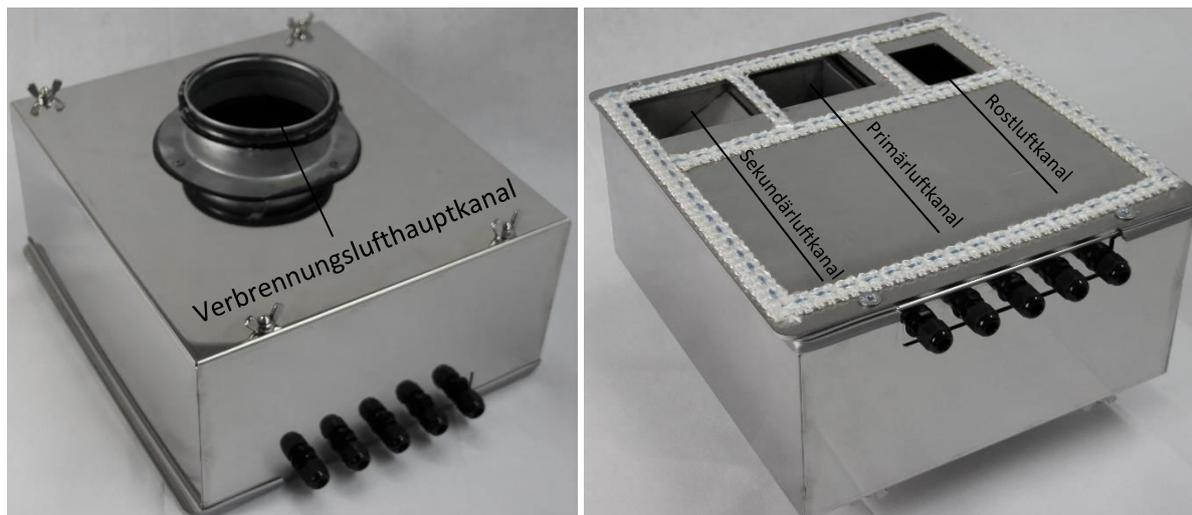


Abbildung 10: Verbrennungsluftverteilungssystem des Fraunhofer IBP.

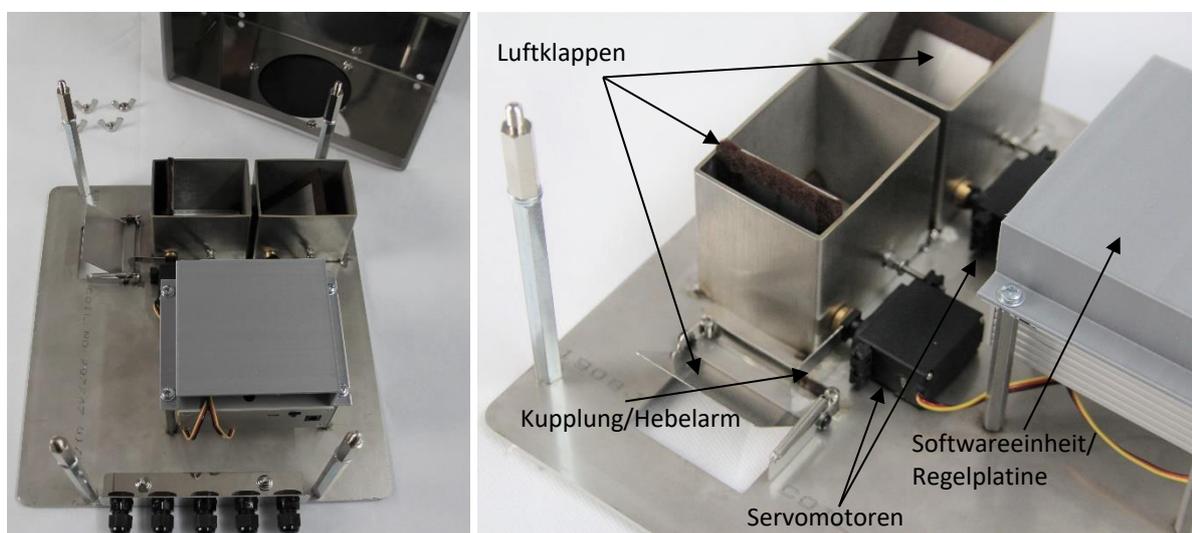


Abbildung 11: Verbrennungsluftverteilungssystem bzw. Grundplatte inklusive der Komponenten der Abbrand-Regelung.

Hardware (Aktoren/Sensoren)

Die notwendige Hardware umfasst Sensoren, Aktoren, Mikrocontroller, Luft- und Sicherheitsklappen sowie ein Netzteil. Als Sensoren werden hauptsächlich **Thermoelemente** in unterschiedlichen Längen (vgl. Abbildung 12) für die Integration in unterschiedlichen Feuerraumgeometrien eingesetzt. Über das Thermoelement wird die aktuelle Feuerraumtemperatur an einer aussagekräftigen Messposition sehr genau erfasst. Der entwickelte Regelansatz kommt gemäß den durchgeführten Untersuchungen sehr gut mit nur einem Thermoelement aus. Der Sensor ist als NiCr-Ni Thermoelement Typ K ausgeführt und wird entsprechend des Einzelraumfeuerungsanlagentyps gestaltet, so dass er leicht zu montieren und auszutauschen ist. Ein Thermoelement dieses Typs ist für die Messung der Temperatur im Bereich von -200 °C bis $+1150\text{ °C}$ geeignet.



Abbildung 12: Temperatursensoren mit unterschiedlichen Längen.

Als Aktoren werden **Servomotoren** des Typs HS-311 von Hitec eingesetzt. Die Auswahl erfolgte aufgrund der Bewertung verschiedener Parameter wie Kosten, Verfügbarkeit, Geräusentwicklung, Geometrie, Drehmoment und Lebensdauer. Die Motoren wurden sowohl im Labor als auch in verschiedenen Öfen unter realistischen Bedingungen in Dauertests ohne Ausfall erprobt.

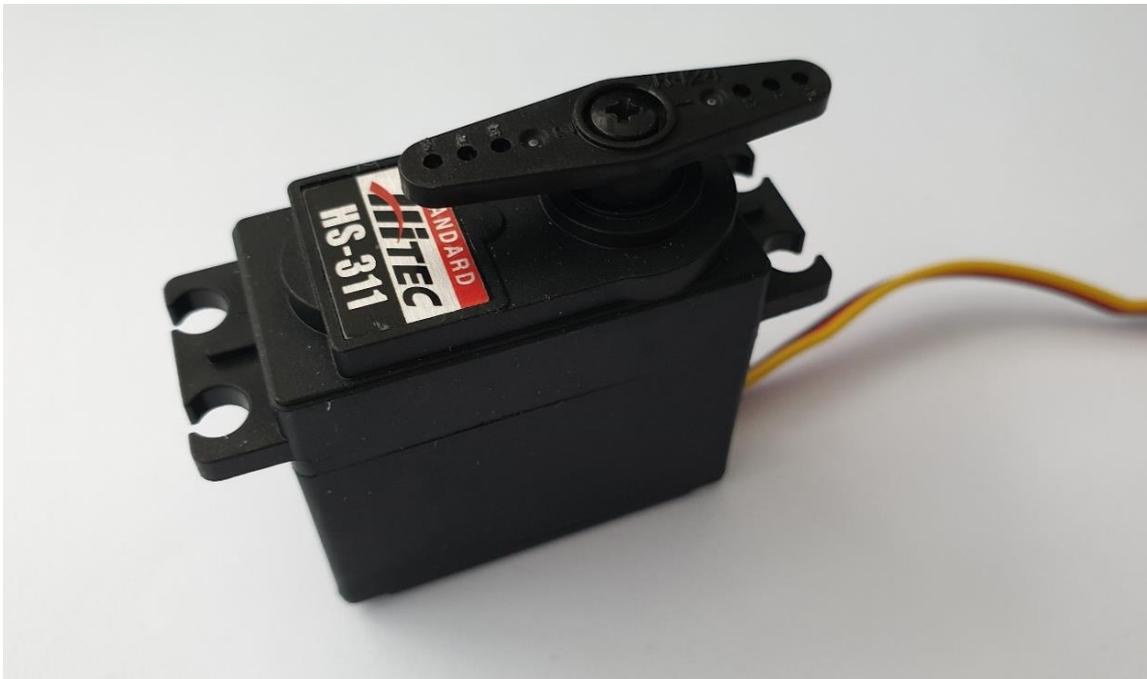


Abbildung 13: Eingesetzter Servomotor-Typ.

Zur Steuerung und Regelung der Einzelraumfeuerungsanlage nach DIN EN 13240 wurde im Rahmen einer erfolgreich durchgeführten Kooperation die Regelplatine

Ofencontroller KSB. 702.26 entwickelt und hergestellt. In der ersten Phase lag der Fokus dabei darauf, den Mikrocontroller so auszulegen, dass er für die Sauerstoffberechnungsmethode und folglich für den Einsatz in Einzelraumfeuerungsanlagen geeignet ist. Hierfür wurde ein einfaches Regelungskonzept mit zwei PI-Reglern verwendet. Im Rahmen der hier vorliegenden Forschungstätigkeiten wird die Grundstruktur des vorherigen Mikrocontroller-Programms fortgeführt. Der Vorteil in der Fortführung der Grundstruktur des Programmes liegt einerseits darin, dass diese Grundstruktur bereits bekannt ist. Andererseits muss die Funktionalität des Codes bzw. des Programms nicht erneut intensiv getestet werden.

Die Regelplatine in Abbildung 14 wurde mit insgesamt zwei Mikrocontrollern ausgerüstet, der Erste ist ein MICROCHIP PIC24FJ128 (IC201) und für die Steuerung verantwortlich, der Zweite ist ein ESP32 (IC400) und für die Kommunikation zuständig. Der Mikrocontroller ESP32 kann sich nicht nur als Client in einem WLAN gemäß IEEE 802.11 b/n/g verhalten, sondern auch als Access Point. Beim Access-Point-Modus besteht auch die Möglichkeit, die WLAN-Parameter konfigurieren zu können. Über den Eingang X1 erfolgt die 24 V Gleichstromversorgung. Mit den Ausgängen X2 und X3 können bis zu zwei Servomotoren gesteuert werden und versorgen den Motor mit 5 V Strom und einem PWM-Steuerungssignal. An den analogen Eingang X4 kann das Thermoelement angeschlossen werden. Die Stiftleiste X5 ist für die Signal-LEDs vorgesehen. Der Mikrocontroller verfügt über eine USB-Schnittstelle und kann mit einem USB-Kabel mit einem Rechner verbunden werden.

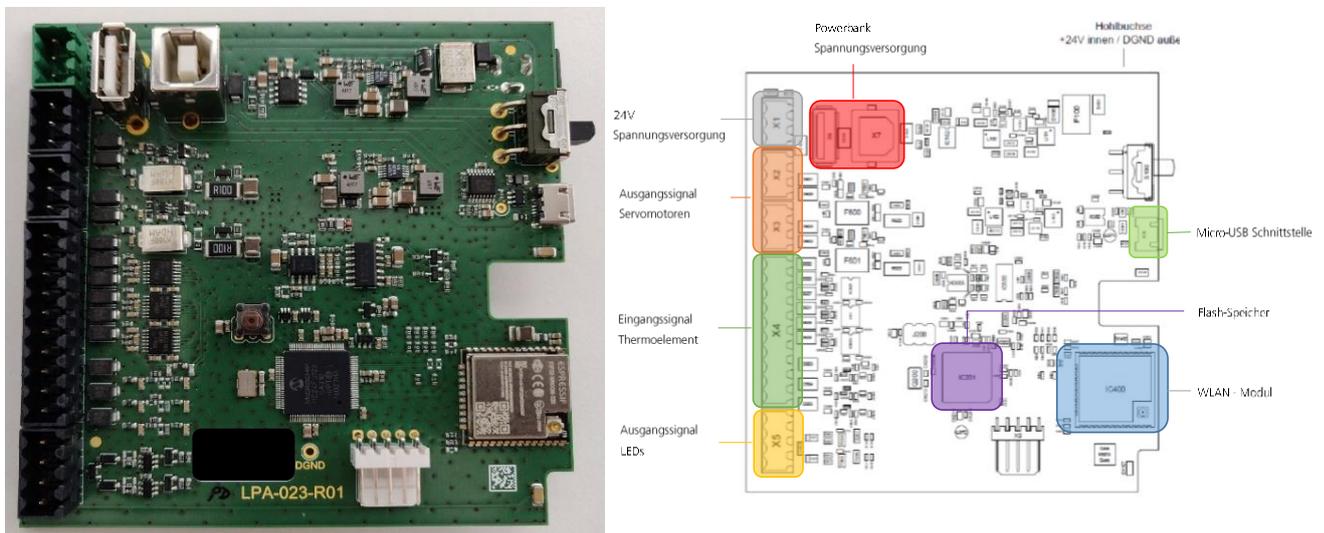


Abbildung 14: Ofencontroller-Platine KSB.207.26 (links: Platine; rechts: Beschreibung der Bestückung der Platine).

Stromversorgungs- und Speichereinheit. Für den Betrieb des Regelungssystems mit der Hardware und den Regelaktoren (Regelklappen) ist nur eine geringe Menge an Hilfsstrom notwendig. Der Stromverbrauch ist im Gegensatz zu anderen Systemen sehr gering und liegt im Wattbereich (< 15 W). Der benötigte Strom könnte beispielsweise durch einen thermoelektrischen Generator bereitgestellt

oder im Falle eines Stromausfalls mit dem Einsatz einer kleinen Stromspeichereinheit problemlos weiterbetrieben werden.

Software

Die Grundstruktur der Abbrand-Regelung enthält verschiedene Bausteine, wie z. B. die für die Implementierung des Programmes auf dem Mikrocontroller (APIs) notwendig sind, die Sauerstoffberechnung in Abhängigkeit von der gemessenen Temperatur im Feuerraum sowie intelligente und parametrierbare Regelalgorithmen für die Abbrand-Regelung und Überwachung der Einzelraumfeuerungsanlage.

Die **Software StoveCtrl** wurde zusätzlich dazu entwickelt um den Mikrocontroller programmieren und steuern zu können. Die Software realisiert ein Kommando-Ziel-Interface, mit welchem Befehle an den Mikrocontroller gesendet werden können. Darüber hinaus erlaubt StoveCtrl die Übersetzung von CODESYS-Projekten, sofern bestimmte Voraussetzungen eingehalten sind. Hierzu gehört unter anderem, dass das Programm bzw. der Programmcode mit der Programmiersprache „Strukturierter Text“ (ST) geschrieben wurde.

Im Anschluss an die Beschreibung der einzelnen Komponenten der Abbrand-Regelung veranschaulicht die nachfolgende Abbildung 15 im Schnitt einer Konstruktionszeichnung die Integration des gesamten Regelsystems des Fraunhofer IBP in einen freistehenden Raumheizer nach DIN EN 13240 zur Regelung der Verbrennungsluftzufuhr bzw. der drei unterschiedlichen und separaten Verbrennungsluftströme (Rostluft = RL = von der Unterseite in das Glutbett kommend; Scheibenspülluft = SSL = von oben nach unten entlang der Sichtscheibe kommend; Sekundärluft = SL = von der Rückwand des Verbrennungsraumes kommend).

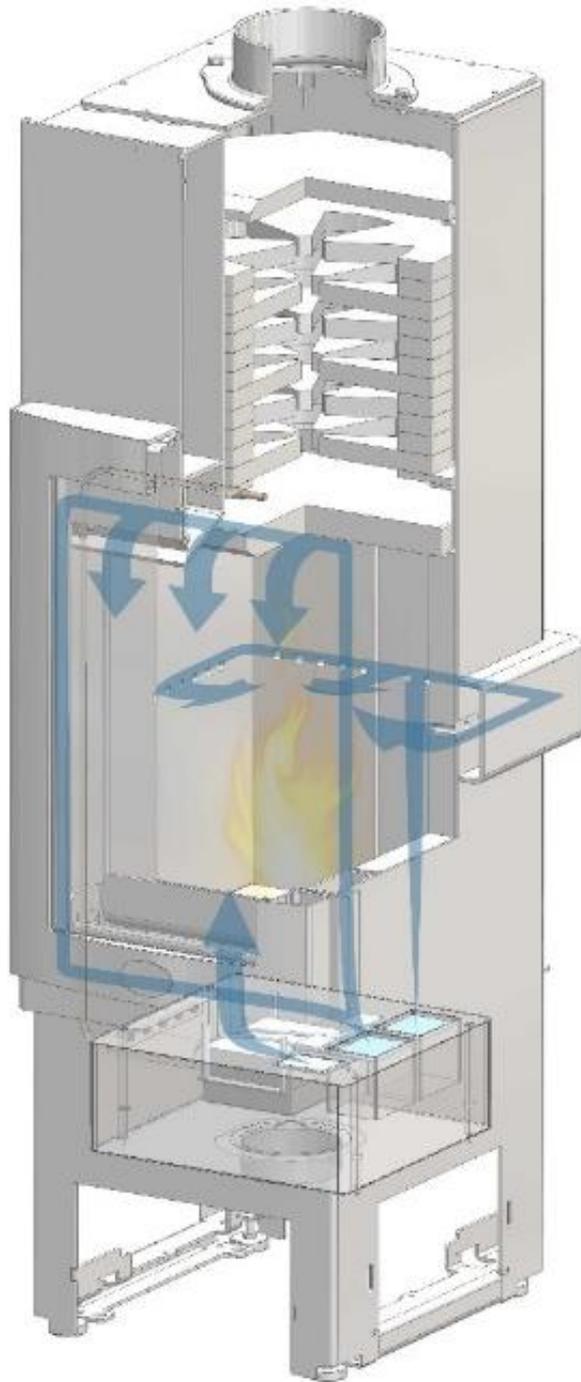


Abbildung 15: Schnitt einer Konstruktionszeichnung eines freistehenden Raumheizers nach DIN EN 13240 mit integrierter Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP zur Regelung von drei separaten Verbrennungsluftströmen (Rostluft=RL= von der Unterseite in das Glutbett kommend; Scheibenspülluft=SSL= von oben nach unten entlang der Sichtscheibe kommend; Sekundärluft=SL= von der Rückwand des Verbrennungsraumes kommend).

