

Universität Stuttgart

**Abteilung
Reinhaltung der Luft**

Teilbericht zu den Arbeitspaketen des IFK im Verbundprojekt

Holzverbrennung 2015

Konzeption, Darstellung und Untersuchung eines
extrem emissionsarmen Stückholz-Heizkessels



**Institut für Feuerungs- und
Kraftwerkstechnik (IFK)**

Holzverbrennung 2015

Konzeption, Darstellung und Untersuchung eines extrem emissionsarmen Stückholz-Heizkessels

Förderprojekt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück
Projektlaufzeit: 18. Juni 2010 – 30. Sept. 2012

Verbundpartner

Institut für Feuerungs- und Kraftwerktechnik (IFK), Universität Stuttgart

Institut für Raumfahrtsysteme (IRS), Universität Stuttgart

Institut für Sensorik und Informationssysteme (ISIS), Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Bosch Thermotechnik GmbH (BTT), Lollar

Dittrich Elektronik GmbH, Baden-Baden

Lamtec GmbH, Walldorf

Abschlussbericht

Autoren:

M.Sc Dipl.-Ing. (FH) Johannes Brodbeck (IFK)

Dr.-Ing. Frank Hammer (IRS)

Prof. Dr. Ralf Herwig (ISIS)

Prof. Dr. Heinz Kohler (ISIS)

Prof. Dr. Thorsten Leize (ISIS)

Dr.-Ing. Michael Struschka (IFK)

25. Januar 2013

Einleitung und Zielsetzung

Das Projekt „Holzverbrennung 2015“ hat zum Ziel, die Stückholzverbrennung in Heizkesseln kleiner Leistung (Nennwärmeleistung (NWL) ca. 18 kW) weit über den Stand der Technik hinaus in allen Phasen der Verbrennung zu optimieren, um auf diese Weise die Emissionen von unverbrannten Kohlenwasserstoffen, CO und Feinstäuben auf ein Minimum zu reduzieren. Diese Ziele sollen nicht nur unter der nach den gesetzgeberischen Vorgaben als Qualitätsmaßstab herangezogenen quasi stationären Hochtemperaturphase (stationärer Dauerbetrieb) der Verbrennung erreicht werden, die ab 2017 gemäß der zweiten Stufe der 1. BImSchV auch wiederkehrend vor Ort zu überprüfen sein wird; das Projekt zielt vielmehr darüber hinaus auf die Absenkung der Umweltbelastung in allen Phasen der Verbrennung im praxisnahen Betrieb ab. Um die Entwicklungsziele zu quantifizieren, wurden Benchmark-Werte definiert. Diese sind in Tabelle 1 dem Stand der Technik gegenübergestellt.

Tabelle 1: Vergleich der Emissionsmittelwerte moderner Heizkessel mit den in diesem Projekt angestrebten Emissionszielen

Emissionskomponente**	Mittelwerte modernster Heizkessel auf Basis (Stand der Technik)			Benchmark-Werte für Stückholzkessel „Holzverbrennung 2015“	
	Normprüfung* (stationärer Dauerbetrieb)	Überwachungsmessung 1. BImSchV	praxisnaher Betrieb****	stationärer Dauerbetrieb	praxisnaher Betrieb
CO in mg/m ³	178	1.675	5.055	< 25	< 125
VOC in mgC/m ³	8	***	424	< 2	< 10
Staub in mg/m ³	20	108	197	< 8	< 20

* vgl. auch Abb. 3-4 und 3-6 des vorläufigen Endberichts der Vorstudie zur Untersuchung der Möglichkeiten, die Schadgas- und Feinstaubemissionen eines Stückholzkessels zu minimieren. In obiger Tabelle sind nur Prüfberichte der BLT Wieselburg aufgeführt

** bei 13 Vol% O₂

*** für VOC existiert kein Grenzwert

**** mit Teillastregelung und ohne Pufferspeicher, Messungen ausgeführt am IFK. Vgl. hierzu Werte beim stationären Dauerbetrieb: CO 170 mg/m³ und Staub 38 mg/m³ (jeweils bei 13 Vol% O₂) in Tab. 3-3 im vorläufigem Endbericht der Vorstudie zur Untersuchung der Möglichkeiten zur Minimierung der Schadgas- und Feinstaubemissionen eines Stückholzkessels.

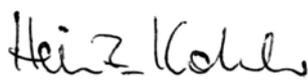
Aus den Ergebnissen vorangegangener Arbeiten des ISIS zur Optimierung der Verbrennung eines Stückholzheizkessels mittels neuartiger Methoden der Verbrennungsluftregelung mit dem Ziel der Absenkung der Schadgas- und Feinstaubemissionen /Koh07, Koh09/ hatte sich die Erkenntnis verfestigt, dass die Schadgas- und Feinstaubemissionen nur durch einen ganzheitlichen Lösungsansatz zur Optimierung des Verbrennungsprozesses auf ein Minimum gesenkt werden können. Dieser ganzheitliche Lösungsansatz wurde in einer Vorstudie /Vor10/ im Hinblick auf

- den Stand der Feuerungstechnik und den daraus resultierenden Entwicklungspotenzialen,
- die Untersuchung zur Auswahl, Eignung und Weiterentwicklung von Abgassensoren zur Optimierung der Verbrennungsprozessregelung und die
- die Studie eines Feuerungsmonitors

vertieft, um konkrete Entwicklungsschritte für die Projektstufe I vorzubereiten, die in diesem Schlussbericht vorgestellt wird. Wegen des großen Umfangs der Gesamtaufgabe wurde von Beginn an eine weitere Projektstufe II vorgesehen, in der die aus den beiden ersten Projektstufen resultierenden Ergebnisse in weiteren Entwicklungsschritten in einen intelligenten Stückholzheizkessel (Prototyp) münden sollen, mit dem schließlich das Projektziel „minimale Emissionen im Praxisbetrieb“ erreicht werden soll. Die im Projektzeitraum zu bearbeitende Projektstufe I wurde grob in folgende Teilaufgaben unterteilt:

- (1) Neukonzeption der Brennräume im Hinblick auf rasche Erreichung genügend hoher Verbrennungstemperaturen nach der Zündung, optimale Heranführung der Verbrennungsluft an das Brenngut (Primärbrennkammer) zur Vermeidung von Verbrennungsprozessstörungen und optimale Durchmischung der Pyrolysegase mit der Verbrennungsluft (Sekundärbrennkammer) zur Realisierung möglichst vollständiger Verbrennung der Pyrolysegase.
- (2) Weiterentwicklung der Erkenntnisse aus Vorläuferprojekten zur Regelung der Verbrennungsluftströme in allen Phasen der Verbrennung auf der Basis der sensorisch registrierten Prozessgrößen Verbrennungstemperatur in der Nachbrennkammer (TNBK), Restsauerstoffkonzentration im Abgas (ROC) und CO/HC-Gehalt im Abgas /But09, Koh10, Koh12/.
- (3) Entwicklung von Gassensorelement-Prototypen (Kombisensoren), die sowohl die Detektion von ROC als auch von CO/HC mit einem Sensorchip ermöglichen.
- (4) Untersuchungen verschiedener Hochtemperatur-Gassensoren hinsichtlich ihrer Eignung zum Dauereinsatz im Abgas von Holzfeuerungsprozessen.
- (5) Integration eines Oxidationskatalysators zur Nachverbrennung der gasförmigen Bestandteile in Phasen geringerer Verbrennungstemperatur (z.B. TNBK <850°C).
- (6) Realisierung eines Musterkessels (NWL ca. 18 kW), der auch für Teillastbetrieb geeignet ist, Optimierung der Verbrennungsluftregelung in allen Phasen der Verbrennung und Gegenüberstellung der Emissionen im Betrieb optimaler Verbrennung (Vollast) und im Teillastbetrieb.
- (7) Erstmalige Entwicklung eines Verbrennungsprozessmonitors, der sowohl die Verbrennungsqualität über die Zeit darstellt als auch aus einem zu entwickelnden Wärmebedarfsmodell den Brennstoffbedarf prognostiziert und dem Betreiber den Nachlegebedarf an Brennstoff vorschlägt, um auf diese Weise den Betriebszustand optimaler Verbrennung auch im praxisnahen Betrieb über möglichst lange Betriebszeiten aufrecht zu erhalten. Der Aspekt der Brennstoffbedarfsermittlung wurde nach Projektstart zusätzlich in das Programm aufgenommen und im Zwischenbericht erstmals formuliert.
- (8) Optimierung des Musterkessels und der Verbrennungsluftregelung in einer weiteren Entwicklungsstufe, Fertigstellung des Feuerungsprozess-Monitors (Prototyp).

Zur Verfolgung dieses ganzheitlichen Lösungsansatzes mit dem Ziel der Minimierung der Emissionen im Praxisbetrieb wurde ein Forschungsverbund aus ausgewiesenen Partnern auf den Gebieten Feuerungsanlagenkonstruktion, Stückholzkesselbau, Sensorik- und Informationssysteme und Sensorherstellung und -vertrieb gegründet. Die Teilaufgaben (1) – (6) waren in Projektstufe I vorgesehen, die Teilaufgabe (7) sollte in Projektstufe I begonnen und zusammen mit Teilaufgabe (8) in Projektstufe II fortgeführt werden (Option).


(Projektkoordinator)

Karlsruhe, den 25. Januar 2013

Ökologische Bilanzierung des Verfahrens (IFK)

Durch Holzfeuerungen werden verschiedene Schadstoffe (CO, VOC, Staub) emittiert, die sich auf Klima und Gesundheit auswirken. So verursacht z.B. Kohlenstoff in Form von Ruß und CH₄ eine Erhöhung des Strahlungshaushaltes der Erde und ruft somit eine direkte klimaverändernde Wirkung hervor. Organische Verbindungen sowie Ruß weisen eine gesundheitsschädigende Wirkung auf.

Um die Umweltbelastung durch Holzfeuerungen bilanzieren zu können, müssen für den Anlagenbestand altersstufenspezifische Emissionsfaktoren berechnet werden. Diese Emissionsfaktoren berücksichtigen sowohl gemessene Praxiswerte als auch Emissionswerte von Prüfstandsmessungen bei Voll- und Teillast. Durch statistische Erhebungen kann die Anzahl der in Betrieb stehenden Anlagen nach Baujahr aufgeschlüsselt werden, so dass letztendlich für die einzelnen Schadstoffe ein durchschnittlicher Emissionsfaktor berechnet werden kann. Über den Endenergieverbrauch können dann die Gesamtemissionen eines bestimmten Jahres berechnet werden. In einem Forschungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit wurden diese Emissionsfaktoren unter anderem auch für den Anlagenbestand von Stückholzkesseln bis zum Jahr 2005 bestimmt [Struschka et al., 2007]. Die folgende Tabelle 2 zeigt die ermittelte Anlagenzahl und die Aufteilung in Altersstufen der installierten Stückholzkessel (mittlere Leistung 35 kW).

Tabelle 2 Anlagenbestand von Stückholzkesseln und Aufteilung nach Altersstufen in Deutschland im Jahr 2005 [Struschka et al., 2007]

Feuerstätten für feste Brennstoffe in Haushalten in Deutschland (2005) Gesamtbestand in 1.000 Stück: 13.688,4	Leistungsbereich in kW (mittlere Leistung ¹)	Altersstufe	Anzahl insgesamt	davon in Alterstufe	
				Anteil	Anzahl
			[1.000 Stück]	[%]	[1.000 Stück]
Heizkessel - handbeschickt	25 - 50 (35 kW)	bis 1988/89	190,2	19	37,1
		1990 - 2004		65	123,5
		ab 2005		16	29,6

Mit einem ermittelten Endenergieverbrauch dieser Anlagen von 20.413 TJ im Jahr 2005 ergab sich für Stückholzkessel in Deutschland im Bereich Haushalte folgendes Emissionsaufkommen für CO, VOC und Staub:

Tabelle 3 Berechnetes Emissionsaufkommen für Stückholzkessel im Bereich Haushalte für Deutschland im Jahr 2005 [Struschka et al., 2007]

	Emissionsaufkommen		
	CO t	VOC t	Staub t
Anlagenbestand bis 2005	29249	991	1054

Da für den optimierten Stückholzkessel nur Emissionswerte bei Vollast vorliegen, wurden für eine ökologische Bilanzierung gegenüber dem Anlagenbestand drei Szenarien berechnet. Zunächst wurde das Emissionsaufkommen für den Anlagenbestand in 2005 wie in Tabelle 2

ohne Berücksichtigung der Teillastzustände berechnet. Als zweites Szenario wurde das Emissionsaufkommen mit den Emissionen gemäß dem ermittelten Stand der Technik (Normprüfungen - siehe Tabelle 1) für den Fall berechnet, dass alle Stückholzkessel (190.000 Stück) durch Anlagen gemäß dem Stand der Technik ersetzt werden. Im dritten Szenario erfolgte die Berechnung mit den gemessenen Emissionen des optimierten Stückholzmusterkessels, ebenfalls für den Fall, dass alle bestehenden Anlagen durch den optimierten Stückholzmusterkessel substituiert worden wären. Tabelle 4 fasst das derart berechnete Emissionsaufkommen zusammen.

Tabelle 4 Berechnetes Emissionsaufkommen für unterschiedliche Szenarien

	Emissionsaufkommen *		
	CO t	VOC t	Staub t
Anlagenbestand bis 2005**	15596	898	1327
Stand der Technik***	3838	163	531
Stückholzmusterkessel****	327	61	347
Minderungspotential gegenüber Anlagenbestand	98%	93%	74%
Minderungspotential gegenüber Stand der Technik	91%	63%	35%

* Endenergieverbrauch 20413 TJ

* Anlagenzahl und Verteilung 2005; ohne Teillast;

**Anlagenzahl 2005; alle Anlagen mit Emissionen gemäß dem Stand der Technik; ohne Teillast;

***Anlagenzahl 2005; alle Anlagen mit Emissionen optimierter Stückholzmusterkessel; ohne Teillast

Natürlich würden die berechneten Emissionsaufkommen in Tabelle 4 nicht die Realität widerspiegeln, da bestimmte Betriebszustände der Anlagen nicht mit berücksichtigt wurden. Sie sollen vielmehr dazu dienen ein relatives Minderungspotential gegenüber dem Stand der Technik abschätzen zu können.

Das Emissionsaufkommen von Stückholzkesseln kann nicht nur durch verbrennungstechnische Maßnahmen reduziert werden, dies kann auch durch den effizienten Einsatz des Energieträgers Holz erfolgen. Dank des reduzierten Luftüberschusses konnte der Wirkungsgrad des optimierten Stückholzmusterkessels gegenüber dem Stand der Technik deutlich erhöht werden (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5 Wirkungsgrad von Stückholzkesseln gemäß dem Stand der Technik und des Stückholzmusterkessels

	Wirkungsgrad
Stand der Technik	90%
Stückholzmusterkessel*	94%

* Ö-Norm M7510-4; Abgastemperatur= 150°C;

Umgebungstemperatur= 20°C; O2= 4 Vol.%

Dies zeigt, dass mit dem Einsatz eines verbrennungstechnisch und Wirkungsgrad optimierten Stückholzkessels ein großer Schritt in Richtung einer umwelt- und klimafreundlichen, sowie ressourcenschonenden Biomassenutzung getan werden kann.