4.3 Charakteristika und Besonderheiten der Verbrennungslufteinrichtung des Fraunhofer IBP

Die parametrierbare Abbrand-Regelung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP zur Regelung von Einzelraumfeuerungsanlagen zeichnet sich durch die folgenden technischen Charakteristika bzw. Merkmale und Vorteile aus:

- Die Regelung erfolgt nur mit preiswerten, robusten und langlebigen Sensoren, welche stabile Signale liefern bzw. keine Wartung und Kalibrierung im Praxisbetrieb benötigen.
- Die konzeptionierte Software ist parametrierbar, wodurch eine schnelle Anpassung der Regelung an unterschiedliche Arten von Feuerungsanlagen unabhängig von ihrer Konstruktion ohne Bedarf einer Änderung der Software ermöglicht wird.
- Die Soft- sowie die Hardware mit dem Verbrennungsluftverteilungssystem sind universell einsetzbar und berücksichtigen alle normativen Anforderungen sowie Zulassungsregelungen vom DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik) für eine technische Zulassung bzw. einen sicheren Betrieb in der Praxis.
- Die Hardwarekomponenten mit den Sensoren sowie den Regelakteuren sind so ausgesucht, dass sich das Regelungssystem ohne jeglichen Starkstrom bzw. häusliche Stromversorgung betreiben lässt (notwendige Eingangsleistung ca. 10 W).

Bei dem intelligenten, temperaturbasierten Verbrennungsregelungssystem wurden alle technischen Anforderungen berücksichtigt, welche für eine hohe Umsetzbarkeit bzw. Praxistauglichkeit des Systems in der Praxis relevant sind. Das gesamte Regelsystem soll im Rahmen des hier vorliegenden Anwendungsfalls mindestens fünf Jahre ohne jegliche Wartung oder Reparatur betrieben werden können.

5 Übertragung der Verbrennungsregelung auf weitere handbeschickte Einzelraumfeuerungsanlagen gemäß DIN EN 13240, DIN EN 13229, DIN EN 12815 – bauliche Maßnahmen

Bei der Übertragung des Regelungskonzepts des Fraunhofer IBP auf verschiedene Arten von Einzelraumfeuerungsanlagen müssen spezielle geometrische bzw. bauliche Voraussetzungen gegeben sein, dass sich die Verbrennungslufteinrichtung problemlos und sachgemäß in die Feuerungsanlage integrieren lässt. Darüber hinaus sollte das Luftführungskonzept der jeweiligen Feuerungsanlage bzw. die Aufteilung in idealerweise drei Verbrennungsluftströme bzw. Rostluftstrom, Primärluftstrom und Sekundärluftstrom gegeben sein. Nachfolgend werden die durchgeführten Entwicklungsarbeiten im Rahmen der baulichen Übertragung der Verbrennungsregelung des Fraunhofer IBP auf verschiedene Arten von Einzelraumfeuerungsanlagen beschrieben.



Abbildung 16: Abbrand-Regelung für unterschiedliche Einzelraumfeuerungsanlagentypen (freistehende Raumheizer nach DIN EN 13240, Kamineinsätze nach DIN EN 13229, Holzherde nach DIN EN 12815).

Hierfür war es im ersten Schritt notwendig angepasste Prototypenanlagen unterschiedlicher Einzelraumfeuerungsanlagentypen zu entwickeln und herstellen zu lassen bzw. verfügbar zu machen, da sich die Grundplatte der klappenbasierenden Verbrennungslufteinrichtung des Fraunhofer IBP (vgl. Abbildung 11) nur sachgemäß in unterschiedlichen Feuerungsanlagen integrieren lässt, wenn bestimmte Voraussetzungen hinsichtlich des Verbrennungsluftkonzepts eingehalten werden. Diese Voraussetzungen umfassen zum einen ein definiertes Verbrennungsluftkonzept, welches sich durch drei separate Luftströme (Primärluft, Sekundärluft und Tertiärluft) kennzeichnet und somit eine adäquate Regelung der Verbrennungsluft ermöglicht, sowie ein Geräteboden mit einer speziellen Geometrie und Anordnung der Öffnungen der insgesamt drei Luftzufuhrkanäle für eine einfache Installationsmöglichkeit der Adapter- bzw. Grundplatte der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP an das jeweilige Gerät für eine optimale Funktionsfähigkeit der Abbrand-Regelung. Hierfür wurden verschiedene Einzelraumfeuerungsanlagen-

Prototypen von interessierten Unternehmen gemäß den Vorgaben bzw. unter Einhaltung der notwendigen baulichen Voraussetzungen, sodass die Adapter- bzw. Grundplatte der Abbrand-Regelung unter Berücksichtigung der Luftzuordnung montiert werden kann, für das Fraunhofer IBP hergestellt bzw. für die Versuchsdurchführung zur Integration der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP zur Verfügung gestellt.

Das Fraunhofer IBP hat in diesem Arbeitsschritt auf bereits bestehende Feuerungsanlagenkonzepte verschiedener Hersteller zurückgegriffen und diese hinsichtlich der Konstruktion unter Verwendung von Computer Aided Design (CAD) so adaptiert, dass eine möglichst einfache Integration der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP in die bestehenden Feuerungsanlagenkonzepte, unter Berücksichtigung der technischen Umsetzbarkeit bei der späteren Herstellung sowie weiteren wirtschaftlichen Gesichtspunkten, gewährleistet werden kann. Die nachfolgenden Prototypen wurden im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts geplant, konstruiert und hergestellt.

5.1 Prototyp Kamineinsatz nach DIN EN 13229 (Kalfire – 15 kW – 3 Luftströme)

Ein sogenannter Kamineinsatz nach DIN EN 13229 der Firma Kalfire mit einer Feuerungsleistung von 15 kW wurde für die Integration der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP eingesetzt bzw. zur Verfügung gestellt. Die Einzelraumfeuerungsanlage aus dem Produktportfolio der Firma Kalfire war nicht für den Betrieb mit einer Abbrand-Regelung vorbereitet und musste für die Integration der Abbrand-Regelung baulich angepasst werden, sodass eine Regelung von drei unabhängigen Verbrennungsluftströmen realisiert werden konnte. Der Umbau der bestehenden Anlage konnte während des Corona-Lockdowns bei vielen Unternehmen im Vergleich zu einer Neuproduktion innerhalb eines kürzeren Zeithorizonts durchgeführt werden. Die Umbaumaßnahmen haben folgende Arbeitsschritte umfasst (vgl. Abbildung 17):

- vollständige Neugestaltung der Luftführung mit einer fachgerechten Teilung bzw. Isolierung der Luftströme,
- Installation einer angepassten Bodenplatte für eine richtige Zuordnung an die Verbrennungsluftkanalöffnungen (SSL/RL/SL) sowie zur Montage der Adapter- bzw. Grundplatte der Abbrand-Regelung,
- Überprüfung der Funktionsfähigkeit der einzelnen Luftkanäle sowie Gewährleistung der Dichtheit der gesamten Verbrennungsanlage,
- Einbringung einer dosierten Sekundärluftzugabe über gefräste Kanäle in der Rückwandverkleidung,
- Installation des Temperatursensors an einer aussagekräftigen Messstelle im ersten Abgaszug, für qualitativ hochwertige Regelergebnisse.

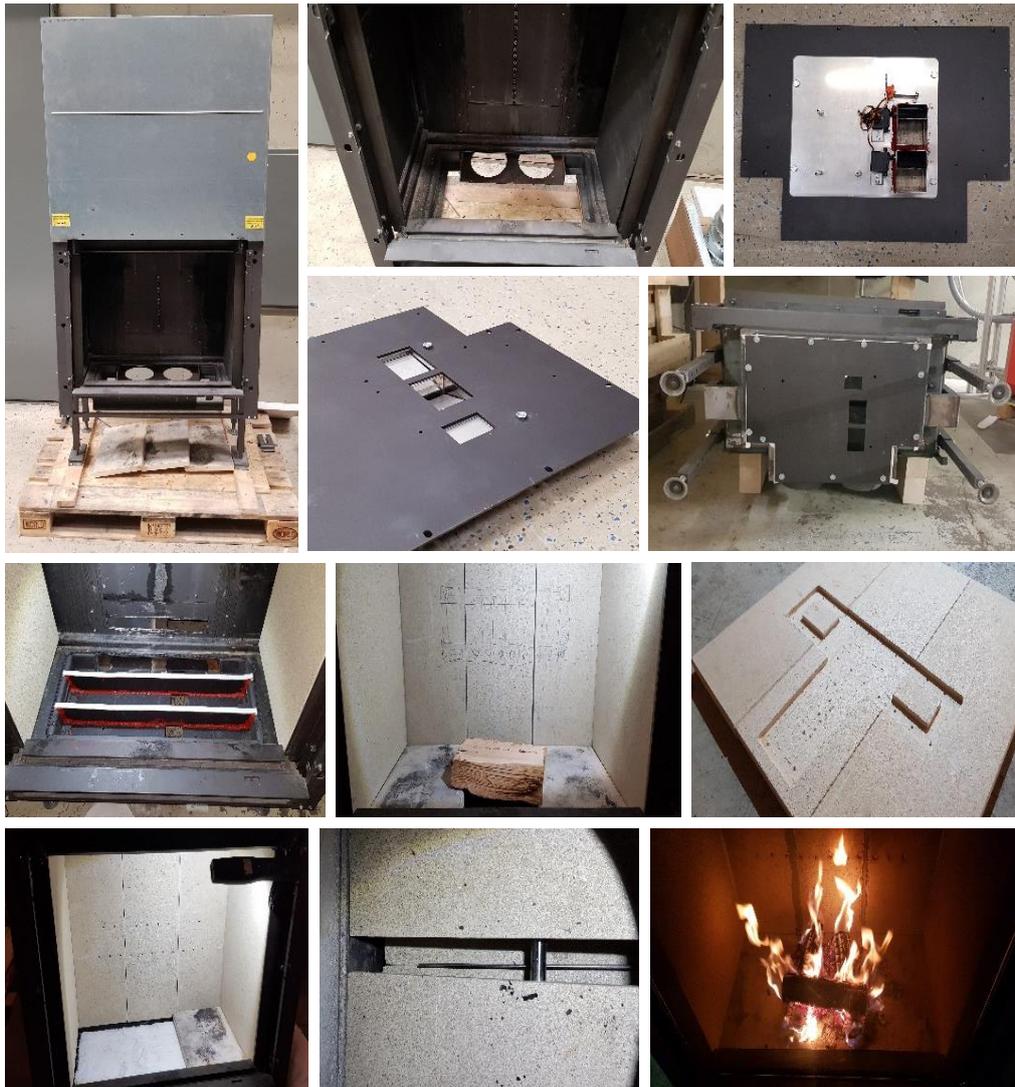


Abbildung 17: Umbaumaßnahmen für eine sachgemäße und funktionale Integration der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP in einen Kamineinsatz gemäß DIN EN 13229.

Im Zuge von vielen durchgeführten Abbränden bzw. Betriebsstunden mit dem umgebauten Kamineinsatz nach DIN 13229 mit integrierter Abbrand-Regelung, ist aufgefallen, dass es am bisher vorgesehenen Einbauort der Abbrand-Regelung direkt unterhalb der Brennkammer, speziell bei dieser großen Feuerungsanlage (15 kW) eine hohe Wärmeentwicklung und damit Wärmebelastung für das gesamte Regelsystem besteht. In der Zwischenzeit wurde das vielversprechende Regelkonzept bzw. das Potential der Feuerungsanlage der Firma Kalfire in Kombination mit der Abbrand-Regelung durch das Unternehmen erkannt und ein weiterentwickelter Prototyp, gemäß den Anforderungen, werkseitig gefertigt. Der Abstand zwischen Regelsystem und Brennkammer wurde dabei deutlich vergrößert, sodass zu hohe Temperaturbelastungen für die eingebauten elektronischen Komponenten zukünftig vermieden werden können. Die Regeleinheit wurde bei der weiterentwickelten Variante des Kamineinsatzes vertikal stehend unterhalb des Kamineinsatzes platziert (vgl. Abbildung 18).

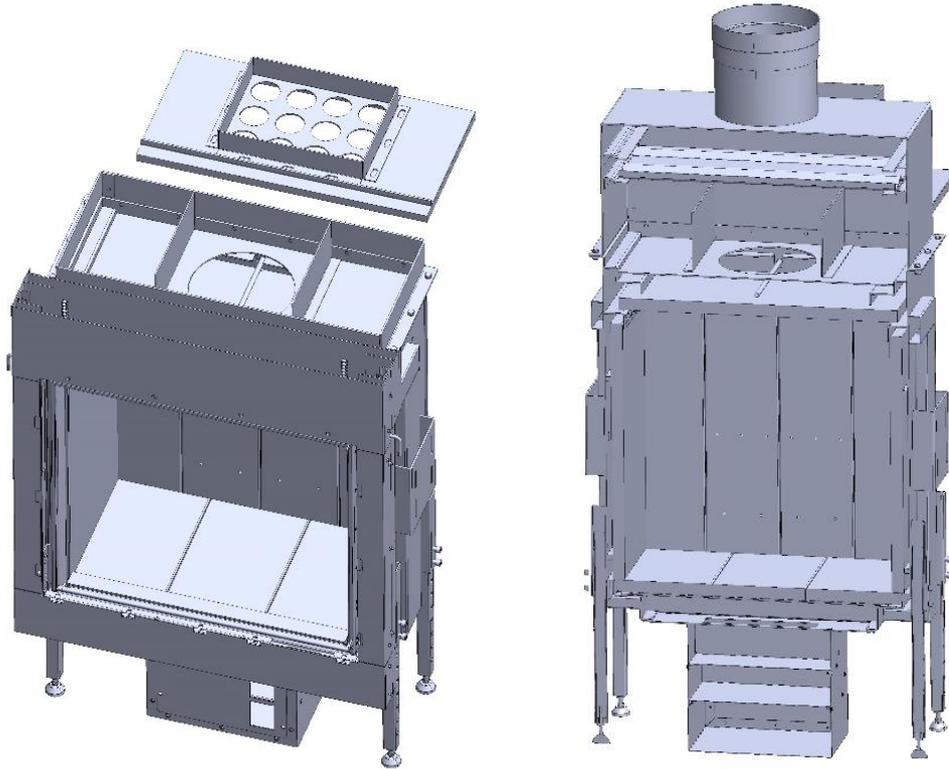


Abbildung 18: Neugestaltung und Anordnung der Verbrennungsluftströme zur Installation der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP basierend auf einer CAD-Konstruktionszeichnung (SSL – räumlich getrennter Scheibenspülluftzufuhrkanal; RL – räumlich getrennter Rostluftzufuhrkanal; SL – räumlich getrennter Sekundärluftkanal).

Darüber hinaus wurde zusätzlich eine Montagevorrichtung zur Integration des Thermosensors angebracht, sodass dieses definiert an der dafür vorgesehenen Messstelle wiederholbar installiert werden kann. Des Weiteren wurde die Einbaumöglichkeit für die vom Fraunhofer IBP entwickelte Einbautentechnik geschaffen. Der weiterentwickelte werkseitig gefertigte Prototyp des Kamineinsatzes nach DIN EN 13229 mit integrierter Abbrand-Regelung ist in der Abbildung 19 zu sehen.



Abbildung 19: Kamineinsatz nach DIN EN 13229 Prototyp 2.0 mit integrierter vertikal angeordneter Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP.

In der Praxis wird dieser Typ von Einzelraumfeuerungsanlage nach der Installation noch zusätzlich vollständig verkleidet bzw. verputzt, sodass anschließend nur noch die Sichtscheibe sowie die Bedienelemente sichtbar sind.

5.2 Prototyp Holzherd nach DIN EN 12815 (Universal-Brennraum – 10 kW – 3 Luftströme)

Beim Einsatz einer Feuerungsanlage aus dem Segment der Holzherde nach DIN EN 12815 wurde eine Anlage des Herstellers Kunstschlosserei Grasmüller eingesetzt. Die Anlage wurde auf Grund des darin eingesetzten Universal-Brennraums ausgewählt, der auch noch in weiteren Einzelraumfeuerungsanlagentypen, wie zum Beispiel in Speicherfeuerstätten, eingesetzt wird. Darüber hinaus werden alle hergestellten Feuerungsanlagen händisch und nicht automatisiert hergestellt, wodurch Anpassungen in der Luftführung sowie allgemein in der Anlagengeometrie einfach und schnell umsetzbar sind. Aufgrund des begrenzten Platzangebots auf der Unterseite des Herds sowie möglichst niedrigen Temperaturbelastungen für die einzusetzende Elektronik der Abbrand-Regelung wurde die konstruktive Vorbereitung für die Installation der Adapter- bzw. Grundplatte auf der Rückseite des Herds vorgesehen. Die Abbildung 20 zeigt die Neugestaltung und Anordnung der drei

separaten Verbrennungsluftströme mit der Primärluft (PL), bestehend aus Scheibenspülluft (SSL) und Rostluft (RL) und der Sekundärluft (SL) mit der räumlichen Abtrennung für eine optimale Regelbarkeit über die Stellklappen der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP. Die räumliche Abtrennung der Luftkanäle sorgt dabei dafür, dass eine gegenseitige Beeinflussung der Luftkanäle beispielsweise durch eine Strömungsabhängigkeit ausgeschlossen und eine sehr genaue Dosierung der Verbrennungsluft im gewünschten Verbrennungsbereich ermöglicht wird.

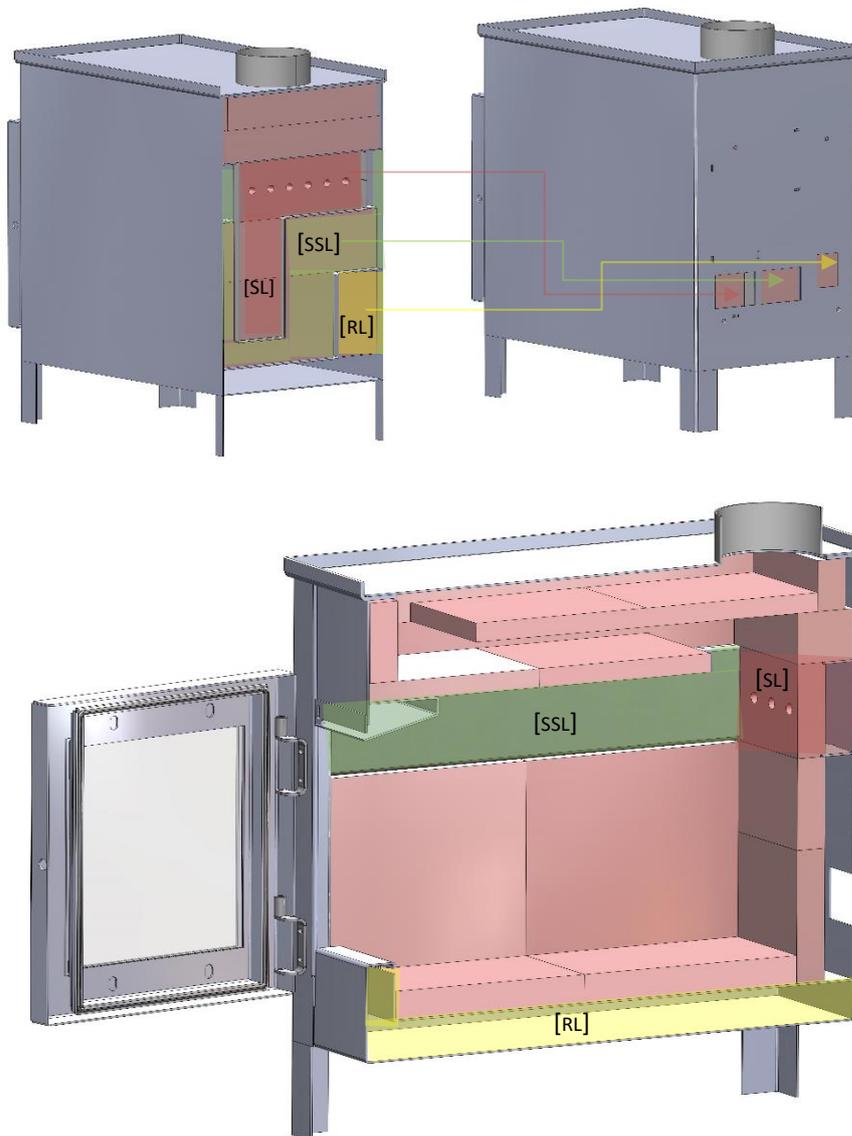


Abbildung 20: Neugestaltung und Anordnung der Verbrennungsluftströme zur Installation der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP basierend auf einer CAD-Konstruktionszeichnung (SSL – räumlich getrennter Scheibenspülluftzufuhrkanal; RL – räumlich getrennter Rostluftzufuhrkanal; SL – räumlich getrennter Sekundärluftkanal).

Die Adapter- bzw. Grundplatte der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP wird auf der Rückseite des Holzherds angeschraubt bzw. dicht montiert und ist sofort

einsatzbereit. Das identische Luftführungskonzept wurde darüber hinaus auf einen weiteren Holzherd mit größerem Brennraum übertragen und die Funktionsfähigkeit der Abbrand-Regelung konnte gemeinsam mit integrierter Abbrand-Regelung auch in dieser Variante bestätigt werden. Die für dieses Forschungsprojekt hergestellten Prototypen von Holzherden nach DIN EN 12815 werden in Abbildung 21 dargestellt.



Abbildung 21: Prototypen Holzherd DIN EN 12815.



Abbildung 23: Montage der Abbrand-Regelung an den freistehenden Raumheizer nach DIN EN 13240 mit nur zwei Luftströmen.

Für die erfolgreiche Integration der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP in unterschiedliche Anlagentypen war es notwendig angepasste Prototypen von bereits bestehenden Anlagen anzufertigen, wobei die Luftführung sowie die Öffnungen der separaten Luftstromeingänge für einen reibungslosen Anschluss der Abbrand-Regelung an den Ofen modifiziert werden musste. Ein Anschluss bzw. eine Integration der Abbrand-Regelung in die für die Untersuchungen eingesetzten Einzelraumfeuerungsanlagen-Prototypen konnte für jeden Anlagentyp mit einem überschaubaren technischen Aufwand realisiert werden. Der folgende Abschnitt befasst sich mit dem nächsten Schritt, nach der technischen Integration der Abbrand-Regelung in die Versuchsanlagen, mit der softwareseitigen Anpassung bzw. mit der Parametrierung zur Gewährleistung einer optimalen Funktion der Verbrennungsluftregelung.

6 Übertragung der Abbrand-Regelung auf weitere handbeschickte Einzelraumfeuerungsanlagen gemäß DIN EN 13240, DIN EN 13229, DIN EN 12815 – softwareseitige Anpassung bzw. Parametrierung

Die Grundlage für die Abbrand-Regelung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP für den Anlagentyp freistehender Raumheizer nach DIN EN 13240 wurde bereits im Rahmen anderer Forschungsaktivitäten entwickelt. Die dabei geschaffene Grundstruktur der bestehenden Software der Abbrand-Regelung stellt hierbei die Basis für die im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts durchzuführende Weiterentwicklung der Abbrand-Regelung für den möglichen Einsatz in unterschiedlichen Arten von Einzelraumfeuerungsanlagen, wie z. B. weitere Raumheizer nach DIN EN 13240, Kamineinsätze nach DIN EN 13229 und Holzherde für feste Brennstoffe nach DIN EN 12815.

Die Regelung der Primärluft (Rostluft, Scheibenspülluft) erfolgt in Bezug auf die gewünschte Feuerungsleistung bzw. die Einstellung günstiger Temperaturen im Feuerraumbereich für eine effiziente und emissionsarme Verbrennung. Die dem Verbrennungsprozess zugeführte Verbrennungsluftmenge bestimmt die Intensität der thermischen Umsetzung des Brennstoffs und somit die thermische Leistung der Feuerungsanlage. Die Berechnung des Sauerstoffs beruht auf einer mathematischen Gleichung welche von mehreren Parametern abhängig ist. Die Faktoren zur Berechnung werden unter anderem von dem Brennstoff und dem Feuerraum beeinflusst und können je nach Feuerstätte angepasst bzw. sollten für eine möglichst hohe Regeleffizienz angepasst werden. Der Korrekturfaktor k_B berücksichtigt die Eigenschaften und Qualität des Brennstoffes. Der Wert dieses Faktors variiert und wird während der Verbrennung berechnet. Er bewertet das Verbrennungsverhalten, beziehungsweise die Temperaturänderung im Feuerraum über die Zeit. Der in der Berechnungsgleichung enthaltene Korrekturfaktor k_f berücksichtigt die unerwünschte Wärmeabgabe bei der thermischen Umsetzung des Brennstoffs. In Abhängigkeit der Einzelraumfeuerungsanlage und dem Betriebszustand beschreibt dies die Wärmeverluste von der Flammenzone bis hin zur Nachoxidationskammer vor der Vervollständigung der Oxidation. Je größer der Wärmeverlust, desto höher der Korrekturfaktor k_f . Für die richtige Berechnung des Sauerstoffs bzw. des virtuellen Sauerstoffsignals ist dieser Korrekturfaktor bei der Übertragung der Abbrand-Regelung auf unterschiedliche Anlagenarten wesentlich. Er beschreibt in vereinfachtem Sinne eine Gerade in Abhängigkeit der Temperatur. Diese Gerade wird in zwei Temperaturbereiche unterteilt, um die Berechnung besser abstimmen zu können. Dazu werden auf dieser Geraden, zu sehen in Diagramm 5, zwei fixe Punkte definiert um diese zu beschreiben.

Für eine erfolgreiche Regelung der Verbrennungsluft beim Einsatz der Abbrand-Regelung am Beispiel in einem Kamineinsatz nach DIN EN 13229 mit einer sehr unterschiedlichen Geometrie und Dimension ist eine vorherige Parametrierung bzw. eine Adaption der Regelsoftware notwendig. Eine nicht durchgeführte Parametrierung würde dazu führen, dass die Sauerstoffberechnung falsche bzw. sehr ungenaue Werte und somit Regelsignale liefert und die Abbrand-Regelung darauf basierend hinsichtlich des Verbrennungsprozesses nicht sachgemäße Regelmanöver ausführt. Um die bestehende Abbrand-Regelung für freistehende Raumheizer nach DIN EN 13240 mit einer Nennwärmeleistung von 7 kW beispielsweise für den Einsatz

im Rahmen eines Feuerungsanlagentyps mit einer wesentlich größeren Nennwärmeleistung > 12 kW, mit einem größeren Verbrennungsraum und größerer Sichtscheibenfläche zu parametrieren, um eine optimale Funktion zu gewährleisten, sollte beispielsweise speziell der Faktor k_f für die Sauerstoffberechnung im niedrigen Temperaturbereich < 400 °C reduziert werden. Ein größerer Verbrennungsraum mit einer größeren Sichtscheibe weist ein langsames Aufheizverhalten auf, da sowohl eine größere Fläche beheizt werden muss, als auch über die größere Sichtscheibe mehr Wärme in den Aufstellraum abgegeben wird. Darüber hinaus muss ebenfalls die schnellere Abkühlung des Feuerraums, speziell während des Nachlegevorgangs, wobei die Sichtscheibe vollständig geöffnet wird und der Nachlegevorgang sehr wahrscheinlich auch mehr Zeit beansprucht, im Rahmen einer Parametrierung der Abbrand-Regelung berücksichtigt werden. Eine Anpassung von k_f im Temperaturbereich zwischen 400 °C und 800 °C (Regelbetrieb) spielt in diesem Fall nur eine untergeordnete Rolle und ist nicht zwingend notwendig.

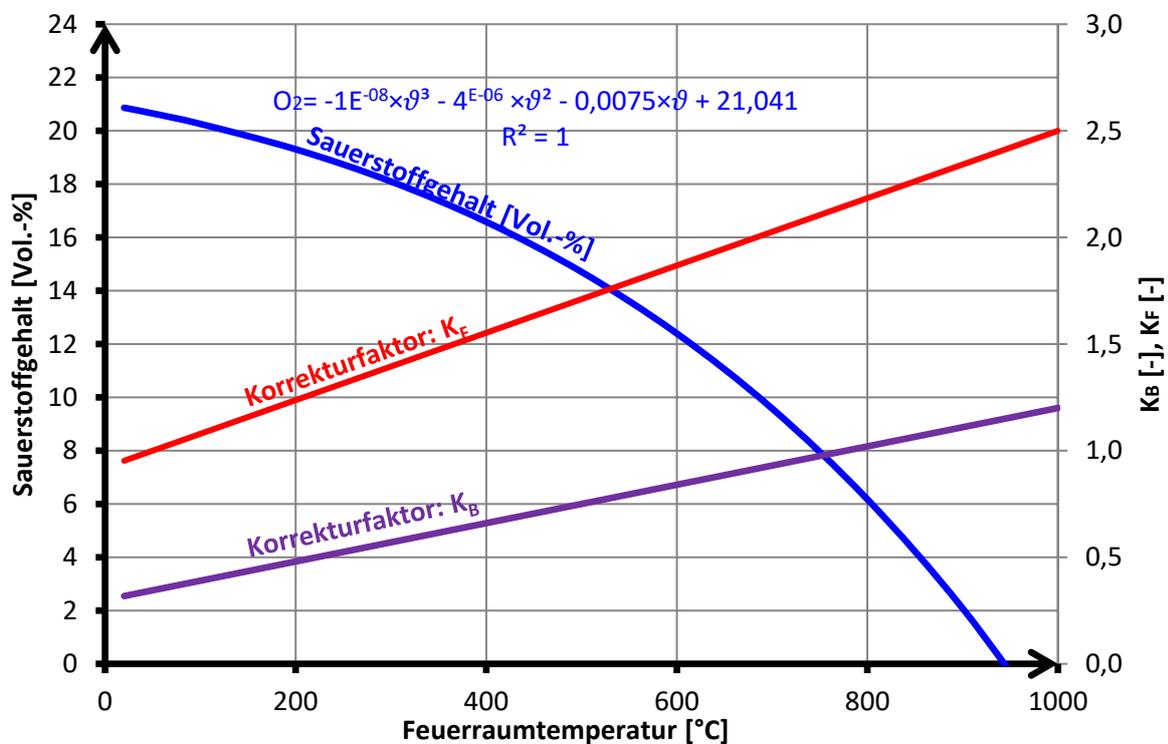


Diagramm 5: Für die Berechnung des Sauerstoffgehalts eingesetzte Korrekturfaktoren bzw. Darstellung der Abhängigkeit und Auswirkung auf die Sauerstoffberechnung.

Zur Umsetzung der Parametrierung bzw. zur Übertragung der Abbrand-Regelung auf einen neuen Feuerungsanlagentyp sind maßgeblich die nachfolgenden vier Arbeitsschritte durchzuführen:

- 1) **Erfassung der Fundamentaldaten der Feuerungsanlage.** Im ersten Schritt werden die Fundamentaldaten der Feuerungsanlage erfasst. Hierzu gehören verschiedene anlagenspezifische Leistungsdaten und Daten zu den Abmessungen der Feuerungsanlage, wie z. B. die Brennraumgröße, die Größe der Sichtscheibe, die Nennwärmeleistung der Anlage sowie das Beschickungs- bzw. Auflageregime. Mit Hilfe dieser Daten kann ein

nachfolgender Testbetrieb unter sachgemäßen Betriebsbedingungen sichergestellt sowie erste Rückschlüsse auf eventuell notwendig werdende Anpassungen bei der Parametrierung gezogen werden.

2) Auswahl einer geeigneten Messstelle für die Installation des

Temperatursensors. Im zweiten Schritt erfolgt die Auswahl einer geeigneten Messstelle für die Installation des Temperatursensors. Die Auswahl einer geeigneten Messstelle ist sehr anlagenspezifisch und sollte für jeden Anlagentyp individuell festgelegt werden um möglichst optimale Regelergebnisse zu erhalten. Generell gilt es bei der Installationssituation des Thermoelements zu beachten, dass eine Beeinflussung der Temperaturmessung durch direkte Wärmestrahlung, wie beispielsweise im gesamten Brennraumbereich oder unmittelbar unterhalb einer Wärmespeichereinheit, ausgeschlossen wird. Die Beeinflussung des Thermoelements durch direkte Wärmestrahlung eines in unmittelbarer Nähe befindlichen Wärmespeichers kann beispielsweise dazu führen, dass die gemessene Temperatur am Thermoelement nicht langsamer und weniger stark abfällt und die Informationsqualität zur Beschreibung des tatsächlichen Verbrennungsprozesses dadurch beeinträchtigt wird. Auch eine Messstelle, welche sich zu nah am Verbrennungsprozess befindet wird besonders im ersten Drittel des Regelbetriebs durch die Bildung von hohen Flammen unmittelbar beeinflusst. Die Schwierigkeit bei der Auswahl einer geeigneten Messstelle für die Installation des Thermoelements liegt darin, dass das Thermoelement nicht zu nah am Verbrennungsprozess und auch nicht in zu großer Entfernung installiert werden sollte, da im zweiten Fall die für die Abbrand-Regelung zur Verfügung gestellten Informationen über den Temperaturverlauf hinsichtlich der Qualität sowie der Quantität gemindert werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt insgesamt drei verschiedene Temperaturverläufe die zur gleichen Zeit von drei verschiedenen Thermoelementen, die an unterschiedlichen Positionen bzw. Entfernungen (nah, mittel, weit) zum Verbrennungsraum in einem Kaminofen installiert waren, erfasst wurden.