Ökonomische Bilanzierung des Verfahrens (BTT)

Eine detaillierte Bewertung der ökonomischen Aspekte der im Projekt umgesetzten Feuerungsanlage kann nur unter dem Gesichtspunkt einer groben Schätzung stattfinden. Die Konstruktionstiefe des Prototyps befindet sich im Stadium eines Funktionsmusters und berücksichtigt daher nicht alle typischen Aspekte einer Serienlösung. Dennoch wird auf Basis der vorliegenden Daten versucht, eine Einschätzung bzgl. der zu erwartenden Kosten einschließlich aller Unsicherheiten zu prognostizieren.

Wird die Lösung im Ganzen betrachtet, so sind die wesentlichen konstruktiven Änderungen in der Primär- und in der Sekundärkammer unternommen worden, um den Verbrennungsprozess gegenüber dem Stand der Technik deutlich zu verbessern. Die technische Umsetzung in der Sekundärbrennkammer zur Verbesserung der Emissionswerte können im Wesentlichen auf folgende Punkte reduziert werden:

- eine zylindrische feuerfeste Brennkammer - heute werden dazu hochbelastbare Keramiken verwendet,
- eine seitliche Zuführung der Verbrennungsgase, aus der Primärzone kommend,
- und einer optimierten Zuführung der Sekundärluft zur Verbesserung der Durchmischung.

Eine keramische zylindrische Brennkammer mit einer seitlichen Eindüsung der Verbrennungsgase kann als Stand der Technik bezeichnet werden und ist somit als kostenneutral einzuschätzen. Die Eindüsung der Sekundärluft über einen metallischen Körper stellt dagegen bzgl. Haltbarkeit und Robustheit in einer thermisch hoch belasteten Umgebung die größte Herausforderung dar. In diesem Temperaturbereich werden typischerweise hochfeste temperaturbeständige Stähle wie z.B. 1.4828 und Inconel verwendet. Letzteres stellt bzgl. Temperaturbeständigkeit die beste, aber auch die teuerste (Material- und Bearbeitungskosten) Lösung dar. Es wäre an dieser Stelle eine Umsetzung in dem keramischen Grundkörper anzustreben, jedoch stellen Gießbarkeit, Fertigungstoleranzen und Mindestmaterialdicke bei feinen Konstruktionen das größte Problem dar. Sollte es nicht möglich sein, die Sekundärluftzuführung als keramisches Bauteil umzusetzen und eine metallische Lösung notwendig sein, so würde die Baugruppe Sekundärkammer gegenüber heutigen Konzepten deutlich kostenintensiver ausfallen. Falls dieser nicht dauerhaft stabil ausführbar ist, muss die Sekundärluftzuführung nach einer bestimmten Betriebszeit ausgetauscht werden und als Verschleißteil definiert werden. Dem Kunden würde hierbei zusätzliche Kosten in Form einer Wartung und Austausch des Verschleißteiles zufallen. Eben genannte Abschätzung beruht auf der Annahme, dass sich der Bauraumvolumen gar nicht bis kaum ändert und sich dadurch die Materialkosten für Materialmenge und Verkleidung annähernd gegenüber Heute konstant bleibt

Im Falle der Primärbrennkammer betritt das Projekt mit einem luftdurchführten Rost zur homogenen Vergasung des Holzes Neuland. Wie die Ergebnisse zeigen, kann die hohe Verbrennungsgüte der Anlage nicht nur auf die gute Performance der Sekundärbrennkammer zurückgeführt werden, sondern auch auf die hoch effiziente Entgasung in der Primärbrennkammer. Offen geblieben ist in dem Projekt das Problem mit der Leistungsmodulation. Offensichtlich neigt diese Art der Vergasung über einen luftdurchströmten Rost zu einer Potenzialerhöhung - einer Neigung zu hoher Entgasungsleistung - und somit zu einem System,

das schwer zu modulieren ist. Hier besteht noch ein erheblicher Entwicklungsbedarf, um die physikalischen und chemischen Zusammenhänge vollends zu verstehen.

Für den durchströmten Brennstoff sind zusätzliche Materialkosten (temperaturbeständiger Stahlwerkstoff) zu berücksichtigen und durch die komplexe Schweißkonstruktion ist ggf. der Einsatz eines Schweißroboters (höhere Investitionskosten) zu prüfen oder eine entsprechend längere Fertigungszeit anzusetzen.

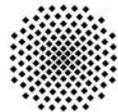
Weiterhin ist bei der Kostenkalkulation zu berücksichtigen, dass zusätzliche Druckgebläse, Veränderungen bzw. Erweiterungen an der Elektronik und der Einsatz zusätzlicher Sensorik (CO-, Luftmassensensor, ...) notwendig sind und sich dadurch die Material- und Montagekosten weiter erhöhen.

In Anbetracht aller noch offenen Punkte und notwendigen Entwicklungsarbeiten würde eine Serienumsetzung der vorgestellten Konzepte die Herstellkosten bis zu 20% höher ausfallen lassen, die sich entsprechend in einen höheren Verkaufspreis ($\geq 20\%$) niederschlagen werden. Ob diese Preiserhöhung am Markt umzusetzen ist, darf auf Grund der bestehenden Emissionsgrenzen der 1. BImSchV angezweifelt werden, da diese mit der heutigen Technologie unterschritten werden kann.

Inhaltsverzeichnis des Schlussberichtes

1	Grundlagen der Emissionsbildung bei der Verbrennung von Holz	10
2	Möglichkeiten der feuerungsseitigen Emissionsminderung	14
3	Gerätetechnischer Stand heutiger Stückholzkessel	16
4	Emissionen bei der Verbrennung von Holz in Stückholzkesseln	23
5	Konzeptentwicklung eines optimierten Stückholzkessels	31
6	Experimentelle Validierung des optimierten Stückholzkessels	42
7	Konzeptumsetzung als Stückholzmusterkessel	52
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	70
9	Literatur IFK.....	74
10	Verbrennungsluftregelung des Musterkessels	78
11	Abgassensorik	91
12	Feuerungsprozess-Monitor	102
13	Zusammenfassung und Ausblick.....	111
14	Literatur ISIS.....	114
15	Einleitung IRS.....	118
16	Abgassensorik - Entwicklung von Kombi-Abgassensoren	118
17	Weiterentwicklung und Qualifizierung der In-Situ Gassensorik in Richtung simultane Messung von CO/HC mit O₂	122
18	Konzeptionierung einer geeigneten Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT)....	130
19	Erarbeitung der Vorgaben für die Entwicklung und den Aufbau einer Sensorelektronik.....	130
20	Entwicklung von Routinen zur kontinuierlichen Funktionsüberwachung der Gassensorik	131
21	Kurzfassung DITTRICH.....	134
22	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	134
23	Einleitung DITTRICH.....	134
24	Das O₂/CO-Sensorsystem	135
25	Ansteuerungs-/Auswertungselektronik.....	138
26	Erprobungsergebnisse.....	140
27	Zusammenfassung DITTRICH.....	142

Berichtsteil zu den Arbeitspaketen des IFK



Universität Stuttgart



Universität Stuttgart
Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik
Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart (Vaihingen)
Tel.: +49-(0)-711-685-63487, Fax: +49-(0)-711-685-63491
Email: ifk@ifk.uni-stuttgart.de

M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Johannes Brodbeck
Dr.-Ing. Michael Struschka

25. Januar 2013

Inhaltsverzeichnis IFK-Berichtsteil

1	Grundlagen der Emissionsbildung bei der Verbrennung von Holz	10
1.1	Kohlenwasserstoffe	11
1.2	Partikel	13
2	Möglichkeiten der feuerungsseitigen Emissionsminderung	14
3	Gerätetechnischer Stand heutiger Stückholzkessel	16
3.1	Stückholzkessel nach dem Sturzbrandprinzip	17
3.2	Stückholzkessel mit seitlichem Abbrand	20
3.3	Geometrische Abmessungen von Stückholzkesseln	22
4	Emissionen bei der Verbrennung von Holz in Stückholzkesseln	23
5	Konzeptentwicklung eines optimierten Stückholzkessels	31
5.1	Konzept Modul 1	32
5.2	Konzept Modul 2	34
6	Experimentelle Validierung des optimierten Stückholzkessels	42
6.1	Beschreibung der Versuchsfeuerung	42
6.2	Versuchsaufbau und Messtechnik	43
6.3	Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung	45
6.4	Ergebnisse der Verbrennungsversuche	46
7	Konzeptumsetzung als Stückholzmusterkessel	52
7.1	Beschreibung des Stückholzmusterkessels	52
7.2	Versuchsaufbau und Messtechnik	53
7.3	Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung	55
7.4	Verbrennungstechnische Charakterisierung des Stückholzmusterkessels	55
7.4.1	Einfluss der Primärluftmenge	56
7.4.2	Ergebnisse der Gasmessungen	57
7.4.3	Einfluss der Sekundärluftmenge	61
7.4.4	Ergebnisse der Partikelmessungen	63
7.4.5	Einfluss der Verbrennungsregelung	65
7.4.6	Schlussfolgerungen	68
8	Zusammenfassung und Ausblick	70
9	Literatur IFK	74

1 Grundlagen der Emissionsbildung bei der Verbrennung von Holz

Der Verbrennungsprozess von holzartiger Biomasse kann grundsätzlich in drei Teilprozesse unterteilt werden (Abbildung 1.1). Die Verbrennung von Holz beginnt mit der Erwärmungsphase. In der anschließenden Trocknungsphase, die hauptsächlich über 100 °C stattfindet, wird das am Holz anhaftende oder eingeschlossene Wasser verdampft. Dabei, wie auch bei den anderen Verbrennungsstufen, schreitet der Prozess von außen nach innen fort. Während der Brennstoff innen noch trocknet, beginnt außen bereits die pyrolytische Zersetzung der Holzbestandteile.

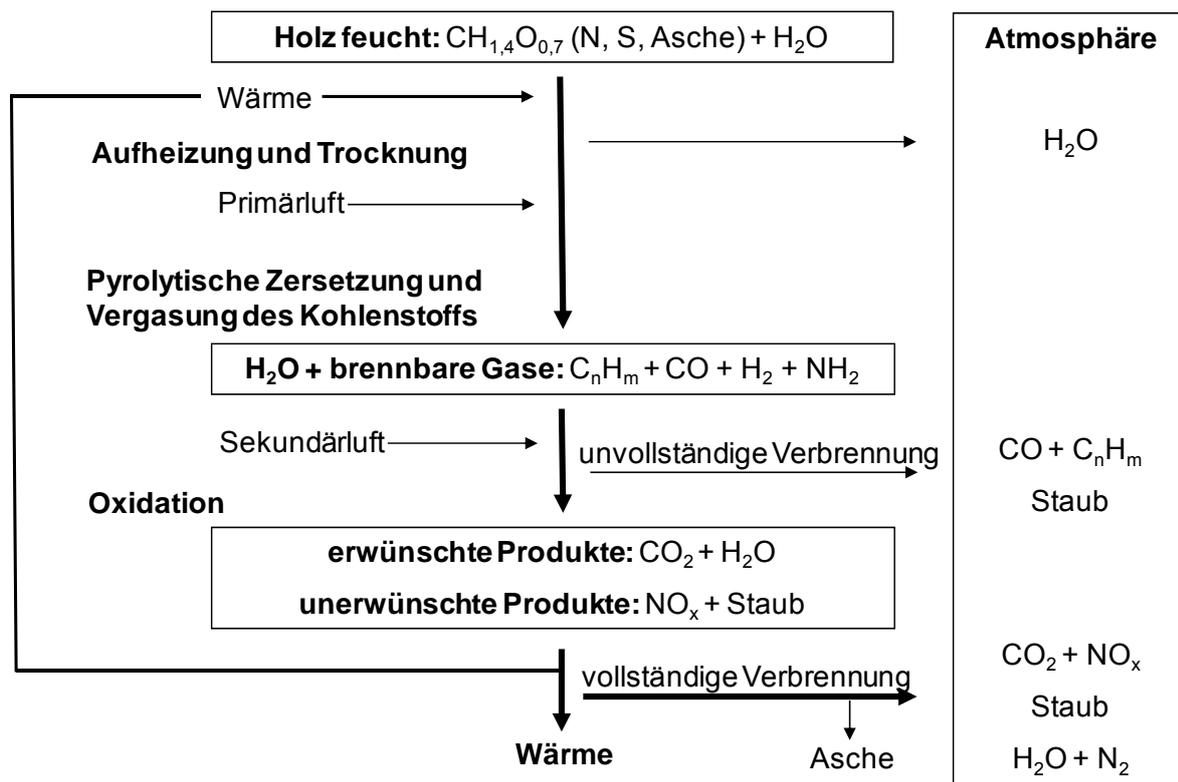


Abbildung 1.1 Teilprozesse bei der Holzverbrennung [Kaltschmitt et al., 2001]

Unter Pyrolyse versteht man den chemischen Prozess, bei dem ausschließlich Wärme bei Sauerstoffausschluss zugeführt wird. Dabei kommt es zu einer Aufspaltung der langkettigen organischen Verbindungen in kürzerkettige Verbindungen. Es werden brennbare Gase in Form von Kohlenstoffmonoxid (CO) und gasförmigen Kohlenwasserstoffen sowie Pyrolyseöle (Teere) gebildet. Dieser Vorgang benötigt keinen Sauerstoff. Da Sauerstoff aber in chemisch gespeicherter Form (bei Holz ca. 44 % der Trockenmasse) oder durch Luftzuführung stets vorhanden ist, kommt es unter Wärmefreisetzung unmittelbar nach der Aufspaltung zu mehr oder weniger vollständigen Oxidationsreaktionen.

Um den Prozess der Entgasung durch die Wärmefreisetzung in Gang zu halten und in der Leistung zu steuern, wird in Feuerungsanlagen gezielt an den Ort der pyrolytischen Zersetzung (z. B. Glutbett) Luftsauerstoff als Primärluft zugeführt. Dieser Teilprozess wird auch als Vergasung bezeichnet. Dabei wird die benötigte Wärme aus unvollständigen Reaktionen der gasförmigen Pyrolyseprodukte mit Sauerstoff bereitgestellt. Zur Reaktion der festen und flüs-

sigen Pyrolyseprodukte (Kohle, Teere) sind im Vergleich zur pyrolytischen Zersetzung mit zum Teil über 500 °C, merklich höhere Temperaturen notwendig.

Im Teilprozess der Oxidation haben sich die Brenngase schon teilweise im Feuerraum ausgebreitet. Durch die gezielte Zuführung von Luftsauerstoff in diesem Teilprozess (Sekundärluft) kann hier eine mehr oder weniger vollständige Oxidation der freigesetzten gasförmigen Produkte stattfinden. Dabei entsteht Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasser (H_2O). Der Abbau der Kohlenwasserstoffe erfolgt hierbei über die Bildung von CO als Zwischenprodukt, das in einer weitergehenden Oxidation zu CO_2 reagiert.

Außer der von Flammenbildung gekennzeichneten Oxidation ist bei biogenen Festbrennstoffen ebenso die flammenlose Verbrennung bedeutsam, die im Endstadium des Verbrennungsvorganges auftritt. Der als Endprodukt der pyrolytischen Zersetzung gebildete feste Kohlenstoff (Holzkohle) wird dabei im Glutbett zuerst vergast (Feststoffvergasung) und anschließend in der Gasphase oxidiert. Als Verbrennungsrückstand verbleibt die Asche [Kaltschmitt et al., 2001].

Bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz werden mit dem Abgas Verbrennungsprodukte emittiert, die je nach Verbrennungszustand, in Produkte aus vollständiger bzw. unvollständiger Verbrennung unterteilt werden können. Stoffe aus der vollständigen Verbrennung der biogenen Hauptbrennstoffbestandteile (C, H, O) sind Kohlenstoffdioxid, Wasserdampf, Stickstoffoxide (NO_x) und anorganische Staub- und Aschepartikel. Stoffe aus der unvollständigen Verbrennung der Hauptbrennstoffbestandteile (C, H, O) sind im Wesentlichen Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (C_nH_m oder VOC), sowie Partikel (Ruß, Teere und bei Umgebungstemperatur kondensierbare organische Verbindungen).

Als Ursache für eine unvollständige Verbrennung ist eine ungenügende Sauerstoffzuführung nur selten allein ausschlaggebend. Oft ist auch die Verbrennungstemperatur in der Ausbrandzone (Oxidationszone) zu gering. Dadurch laufen die Reaktionen zu langsam ab, besonders dann, wenn zu feuchte Brennstoffe verwendet werden. Weiterhin kommt es zu einer unvollständigen Verbrennung, wenn die Verweilzeit der Reaktionspartner in der heißen Zone zu gering ist (z. B. auf Grund zu klein dimensionierter Feuerräume). Zu hohe Wassergehalte im Brennstoff reduzieren die Verbrennungstemperatur und führen zu einer Erhöhung des Abgasvolumens. Dadurch ist die Aufenthaltszeit der Brenngase im Brennraum herabgesetzt. Eine zu geringe Durchmischung der Brenngase mit der Verbrennungsluft kann außerdem zu einer lokalen Unterversorgung von Sauerstoff führen. Die Folge ist auch hier eine unvollständige Verbrennung [Kaltschmitt et al., 2001].

Nachfolgend wird auf die Emissionsbildung der Kohlenwasserstoffe und Partikel näher eingegangen.

1.1 Kohlenwasserstoffe

Bei der unvollständigen Verbrennung von Kohlenwasserstoffen kann im Abgas eine Vielzahl von Substanzen auftreten, welche einen ketten- oder ringförmigen Grundkörper aus Kohlenstoff und Wasserstoff aufweisen. Zusätzlich können neben diesen Elementen auch Heteroatome wie z.B. Sauerstoff vorhanden sein. Zu solchen organischen Verbindungen gehören Alkohole, Aldehyde und organische Säuren, wie z. B. Methan, Propan, Methanol, Formaldehyd, und Ameisensäure [Baumbach, 1994]. Viele dieser organischen Substanzen sind flüchtige Verbindungen und befinden sich im Abgas in gas- oder dampfförmigem Zustand. Andere

dagegen kondensieren aus und können an Asche- bzw. Rußpartikeln adsorbiert werden, wie z.B. die nachfolgend beschriebenen polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK), oder liegen als teerartige Aerosole vor.

Läuft die Verbrennung mit unzureichender O₂-Zufuhr oder schlechter Vermischung der Verbrennungsluft mit den Pyrolysegasen ab, können auch höhermolekulare Stoffe wie polyzyklisch aromatische Kohlenwasserstoffe im Abgas von Holzfeuerungsanlagen auftreten. Dabei sind zwei oder mehr Benzolringe miteinander verknüpft (Abbildung 1.2).

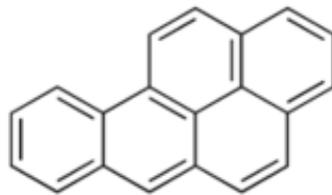


Abbildung 1.2 Strukturformel von Benzo[a]pyren

Die Polyzyklenbildung läuft in folgenden Teilschritten ab [Baumbach, 1994]:

- Addition von kleineren aliphatischen Verbindungen und Zyklisierung zu hydroaromatischen Kohlenwasserstoffen mittlerer Molekülgröße
- Überführung der hydroaromatischen Kohlenwasserstoffe in vollaromatische
- Bildung größerer aus kleineren polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen.

Die wichtigsten polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe wurden von der amerikanischen Umweltbehörde EPA (Environmental Protection Agency) in einer Liste zusammengefasst (Tabelle 1.1). Darin werden insgesamt 16 Einzelverbindungen benannt, die nach Vorkommen, Bedeutung, Umweltrelevanz und toxikologischen Gesichtspunkten als Leitsubstanzen unter den PAK anzusehen sind. Wobei sowohl die Toxizität als auch der Siedepunkt der PAK mit der Anzahl der Benzolringe zunimmt.

Tabelle 1.1 PAK-Liste der amerikanischen Bundesumweltbehörde (EPA)

Einzelverbindung	Anzahl Benzolringe	Einzelverbindung	Anzahl Benzolringe
Naphthalin	2	Benzo[a]anthracen	4
Acenaphthylen	3	Chrysen	4
Acenaphthen	3	Benzo[b]fluoranthen	5
Fluoren	3	Benzo[k]fluoranthen	5
Phenanthren	3	Benzo[a]pyren	5
Anthracen	3	Dibenz[ah]anthracen	5
Fluoranthen	4	Benzo[ghi]perylen	6
Pyren	4	Indeno[1,2,3-cd]pyren	6

1.2 Partikel

Das entstehende Abgas aus der Holzverbrennung besteht nicht nur aus gasförmigen Komponenten, sondern enthält auch feste und flüssige Bestandteile, sogenannte Aerosole. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften dieser Aerosole werden hauptsächlich durch die vorherrschende Verbrennungsqualität beeinflusst. Außerdem können Partikel durch das Mitreißen von Brennstoff- oder Ascheteilchen ins Abgas gelangen (Tabelle 1.2).

Tabelle 1.2 Partikelarten aus der Holzverbrennung, eingeteilt nach Verbrennungsqualität [Nussbaumer, 2003]

Partikel aus vollständiger Verbrennung	Partikel aus unvollständiger Verbrennung
mineralische Bestandteile des Holzes (z.B. CaO)	elementarer Kohlenstoff (Holzkohle)
Fremdteile, die am Holz anhaften (Sand, Erde)	organischer Kohlenstoff in Form von unverbrannten Holzbestandteilen
Salze (Sulfate, Chloride, Karbonate, Hydroxide, Oxide, Nitrate, ionische Verbindungen)	organischer Kohlenstoff in Form von Teer
Metalloxide (z.B. Al ₂ O ₃)	organischer Kohlenstoff in Form von Ruß

Bei der Verbrennung von Holz kommt es zu verschiedenen Partikelbildungsmechanismen, welche in Abhängigkeit von den Verbrennungsbedingungen unterschiedlich stark zu den Gesamtstaubemissionen beitragen (Abbildung 1.3). Unter nahezu **vollständigen Verbrennungsbedingungen** gehören folgende Partikelbildungspfade zu den wichtigsten:

- Fest-Dampf-Partikel-Pfad anorganischer Bestandteile: Hierbei verdampfen die Komponenten im Glutbett (> 600 °C) und bilden, bei der Temperaturabnahme im Abgas, über Nukleation, Koagulation und heterogene Kondensation Partikel. Bei den so entstandenen Partikeln handelt es sich um anorganische Salze, im Größenbereich von 0,1 µm (=100 nm), hauptsächlich um Kaliumverbindungen wie K₂SO₄ und KCl.
- Fest-Partikel-Pfad anorganischer Bestandteile: Diese schwerflüchtigen anorganischen Komponenten des Holzes gelangen als feste Komponenten ins Abgas und können dort durch Kondensation und Koagulation wachsen. Diese Salze, meist Kalziumverbindungen wie CaO, haben einen Aerodynamischen Durchmesser im Bereich von 1 µm. Dieser Partikelbildungsmechanismus spielt jedoch lediglich bei der Rindenverbrennung eine Rolle.

Läuft die **Verbrennung unvollständig** ab, werden Kohlenstoff-Partikel mit dem Abgas emittiert, die bei der pyrolytischen Zersetzung freigesetzt wurden und anschließend nicht vollständig oxidiert sind. Dabei kann zwischen den Kohlenstoff(C)-haltigen festen oder flüssigen Zersetzungsprodukten sowie den C-haltigen Syntheseprodukten unterschieden werden:

- C-haltige (kondensierte) Zersetzungsprodukte sind organische Verbindungen (z.B. Teere), welche aus Fragmenten der Holzbestandteile Cellulose, Hemicellulose und Lignin bestehen.
- Zu den kohlenstoffhaltigen Syntheseprodukten gehört z.B. Ruß. Die Rußbildung wird durch Sauerstoffmangel in der Flammenwurzel, z.B. durch ungenügende Vermischung von Brennstoff und Luft, und durch hohe Temperaturen in dieser Phase begünstigt [Baumbach, 1994].

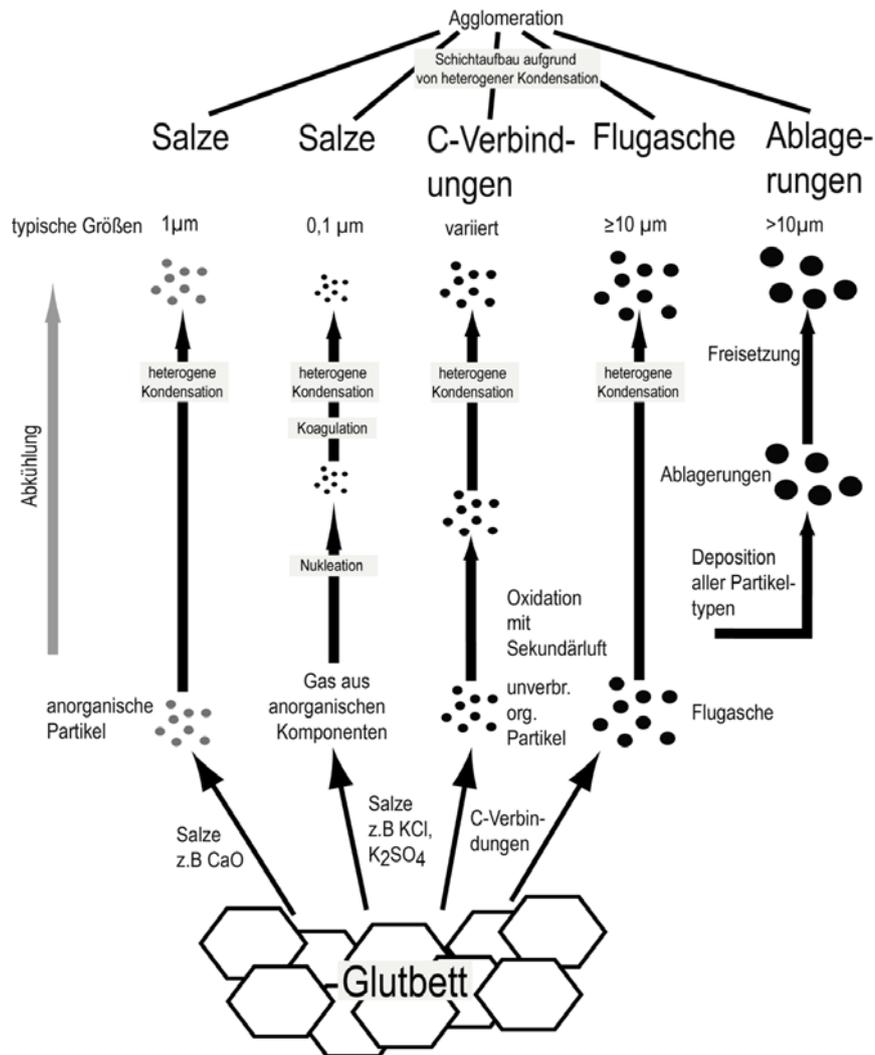


Abbildung 1.3 Schematische Darstellung der Partikelbildung in Holzfeuerungen [Nussbaumer, 2003]

Durch schwankende Gasgeschwindigkeiten können sowohl Aschepartikel mitgerissen (Flugasche) als auch Ablagerungen abgelöst und freigesetzt werden. Diese Partikel liegen im Größenbereich $\geq 10\ \mu\text{m}$ und sind für die Gesamtstaubemissionen von untergeordneter Bedeutung, da sie meist schon, durch entsprechende Abgasführung, in der Feuerungsanlage abgeschieden werden können.

2 Möglichkeiten der feuerungsseitigen Emissionsminderung

Für einen vollständigen Ausbrand und niedrige Emissionen müssen im Feuerraum bestimmte Verbrennungsbedingungen vorhanden sein. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Sekundärbrennkammer oder Nachbrennkammer. In ihr werden die Brenngase bei möglichst hohen Temperaturen, ausreichender Verweilzeit und guter Durchmischung mit der Sekundärluft mehr oder weniger vollständig verbrannt. In der Regel gelten für eine vollständige Brennstoffumsetzung im Feuerraum folgende Einflussgrößen:

- Oxidationsmittel, d.h. Sauerstoff im Überschuss (λ i.d.R. zwischen 1,4 und 2,2)

- Räumliche Trennung von Feststoffvergasung und heißer Gasphasenoxidation (Primär- und Sekundärluft)
- homogene Vermischung der Gase mit dem Sauerstoff der Verbrennungsluft
- ausreichende Verweilzeit in der heißen Zone (i.d.R. ca. 2s)
- ausreichend hohe Temperaturen ($> 850^{\circ}\text{C}$).

Bei der Auslegung und Konstruktion einer Nachbrennkammer kann der Ausbrand z.B. durch die Erhöhung der Verweilzeit in der heißen Zone oder durch die Erhöhung der Turbulenz verbessert werden. Eine Verbesserung der Durchmischung kann durch aktive Elemente wie Prallplatten und Düsen oder durch rein strömungstechnische Maßnahmen (z.B. Erzeugung einer Rückströmung) erfolgen. Der Einfluss wird in Abbildung 2.1 deutlich, demnach ist eine ideale Mischung der Ausbrandluft mit den heißen Brenngasen anzustreben.