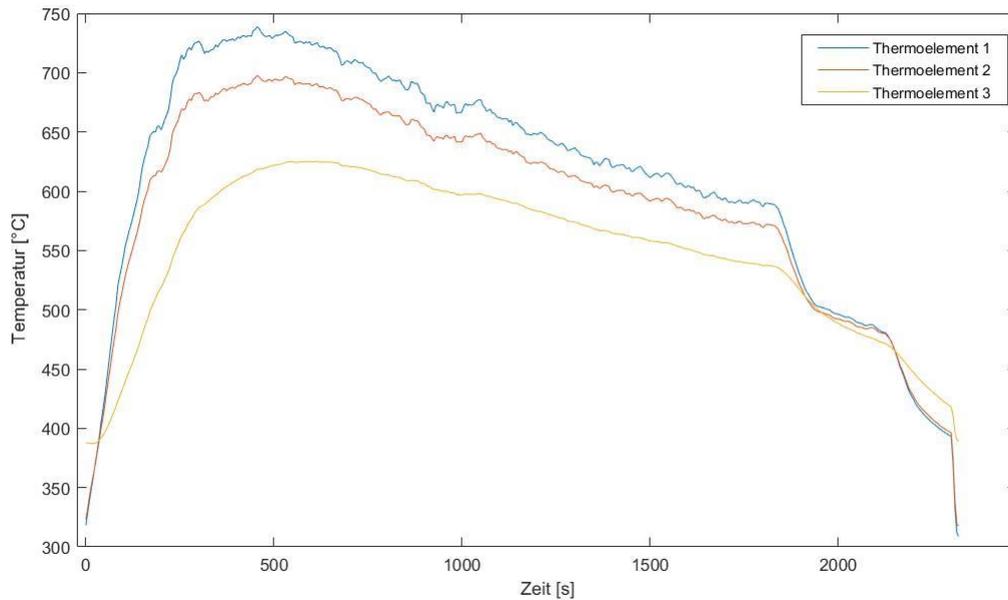


Diagramm 6: Aufgezeichnete Abgastemperatur eines Abbrands mit Thermoelementen an unterschiedlichen Positionen in einem Kaminofen.

Der aufgezeichnete Temperaturverlauf mit den geringsten Temperaturen ist dem Thermoelement zuzuordnen, was den größten Abstand zum Verbrennungsraum aufgewiesen hat. Der hierbei aufgezeichnete Temperaturverlauf ist sichtlich glatt und wenig detailreich, da leichte Temperaturschwankungen in zu großer Entfernung nicht miterfasst werden können. Bei einer Installation des Thermosensors an dieser Position würden der Abbrand-Regelung eine Vielzahl an Informationen bzw. Signalen nicht zur Verfügung stehen und ist daher nicht als optimale Einbauposition zu bewerten. Der aufgezeichnete Temperaturverlauf mit den höchsten Temperaturen ist dem Thermoelement mit dem geringsten Abstand zum Verbrennungsraum zuzuordnen. Dieses Thermoelement hat sich im Bereich der ersten 2-3 cm im ersten Abgaszug befunden. Der aufgezeichnete Temperaturverlauf spiegelt sehr viel mehr Details wieder und auch geringste Temperaturänderungen wurden an dieser Position aufgezeichnet. Nachteile dieser Position sind, dass das installierte Thermoelement teilweise direkt von Flammenspitzen getroffen und generell einer höheren Temperaturbelastung ausgesetzt ist. Der in der Abbildung sichtbare mittlere Temperaturverlauf wurde durch ein Thermoelement aufgezeichnet, das bei ca. 10 cm im ersten Abgaszug positioniert wurde. Dieser Temperaturverlauf hat Temperaturschwankungen nahezu genauso detailreich aufgezeichnet, wie das Thermoelement mit dem geringsten Abstand zum Verbrennungsraum bei nicht vorhandener Beeinflussung durch Flammenspitzen und niedrigeren Temperaturbelastungen, was die Langlebigkeit des Sensors begünstigt. Aus den genannten Gründen hat die Positionierung nach dem Aufstieg der Rauchgase, ca. 10 cm im ersten Abgaszug, (vgl. nachfolgende Abbildung 24) als optimale Messstelle für die Installation des Thermoelements zum Erhalt von qualitativ hochwertigen Regelergebnissen, herausgestellt.

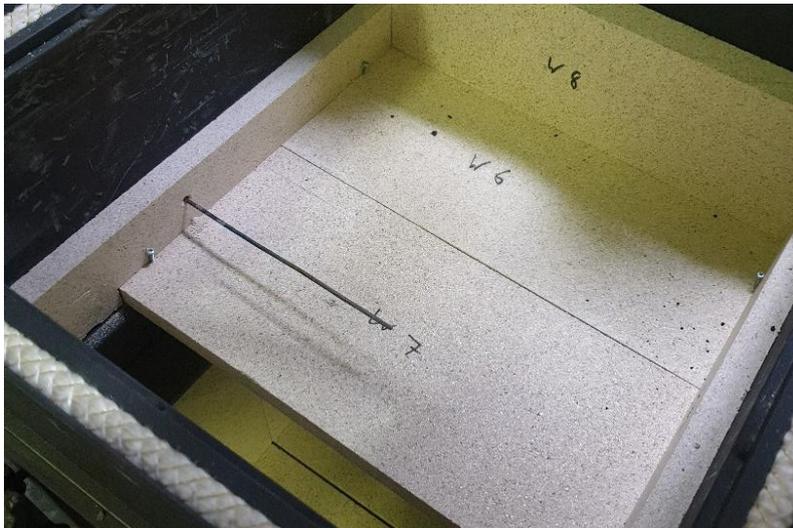


Abbildung 24: Optimale Positionierung des Thermoelements ca. 10 cm im ersten Abgaszug in verschiedenen Einzelraumfeuerungsanlagen.

An dieser Position ist das Thermoelement sowohl vor auftretenden Flammenspitzen geschützt, als auch nicht zu weit vom Verbrennungsprozess

entfernt, um eine möglichst hohe Bandbreite des Temperaturverlaufs der Verbrennung zu erfassen.

- 3) Bestimmung des optimalen Betriebspunkts (T_{SOLL}) der Feuerungsanlage.** Im dritten Schritt wird ein unregelmäßiger Testbetrieb mit fixer Verbrennungsluftklappeneinstellung durchgeführt um den optimalen Betriebspunkt bzw. die optimale Betriebstemperatur (T_{SOLL}) eines neuen Feuerungsanlagentyps in Erfahrung zu bringen. Die Bestimmung des optimalen Betriebspunkts erfolgte im Prüfstandbetrieb während des Regelbetriebs der Anlage und mit Hilfe einer Gasanalyse zur Messung des Sauerstoffgehalts der Verbrennung. Als optimalen Betriebspunkt bzw. optimale Betriebstemperatur (T_{SOLL}) wurde der Verbrennungstemperaturbereich definiert, der erfasst wird, wenn der kalibrierte Gasanalysator einen Sauerstoffgehalt in der Verbrennung von ca. 10 Vol.-% gemessen hat. An diesem Betriebspunkt verfügt die Verbrennung über eine ausreichend hohe Verbrennungstemperatur und einen optimalen Sauerstoffanteil bzw. über optimale Voraussetzungen für eine möglichst effiziente Verbrennung mit niedrigen Schadstoffemissionen. Die Verbrennungslufteinrichtung hat das Ziel diesen Betriebsbereich über die Einstellung der Verbrennungsluftklappen über eine möglichst lange Betriebszeit aufrechtzuerhalten.
- 4) Überprüfung bzw. Anpassung des berechneten Sauerstoffsollwert O_{2-SOLL} am optimalen Betriebspunkt über die Parametrierung der Faktoren.** Nach der Bestimmung des anlagenspezifischen Temperaturwerts T_{SOLL} erfolgt im vierten Schritt die Überprüfung bzw. Anpassung des in der Regelsoftware berechneten Sauerstoffwert O_{2IST} bei der optimalen Betriebstemperatur über die Parametrierung der Faktoren K_F und K_B . Über die Anpassung dieser Faktoren ändert sich die in der Software hinterlegte Sauerstoff-Temperatur-Kalibrierkurve. Die Parametrierung ist dann abgeschlossen, wenn der bestimmte optimale Betriebspunkt einer Feuerungsanlage T_{SOLL} einem Wert von 10 Vol.-% $O_{2IST - BERECHNET}$ entspricht.

Das nachfolgende Diagramm 7 veranschaulicht den vierten Schritt bzw. die Überprüfung und anschließende Anpassung des berechneten Sauerstoffwerts $O_{2IST - BERECHNET}$ am optimalen Betriebspunkt über die Parametrierung der Faktoren. Darin werden der im Mikrocontroller aufgezeichnete softwareseitig berechnete Sauerstoffgehalt $O_{2IST - BERECHNET}$ sowie der durch eine kalibrierte Gasanalyse gemessene Sauerstoffgehalt $O_{2IST - GEMESSEN}$ dargestellt.

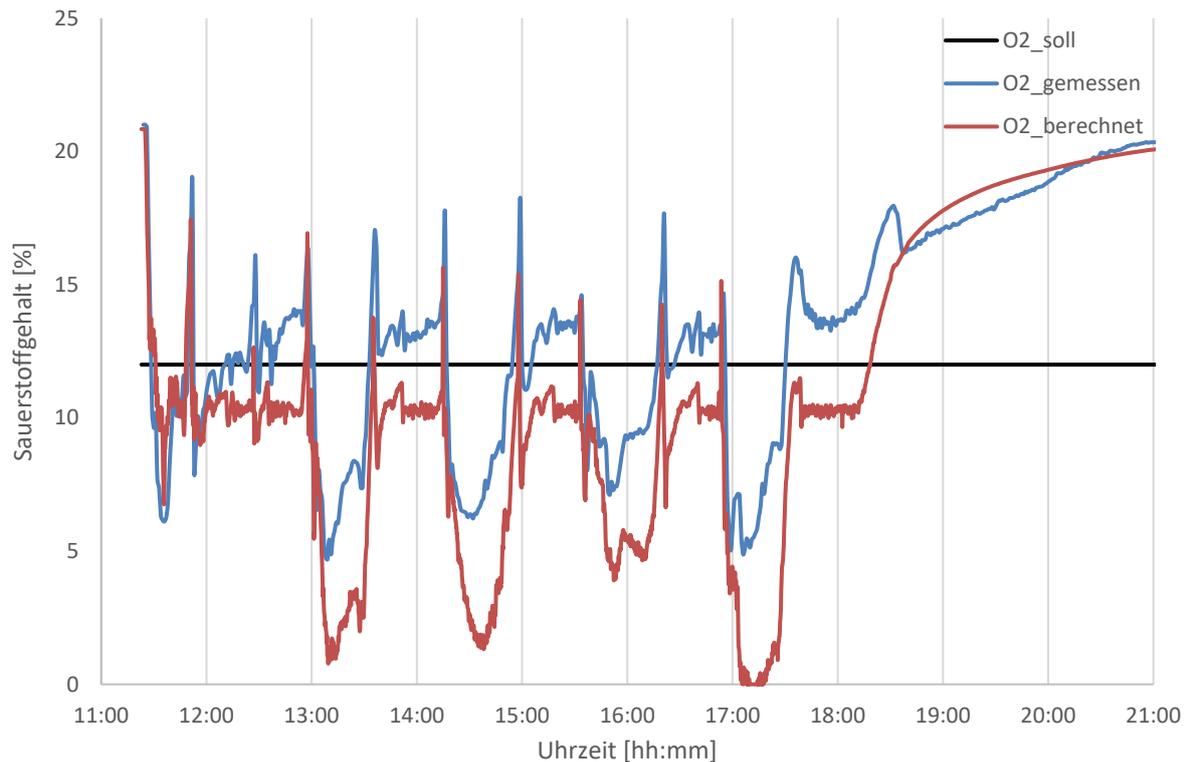


Diagramm 7: Sauerstoffgehalt im Abgas SOLL/IST-Vergleich vor der Parametrierung.

Der Sauerstoffgehalt im Abgas wird maßgeblich über das Schließen und Öffnen der Sekundärluftklappe geregelt. Über die Sekundärluftklappe wird Sauerstoff der Verbrennung oberhalb der Flammen zugeführt um bei einem ausreichend hohen Temperaturniveau ($> 500\text{ °C}$) eine möglichst vollständige Oxidation zu begünstigen. Unterschreitet der Wert des berechneten Sauerstoffgehalts $O_{2\text{-IST}}$ den in der Regeleinheit vorgegebenen Sauerstoffsollwert $O_{2\text{-SOLL}}$ öffnet sich die Sekundärluftklappe, um der Verbrennung die benötigte Verbrennungsluft zuzuführen, und nicht verbrannte Bestandteile des Abgases vollständig zu oxidieren.

Um ein optimales Zusammenspiel der Verbrennungsluft zu erreichen muss daher die Verbrennungsluft zum richtigen Zeitpunkt zugeführt werden. Durch eine Parametrierung der Faktoren an die neuen Verbrennungsgegebenheiten kann eine genauere Berechnung des Sauerstoffgehalts erreicht und die Abweichung des berechneten zum gemessenen Sauerstoff erheblich verringert werden. Dadurch ist ein genaueres Regeln der Sekundärluftklappe gegeben, um die Feuerstätte an ihrem gewünschten Sollpunkt zu betreiben.

In Diagramm 8 lässt sich erkennen, dass nach der Parametrierung der Faktoren und der damit verbundenen Korrektur der Sauerstoffberechnung die Sekundärluftklappe zum richtigen Zeitpunkt geöffnet wird. Während der Anheizphase werden oftmals noch erhöhte Sauerstoffgehalte berechnet (je höher die Temperatur, desto niedriger der Sauerstoffgehalt der Verbrennung). Mit zunehmender Dauer heizt sich die Feuerstätte auf bzw. ein höheres Temperaturniveau wird erreicht und die Verbrennung nähert sich dem Temperatursollbereich an, sodass die Berechnung des Sauerstoffs mit einer hohen Genauigkeit durchgeführt werden kann.

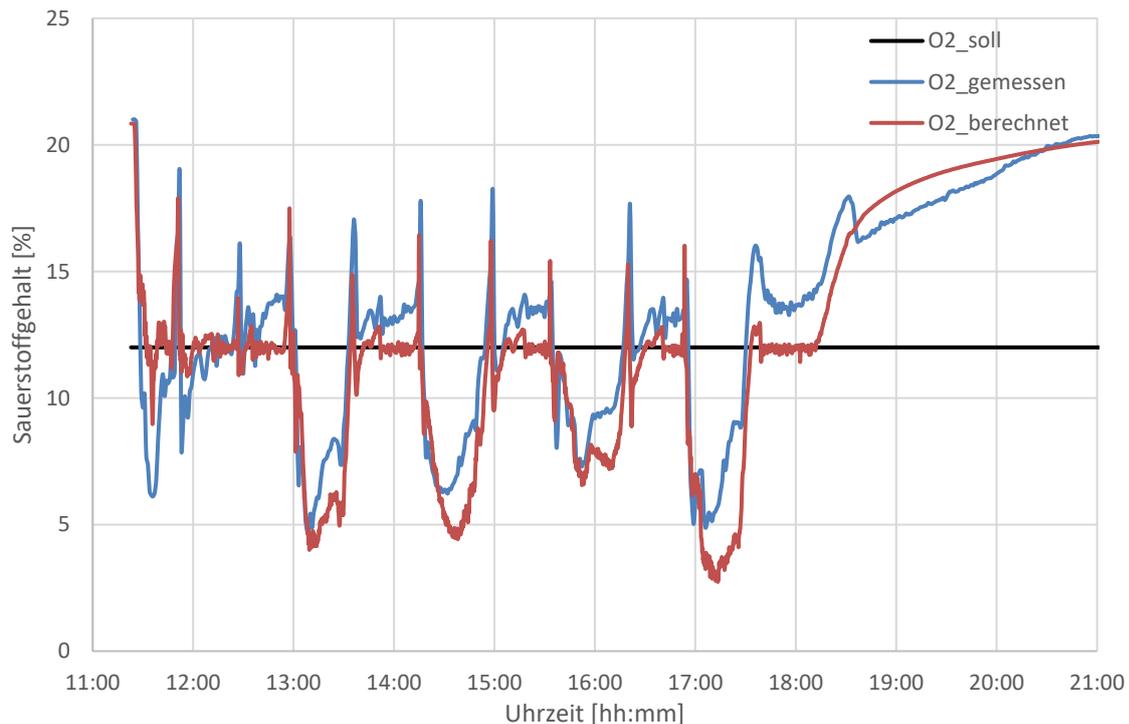


Diagramm 8: Sauerstoffgehalt im Abgas SOLL/IST-Vergleich nach der Parametrierung.

Der Mittelwert des Sauerstoffgehalts im Abgas wurde mit einem kalibrierten Gasanalysemessgerät gemessen und lag über die gesamte Abbranddauer von etwa 7 Betriebsstunden bei 11,5 Vol.-%. Im Anschluss an die Parametrierung lag der Mittelwert des berechneten virtuellen Sauerstoffsignals bei 10,9 Vol.-%. Mit dieser geringen Abweichung von 0,6 Vol.-% zwischen gemessenem Sauerstoffgehalt und berechnetem Sauerstoffgehalt der Abbrand-Regelung, lässt sich ein Verbrennungsprozess bereits sehr gut regeln. Im Zuge einer anschließenden weiteren Feinjustierung lässt sich eine noch exaktere Sauerstoffberechnung der Abbrand-Regelung erzielen.

Eine erfolgreiche softwareseitige Übertragung der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP auf verschiedene Arten von Einzelraumfeuerungsanlagen setzt wie beschrieben voraus, dass bestimmte Betriebsparameter wie beispielsweise der optimale Sauerstoffgehalt für die Verbrennung sowie die optimale Betriebstemperatur der Anlage für eine vollständige, effiziente und emissionsarme Verbrennung individuell ermittelt und mit Hilfe der vorgesehenen Parametrierfähigkeit über die Korrekturfaktoren für den Einsatz in unterschiedlichen Anlagentypen softwareseitig angepasst werden. Nachfolgend werden die eingesetzten technischen Messeinrichtungen sowie die durchgeführten Entwicklungsarbeiten im Rahmen der softwareseitigen Übertragung der Verbrennungsregelung des Fraunhofer IBP auf verschiedene Arten von Einzelraumfeuerungsanlagen beschrieben.