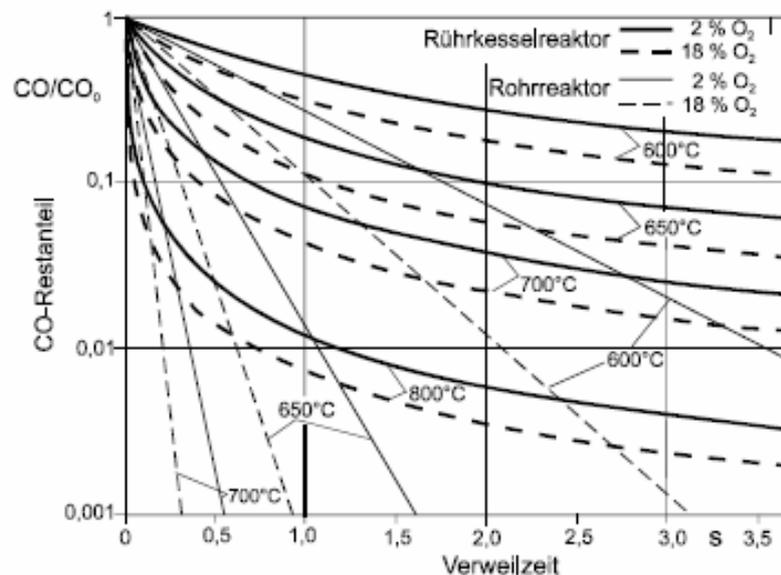


Abbildung 2.1 CO-Restanteil in Abhängigkeit der Verweilzeit für verschiedene Temperaturen, Reaktortypen und O_2 -Konzentrationen [Kaltschmitt et al., 2001]

Für niedrige Partikelemissionen reicht, aufgrund der unterschiedlichen Partikelbildungsmechanismen (vgl. Kapitel 1.2), eine vollständige Verbrennung allein nicht aus. Untersuchungen an einer automatischen Holzfeuerung zeigen, dass die über den Fest-Dampf-Partikel-Pfad entstandenen Partikel (bei konstantem Betrieb) den größten Anteil (ca. 60%) der Partikelmasse ausmachen und der Anteil des Kohlenstoffs unter 7 Massen-% liegt. Bei Phasen mit unvollständigen Verbrennungszuständen nimmt der Anteil der Kohlenstoff-Partikel zu. Um den anorganischen Partikelanteil, der hauptsächlich aus Kaliumverbindungen besteht, zu reduzieren, muss im Glutbett eine gewisse Sauerstoffarmut erzeugt werden, so dass bevorzugt schwerflüchtige Kaliumverbindungen entstehen. Bei einem Glutbett-Luftüberschuss von $\lambda = 0,2$ bis $0,4$ und einem Gesamt-Luftüberschuss zwischen $\lambda = 1,3$ und $1,4$ kann sowohl die Gesamtstaubemission (Faktor 5-6) als auch die Partikelanzahl reduziert werden [Nussbaumer, 2003]. Die Verbrennungstemperatur ist für die Partikelbildung über den Fest-Dampf-Partikel-Pfad von untergeordneter Bedeutung.

3 Gerätetechnischer Stand heutiger Stückholzkessel

Bei handbeschickten Stückholzkesseln zur zentralen Gebäudebeheizung (über Heizwasserkreisläufe) wird heute ausschließlich der untere Abbrand als Feuerungsprinzip eingesetzt. Hierbei wird der Feuerraum in eine Primär- (Brennstoffreservoir) und Sekundärkammer unterteilt. In der Primärkammer erfolgt mittels Primärluftzugabe die Feststoffvergasung, wobei jeweils nur die unterste Schicht des Brennstoffs umgesetzt wird. Das über dem Glutbett liegende Holz dient als Brennstoffreserve, welches selbstständig nachrutscht und somit einen quasi-kontinuierlichen Brennstoffnachschub ermöglicht. Über die Menge der zugeführten Verbrennungsluft (Primärluft) kann die Feuerungswärmeleistung entsprechend dem aktuellen Wärmebedarf angepasst werden. Die in der Primärkammer freigesetzten Brenngase werden meist über ein Saugzuggebläse entweder nach unten (Sturzbrand) oder zur Seite (seitlicher Unterbrand) in die Sekundärkammer (Brennkammer) befördert und dort unter Sekundärluftzugabe mehr oder weniger vollständig verbrannt (Abbildung 3.1). Feuerungen mit Sturzbrand besitzen keinen Verbrennungsrost, dort bleibt die Asche im Füllraum liegen. Beim seitlichen Unterbrand kann die Primärluftzugabe teils auch über einen Bodenrost erfolgen, dies ermöglicht eine komfortablere Entaschung und einen vollständigen Holzkohleabbrand.

Nach der Sekundärkammer werden die heißen Abgase durch den Wärmetauscher geleitet. Je mehr Schikanen (Turbulatoren) die heißen Abgase hierbei im Wärmetauscher überwinden müssen, desto besser erfolgt die Wärmeabgabe an das Heizwasser und desto höher ist folglich der Kesselwirkungsgrad. Dieser liegt im Volllastbetrieb unter Prüfstandsbedingungen durchschnittlich bei ca. 90% (laut FNR-Marktübersicht, 2007).

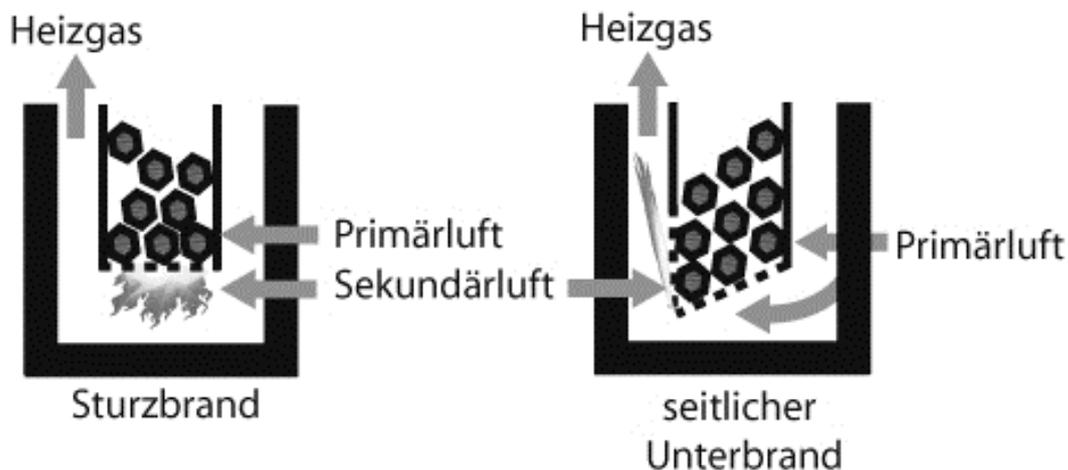


Abbildung 3.1 Feuerungsprinzipien bei Stückholzkesseln

Ein weiteres gerätetechnisches Unterscheidungsmerkmal ist die Ausführung der Regelung. Bei handbeschickten Stückholzkesseln hat eine Regelung folgende Ziele:

- Anpassung der Feuerungswärmeleistung an den aktuellen Wärmebedarf, wodurch lange Abbrandzeiten erreicht werden
- Anpassung von Primär- und Sekundärluft um möglichst optimale Verbrennungsbedingungen während der unterschiedlichen Verbrennungsphasen zu erreichen
- bei Systemen mit Wärmespeicher: Integrierte Speicherbewirtschaftung mit Restwärmenutzung.

Abhängig von der Regelung lassen sich Stückholzkessel in reine Vollastkessel, leistungsregelte Stückholzkessel und leistungs- und verbrennungsgeregelte Stückholzkessel unterscheiden. Vollastkessel besitzen keine Regelung, die Primär- und Sekundärluftmengen sind fest eingestellt. Bei einem leistungsregelmäßigem Stückholzkessel kann der Verbrennungsprozess entsprechend der Wärmeabnahme angepasst werden. Die modernste Entwicklungsstufe für die Verbrennung von Stückholz stellen die leistungs- und verbrennungsgeregelten Stückholzkessel dar. Zur Verbrennungsüberwachung kommt hier meist eine Lambdasonde zur Messung der O_2 -Konzentration am Kesselausgang bzw. im Abgasrohr zum Einsatz. Ziel der Verbrennungsregelung ist es, durch die Anpassung der Primär- und/oder Sekundärluftmenge möglichst optimale Verbrennungsbedingungen und niedrige Emissionswerte zu erreichen.

Nachfolgend wird auf die verschiedenen Verbrennungskonzepte, Detaillösungen zur Feuer- raumgestaltung, zur Führung und Verteilung der Verbrennungsluft sowie auf die bisherigen Entwicklungsansätze zur Verbrennungsoptimierung der verschiedenen Hersteller eingegangen.

3.1 Stückholzkessel nach dem Sturzbrandprinzip

Eine gebräuchliche Bauform von Stückholzkesseln beruht auf dem Sturzbrand-Feuerungsprinzip (Abbildung 3.2). Sie besteht aus einem großen Füllschacht für 33, 50 oder auch 100 cm langem Scheitholz, in den eine bestimmte Menge Holz aufgegeben werden kann. Damit möglichst nur die Brennstoffschicht direkt über dem Glutbett an der Verbrennung teilnimmt, werden verschiedene konstruktive Maßnahmen ergriffen. So wird z.B. der Füllschacht durch einen Wassermantel gekühlt. Eine zusätzliche Innenauskleidung des Füllraums soll den Teer- und Rußniederschlag an kalten Flächen im Füllraum begrenzen. Die Primärluftzugabe in den unteren Teil des Füllschachts erfolgt über zahlreiche seitliche Öffnungen, siehe auch Abbildung 3.3. Der Füllschachtboden muss grundsätzlich folgenden materialspezifischen Anforderungen gerecht werden:

- robust gegen mechanische Beanspruchung aufgrund herabfallender Holzscheite beim Befüllen des Stückholzkessels
- hohe Wärmespeicherkapazität für ein hochreaktives und heißes Glutbett unmittelbar vor der Brennkammer.

Meist kommen bei der Konstruktion von Füllschachtböden für Stückholzkessel mit Sturzbrand z.B. Feuerbetone, Schamottesteine oder hitzebeständige Gussplatten zum Einsatz. Über eine Öffnung im Füllschachtboden werden die freigesetzten Brenngase unter Zugabe von Sekundärluft in die Brennkammer gesaugt. Füllraumseitig sind diese (schlitzförmigen) Öffnungen meist mit Stahl- oder Gussbauteilen ausgekleidet. Dies dient zum einen als Kantenschutz der sehr stoßempfindlichen Feuerfestmaterialien, zum anderen wird durch eine entsprechende geometrische Gestaltung verhindert, dass Holzkohle in die Brennkammer gelangt bzw. die Sekundärluftöffnungen verstopfen (siehe Abbildung 3.4).

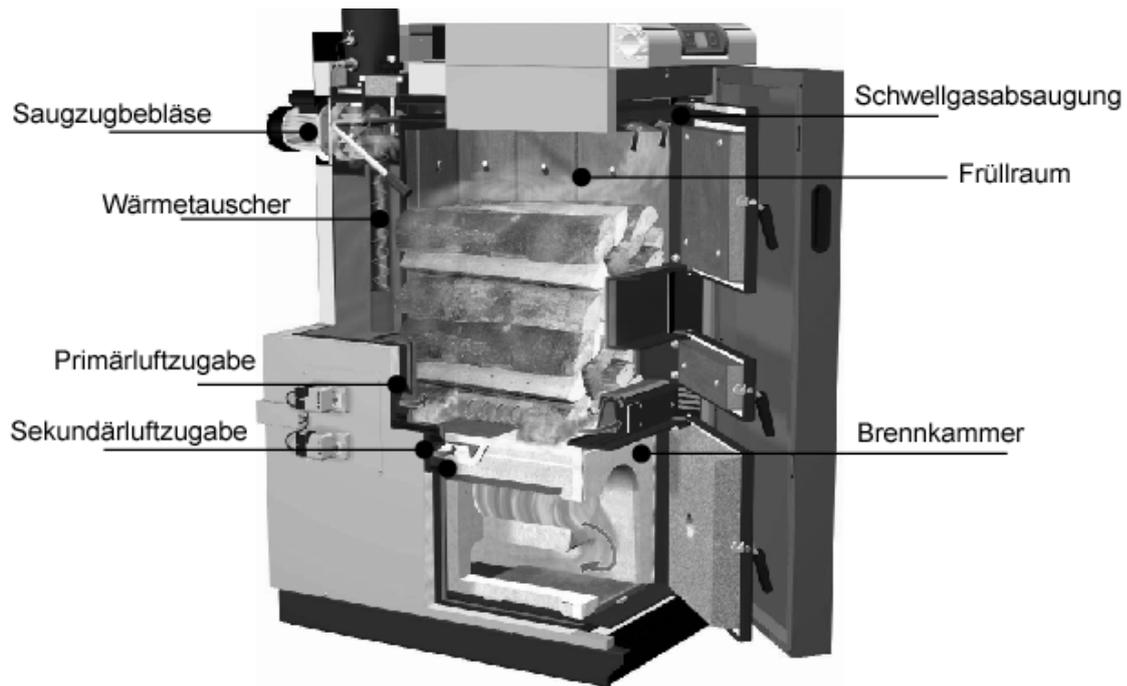


Abbildung 3.2 Aufbau eines Stückholzkessels nach dem Sturzbrandprinzip [Fröling, 2009]

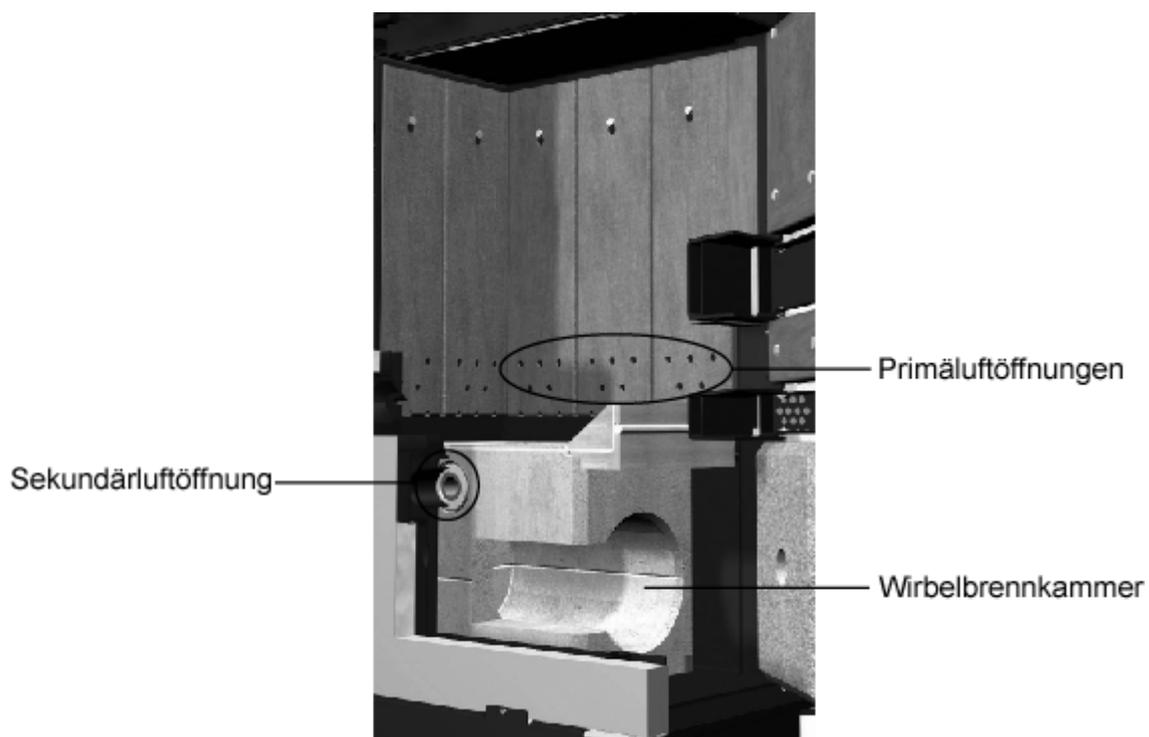


Abbildung 3.3 Primärluft- und Sekundärluftöffnungen eines Sturzbrand-Stückholzkessels [Fröling, 2009]



Abbildung 3.4 Beispiel für Füllschachtboden mit Durchgangsöffnung für die Brenngas in die darunterliegende Brennkammer [ETA, 2008]

Die geometrische Gestaltung im weiteren Verlauf der Durchgangsöffnung (nach der Sekundärluftzugabe) ist für eine intensive Durchmischung der Brenngase mit der Sekundärluft in der Brennkammer sehr wichtig. Dies kann z.B. durch eine Verjüngung der Durchgangsöffnung (Düseneffekt) erreicht werden, wie in Abbildung 3.5 beispielhaft dargestellt ist.

Durch die zylindrische (siehe Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3) oder rechteckige Bauform (siehe Abbildung 3.4) der Brennkammer werden heiße Gaswirbel erzeugt, so dass eine heiße Zone mit sehr guter Durchmischung entsteht. Aufgrund der sehr hohen Temperaturen, die bis ca. 1.000 °C erreichen können, kommen auch hier Feuerfestmaterialien wie Schamotte, Feuerbetone, Lava Tone oder Keramikfasermaterialien und Feuerfestmaterialien aus Siliziumcarbid zum Einsatz.

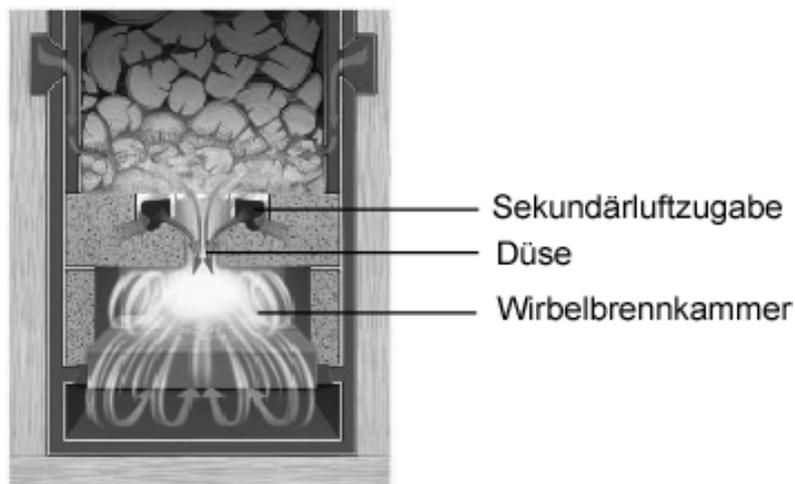


Abbildung 3.5 Geometrische Gestaltung der Durchgangsöffnung zur Brennkammer eines Stückholzkessels nach dem Sturzbrandprinzip [Hoval, 2007]

Manche Hersteller versuchen durch eine horizontale Zweiteilung der Brennkammer die Verweilzeit der Brenngase deutlich zu erhöhen (vgl. Abbildung 3.3 gegenüber Abbildung 3.2). Eine weitere Möglichkeit, eine Vermischung der Brenngase mit der Sekundärluft zu erreichen, beruht auf einer Art Brennerprinzip. Hierbei erfolgt die Vermischung direkt beim Zusammentreffen der beiden Gasströme (Brenngas und Sekundärluft) und nicht in der Nachbrennkammer. Dieses Prinzip wird derzeit, soweit bekannt, von einem Hersteller angewandt,

was eine keramikfreie Konstruktion der Nachbrennkammer ermöglicht, so dass diese auch als herausnehmbare Aschelade verwendet werden kann (siehe Abbildung 3.6).



Abbildung 3.6 Keramikfreie Sekundärbrennkammer und Wirbelkammerbrenner [Künzel, 2009]

Die Wärmeabgabe der heißen Verbrennungsgase an das Heizwasser erfolgt dann im anschließenden Wärmetauscher. In Rohrwärmetauschern sorgen Einbauten (bezeichnet z.B. als Wirbulatoren oder Turbulatoren), die gleichzeitig zur Reinigung der abgasseitigen Wärmetauscherflächen dienen, für hohe Wirkungsgrade (Abbildung 3.7).

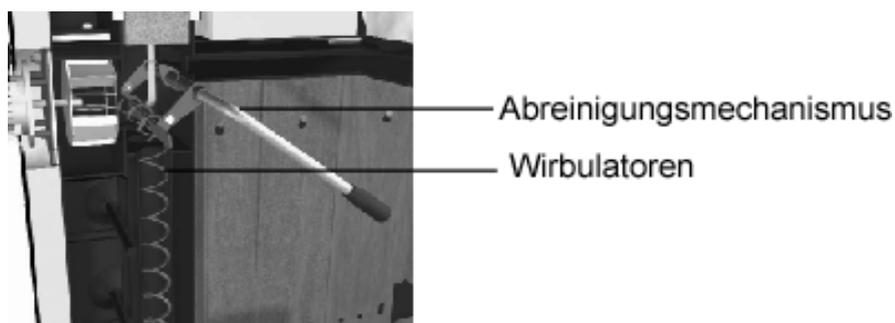


Abbildung 3.7 Wärmetauscher mit Wirbulatoren eines Stückholzkessels [Fröling, 2009]

3.2 Stückholzkessel mit seitlichem Abbrand

Als weiteres häufig eingesetztes Feuerungsprinzip kommt der seitliche Abbrand zum Einsatz, wobei die Brenngase seitlich in die Sekundärkammer geleitet werden (Abbildung 3.8).

Die Primärluftzuführung erfolgt über seitliche Öffnungen im Füllraum und von unten über einen Rost. Sekundärluft wird im Übergang zur Sekundärkammer beigemischt. Abhängig von der Füllraumgeometrie (Länge x Breite) ist die Sekundärkammer seitlich (Abbildung 3.8 und

Abbildung 3.9) oder rückseitig (Abbildung 3.10) angeordnet. Wobei es stehende und liegende Ausführungen gibt.

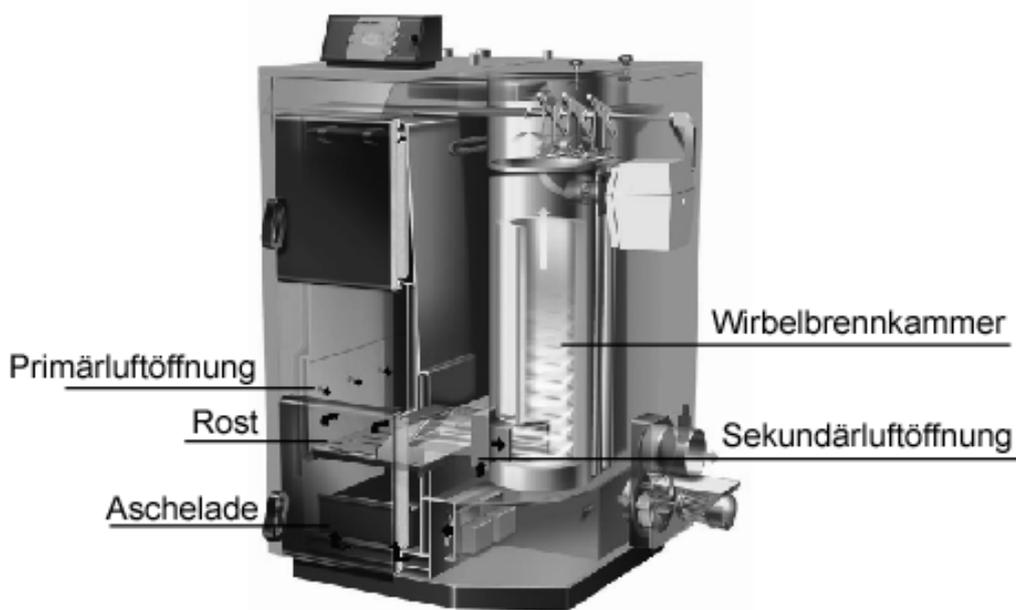


Abbildung 3.8 Aufbau eines Stückholzkessels mit seitlichem Abbrand (stehende Sekundärbrennkammer) [Arca, 2009]

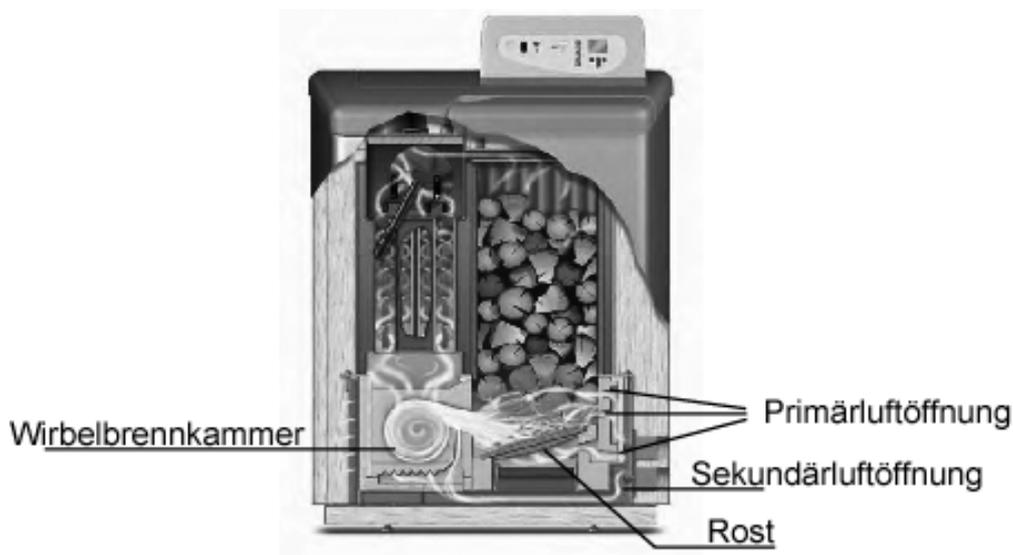


Abbildung 3.9 Aufbau eines Stückholzkessels mit seitlichem Abbrand (liegende Sekundärbrennkammer) [Guntamatik, 2009]

Im Gegensatz zum Feuerungsprinzip mit unterem Abbrand (Sturzbrand) unterstützt der Rost beim seitlichen Abbrand (Primärluft von unten) aktiv den Holzkohleausbrand. Für ein besonders heißes und reaktives Glutbett haben manche Hersteller den Stahlrost weiterentwickelt und mit keramischen Bauteilen versehen (Abbildung 3.10).

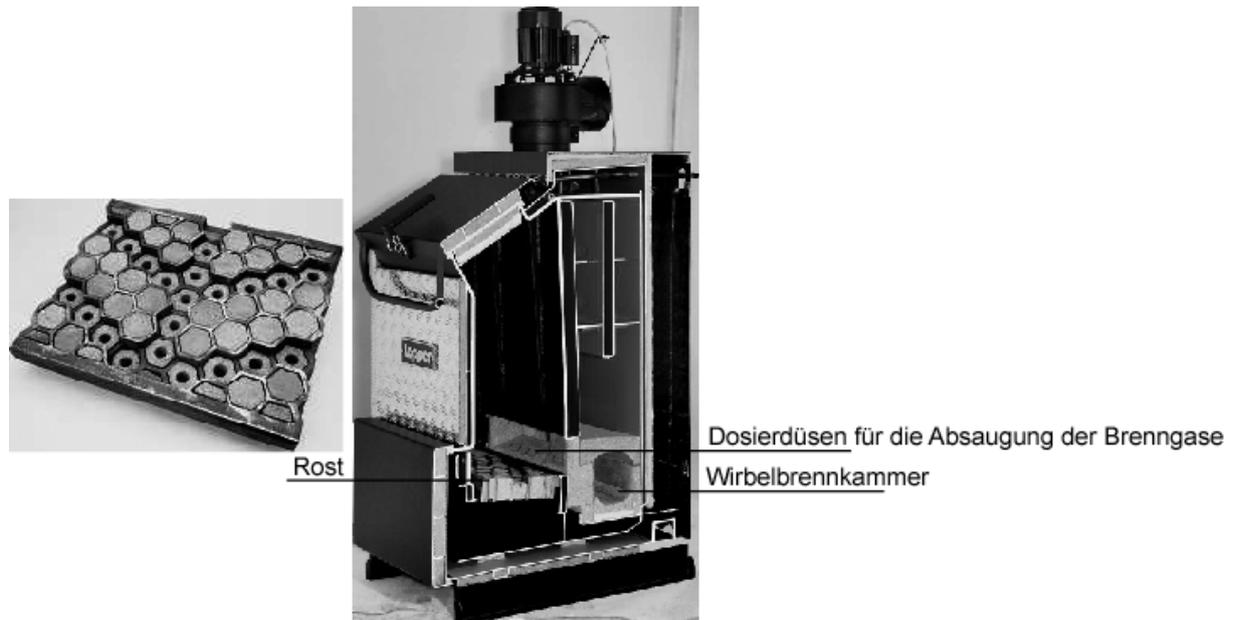


Abbildung 3.10 Aufbau eines Stückholzkessels mit seitlichem Abbrand (liegende Sekundärbrennkammer) und keramischem Wabenrost [Lopper, 2004]

3.3 Geometrische Abmessungen von Stückholzkesseln

Typische geometrische Abmessungen von Stückholzkesseln im Leistungsbereich zwischen 20 kW und 30 kW und von einzelnen Bauteilen sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tabelle 3.1 Typische geometrische Abmessungen von Stückholzkesseln im Nennwärmeleistungsbereich von 20-30 kW

	Kesselabmessungen [cm]			Gewicht [kg]	spezifisches Füllschachtvolumen [l/kW]	spezifisches Kesselwasservolumen [l/kW]
	Höhe	Breite	Tiefe			
Mittelwert	143	71	111	573	5,6	4,8
Min-Wert	106	55	83	300	3,1	2,6
Max-Wert	163	104	142	770	8,8	9,8

Abhängig vom Feuerungsprinzip unterscheiden sich die Stückholzkessel in ihrer Geometrie, wobei Stückholzkessel nach dem Sturzbrandprinzip eher höher und Stückholzkessel mit seitlichem Abbrand eher breiter sind. Letztendlich müssen die geometrischen Abmessungen eines Stückholzkessels so gestaltet werden, dass Engstellen im Haus und schmale Türen problemlos passiert werden können. Das Füllschachtvolumen ist hauptverantwortlich für die Brenndauer des Stückholzkessels und damit mitentscheidend für einen großen Heizungskomfort. Die Grundfläche des Füllschachtes wird nach der maximal einfüllbaren Holzlänge ausgelegt. Unterschieden wird im betrachteten Nennwärmeleistungsbereich zwischen 33 cm und 50 cm langen Holzscheiten. 86% der Stückholzkessel im Leistungsbereich 20-30 kW sind für die Verbrennung von 50 cm Holzscheiten dimensioniert [FNR-Marktübersicht, 2007]. Typische spezifische Volumina für Wirbelnachbrennkammern liegen zwischen 370 cm³/kW und 470 cm³/kW.