6.1 Technische Messeinrichtungen zur Versuchsdurchführung

Die Weiterentwicklung und Optimierung der universell parametrierbaren Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP wurde auf einem Teststand unter normativen Bedingungen durchgeführt. Zur Überprüfung der Sicherheit und Funktionalität unter praktischen Betriebsbedingungen sowie der Übertragbarkeit auf unterschiedliche

Einzelraumfeuerungsanlagen wurde die Abbrand-Regelung in unterschiedliche Anlagentypen bzw. Anlagenarten integriert und jeweils über mehrere Betriebswochen getestet und parametrieren. Nachfolgend werden die eingesetzten technischen Messeinrichtungen beschrieben, welche im Rahmen der Versuchsdurchführung für die Erfassung der Leistungs- und Emissionsparameter zur Bewertung der Untersuchungen verwendet wurden:

- Normative Abgasmessstrecke für die Messung von staub- und gasförmigen Emissionen sowie sonstigen Abgasparametern zur Bewertung der Betriebs- und Verbrennungsqualität,
- Kaltextraktives Abgasanalysemessgeräte (der Firma ABB Ltd des Typs AO 2020) sowie ein Flammenionisationsdetektor FID (der Firma SK Elektronik GmbH) für die Messung von Kohlenwasserstoffen. Mit diesen Messgeräten lassen sich folgende Abgaskomponenten messen:
 - Typische Verbrennungsprodukte: Kohlenstoffdioxid (CO₂), Wasserdampf (H₂O), Sauerstoff (O₂),
 - brennbare Komponenten im Abgas aus unvollständiger Verbrennung: Kohlenstoffmonoxid (CO) und diverse Kohlenwasserstoffe,
 - Nicht-brennbare saure Komponenten im Abgas: Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO₂).
- Staubmesssysteme auf Basis von Impaktoren zur Erfassung von Staubfraktionen (z. B. PM_{2,5}, PM₁₀) und Gesamtstaub gemäß VDI 2066 von der Firma Paul Gothe GmbH,
- Druck- und Temperaturmesser in der Abgasmessstrecke,
- Datenverarbeitungs- und Erfassungssystem, mit dem alle wichtigen Prozessparameter erfasst und entsprechend während des Betriebs visualisiert werden können,
- Softwareentwicklungsstand mit der die Software der Abbrand-Regelung weiterentwickelt, parametrieren und getestet wird.

6.2 Parametrierung und erzielte Ergebnisse mit einem freistehenden Raumheizer nach DIN EN 13240 mit integrierter Abbrand-Regelung (Fa. Max Blank Typ: KO2-S2 – Modell Atlanta WF – 10 kW – 1 Belimomotor – nur 2 Luftströme)

Um die Weiterentwicklung der Abbrand-Regelung mit dem Parametrierungsvorgang für den Einsatz in unterschiedlichen Anlagentypen möglichst zielgerichtet und somit beschleunigt umsetzen zu können wurde eine grafische Benutzeroberfläche bzw. Visualisierung der Abbrand-Regelung erzeugt, mit der der Prozess im Betrieb auf dem Teststand anhand einer grafischen Darstellung nachvollziehbar gemacht und beobachtet werden kann. Die grafische Benutzeroberfläche zeigt die IST- und SOLL-Werte der Temperatur und des berechneten Sauerstoffgehalts sowie je nach Bedarf weitere Parameter in Echtzeit als Liniendiagramm an. Darüber hinaus können mit Hilfe der grafischen Benutzeroberfläche nahezu alle Prozessparameter wie z.B. Grenzwerte der Stellgrößen oder Parameter des Reglers jederzeit auf einfache Art und Weise verändert und angepasst werden, wodurch eine große Flexibilität besonders im Rahmen der Entwicklungsarbeiten gegeben ist. Darüber hinaus erlaubt die grafische Benutzeroberfläche die aufgezeichneten Messdaten als Textdatei zu

speichern, um diese bei Bedarf anschließend zu analysieren und den Prozess bewerten zu können. Darüber hinaus verfügt die im Regelsystem eingesetzte Platine über einen integrierten MC ESP32 mit WiFi-Kommunikationsmöglichkeit und soll zukünftig eine SmartHome-App Anbindung ermöglichen. Auf diesem Weg kann der Mikrocontroller mit einem lokalen WiFi-Network verbunden werden und relevante Werte mit der grafischen Benutzeroberfläche bzw. mit der App austauschen. Der Datenaustausch erfolgt über einen mDNS-Server und einen WebSocket-Server auf TCP-Port 8080. Die Abbildung 25 zeigt die grafische Benutzeroberfläche sowie die dazugehörigen verschiedenen Werte, wie beispielsweise die aktuelle Position der Luftklappen, den softwareseitigen oberen und unteren Grenzwert bzw. den Grenzbereich der Luftklappen sowie die aktuelle Betriebsphase. Die in der Visualisierung dargestellten Diagramme zeigen wie die Abbrand-Regelung versucht die vorgegebene Temperatur T_{SOLL} -Temperatur (schwarze Linie oben) sowie den eingestellten Wert für O_{2-SOLL} (schwarze Linie unten) zu erreichen und möglichst aufrechtzuerhalten bzw. in diesem Bereich zu regeln.

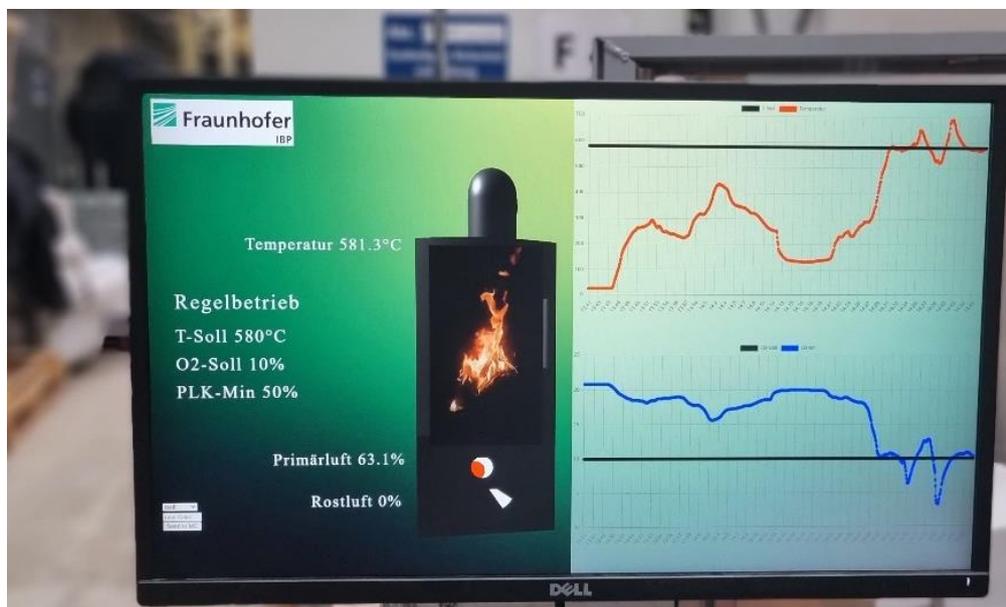


Abbildung 25: Visualisierung für eine zielgerichtete Entwicklungsarbeit, mit welcher die wichtigsten Parameter der Abbrand-Regelung und des aktuellen Verbrennungsprozesses anschaulich dargestellt werden.

Die vollständig integrierte Abbrand-Regelung in den Kaminofen ist der Abbildung 26 zu entnehmen. Nachfolgend werden die erzielten Kenn- und Emissionsdaten aus den durchgeführten Emissionsmessungen gemäß den normativen Vorgaben der DIN EN 13240 ohne und mit integrierter Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP tabellarisch dargestellt. Der freistehende Raumheizer nach DIN EN 13240 wurde jeweils bei Nennwärmeleistung mit naturbelassenem Buchenscheitholz mit einem Feuchtegehalt von ca. 12 % betrieben. Die erhaltenen Messwerte stellen Mittelwerte aus insgesamt drei Abbränden bzw. Brennstoffauflagen dar. Die sich aus den Versuchsreihen ergebende optimale Betriebstemperatur für die untersuchte Versuchsanlage bei einem berechneten Sauerstoffgehalt im Abgas von $O_{2-SOLL} = 10$ Vol.-% liegt bei ca. 580 °C.



Abbildung 26: Erste Abbrände auf dem Teststand mit integrierter Abbrand-Regelung (Belimo-Version) des Fraunhofer IBP in die Verbrennungsanlage von Max Blank (nur zwei Luftströme).

Die erhaltenen Messwerte mit integrierter Abbrand-Regelung wurden den bei der Erstprüfung des Kaminofens erzielten Messergebnissen gegenübergestellt (vgl. Tabelle 6). Mit der Angabe der Kohlenstoffmonoxid-Emissionen (CO) lässt sich als Kriterium eine Aussage über die Vollständigkeit und die Verbrennungsqualität einer Verbrennung treffen. Der aktuell geltende Grenzwert gemäß den normativen Anforderungen liegt bei 1.250 mg/Nm^3 . Die gemessenen CO-Emissionen konnten mit integrierter Abbrand-Regelung im Vergleich zur Erstprüfung ohne Abbrand-Regelung um ca. 40 % reduziert werden.

Tabelle 6: Ergebnistabelle der gemessenen Leistungs- und Emissionsparameter beim Einsatz ohne und mit integrierter parametrierter Abbrand-Regelung in einem freistehenden Raumheizer nach DIN EN 13240 mit zwei Luftströmen.

	Leistung	CO ₂	CO

	(kW)	(Vol.-%)	(mg/Nm ³ _{tr} ^(*))
ohne Abbrand-Regelung	10,6	7,6	1.019
mit Abbrand-Regelung	10,4	9,0	618

(*) Alle Messwerte sind bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 13 Vol.-% gemäß der 1. BImSchV.

6.3 Parametrierung und erzielte Ergebnisse mit einem Kamineinsatz nach DIN EN 13229 mit integrierter Abbrand-Regelung (Kalfire – 15 kW – 3 Luftströme)

Im Anschluss an eine vergleichsweise aufwendige aber dennoch erfolgreiche Integration der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP zur Regelung der Verbrennungsluftzufuhr in einem Kamineinsatz nach DIN EN 13229 erfolgte die Parametrierung der Abbrand-Regelung zur Adaption auf die vergleichsweise große Feuerungsanlage. Die Versuchsanlage von der Firma Kalfire kennzeichnet besonders die Breite der Anlage sowie den dadurch verfügbaren großen Verbrennungsraum. Der Verbrennungsraum verfügt über ein Raumvolumen von ca. 145.000 cm³. Im Vergleich zur Versuchsanlage Holzherd mit einem Raumvolumen des Verbrennungsraums von ca. 45.000 cm³ verfügt der Kamineinsatz über einen mehr als dreimal so großen Verbrennungsraum.

Mit der sehr abweichenden Geometrie und Dimension von ansonsten eher schmalen und hohen Raumheizern ist eine vorherige Parametrierung bzw. eine Adaption der Regelsoftware für eine sachgemäße Regelung des Verbrennungsprozesses zwingend notwendig. Im Rahmen der durchgeführten Parametrierung der Regelsoftware für den Einsatz in dieser Versuchsanlage musste hauptsächlich die Berechnung für Temperaturen unterhalb von 400 °C angepasst werden, da aufgrund der erheblich größeren Sichtscheibe des Kamineinsatzes nach DIN EN 13229 im Vergleich zu einem Raumheizer nach DIN EN 13240 mehr Wärme in den Aufstellraum abgegeben wird. Weiterhin muss das damit verbundene langsamere Anheizverhalten sowie die schnellere Abkühlung des Feuerraumes für eine möglichst exakte Berechnung des Sauerstoffwerts berücksichtigt werden. Ebenfalls gilt es zu berücksichtigen, dass der Nachlegevorgang, wobei die Sichtscheibe nahezu vollständig geöffnet wird, aufgrund der höheren Holzauflagemenge bei großen Feuerungsanlagen mit hoher Wärmeleistung mehr Zeit in Anspruch nimmt und somit höhere Wärmeverluste entstehen. Im Rahmen der Parametrierung der Abbrand-Regelung für den Einsatz in diesem speziellen Anlagentyp war es vor allem notwendig den Korrekturfaktor k_f zur Sauerstoffberechnung für den niedrigen Temperaturbereich < 400 °C zu erhöhen, im Normalbetrieb bzw. bereits gleichmäßig aufgeheizten Regelbetrieb im Temperaturbereich von 400 °C bis 700 °C kann die Berechnung unverändert bleiben.

Für einen zuverlässigen und sicheren Betrieb musste darüber hinaus die prozentuale Mindestöffnungsweite der Primärluftklappe PLK_{min} erhöht werden. Dieser Parameter bewegt sich bei freistehenden Raumheizern nach DIN EN 13240 in einem Bereich zwischen 15 % bis 30 % und sorgt dafür, dass der Verbrennungsprozess zu keinem Zeitpunkt während der Verbrennung in einen Sauerstoffmangel durch ein vollständiges Schließen der Primärluftklappe gerät. Eine definierte Mindestöffnung der Primärluftklappe sorgt dafür, dass stets eine Mindestmenge an Sauerstoff dem Verbrennungsprozess zugeführt werden kann, sodass eine sachgemäße und kontrollierte Verbrennung stattfindet. Die Einstellung von PLK_{min} bei Feuerungsanlagen mit größerer Leistung im Bereich von > 15 kW und damit verbundenen größeren Holzauflagemengen sollte zu jederzeit mindestens eine

Öffnungsweite der PLK von 35 % betragen um kritische Verbrennungszustände mit einem Sauerstoffmangel vermeiden zu können.

Nachfolgend werden die erzielten Kenn- und Emissionsdaten aus den durchgeführten Emissionsmessungen gemäß den normativen Vorgaben der DIN EN 13229 ohne und mit integrierter Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP tabellarisch dargestellt. Die Feuerungsanlagen wurden jeweils nach Herstellerangaben bzw. bei Nennwärmeleistung betrieben, die Auswertung erfolgte gemäß den normativen Vorgaben für Kamineinsätze gemäß DIN EN 13229, wobei insgesamt zwei Abbrände bzw. Brennstoffauflagen ausgewertet werden. Die sich aus den Versuchsreihen ergebende optimale Betriebstemperatur für die untersuchte Versuchsanlage bei einem berechneten Sauerstoffgehalt im Abgas von $O_{2-SOLL} = 10 \text{ Vol.-%}$ liegt bei 550 °C . Die erhaltenen Messwerte mit integrierter Abbrand-Regelung wurden den bei der Erstprüfung des Kaminofens erzielten Messergebnissen gegenübergestellt (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Ergebnistabelle der gemessenen Leistungs- und Emissionsparameter beim Einsatz ohne und mit integrierter parametrierter Abbrand-Regelung in einem Kamineinsatz nach DIN EN 13229.

	η	AT	CO ₂	OGC	CO
	(%)	(°C)	(Vol.-%)	(mg/Nm ³ _{tr} ^(*))	(mg/Nm ³ _{tr} ^(*))
ohne Abbrand-Regelung	80	262	9,7	61	1.167
mit Abbrand-Regelung	81	260	9,1	33	538

(*) Alle Messwerte sind bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 13 Vol.-% gemäß der 1. BImSchV.

Die gemessenen CO-Emissionen konnten mit integrierter Abbrand-Regelung im Vergleich zur Erstprüfung ohne Abbrand-Regelung um über 50 % reduziert werden. Ebenfalls wurden die OGC-Emissionen, welche die Summe der gasförmigen Emissionen von organisch gebundenem Kohlenstoff umfassen, um nahezu 50 % reduziert. Während der durchgeführten Untersuchungen wurde festgestellt, dass besonders die Zündphase bei Feuerungsanlagen mit derart großen Brennräumen hinsichtlich einer sachgemäßen Verbrennung problematisch sind. Im Rahmen von Verbrennungsversuchen ohne Abbrand-Regelung musste hierbei die Feuerraumtür 2-3 cm für eine sachgemäße Zündung des neu aufgelegten Brennstoffs für bis zu zwei weitere Minuten geöffnet bleiben. Mit der integrierten Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP und der dadurch beim Zündvorgang automatisierten Zugabe von Rostluft direkt in das Glutbett und in Richtung der aufgelegten Holzscheite oder während jeder weiteren Brennstoffauflage erfolgte die Zündung problemlos und eine Unterstützung durch das Öffnen der Sichtscheibe ist nicht mehr erforderlich. Durch ein schnelles Zünden und einer damit verbundenen möglichst kurzen Zündphase lassen sich Schadstoffemissionen erheblich reduzieren. Das nachfolgende Diagramm 9 zeigt die aufgezeichneten Emissionsverläufe sowie die Abgastemperatur über einen gesamten Betriebstag mit insgesamt acht Brennstoffauflagen.