4 Emissionen bei der Verbrennung von Holz in Stückholzkesseln

Bei der Verbrennung von Holz in Stückholzfeuerungen ändern sich die Emissionskonzentrationen im Abgas im Zuge eines Abbrandes einer Holzcharge sehr stark. In Abbildung 4.1 ist ein charakteristischer Verlauf eines Chargenabbrandes dargestellt, wobei sich die verschiedenen Abbrandphasen in einer Stückholzfeuerung anhand der CO- und CO₂-Konzentrationsverläufe erkennen lassen. Die zeitliche Länge und die Emissionshöhe der einzelnen Phasen sind exemplarisch zu verstehen und können je nach Stückholzkessel, auf-gegebene Brennstoffqualität und Betriebsbedingungen unterschiedlich lang und ausgeprägt sein.

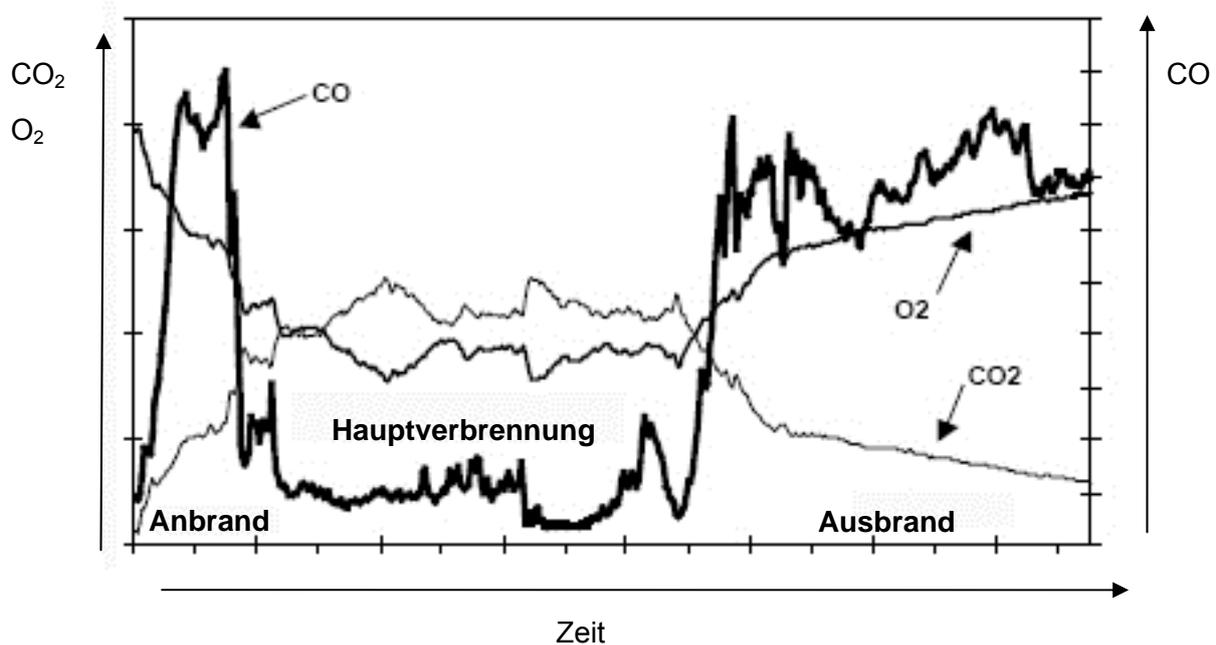


Abbildung 4.1 Exemplarischer Chargenabbrand einer Stückholzfeuerung mit verschiedenen Verbrennungsphasen [Zuberbühler, 2002]

Grundsätzlich unterscheidet man bei Stückholzfeuerungen die Verbrennungsphasen Anbrand, Hauptverbrennung und Ausbrand. Hauptursache für die hohen Emissionen beim Anbrand und Ausbrand ist die zu niedrige Flammentemperatur und bei der Ausbrandphase noch der Wechsel von der Gasphasen- zur Feststoffverbrennung (reiner Holzkohleabbrand). Während der ungestörten stationären Hauptverbrennungsphase im Volllastbetrieb (bei Nennwärmeleistung) weist eine Stückholzfeuerung unter günstigen Randbedingungen (z.B. Verwendung guter Brennstoffqualitäten, technisch einwandfreier Zustand der Anlage, guter Wartungszustand) ihr niedrigstes Emissionsniveau auf, da hier optimalste Verbrennungsbedingungen gegeben sind.

Abweichend davon kann es während der Hauptverbrennungsphase zu erhöhten Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung kommen (Tabelle 4.1). Dies ist z.B. der Fall, wenn die Feuerung zur Leistungsanpassungen auf einen veränderten Wärmebedarf reagiert, so dass die Stückholzfeuerungen gewisse Teillastpunkte anfährt oder gar in einen Gluthalteinbetrieb schaltet, auch hier ist die sinkende Flammentemperatur maßgebend für erhöhte Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung. Zum anderen kann es aber auch

zu Störungen - bedingt durch das Hohlbrandphänomen, Holzaufgabe des Betreibers oder schwankende Brennstoffeigenschaften - während der Hauptverbrennungsphase kommen.

Tabelle 4.1 **Verbrennungsphasen einer Stückholzfeuerung und charakteristisches Emissionsniveau**

Verbrennungsphase	Emissionen
Anbrand	hohe Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffkonzentrationen hohe Feinstaubkonzentrationen (besonders organische Stäube)
Hauptverbrennung	
- Volllast	niedrige Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffkonzentrationen mittlere Feinstaubkonzentrationen (anorganische Stäube)
- Teillast	mittlere Kohlenmonoxid- und niedrige Kohlenwasserstoffkonzentrationen niedrige Feinstaubkonzentrationen (anorganische Stäube)
- Gluthalteinbetrieb bzw. Anfahren aus Gluthalteinbetrieb	hohe Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffkonzentrationen hohe Feinstaubkonzentrationen (besonders organische Stäube)
- Störungen (Hohlbrand, Holzaufgabe, schlechte Brennstoffqualität)	hohe Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffkonzentrationen hohe Feinstaubkonzentrationen (besonders organische Stäube)
Ausbrand	hohe Kohlenmonoxidkonzentrationen niedrige Feinstaubkonzentrationen (anorganische Stäube)

Das Emissionsniveau moderner Stückholzfeuerungen unterscheidet sich in Abhängigkeit der Art und Weise, wie die Abbrandversuche zur Ermittlung des Emissionsverhaltens der Kessel durchgeführt werden. Daher wurden verschiedene Datenquellen ausgewertet und gegenübergestellt. Als Datengrundlage dienten die Prüfstandwerte der Normprüfung nach DIN-EN 303-5 für die Stückholzfeuerungen, die Inbetriebnahmemessungen der Schornsteinfeger nach 1. BImSchV sowie eigene Messungen eines simulierten Praxisbetriebs. Entscheidend für die Vergleichbarkeit und Beurteilung der Emissionswerte aus den vorliegenden Datenquellen ist die Versuchsdurchführung und die Betriebsweise der Stückholzfeuerungen während der Messungen:

- **Messungen nach DIN-EN 303-5**

Im Rahmen der Normprüfung nach DIN-EN 303-5 werden Messungen bei Nennwärmeleistung und im Teillastbetrieb des Stückholzkessels durchgeführt. Vor Messbeginn schreibt die Prüfnorm ein Vorheizen des zu prüfenden Kessels von mindestens 3 Stunden bei Nennwärmeleistung vor. Die Mittelwertbildung der gasförmigen Emissionen erfolgt bei Nennwärmeleistung über zwei komplette Abbrände, im Teillastbetrieb wird über einen Abbrand gemittelt. Für einen Kessel mit 22 kW Nennwärmeleistung mit einem Füllschachtvolumen von 145 Litern ergibt sich demnach eine Messzeit bei Nennwärmeleistung von bis zu 16 h und nochmals 16 h im Teillastbetrieb. Der Staubgehalt wird über mehrere Halbstundenmittelwerte bestimmt. Die Emissionswerte werden getrennt nach Leistung für den ungestörten Dauerbetrieb bei Nennwärmeleistung bzw. Teillast angegeben. In Abbildung 4.2 ist der Emissionsverlauf einer solchen Prüfstandmessung im ungestörten Dauerbetrieb bei Nennwärmeleistung dargestellt. Leis-

tungsregelvorgänge, Anbrand- und Ausbrandphase, sowie erhöhte Emissionen durch Verbrennungsstörungen, wie z.B. Hohlbrände, werden nicht erfasst oder sind aufgrund der langen Mittelungszeiten nicht von Bedeutung.

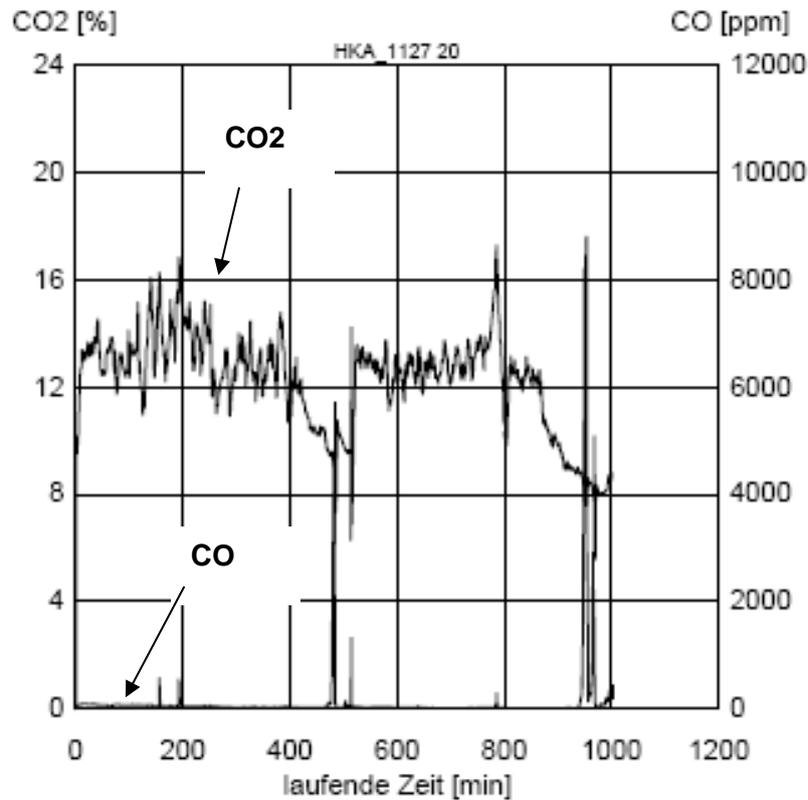


Abbildung 4.2 Zeitlicher Verlauf der CO₂- und CO-Konzentrationen im Abgas bei der Normprüfung einer Stückholzfeuerung nach DIN-EN 303-5 [BLT Wieselburg, 2004]

- **Inbetriebnahmemessungen der Schornsteinfeger**

Überwachungsmessungen nach 1. BImSchV sind bei Stückholzkesseln bei Nennwärmeleistung im ungestörten Dauerbetrieb durchzuführen. Der Beginn der Emissionsmessung soll 5 Minuten nach Aufgabe der maximal möglichen Brennstoffmenge auf ein für die Entzündung ausreichendes Glutbett erfolgen. Die Mess- und Mittelungszeit beträgt 15 Minuten. Aufgrund den Gegebenheiten vor Ort an den installierten Anlagen ist davon auszugehen, dass die Emissionswerte z.T. auch andere Verbrennungsphasen wie Anbrand, Teillast und Verbrennungsstörungen (Hohlbrände) mit beinhalten, welche aufgrund der kurzen Mess- und Mittelungszeit den Emissionsmittelwert der Feuerung deutlich beeinflussen können.

- **Praxisnahes Betriebsverhalten**

Im Rahmen einer wissenschaftlichen Arbeit wurde das Emissionsverhalten einer Stückholzfeuerung unter praxisnahen Bedingungen untersucht. Hierzu wurde die Stückholzfeuerung in verschiedenen Versuchsreihen mit bzw. ohne Pufferspeicher be-

trieben und anhand verschiedener Heizlastkurven (kalter Wintertag, mittlerer Wintertag und milder Wintertag) ein Verbraucher simuliert. In Abbildung 4.3 ist hierzu ein Beispiel für die Verläufe der CO₂-, CO- und VOC-Konzentrationen für den Stückholzkessel mit 1.500 l Speicher für die Heizlastkurve Wintertag 'kalt' dargestellt. Der Heizenergiebedarf wurde hierbei durch die Aufgabe von zwei Holzchargen gedeckt [Struschka et al., 2004].