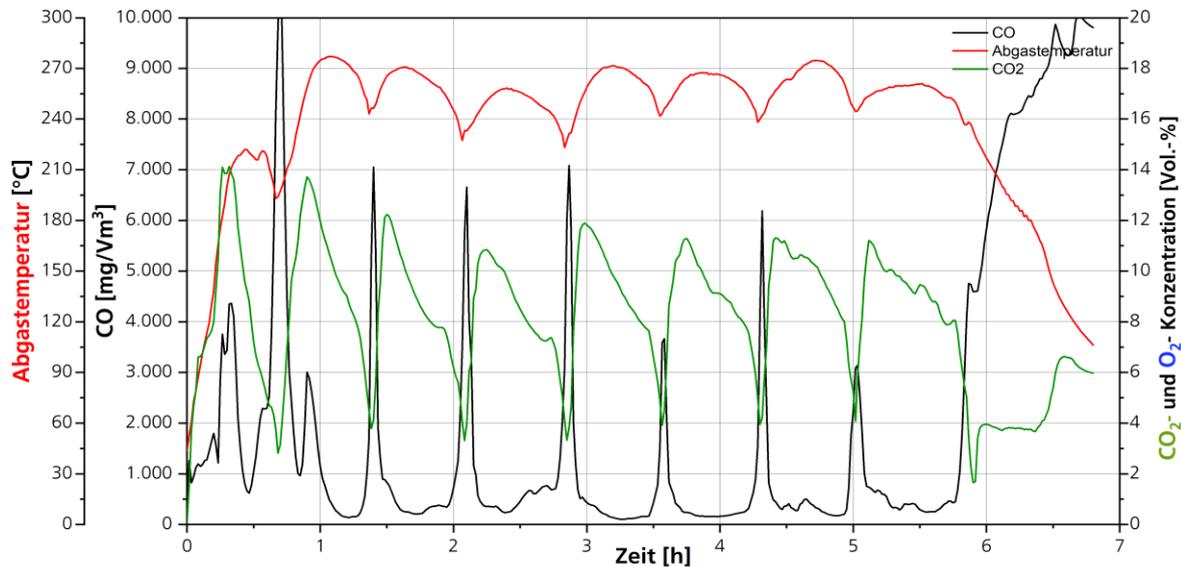


Diagramm 9: Aufgezeichneter Emissionsverlauf während eines Betriebs über insgesamt acht Brennstoffauflagen mit einem Kamineinsatz gemäß DIN EN 13229 mit integrierter Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP.

Es ist zu erkennen, dass die Verbrennung über die Gesamtheit der Brennstoffauflagen sehr konstant abläuft und sich die gemessenen CO-Schadstoffkonzentrationen gleichbleibend auf einem niedrigen Niveau befinden sowie die Emissionsspitzen zu den Nachlegezeitpunkten relativ schmal verlaufen, da die Anzündvorgänge durch den Einsatz der Abbrand-Regelung schnell und zuverlässig ablaufen kann. Mit der Ausnahme der Anzündphase liegen die gemessenen CO-Emissionen dauerhaft auf einem sehr niedrigen Niveau erheblich unterhalb des aktuellen Grenzwerts von 1.250 mg/m^3 . Im Vergleich dazu ohne den Einsatz der Abbrand-Regelung konnte der untersuchte Kamineinsatz bei der Erstprüfung mit den zwei Auflagen mit dem im Mittel niedrigsten Emissionsniveau den Grenzwert nur leicht unterschreiten.

6.4 Parametrierung und erzielte Ergebnisse mit einem Holzherd nach DIN EN 12815 mit integrierter Abbrand-Regelung (Universal-Brennraum – 10 kW – 3 Luftströme)

Eine weitere untersuchte Variante für den universellen Einsatz der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP ist in einem sogenannten Holzherd für feste Brennstoffe nach DIN EN 12815. Ein geeigneter Prototyp einer Feuerungsanlage dieser Art mit einem speziell geprüften Universal-Brennraum wurde durch die Firma Kunstschlosserei Grasmüller, einem Spezialisten für die Herstellung von Küchenherden, angefertigt und zur Verfügung gestellt. Die Integration der Abbrand-Regelung zur separaten Regelung des Primär-, Sekundär- und Rostluftstroms konnte baulich auf der Rückseite der Anlage realisiert werden (vgl. Abbildung 27). Durch die sich ebenfalls auf der Rückseite befindlichen Luftkanäle wird die Elektronik der Abbrand-Regelung bei einer Installation auf der Rückseite besonders vor zu hohen Temperaturen bzw. vor einer Überhitzung geschützt. Die Installation des Thermoelements zur Messung des Temperaturniveaus im Verbrennungsraum erfolgte ca. 10 cm nach dem Aufstieg der Rauchgase im ersten Rauchgaszug. Die Kompakte Bauweise des Holzherds erforderte

im Rahmen der durchgeführten Parametrierung zur Gewährleistung einer sachgemäßen Berechnung des Sauerstoffgehalts und folglich optimalen Regelbarkeit des Verbrennungsprozesses im ersten Schritt eine Anpassung des Korrekturfaktors k_f . Der in der Berechnungsgleichung enthaltene Korrekturfaktor k_f berücksichtigt die unerwünschte Wärmeabgabe bei der thermischen Umsetzung des Brennstoffs. In Abhängigkeit der Einzelraumfeuerungsanlage und dem Betriebszustand beschreibt dies die Wärmeverluste von der Flammenzone bis hin zur Nachoxidationskammer vor der Vervollständigung der Oxidation. Je größer der Wärmeverlust, desto höher muss der Wert für Korrekturfaktor k_f angenommen werden. Für die richtige Berechnung des Sauerstoffs bzw. des virtuellen Sauerstoffsignals ist dieser Korrekturfaktor wesentlich. Er beschreibt in vereinfachtem Sinne eine Gerade in Abhängigkeit der Temperatur. Diese Gerade wird in zwei Temperaturbereiche unterteilt, um die Berechnung besser abstimmen zu können. Für eine möglichst optimale Auslegung der Abbrand-Regelung für die Versuchsanlage Holzherd wurde der Korrekturfaktor K_f für beide Temperaturbereiche ($< 400\text{ °C}$ und $> 400\text{ °C}$ bis 700 °C) deutlich verringert. Es musste berücksichtigt werden, dass im Gegensatz zur Versuchsanlage Kamineinsatz der Fa. Kalfire (Fläche der Sichtscheibe 4.155 cm^2) der Holzherd (Fläche der Sichtscheibe 715 cm^2) eine kompakte Feuerungsanlage mit einem nahezu 6-fach geringeren Sichtscheibenanteil ist. Daraus resultieren bedeutend geringere Wärmeverluste und demnach ein schnelleres An- bzw. Aufheizverhalten. Für die prozentuale Mindestöffnungsweite der Primärluftklappe PLK_{\min} musste aufgrund der geringen Größe der Anlage für einen sicheren Betrieb ein niedriger Wert von 25 % gewählt werden.



Abbildung 27: Integration der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP in einen Holzherd gemäß DIN EN 12815 (links: Inbetriebnahme bzw. erste Abbrände in der Versuchsanlage mit Abbrand-Regelung und Funktionstest der Herdplatte; rechts: auf der Rückseite integrierte Grundplatte mit parametrierter Abbrand-Regelung).

Die sich aus den Versuchsreihen auf dem Teststand ergebende optimale Betriebstemperatur für die untersuchte Versuchsanlage bei einem berechneten Sauerstoffgehalt im Abgas von $O_{2-SOLL} = 10 \text{ Vol.-%}$ liegt bei 635 °C . Die nachfolgende Abbildung 28 zeigt ein aufgenommenes Wärmebild der Herdplatte auf der Oberseite des Holzherds. Die Herdplatte kann zum Kochen verwendet werden und stellt in der wärmsten Zone, im Bereich des Messpunkts M1 auf dem Wärmebild, Temperaturen von bis zu 330 °C bereit.

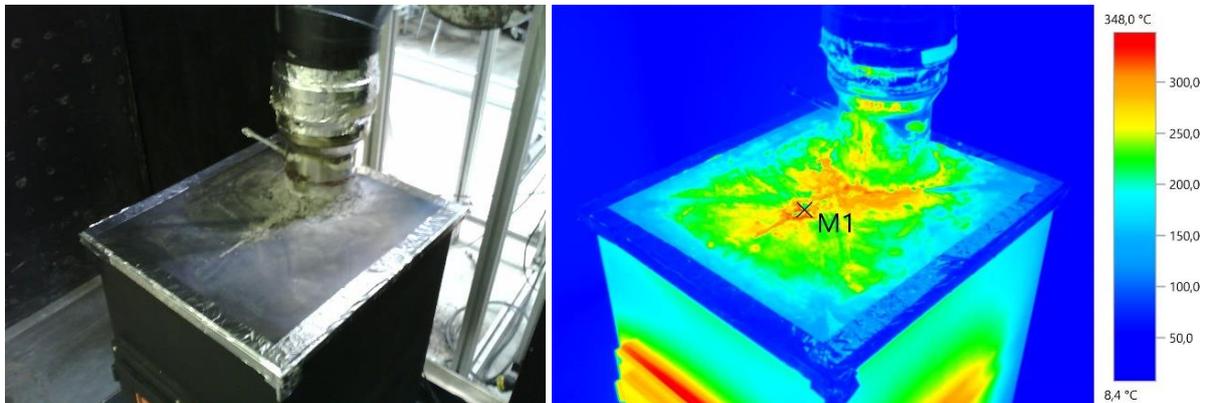


Abbildung 28: Wärmebild der Herdplatte zur Visualisierung der Wärmeverteilung auf dem Kochfeld.

Nachfolgend werden die erzielten Kenn- und Emissionsdaten aus den durchgeführten Emissionsmessungen gemäß den normativen Vorgaben ohne und mit integrierter Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP tabellarisch dargestellt. Der Holzherd wurde jeweils nach Herstellerangaben bzw. bei Nennwärmeleistung betrieben, die Auswertung erfolgte in diesem Fall in Anlehnung an den Blauen Engel für Kaminöfen, welcher den gesamten Betrieb inklusive der Anheizphase sowie die Ausbrandphase mitberücksichtigt und insgesamt sieben aufeinanderfolgende Abbrände bzw. Brennstoffauflagen umfasst. Die durchgeführten Untersuchungen wurden jeweils ohne Abbrand-Regelung und mit integrierter Abbrand-Regelung unter identischen Betriebsparametern (Kaminzug, Brennstoffqualität, Brennstofffeuchte, Brennstoffgewicht u. w.) durchgeführt. Bei der durchgeführten Untersuchung ohne Abbrand-Regelung wurde eine fixe Verbrennungslufteinstellung für die Primär- und die Sekundärluftklappe (dauerhaft jeweils zu 50 % geöffnet) gewählt, wodurch eine Festeinstellung der Verbrennungsluft wie bei klassischen Feuerungsanlagen simuliert wurde. Die dabei erzielten Messergebnisse werden in der Tabelle 8 gegenübergestellt. Durch den geregelten Verbrennungsprozess in der Versuchsanlage Holzherd konnte die mittlere Abgastemperatur des Betriebstags drastisch um 66 °C gesenkt werden und somit gleichzeitig eine Wirkungsgradsteigerung von 5 % erzielt werden. Dies ist maßgeblich damit zu begründen, da bei einer Überschreitung der definierten optimalen Betriebstemperatur die Primärluftklappe anfängt zu schließen, umso höher die Überschreitung desto schneller verringert die Klappe die primäre Sauerstoffzufuhr bis zum definierten Punkt PLK_{min} , sodass die gemessene Abgastemperatur stets möglichst nahe an der optimalen Betriebstemperatur gehalten werden kann. Darüber hinaus zeigt sich eine vollständigere Verbrennung mit einem signifikant höheren CO_2 -Wert und drastisch reduzierten Schadstoffemissionen Staub (- 40 %), OGC (- 32 %) und Kohlenstoffmonoxid bzw. CO (- 44 %). Dies lässt sich durch die eingesetzte integrierte Abbrand-Regelung realisieren indem die vorgegebene

Temperatur T_{SOLL} in einem engen Bereich geregelt wird sowie durch die optimale Verteilung und der bedarfsgerechten Zufuhr an Sauerstoff in allen Betriebsphasen.

Tabelle 8: Ergebnistabelle der gemessenen Leistungs- und Emissionsparameter beim Einsatz ohne und mit integrierter parametrierter Abbrand-Regelung in einem Holzherd nach DIN EN 12815.

	η	AT	CO ₂	OGC	CO	Staub
	(%)	(°C)	(Vol.-%)	(mg/Nm ³ _{tr} ^(*))	(mg/Nm ³ _{tr} ^(*))	(mg/Nm ³ _{tr} ^(*))
ohne Abbrand-Regelung	80	276	8,0	28	948	35
mit Abbrand-Regelung	85	210	10,8	19	531	21

(*) Alle Messwerte sind bezogen auf einen Sauerstoffgehalt von 13 Vol.-% gemäß der 1. BImSchV.

Das nachfolgende Diagramm 10 zeigt die aufgezeichneten Abgasparameter über den dazugehörigen gesamten Betriebstag mit einer normierten Betriebszeit inklusive der Anzündphase und der Ausbrandphase. Der Betrieb des Holzherds ohne Abbrand-Regelung ist deutlich an der aufgezeichneten O₂-Kurve zu identifizieren, der den mit einem Abgasanalysator gemessenen Sauerstoffgehalt im Abgas während des Betriebstages darstellt. Der aufgezeichnete Sauerstoffgehalt bewegt sich innerhalb einer Brennstoffauflage vom Minimum mit ca. 6 Vol.-% nach dem Auflegen und bei den höchsten Verbrennungstemperaturen und verläuft mit der Abbrandzeit bis hin zum Ausbrand der Auflage relativ direkt bzw. linear bis zu einem Maximum von ca. 17 Vol.-%. Die fehlende Abbrand-Regelung bzw. die fehlende Vorgabe eines Sauerstoffsollwerts lässt sich an dem aufgezeichneten Kurvenverlauf des Sauerstoffgehalts dadurch direkt erkennen. Demgegenüber ist ein sehr spitzzulaufender und schnell bzw. steil abfallender CO₂-Verlauf zu erkennen. Die aufgezeichneten CO-Emissionen der einzelnen Brennstoffauflagen liegen auf einem konstanten Emissionsniveau, ausreichend niedrig um den aktuellen Grenzwert zu erreichen.

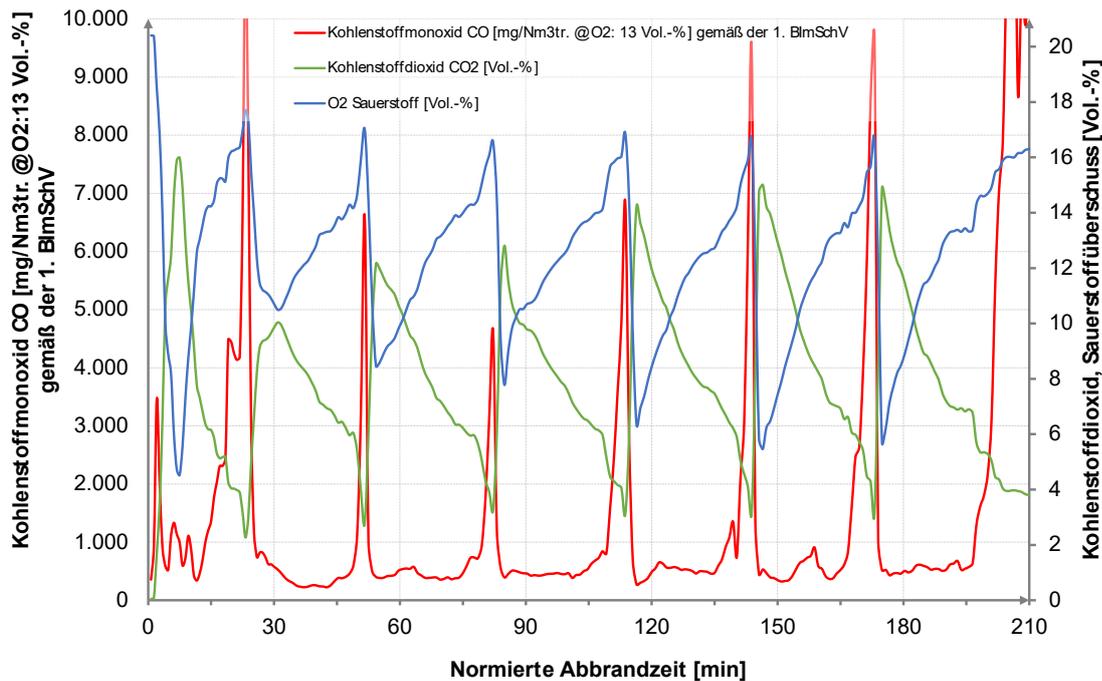


Diagramm 10: Aufgezeichneter Emissionsverlauf während eines Betriebs über insgesamt sieben Brennstoffauflagen mit einem Holzherd gemäß DIN EN 12815 ohne Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP bzw. mit fixer Luftpfeinstellung.

Das nachfolgende Diagramm 11 zeigt die aufgezeichneten Abgasparameter über den dazugehörigen gesamten Betriebstag mit einer normierten Betriebszeit inklusive der Anzündphase und der Ausbrandphase. Der Betrieb des Holzherds mit integrierter Abbrand-Regelung ist ebenfalls deutlich an der aufgezeichneten O₂-Kurve zu identifizieren, der den mit einem Abgasanalysator gemessenen Sauerstoffgehalt im Abgas während des Betriebstages darstellt. Im Gegensatz zum Kurvenverlauf des Sauerstoffgehalts aus dem Verbrennungsversuch ohne Abbrand-Regelung ist deutlich zu erkennen, dass der aufgezeichnete Sauerstoffgehalt mit integrierter Abbrand-Regelung und Sauerstoff-Sollwertvorgabe durch das Schließen und Öffnen der Stellklappen in einem bestimmten Sauerstoffbereich, zwischen 8,0 Vol.-% und 10,5 Vol.-%, im Rahmen der thermodynamischen Möglichkeiten mit geringen Abweichungen um den definierten Sauerstoffsollwert geregelt wird. Daraus resultiert ein vergleichsweise auf konstant hohem Niveau verlaufender, nicht steil abfallender CO₂-Verlauf, der im Mittelwert dementsprechend höher ausfällt. Die aufgezeichneten CO-Emissionen der einzelnen Brennstoffauflagen liegen im Vergleich zur Untersuchung ohne Abbrand-Regelung konstant auf einem erheblich niedrigeren Emissionsniveau (über 40 % niedriger) und unterschreiten den aktuellen Grenzwert bedeutend, sodass auch weitere zukünftige Grenzwertverschärfungen bzw. zusätzliche Umweltzertifikate wie z. B. der Blaue Engel, erreichbar werden.