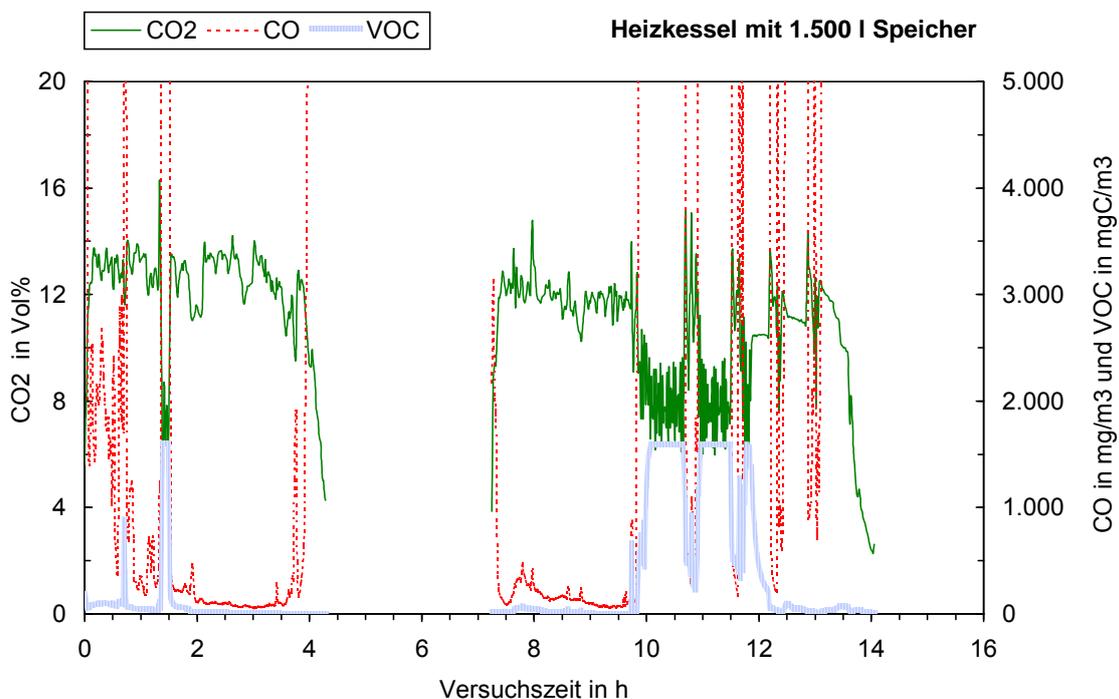


Abbildung 4.3 Gemessene Konzentrationsverläufe beim Heizbetrieb Wintertag 'kalt' für einen Stückholzkessel mit 1.500 l Speicher (Brennstoff Buchenscheitholz, Holzaufgabemenge insgesamt 73 kg) [Struschka et al., 2004]

Beim Betrieb des Kessels mit Pufferspeicher kann die Feuerungsleistung über längere Zeiten konstant auf hohem Niveau gehalten werden, solange Überschusswärme in den Pufferspeicher gefahren werden kann. Dies war vollständig im ersten Abbrand und einige Zeit im zweiten Abbrand möglich. Höhere CO- und VOC-Emissionen beim ersten Abbrand traten durch den Anbrenn- und Aufwärmvorgang des Kessels und im weiteren Verlauf durch Störungen im Verbrennungsablauf (wahrscheinlich durch Vorgänge der Verbrennungsregelung oder geringfügige Brückenbildung im Füllraum) auf. Nach rund 1,5 h Feuerungsbetrieb erfolgte eine kurze Kesselabschaltung, da die obere Grenze der Kesselwassertemperatur erreicht wurde. Beim zweiten Abbrand war nach einer Feuerungszeit von rund 2 Stunden der Pufferspeicher nahezu aufgeladen. Dies führte zu längeren Betriebszeiten des Kessels im Gluthaltemodus.

Die so gewonnen Emissionswerte spiegeln das reale Emissionsverhalten einer Stückholzfeuerung wieder, da sie eine nahezu alle Verbrennungsphasen aus Tabelle 4.1 beinhalten.

Die anhand der beschriebenen Datenquellen berechneten Emissionsmittelwerte im Abgas von Stückholzfeuerungen sind in Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5 für die Kohlenmonoxid- und Staubkonzentration gegenübergestellt.

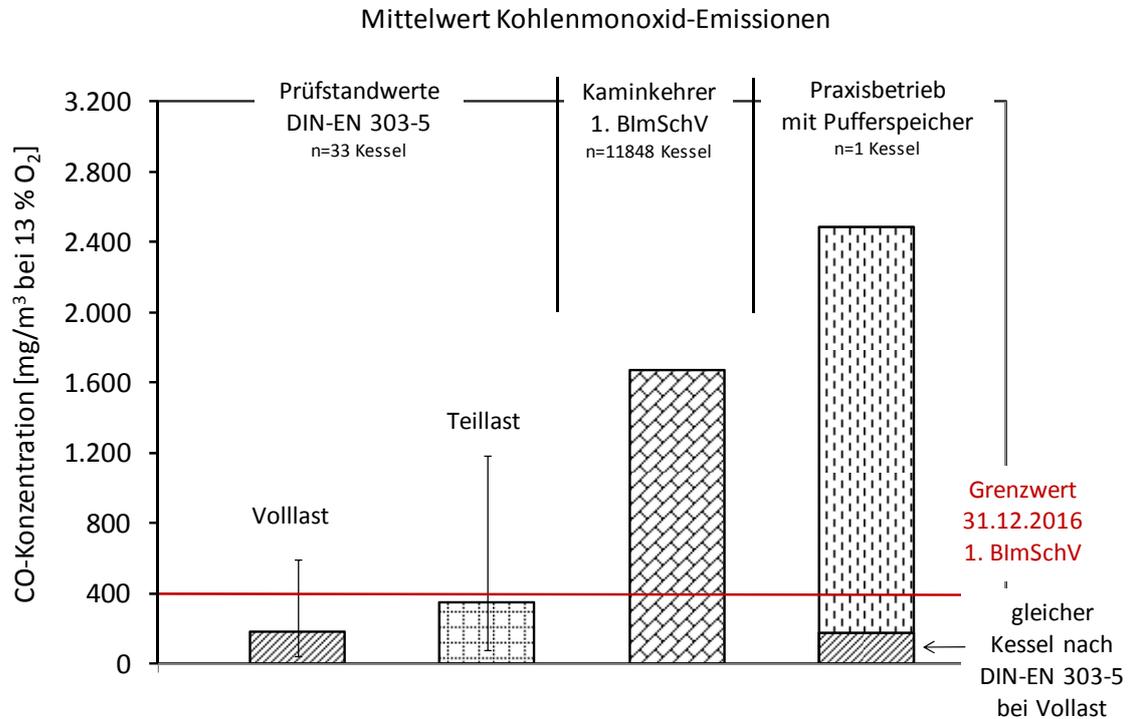


Abbildung 4.4 Mittelwert der Kohlenmonoxidkonzentrationen von Stückholzkesseln nach unterschiedlichen Datenquellen

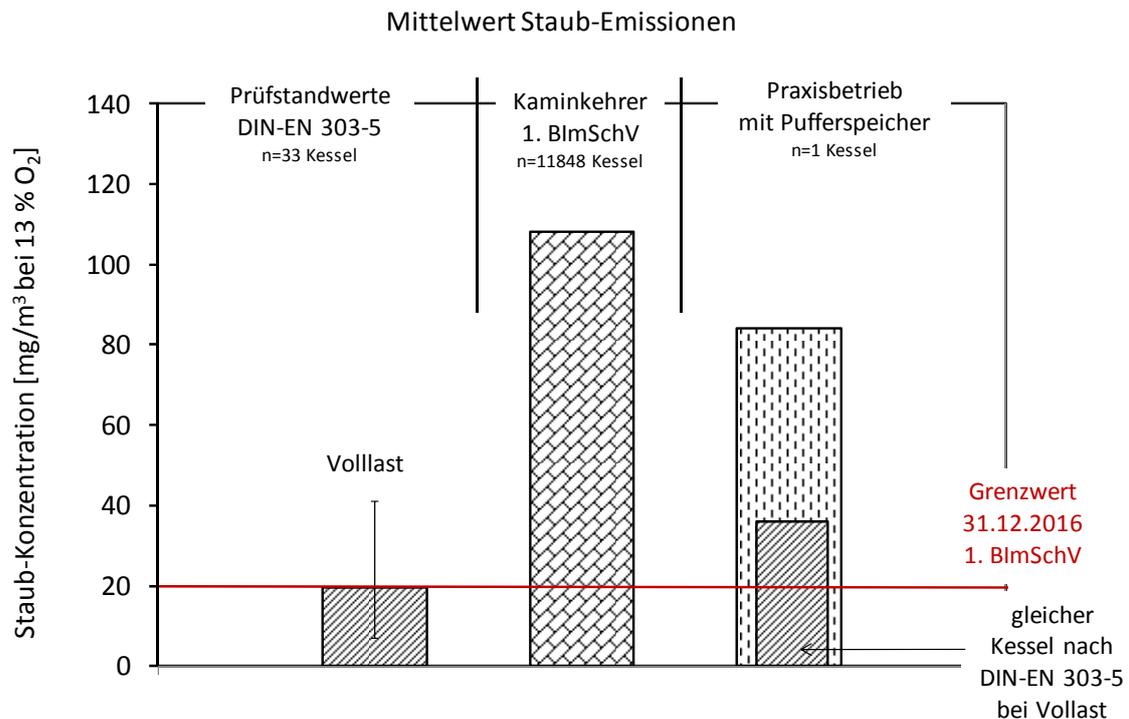


Abbildung 4.5 Mittelwert der Staubkonzentrationen von Stückholzkesseln nach unterschiedlichen Datenquellen

Die Prüfstandwerte nach DIN-EN 303-5 zeigen, dass der emissionstechnische Stand moderner Stückholzfeuerungen schon sehr weit fortgeschritten ist. Eine Vielzahl der zugelassenen Kessel weisen niedrige Emissionen im reinen Volllastbetrieb unter stationären Bedingungen auf. Was die gasförmigen Emissionen (CO-Emissionen) angeht, kann der geforderte Grenzwert der Stufe 2 der 1. BImSchV (gilt für Neuanlagen für Stückholz ab 1.1.2017) zumindest auf dem Prüfstand sicher eingehalten werden. Allerdings verursachen bereits geringe Abweichungen vom optimalen Betriebspunkt einer Feuerung, wie dies z.B. im Teillastbetrieb der Fall ist (niedrigere Verbrennungstemperaturen, veränderte Strömungsverhältnisse), erhöhte Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung (vgl. Abbildung 4.4). Dies zeigen auch die Messergebnisse der Schornsteinfeger oder des simulierten Praxisbetriebs.

Kritischer stellt sich die Situation bei den partikelförmigen Emissionen dar. Der Mittelwert der Staubkonzentration unter Prüfstandsbedingungen fällt genau mit dem geforderten Grenzwert der Stufe 2 zusammen. Es ist daher unsicher, ob die Stückholzkessel nach dem heutigen Stand der Technik die Überwachungsmessungen der Schornsteinfeger nach 1. BImSchV einhalten können.

Demzufolge ist vor allem im Praxisbetrieb mit instationären Betriebsanteilen ein erhebliches Minderungspotential bezüglich der Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung (CO, VOC und Staub) bei Stückholzkesseln vorhanden. Bei der Entwicklung von neuen Konzepten für einen emissionsarmen Stückholzkessel genügt es deshalb nicht, den Verbrennungsprozess unter stationären Bedingungen isoliert zu betrachten und zu optimieren, es müssen auch die in der Praxis gegebenen Randbedingungen und damit alle Verbrennungsphasen (vgl. Tabelle 4.1) in eine Konzeptentwicklung mit einbezogen werden.

Als Ursache für eine unvollständige Verbrennung mit erhöhten Emissionen kommen vereinfacht folgende Möglichkeiten in Frage:

- Stofftransport durch Turbulenz:
 - unzureichende Vermischung von Pyrolysegasen mit Sauerstoff und/oder Strahlenbildung
- Reaktionskinetik:
 - zu niedrige Flammentemperatur
 - zu kurze Verweilzeit in der heißen Zone
 - breites Verweilzeitspektrum
 - Temperaturqueneffekte an kalten Wänden oder durch Einmischung kalter Luft bzw. Abgase in die Flamme.

Um eine optimierte Stückholzfeuerung robuster gegenüber Verbrennungsphasen mit unzureichender Reaktionskinetik zu gestalten; ist die minimale Reaktionstemperatur in der Reaktionszone, bei welcher die Reaktionskinetik ausreichend schnell abläuft, abzusenken. Dies kann nur durch eine Verbesserung der Mischungsqualität von brennbaren Gasen und Verbrennungsluft erreicht werden. In einer heißen Brennkammer mit Verbrennungstemperaturen über 850 °C laufen die Reaktionen sehr schnell ab, so dass in der Regel die Mischungsqualität für eine vollständige Verbrennung limitierend ist. Dies hat zur Folge, dass eine Verbesserung der Verbrennung im stationären Volllastbetrieb nur noch durch eine optimierte Vermischung erreicht werden kann. Außerdem ermöglicht die Verbesserung der Mischungsqualität

die Entwicklung einer kompakteren Brennkammer. Die Vorteile einer verbesserten Mischungsqualität der Pyrolysegase mit der Sekundärluft und die zu erwartenden Emissionsminderungspotentiale sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Für die Konzeptentwicklung einer Sekundärbrennkammer mit optimierter Vermischung können die Vorgänge mittels CFD (Computational Fluid Dynamics) simuliert werden. Nur so lassen sich Strömung, Turbulenz, ggf. auch Verbrennung, Temperaturverteilung, Verweilzeiten und Mischungseffizienz anschaulich visualisieren und eine optimale Konstruktion detektieren.

Im reinen Vollastbetrieb emittieren moderne Stückholzkessel nach dem Stand der Technik bereits sehr niedrige Staubemissionen. Da diese Feinstaubpartikel größtenteils anorganischen Ursprungs sind, ist mittels optimierter Verbrennung hier kaum noch eine Minderung zu erwarten. Dies kann nur noch über eine Feinstaubfilterung bzw. im gewissen Maße über eine optimierte Strömungsführung und eine Vergleichmäßigung der Brennstoffbetttemperatur erreicht werden.

Tabelle 4.2 Verbrennungsphasen einer Stückholzfeuerung und Einschätzung der Emissionsminderungspotentiale durch eine optimierte Verbrennung

Verbrennungsphase	Beschreibung der Vorteile	CO	VOC	org. Staub
Anbrand	deutliche Verkürzung der Anbrennzeiten durch Reduzierung der minimalen Reaktionstemperatur und kompaktere Bauweise (schnelleres Aufheizen)	++	++	++
Hauptverbrennung				
- Vollast	stabilerer Betrieb bei kurzzeitigen Schwankungen und verbesserte Verbrennung durch intensive Vermischung	+	+	o
- Teillast	Reduzierung der Flammtemperatur wird durch verbesserte Vermischungsqualität kompensiert	++	++	o
- Gluthaltebetrieb	kurze Start- und Stabilisierungsphasen nach einem Gluthaltebetrieb	+	+	+
- Störungen (Holzauf-lage, Brennstoffqua-lität)	kurze Start- und Stabilisierungsphasen nach der Brennstoffauf-lage und robuster bei schwankender Brennstoffqualität	+	+	+
Ausbrand	Verkürzung der Ausbrandzeiten durch Reduzierung der minimalen Reaktionstemperatur	o	o	o

- ++ großes Emissionsminderungspotential
- + mittleres Emissionsminderungspotential
- o geringes Emissionsminderungspotential

Eine Minderung der Hohlbrandanfälligkeit muss bei der Umsetzung eines optimierten Stückholzkessels ebenfalls Bestandteil der Entwicklungsarbeiten sein. Allerdings sind mögliche Maßnahmen zur Vermeidung dieses Phänomens bei Stückholzfeuerungen weit schwieriger zu finden, da die genauen Ursachen aus wissenschaftlicher Sicht nicht ausreichend erforscht und bekannt sind.