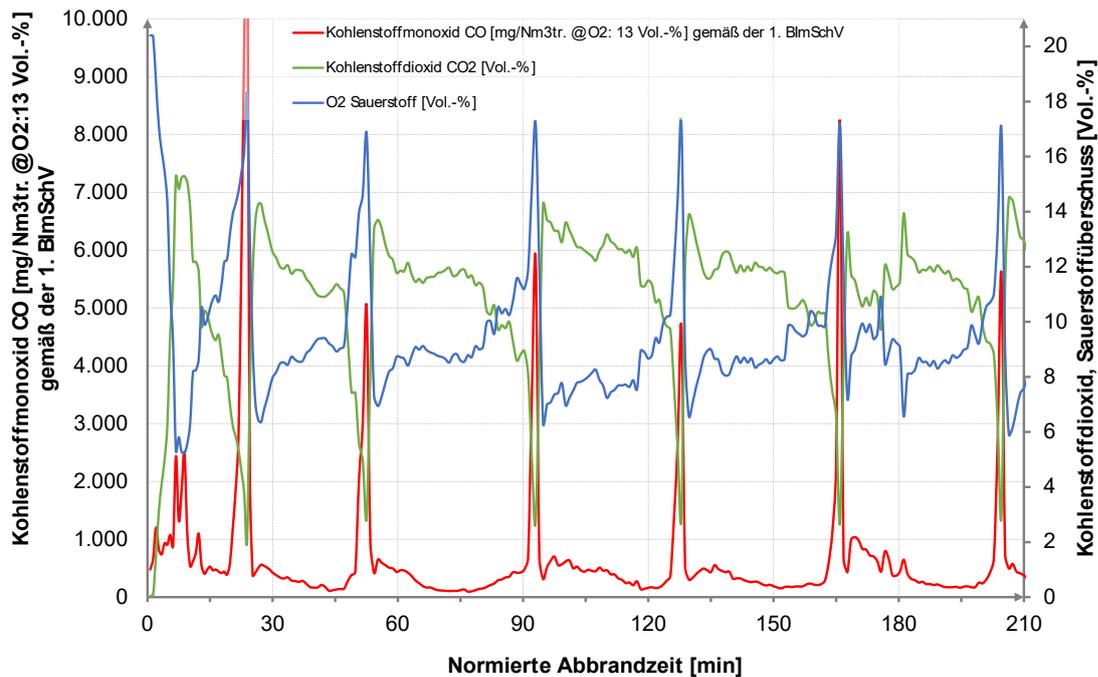


Diagramm 11: Aufgezeichneter Emissionsverlauf während eines Betriebs über mehrere Brennstoffauflagen mit einem Holzherd gemäß DIN EN 12815 mit integrierter parametrierter Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP bzw. bedarfsgerechter Verbrennungsluftzufuhr.

Ein weiterer Vergleich der Untersuchung ohne Abbrand-Regelung mit der Untersuchung mit integrierter Abbrand-Regelung zeigt die zeitlich kürzer andauernden Emissionsspitzen zu den Nachlegezeitpunkten. Die Zündphase einer nachbeschiekten Holzaufgabe dauert durchschnittlich nur halb so lang wie eine Zündphase ohne Abbrand-Regelung und trägt dadurch ebenfalls zu einem großen Teil zur Realisierung des Emissionseinsparpotentials bei. Die Verkürzung der Zündphase wird durch die Erkennung und aktive Unterstützung durch eine gezielte Rostluftzugabe durch die Abbrand-Regelung realisierbar.

6.5 Übertragung der Verbrennungslufteinrichtung auf einen Speicherofen nach DIN EN 15250

Sowohl aus kostentechnischen, als auch aus zeitlichen Gründen kam im Rahmen des zuvor beschriebenen Einsatzes der Verbrennungsluftregelung in einem Holzherd nach DIN EN 12815 ein spezieller geprüfter Universalbrennraum zum Einsatz. Dieser Universalbrennraum wird von verschiedenen Unternehmen als Brennraum in ihren Feuerungsanlagen eingesetzt und als Gesamtprodukt verkauft. Unter anderem verwendet auch die Firma Ambio Speicherofen & Kamin GmbH diese Universalbrennräume in einigen ihrer Produkte. Auf Grund der sich dadurch ergebenden identischen Konstruktions- und Leistungsmerkmale lassen sich die erzielten Ergebnisse aus „6.3 Integration bzw. Übertragung der Verbrennungsluftregelung in einen Holzherd für feste Brennstoffe nach DIN EN 12815“ auch auf eine Vielzahl von Speicheröfen nach DIN EN 15250

uneingeschränkt und ohne eine zusätzliche softwareseitige Anpassung der Abbrand-Regelung übertragen.

7 Verwertung der Forschungsergebnisse und Ausblick

Eine besonders große Bedeutung hat die Biomasse im Wärmesektor, wobei hier etwa 88 % des Endenergieverbrauchs aus erneuerbaren Energien durch die Biomasse bereitgestellt werden. Gemäß den energiepolitischen Zielen soll der Anteil an erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch bis zum Jahr 2030 auf 30 % gesteigert werden. Zudem soll bis zum Jahr 2045 für Deutschland eine Treibhausgasneutralität erreicht werden. Die zukünftigen energiepolitischen Ziele für eine nachhaltige Energieversorgung und eine effiziente und schadstoffarme thermische Nutzung von Biomasse lassen sich jedoch nur durch die vermehrte Nutzung von neuen Technologien erreichen. Eine verstärkte energetische Nutzung von Biomasse darf nicht zu einer Erhöhung der klimarelevanten und gesundheitsschädlichen Emissionen (wie z. B. Feinstaub, CO, VOC, NO_x, usw.) führen und erfordert daher die Entwicklung von innovativen Verbrennungstechnologien. Vor allem Einzelraumfeuerungsanlagen, welche deutschlandweit betrachtet prozentual am häufigsten in den Bundesländern Baden-Württemberg und Bayern betrieben werden zählen unter den Biomassefeuerungsanlagen zu den Hauptquellen der genannten Schadstoffemissionen. Zukünftig schärfere Anforderungen bzw. an eine bestimmte Frist gebundene niedrigere Emissionsgrenzwerte als Voraussetzung für den Verkauf und Betrieb solcher Verbrennungsanlagen stellen eine große Herausforderung für Hersteller von holzbefeuerten Öfen und deren langfristige Wettbewerbsfähigkeit dar. Die Entwicklung von Emissionsminderungstechnologien und die generelle Optimierung der bestehenden Verbrennungstechnik kann in vielen klein- und mittelständischen Unternehmen auf Grund des dafür notwendigen hohen Zeit- und Kosteneinsatz für die Entwicklung nur sehr eingeschränkt erfolgen.

Im Rahmen dieses erfolgreich durchgeführten Forschungsprojekts wurden Untersuchungen durchgeführt, die bestätigt haben, dass die universelle parametrierbare Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP mit einem überschaubaren Aufwand sehr effizient auf unterschiedliche Typen von Einzelraumfeuerungsanlagen übertragen werden kann. Im Anschluss an die Festlegung der Rahmenbedingungen zur Auslegung und unter Einhaltung der wichtigsten technischen Anforderungen für eine effiziente und sichere Funktion der Abbrand-Regelung, gemäß den Vorgaben der geltenden Normen, wurde die Abbrand-Regelung in mehrere unterschiedliche Einzelraumfeuerungsanlagentypen integriert. Im Anschluss daran wurden auf einem Teststand des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik unter praxisnahen Betriebsbedingungen Untersuchungen durchgeführt und die Abbrand-Regelung hinsichtlich der Übertragbarkeit bzw. der Parametrierbarkeit weiterentwickelt und erprobt.

Die Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP wurde erfolgreich für unterschiedliche Arten von Einzelraumfeuerungsanlagen (freistehender Raumheizer nach DIN EN 13240 (zwei Luftströme), Kamineinsatz nach DIN EN 13229, Holzherd nach DIN EN

12815 - inklusive diverse Speicheröfen nach DIN EN 15250) weiterentwickelt und somit für einen möglichst breiten Einsatz in unterschiedlichen Arten von Verbrennungsanlagen verfügbar bzw. verwertbar gemacht. Die dadurch möglich werdende breite Anwendung soll die Luft, speziell in urbanen Gebieten nachhaltig verbessern. Im direkten Vergleich zum aktuellen Stand der Technik entspricht der Einsatz einer Regelungstechnologie im Bereich der handbeschickten Holzöfen einer sprunghaften Entwicklung bei der eine vergleichsweise alte und traditionelle Art und Weise zu heizen mit der modernen digitalen Welt kombiniert wurde, um den Verbrennungsprozess nahezu vollständig zu regeln bzw. zu automatisieren und diesen damit noch effizienter und schadstoffärmer gestalten zu können. Durch den Einsatz der Abbrand-Regelung können eine Reihe positiver Effekte hinsichtlich der Nachhaltigkeit realisiert werden. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurde festgestellt, dass mit dem Einsatz der Abbrand-Regelung der Sauerstoffgehalt im Abgas über den gesamten Betrieb stabil in einem gewünschten und definierten Bereich bedarfsgerecht geregelt werden kann, was einen stabilen Betrieb über die gesamte Verbrennung ermöglicht. Dadurch lassen sich hohe Konzentrationen an Schadstoffen (beispielsweise CO, OGC usw.), die nicht nur toxikologisch relevant, sondern auch klimawirksam sind, vermeiden. Da diese Schadstoffe klimarelevant sind und sich besonders schädlich auf den Menschen auswirken, ist die Regelung auch aus ökologischer Sicht besonders positiv zu bewerten. Außerdem spielt die Erhöhung des Wirkungsgrads eine besondere positive Rolle sowohl bei der ökologischen als auch bei der ökonomischen Betrachtung. Bei der Annahme, dass eine Einzelraumfeuerungsanlage mit einer durchschnittlichen installierten Leistung von 10 kW und einem stündlichen Holzverbrauch von 3,2 kg über die gesamte Heizperiode (01. September bis 31. Mai) an 7 Tagen in der Woche für je 2 Stunden und somit insgesamt etwa 550 h betrieben wird, resultiert daraus ein jährlicher Holzverbrauch von ca. 1,8 T bzw. ca. 3,6 rm trockenem Buchenscheitholz. Bei einer Wirkungsgradsteigerung durch den Einsatz der Abbrand-Regelung des Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, gegenüber Anlagen in der Praxis mit einem vergleichsweise niedrigeren Wirkungsgrad zwischen 70 % und 80 %, um eine durchaus erzielbare Steigerung von bis zu 10 %, kann bei der angenommenen jährlich verbrauchten Brennstoffmenge eines Privathaushalts eine Brennstoffeinsparung von ca. 180 kg und bei aktuellen stark gestiegenen Marktpreisen für 1 rm getrocknetes Buchenscheitholz von 150 € bis zu 200 €, eine Preisersparnis für den Nutzer von 80 € pro Jahr realisiert werden. Die CO₂ Ersparnis bei der Verwendung der parametrierbaren und universellen Abbrand-Regelung ergibt sich aus den folgenden Annahmen. Bei der Verbrennung entstehen durchschnittlich etwa 92 g CO₂/MJ_{Nutzenergie}. Bezüglich der errechneten Brennstoffeinsparung von 180 kg/a können ca. 0,27 t CO₂ pro Einzelraumfeuerungsanlage und Jahr eingespart werden. Unter der Annahme, dass in Deutschland jährlich ca. 400.000 neue Einzelraumfeuerungsanlagen installiert werden, können insgesamt durch den Einsatz der Abbrand-Regelung ca. 110.000 t CO₂ und 1,2 PJ jährlich eingespart werden. Für die Entwicklung und Erprobung der parametrierbaren Abbrand-Regelung wurden 356.779 € bei einer durchschnittlichen Förderquote von 70 % bereitgestellt. Dies entspricht einer Mindesteinsparung von ca. 0,31 t CO₂/€ Fördermittel.

Durch eine breite Anwendung der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP in mehreren hunderttausend Einzelraumfeuerungsanlagen können dementsprechend erhebliche Emissionsminderungs- und Brennstoffeinsparpotenziale realisiert werden. Zudem entsteht durch die mögliche Brennstoffeinsparung ein direkter Anreiz für den Kunden bzw. Nutzer durch die dadurch realisierbare Kostenersparnis, wodurch die allgemeine Attraktivität der energetischen Biomasseverwertung ansteigt. Darüber hinaus kann durch die bedarfsgerechte Sauerstoffzugabe mit der Abbrand-Regelung eine höhere Flexibilität gegenüber der eingesetzten Brennstoffqualität erzielt werden. Durch die höhere Flexibilität bei der Verbrennung von Biomasse mit unterschiedlichen Brennstoffqualitäten kann speziell im Praxisbetrieb in den Haushalten in einem gewissen Rahmen der Einsatz von beispielsweise leicht zu trockenem bzw. leicht zu feuchtem Brennholz, zu viel Brennstoff, zu wenig Brennstoff mit Hilfe der Abbrand-Regelung, im Vergleich zu einer standardmäßigen fixen Verbrennungslufteinstellung, eine dennoch möglichst hohe Verbrennungseffizienz bei vergleichsweise niedrigen Schadstoffemissionen gewährleistet werden. Die Einführung und Etablierung der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP auf dem deutschen und europäischen Markt soll zukünftig einen maßgeblichen Beitrag für eine nachhaltige und effiziente Nutzung, nicht nur auf dem Prüfstand bei optimalen Betriebsbedingungen, sondern auch im Praxisbetrieb wobei nicht selten von optimalen bzw. sachgemäßen Betriebsbedingungen abgewichen wird, leisten.

Im Rahmen der Durchführung des vorliegenden erfolgreich abgeschlossenen Forschungsprojekts stand eine anschließend praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse von Beginn an im Vordergrund. Die praktische Umsetzbarkeit soll dank der Parametrierbarkeit der Regelungsalgorithmen und einem dadurch möglich werdenden universellen Einsatz gewährleistet werden. Den Einsatz der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP für nahezu alle Konstruktionen und Arten von Verbrennungsluftzufuhr ermöglicht die einfache softwareseitig gestaltete Parametrierbarkeit, sodass sich diese mit wenigen Arbeitsschritten kostengünstig auf weitere Verbrennungsanlagen übertragen lässt und eine sachgemäße Verbrennung eingestellt werden kann. Zudem bietet die parametrierbare Abbrand-Regelung den Herstellern von Einzelraumfeuerungsanlagen die Möglichkeit zur Übertragung der Regelung auf unterschiedliche Anlagentypen bzw. weitere Modelreihen, ohne die Algorithmen anzupassen bzw. verändern zu müssen. Durch die hohe Übertragbarkeit können auf Herstellerseite hohe Kosten eingespart werden, die normalerweise bei der Entwicklung von Reglern anfallen. Für die Umsetzung der Übertragung des gesamten Regelsystems sind keine besonderen Kompetenzen notwendig. Dies hat den Vorteil, dass viele Kleinunternehmen mit ihren heutigen Einrichtungen und ihrem Personal das Regelsystem ohne großen Aufwand umsetzen können, wodurch sich die Erfolgsaussichten sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Betrachtung als sehr positiv bewerten lassen.

Die Markteinführung der universellen Abbrand-Regelung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP für den Einsatz in verschiedensten Ofentypen, die auch im Bereich der Zulassung die Anforderungen der geltenden Richtlinien und Normen erfüllt, soll unter dem oben genannten Aspekt auch besagte Hersteller

unterstützen, sodass sich einerseits hohe Entwicklungskosten und -zeit auf Seiten der Unternehmen einsparen lassen, um diese an einer anderen Stelle gezielt einzusetzen und andererseits die Verbesserung der Verbrennung bzw. Steigerung der Effizienz und Minderung an Schadstoffemissionen, um die aktuellen sowie zukünftigen gesetzlich geforderten Grenzwerte einzuhalten. Der Einsatz der Abbrand-Regelung setzt hierbei vor der eigentlichen Entstehung der Emissionen auf der Primärseite der Emissionsminderung an und mindert nicht nur bereits entstandene Emissionen, wie nachgeschaltete Sekundärmaßnahmen, sondern optimiert gezielt den Verbrennungsprozess, wodurch sowohl für die Hersteller als auch für die Kunden keine negativen Folgen hinsichtlich eines großen Platzbedarfs, Einbußen im Komfort und höhere Betriebskosten zu erwarten sind.

Die für die Untersuchungen eingesetzten Feuerungsanlagen-Prototypen wurden von Unternehmen bzw. Ofenherstellern verfügbar gemacht, die bereits bestehendes Interesse am Einsatz der Abbrand-Regelung im Rahmen ihrer Produkte hatten und diese jetzt auch im Anschluss an die Markteinführung einsetzen werden. Während der gesamten Projektlaufzeit wurde der Fortschritt bei der Weiterentwicklung zielführend durch die interessierten Unternehmen begleitet. Nichtsdestotrotz wird die Verwertung dadurch nicht eingeschränkt. Fraunhofer als gemeinnützige Gesellschaft schränkt die Verwertung der Ergebnisse nicht ein, sondern stellt diese der Allgemeinheit zur Verfügung, d. h. alle interessierten Unternehmen bzw. Hersteller von Einzelraumfeuerungsanlagen können von den erhaltenen Ergebnissen, dem aufgebauten Know-How und den gemachten Erfahrungen profitieren. Jeder Hersteller hat die Möglichkeit entsprechende Lizenzen für die Nutzung bzw. Vermarktung von mit der Abbrand-Regelung ausgestatteten Einzelraumfeuerungsanlagen zu erwerben. Die parametrierbare und universell einsetzbare Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP wurde auf dem Prüfstand gemäß den spezifischen Normen unter praxisnahen Betriebsbedingungen entwickelt und die Anwendbarkeit in unterschiedlichen Ofentypen validiert. Die dadurch erzielbaren Vorteile wurden herausgearbeitet, sodass für die Anwendung der Abbrand-Regelung des Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP nicht nur die bereits interessierten Unternehmen in Betracht kommen, sondern auch bei anderen Herstellern großes Interesse an dem Einsatz dieser Abbrand-Regelung geweckt werden soll. Bereits jetzt wird das Interesse bzw. eine erhöhte Nachfrage nach der Technologie, durch die Einführung der Ökodesign-Richtlinie im Januar 2022, der Forderung nach dem verpflichtenden Blauen Engel für Kaminöfen in einigen Städten sowie zukünftig zu befürchtende weitere Verschärfungen von Emissionsgrenzwerten, geschaffen. Bereits mehrere Hersteller von Feuerungsanlagen haben bereits großes Interesse an der Verwertung der Ergebnisse bekundet und die ersten Kooperationen wurden bereits geregelt. Bei der Bereitstellung der Systembestandteile besteht zudem bereits eine Kooperation mit der Firma SABO ELEKTRONIK GmbH und der Firma Kutzner & Weber GmbH, sodass eine möglichst zeitnahe Markteinführung der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP für alle existierenden Einzelraumfeuerungsanlagentypen umsetzbar ist.

Bei der Entwicklung und Übertragung der Abbrand-Regelung des Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP ist eine branchenübergreifende Sektorenkopplung durch

mehrere Unternehmen aus verschiedensten Bereichen erforderlich bzw. entstanden. Zur Entwicklung und Weiterentwicklung dieser Technologie ist eine Bündelung der Kompetenz aus sehr unterschiedlichen Arbeits- und Fachbereichen notwendig um Synergien zu schaffen und gemeinsam branchenübergreifend zu entwickeln. Von der Markteinführung der Abbrand-Regelung profitieren gleich mehrere Branchen wie beispielsweise Kaminofenhersteller, spezialisierte Unternehmen im Bereich der Elektronik bzw. Automatisierungstechnik, Softwareentwicklung, sowie Zulieferer von Hard- und Softwarekomponenten. Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP arbeitet eng mit der Firma SABO Elektronik GmbH zusammen, um nicht nur die Software, sondern auch die Hardware der Abbrand-Regelung günstiger zu gestalten, technisch zu verbessern und um neue Smart-Home-Technologien anzubieten. Es lässt sich zusammenfassen, dass die Nachfrage nach entsprechenden Kompaktreglern mit der Software der parametrierbaren Abbrand-Regelung in den nächsten Jahren deutlich ansteigen wird. Für diese Expansion werden die Hersteller neue Entwickler für digitale Verbrennungstechnologien bzw. Softwareentwickler, Ingenieure, Automatisierungstechniker, Techniker, Handwerker und zwischen diesen Disziplinen als Bindeglied agierendes Personal benötigen, wodurch ein zusätzlicher positiver Effekt für den Arbeitsmarkt entsteht. Seit etwa Anfang der 2000er-Jahre entspricht ein unregelter Heizkessel nicht mehr dem Standard. Eine ähnliche Entwicklung, ausgelöst unter anderem durch das in der Bevölkerung und auf politischer Ebene steigende Umweltbewusstsein wird zukünftig auch für den Markt der Einzelraumfeuerstätten zu erwarten sein. Diese Entwicklung kommt allen Beteiligten zugute, dem Hersteller, dem Kunden vor allem unserer Umwelt.

8 Zusammenfassung

Die Vorteile der energetischen Biomassenutzung kommen nur zum Tragen, wenn die Nutzung unter ökologischen und ökonomischen Bedingungen mit geeigneten Technologien erfolgt. Hierbei gilt es zu beachten, dass der Einsatz von Biomasse einerseits viele Vorteile vereint und bieten kann, jedoch andererseits bei unsachgemäßer Nutzung toxikologisch relevante Luftschadstoffe bei der Verbrennung entstehen können, welche für die Menschen und die Umwelt gefährlich sein können.

Handbeschickte Einzelraumfeuerungsanlagen stellen ca. 92% der Gesamtfeuerungsanlagen (ca. 11 Mio. Anlagen) dar und zählen zu den Hauptquellen für staub- und gasförmige Schadstoffemissionen wie z. B. Feinstaub, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, flüchtige organische Verbindungen, Kohlenstoffmonoxid und sonstige Schadstoffe. Diese Schadstoffe können sich gesundheits- und klimagefährdend auf die Umwelt bzw. auf das gesamte Ökosystem auswirken. In handbeschickten Einzelraumfeuerungsanlagen entstehen die Schadstoffe und die klimarelevanten Emissionen überwiegend durch eine unvollständige Verbrennung, welche meistens durch eine Fehlbedienung der Feuerungsanlagen verursacht werden. Die Fehlbedienung in diesem Zusammenhang ergibt sich hauptsächlich aus einer falschen Einstellung der Verbrennungsluftzufuhr oder aus dem Einsatz ungünstiger Brennstoffe sowie aus einer Missachtung der empfohlenen Angaben der Hersteller, die nur für ein

bestimmtes Beschickungsregime (Brennstoffart, Anzahl, Größe und Anordnung der Scheite im Brennraum usw.) gelten. Oftmals lässt sich unter Praxisbedingungen eine schadstoffarme und effiziente bzw. eine bedarfsgerechte Verbrennung aufgrund fehlender Regelung des Verbrennungsprozesses bzw. der Verbrennungsluftzufuhr nur bedingt und in einem engen Betriebsbereich erreichen. Zukünftig schärfere Anforderungen bzw. an eine bestimmte Frist gebundene niedrigere Emissionsgrenzwerte als Voraussetzung für den Verkauf und Betrieb solcher Verbrennungsanlagen stellen eine große Herausforderung für Hersteller von holzbefeuerten Öfen und deren langfristige Wettbewerbsfähigkeit dar. Die Entwicklung von Emissionsminderungstechnologien und die generelle Optimierung der bestehenden Verbrennungstechnik kann in vielen klein- und mittelständischen Unternehmen auf Grund des dafür notwendigen hohen Zeit- und Kosteneinsatzes für die Entwicklung nur sehr eingeschränkt erfolgen.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde eine Abbrand-Regelung von einem individuellen Einsatz für einen universellen Einsatz in unterschiedlichen Typen von Einzelraumfeuerungsanlagen weiterentwickelt und erprobt. Die durch das Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelte T2O₂-Abbrand-Regelung wurde sowohl softwareseitig parametrisiert, als auch hardwareseitig adaptiert, sodass die intelligente temperaturbasierte Abbrand-Regelung zur Schadstoffminderung und Effizienzerhöhung auch erfolgreich in unterschiedlichen Arten von Einzelraumfeuerungsanlagen (freistehender Raumheizer nach DIN EN 13240 (zwei Luftströme), Kamineinsatz nach DIN EN 13229, Holzherd nach DIN EN 12815 - inklusive diverse Speicheröfen nach DIN EN 15250) eingesetzt und somit für einen möglichst breiten Einsatz in unterschiedlichen Arten von Verbrennungsanlagen verfügbar bzw. verwertbar gemacht werden konnte. Eine erfolgreiche softwareseitige Übertragung der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP auf verschiedene Arten von Einzelraumfeuerungsanlagen mit unterschiedlichen Voraussetzungen wie z. B. unterschiedliche Geometrien, Verbrennungsraumgrößen, Sichtscheibenanteile und den daraus resultierenden unterschiedlichen Anforderungen an die Abbrand-Regelung für eine möglichst genaue Sauerstoffberechnung, umfasste dabei eine individuelle softwareseitige Parametrierung mit Hilfe von entwickelten Korrekturfaktoren, über die die anlagenspezifischen Parameter berücksichtigt werden können und eine optimale und universelle Funktionsfähigkeit der Abbrand-Regelung gewährleistet werden kann.

Im Anschluss an die Festlegung der Rahmenbedingungen zur Auslegung und unter Einhaltung der wichtigsten technischen Anforderungen für eine effiziente und sichere Funktion der Abbrand-Regelung gemäß der Vorgaben der relevanten geltenden Normen, wurde die universelle parametrierbare Abbrand-Regelung in vier unterschiedliche Arten von Einzelraumfeuerungsanlagen integriert und unter praxisnahen Bedingungen im Technikum des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP experimentelle Untersuchungen zum Abbrandverhalten, zum Verbrennungsverhalten, zum strömungstechnischen Verhalten, zur Effizienz und zum Emissionsverhalten durchgeführt. Die durchgeführten Untersuchungen haben bestätigt, dass die universelle parametrierbare Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP mit einem überschaubaren Aufwand sehr effizient auf

unterschiedliche Typen von Einzelraumfeuerungsanlagen übertragen werden kann sowie der Sauerstoffgehalt im Abgas über den gesamten Betrieb stabil in einem gewünschten und definierten Bereich bedarfsgerecht geregelt werden kann, was einen stabilen Betrieb über die gesamte Verbrennung ermöglicht. Dadurch können hohe Konzentrationen an Schadstoffen (CO bis zu - 44 %, OGC bis zu - 32 %, Staub bis zu - 40 %), die nicht nur toxikologisch relevant, sondern auch klimawirksam sind, vermieden werden. Da diese Schadstoffe klimarelevant sind und sich besonders schädlich auf den Menschen auswirken, ist die Abbrand-Regelung auch aus ökologischer Sicht besonders positiv zu bewerten. Darüber hinaus spielt die Erhöhung des Wirkungsgrads eine besonders positive Rolle sowohl bei der ökologischen als auch bei der ökonomischen Betrachtung.

Durch eine breite Anwendung der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP in mehreren hunderttausend Einzelraumfeuerungsanlagen können dementsprechend erhebliche Emissionsminderungs- und Brennstoffeinsparpotenziale realisiert werden. Zudem entsteht durch die mögliche Brennstoffeinsparung ein direkter Anreiz für den Kunden bzw. Nutzer durch eine realisierbare Kostenersparnis, wodurch die allgemeine Attraktivität der energetischen Biomasseverwertung ansteigt. Darüber hinaus kann durch die bedarfsgerechte Sauerstoffzugabe mit der Abbrand-Regelung eine höhere Flexibilität gegenüber der eingesetzten Brennstoffqualität erzielt werden. Durch die höhere Flexibilität bei der Verbrennung von Biomasse mit unterschiedlichen Brennstoffqualitäten kann speziell im Praxisbetrieb in den Haushalten in einem gewissen Rahmen der Einsatz von beispielsweise leicht zu trockenem bzw. leicht zu feuchtem Brennholz, zu viel Brennstoff, zu wenig Brennstoff mit Hilfe der Abbrand-Regelung, im Vergleich zu einer standardmäßigen fixen Verbrennungslufteinstellung, eine dennoch möglichst hohe Verbrennungseffizienz bei vergleichsweise niedrigen Schadstoffemissionen gewährleistet werden. Die Einführung und Etablierung der Abbrand-Regelung des Fraunhofer IBP auf dem deutschen und europäischen Markt soll zukünftig einen maßgeblichen Beitrag für eine nachhaltige und effiziente Nutzung, nicht nur auf dem Prüfstand bei optimalen Betriebsbedingungen, sondern auch im Praxisbetrieb wobei nicht selten von optimalen bzw. sachgemäßen Betriebsbedingungen abgewichen wird, leisten.

Literaturverzeichnis

- Aleysa, M.: Entwicklung und Erprobung eines Abreinigungsfilters für das Abgas häuslicher Kleinfeuerungsanlagen für die Verbrennung von Biomasse und Abfällen, Dissertation, kassel university press, Kassel (2012) 117 S.
- 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.
- Aleysa, M., Leistner, Ph.: Intelligentes Kombinationssystem (VREM-System) zur regelungstechnischen Optimierung der Verbrennung und zur Vermeidung der Fehlbedienung in Biomasseheizkesseln durch den Einsatz der O₂/CO_e-Sonde, Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (03KB109A/B), Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart 2019, 191 S.
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), Stand: August 2019, Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat).
- Beebe, R. A.; Fricke, Griffith, R. H.; Hunsmann, W.; Kohlschutter, H. W.; Straumanis, M.: Heterogene Katalyse I, ISBN-10: 3642520359, ISBN-13: 978-3642520358, Springer Verlag, 568 S.
- Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi): Energiedaten: Gesamtausgabe, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Homepage des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>, 79 S.
- Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi): Zweiter Erfahrungsbericht zum Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz, Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin 2015, 61 S.
- Bundesumweltministerium (BMU): Kleinfeuerungsanlagen, Gesundheitliche Wirkung von Feinstäuben aus der Holzverbrennung, Bonn 2007, 4 S.
- DIN EN 13240 - Raumheizer für feste Brennstoffe – Anforderungen und Prüfungen, Deutsche Fassung EN 13240:2001 + A2:2004, Normenausschuss Heiz- und Raumlufttechnik, Beuth Verlag GmbH, 78 S.
- DIN EN 13229 - Kamineinsätze einschließlich offene Kamine für feste Brennstoffe Anforderungen und Prüfungen; Deutsche Fassung EN 13229:2001 + A1:2003 + A2:2004, Beuth Verlag GmbH, 88 S.

- DIN EN 15250 - Speicherfeuerstätten für feste Brennstoffe –Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 15250:2007, Beuth Verlag GmbH, 62 S.
- DIN 12815 - Herde für feste Brennstoffe - Anforderungen und Prüfungen; Deutsche Fassung EN 12815:2001 + A1:2004, Beuth Verlag GmbH, 84 S.
- DIN EN ISO 17043 - Konformitätsbewertung – Allgemeine Anforderungen an Eignungsprüfungen (ISO/IEC 17043:2010); Deutsche und Englische Fassung EN ISO/IEC 17043:2010, Beuth Verlag GmbH, 89 S.
- DIN ISO IEC 17025 - Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2005); Deutsche und Englische Fassung EN ISO/IEC 17025:2005, B.
- Dreiundvierzigste Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (Verordnung über nationale Verpflichtungen zur Reduktion der Emissionen bestimmter Luftschadstoffe - 43. BImSchV),
Ausfertigungsdatum: 18.07.2018, zuletzt geändert: 18.07.2018.
- Europäische Umweltagentur (EEA): Healthy environment, healthy lives: how the environment influences health and well-being in Europe, EAA Report No 21/2019, European Environment Agency, Publications Office of the European Union, Luxembourg 2020, 165 S.
- Erste Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV),
Ausfertigungsdatum: 26.01.2010. Zuletzt geändert: 19.06.2020.
- Erste Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV),
Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen vom 26. Januar 2010 (BGBl. I S. 38), Ausfertigungsdatum: 26.01.2010.
- Fuhrmann, G. F.: Allgemeine Toxikologie für Chemiker, Teubner Studienbücher Chemie, 2. Auflage, Leipzig 1999, 206 S.
- Guderian, R.: Handbuch der Umweltveränderung und Ökotoxikologie, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1999, 424 S.
- Hesselbach, J.: Vorlesungsskript LCE, Universität Kassel Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse, Kassel 2010
- Janbozorgi, M.; Eisazadeh Far K.; Metghalchi, H.; Handbook of Combustion Vol.I, Fundamentals and Safety, Edited by Maximilian Lackner, Franz Winter, and Avinash K. Agarwal Copyright _ 2010 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2010, ISBN: 978-3-527-32449-1, 2698 S.

- Joos, F.: Technische Verbrennung, Verbrennungstechnik, Verbrennungsmodellierung, Emissionen, ISBN: 978-3-540-34333-2, Springer-Verlag 2006, XXVII, 907 S.
- Kaltschmitt et al.: "Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren", Springer, 2. Auflage, ISBN 978-3-540-85094-6, Heidelberg, 2009.
- Klippel, N.; Nussbaumer, Th.: Feinstaubbildung in Holzfeuerungen und Gesundheitsrelevanz von Holzstaub in Vergleich zu Dieselruß, 9. Holzsymposium, Zürich 2006, S. 21-40.
- Lullmann, H.; Mohr, K.; Wehling, M.: Pharmakologie und Toxikologie, 15. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart 2003, 595 S.
- Marutzky, R; Seeger, K.: Energie aus Holz und anderer Biomasse, DRW-Verlag, Stuttgart 2002, 352 S.
- Urban, A.: Energetische Verwertung von Abfällen, Vorlesungsskript des Fachgebiet Abfalltechnik der Universität Kassel, WS 2008/2009
- Schultes, M.: Abgasreinigung, Verfahrensprinzipien, Berechnungsgrundlagen und Verfahrensvergleich, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg (1996), 243 S.
- Schwister, K.: Taschenbuch der Umwelttechnik, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, Leipzig (2009), 501 S.