Auch lässt sich dieser Vorgang mittels CFD bisher nicht simulieren, auch experimentell ist es schwierig, diese Zustände reproduzierbar und zuverlässig einzustellen. Somit ist die Ursachenforschung grundsätzlich zeitaufwändig, weshalb dieses Phänomen bisher nicht systematisch untersucht wurde. Es wird aber vermutet, dass eine ungleichmäßige Temperaturverteilung über dem Rost oder Füllschachtboden als mögliche Ursache in Frage kommt, so dass der Brennstoff unterschiedlich schnell entgast und sich so Hohlräume bilden. In der Entgasungszone einer optimierten Stückholzfeuerung ist daher eine homogene Temperatur- und Sauerstoffverteilung in der Entgasungszone anzustreben.

Allerdings wird in der Praxis unter Umständen bei einer Brennstofffüllung Holz unterschiedlicher Feuchte, unterschiedlicher Holzart (Fichte, Buche usw.) und mit morphologisch unterschiedlichen Eigenschaften (Rundholz, gespaltenes Holz, große und kleine Holzstücke) verwendet. Auch die Art und Weise wie der Brennstoff eingeschichtet wird, ist sehr betreiber-spezifisch. Unter solchen Bedingungen ist die Entstehung eines Hohlbrandes mit erhöhten Emissionen, aufgrund der unterschiedlichen Entgasungsgeschwindigkeit, vorprogrammiert. Somit reicht eine homogene Temperatur- und Sauerstoffverteilung nicht aus, es muss vielmehr auch eine mechanische Vorrichtung (z.B. beweglicher Rost) in Betracht gezogen werden, um entstandene Hohlräume automatisch zu verdichten. Hierzu ist eine automatische Erkennung einer Hohlbrandsituation durch die Kesselregelung notwendig. Derartige Maßnahmen müssen letztendlich aber experimentell erprobt und nachgewiesen werden, sie können weder berechnet noch simuliert werden.

Ein neu konzipierter Stückholzkessel muss die Grenzwerte der 1. BImSchV der Stufe 2 für das Jahr 2017 bei den Betriebsbedingungen für die Normprüfung (nur stationäre Bedingungen bei konstanter Wärmeleistung, optimale Randbedingungen und fachgerechte Bedingung) deutlich unterschreiten. Im praktischen Betrieb bei den Betriebsbedingungen für die Schornsteinfegermessungen (Randbedingungen der Praxis mit nicht genau definierten Brennstoffqualitäten, mehr oder weniger ungestörtem Dauerbetrieb, u.U. mit nicht optimaler Installation, hydraulischer Abstimmung des Systems und Einstellung der Kesselregelung) sind die Grenzwerte sicher zu unterschreiten. Diese liegen für CO bei $0,4 \text{ g/m}^3$ und für Staub bei $0,02 \text{ g/m}^3$ (jeweils bezogen auf 13 Vol% O_2). Außerdem muss der neu konzipierte Heizkessel so aufgebaut sein, dass auch im praktischen Heizbetrieb mit instationären Betriebszuständen eine Grenzwertüberschreitung, wenn überhaupt, nur kurzzeitig und nur in geringem Umfang stattfindet. In der Regel sollen auch bei diesen ungünstigen Betriebsbedingungen die Grenzwerte merklich unterschritten werden. Diese hohen Ziele können nur erreicht werden, wenn das Gesamtsystem, bestehend aus Kessel, Regelung, Sensorik optimiert wird. Die Zielwerte für CO, VOC und Staub für die Neuentwicklung des Stückholzkessels sind in Tabelle 1 (siehe Einleitung und Zielsetzung des Projektes) aufgelistet.

Zusammengefasst soll der neu entwickelte Stückholzkessel in folgenden Punkten, gegenüber den besten marktverfügbaren Kesseln, erheblich verbessert werden:

- abgestimmtes und insgesamt optimiertes marktfähiges Gesamtkonzept bestehend aus Kessel, Regelung, Sensorik
- Reduzierung der Hohlbrandgefahr durch eine homogene Temperatur- und Sauerstoffverteilung in der Entgasungszone (weniger Emissionsspitzen)
- Erhöhung der Mischungsgüte in der Nachbrennkammer durch optimierte Strömungsbedingungen (geringere Emissionen im Dauerbetrieb, bei Teillast und im praxisnahen Betrieb)

- schnelle Aufheizzeiten der Nachbrennkammer durch Verwendung von Bauteilen mit geringer Masse (kürzere Emissionsspitzen beim Kesselstart)
- Minderung des Luftüberschusses durch die angestrebten Verbrennungsverbesserungen (höherer feuerungstechnischer Wirkungsgrad).

Die nachfolgenden Kapitel beschäftigen sich nahezu ausschließlich mit der verbrennungstechnischen Optimierung eines Stückholzkessels.

5 Konzeptentwicklung eines optimierten Stückholzkessels

Das Kesselkonzept des feuerungstechnisch optimierten Stückholzkessels beruht grundsätzlich auf dem Prinzip einer zweistufigen Verbrennung mit seitlichem Abbrand. Die Nennwärmeleistung des Stückholzkessels wurde, im Hinblick auf die verbesserten Dämmstandards von Einfamilienhäusern, auf ca. 18 kW festgelegt, die Teillast soll 50 % der Nennwärmeleistung betragen. Diese Leistungsklasse bietet auch Vorteile hinsichtlich der geforderten Pufferspeichergröße, welche in der 1. BImSchV mit min. 55 l/kW vorgeschrieben ist. Pufferspeicher dieser Größe mit ca. 1.000 l passen noch durch jede gängige Haus- bzw. Heizraumtüren und sind daher aufgrund der Einbringmöglichkeit aber auch aufgrund des geringen Platzverbrauchs im Heizungskeller eine optimale Lösung. Die wichtigsten Eckdaten sind in Tabelle 5.1 nochmals zusammengefasst.

Tabelle 5.1 Eckdaten für einen optimierten Stückholzkessel

Kenngroße	Wert
Heizleistung	9 – 18 kW (Teillast – Volllast)
Brennstofflänge	30 cm
min. Pufferspeichergröße	1.000 l

Die Aufstellung des optimierten Stückholzkessel soll dem Heizungsbauer deutlich erleichtert werden. Hierzu ist ein modularer Aufbau des Stückholzkessels angedacht. Vom Prinzip stellt sich der Aufbau gemäß Abbildung 5.1 aus zwei Modulen mit jeweils charakteristischen Teilfunktionen dar. Dies ermöglicht dem Heizungsbauer die Module separat voneinander in den Heizungsraum einzubringen und erst vor Ort zu montieren.

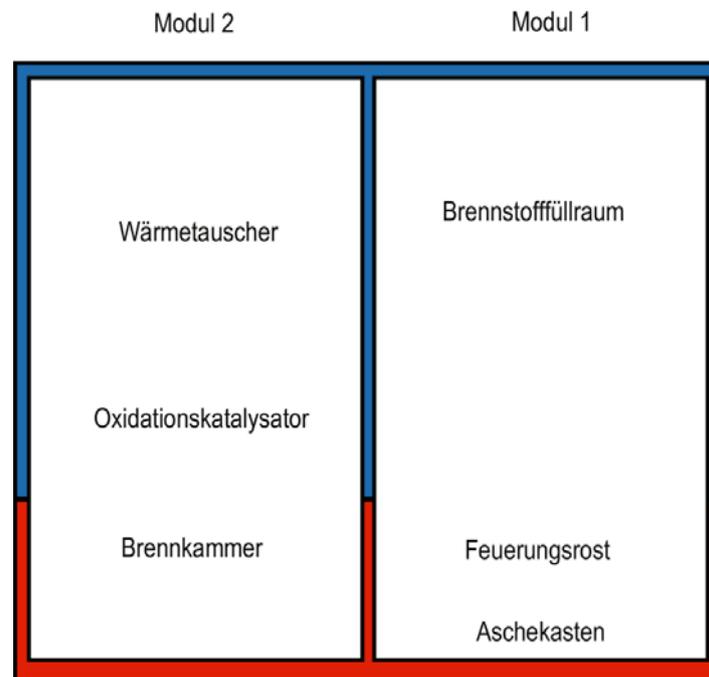


Abbildung 5.1 Schematische Darstellung des modularen Aufbaus eines optimierten Stückholzkessels, bestehend aus zwei Modulen mit den wichtigsten Teilfunktionen (rot: ungekühlt; blau: wassergekühlt)

5.1 Konzept Modul 1

In Modul 1 werden folgende Teilfunktionen erfüllt:

- **Brennstofffüllraum:** Dieser dient als Brennstoffreservoir und muss aus Komfortgründen ausreichen groß dimensioniert werden. Das Füllraumvolumen wurde auf 120 l festgelegt, so können ca. 33 kg Brennstoff pro Brennstofffüllung aufgegeben werden. Bei Nennwärmeleistung (NWL: 18 kW) ergibt dies eine Brenndauer von ca. 7 Stunden.
- **Aschekasten:** Der Aschekasten ist gemäß DIN-EN 303-5 so zu dimensionieren, dass eine Aschemenge von 12 Stunden Betriebszeit aufgenommen werden kann. Mit einem Volumen von ca. 6,8 l ist der Aschekasten 3-fach größer als gefordert und bietet somit für den Betreiber ausreichenden Komfort.
- **Feuerungsrost:** Bei klassischen Rostfeuerungsanlagen erfolgt die Primärluftzuführung ausschließlich durch den Rost. Für eine gleichmäßige Primärluftverteilung und der damit verbundenen gleichmäßigen Temperaturverteilung ist ein hohler Rost vorgesehen, durch welchen die Primärluft strömt und über Lochdüsen in den einzelnen Rostelementen verteilt wird. Neben der gleichmäßigen Primärluftverteilung über die gesamte Rostfläche hat dieses Konzept gleichzeitig den Vorteil einer Primärluftvorwärmung bzw. Kühlung des Rosts. Maßgebend für die Dimensionierung des Rosts ist die vorgesehene maximale Scheitholzlänge. Hieraus ergibt sich eine Grundfläche für den Rost von ca. 380 x 300 mm. In Abbildung 5.2 ist eine erste Version dieses Rosts abgebildet.

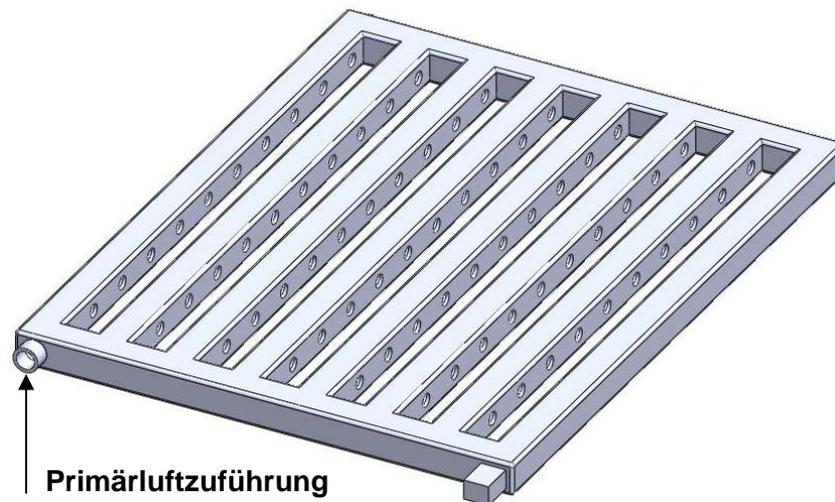


Abbildung 5.2 Feuerungsrost mit Lochdüsen zur Primärluftverteilung

Ein gewisser Nachteil einer solchen Rostausführung liegt in der Verschmutzungsgefahr des Rosts im inneren. Deshalb muss dieser in der Praxis aus dem Füllraum herausnehmbar sein, so dass eine Reinigung erfolgen kann. Als weiterer Nachteil sind an dieser Stelle höhere Produktionskosten zu nennen. Demgegenüber sollten jedoch die Vorteile einer gleichmäßigeren Primärluftverteilung überwiegen. Die Eckdaten dieser ersten Version des Rosts sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst. Hinsichtlich der Luftführung im Rost selbst besteht strömungstechnisch sicherlich noch Optimierungsbedarf. Es muss bei der Detailauslegung sichergestellt werden, dass die Austrittsgeschwindigkeit der Verbrennungsluft durch jede Lochdüse in etwa gleich groß ist.

Tabelle 5.2 Eckdaten des Feuerungsrostes

Kenngröße	Wert
Primärluftvolumenstrom (200°C; 44 % der Verbrennungsluft bei 18 kW NWL)	0,0071 m ³ /s
Lochaustrittsgeschwindigkeit	1 m/s
Lochdurchmesser	8 mm
Anzahl der Löcher	140
Abmessungen	300 x 380 mm

In Abbildung 5.3 ist der Stand des Konzepts für Modul 1 erkennbar. Im Füllraumboden ist der entnehmbare Aschekasten (1) positioniert. Darüber befindet sich der Feuerungsrost (2) mit den Lochdüsen für die Primärluftverteilung. Dieser ist auf der einen Seite beweglich gelagert, wobei über die zylindrische Lagerung der Primärluftstrom (6) von außen in den Rost gelangt (vgl. auch Abbildung 5.2). Besonderes Merkmal des Feuerungsrostes stellt die mechanische Vorrichtung zur Vermeidung von Hohlbränden dar. Hierzu soll die andere Seite des Feuerungsrostes auf Federn (4) gelagert werden. Über eine starre Verbindung des Rosts, mit einem sich außerhalb des Füllraums befindlichen Vibrationsmotor (5), soll dieser in vertikaler Richtung schwingfähig sein. Entstandene Hohlräume können somit beseitigt werden. Ob der

Vibrationsvorgang zyklisch erfolgen und/oder über einen Algorithmus ausgelöst werden soll, kann beim derzeitigen Projektstand nicht entschieden werden. Die Praxistauglichkeit und Wirksamkeit einer solchen Vibrationseinrichtung ist experimentell nachzuweisen und steht noch aus. Ein Alternativkonzept zur Vertikalen Bewegung des Rosts sieht an gleicher Stelle eine Art Nockenwelle vor, mittels derer der Rost angehoben und abgesenkt werden kann.

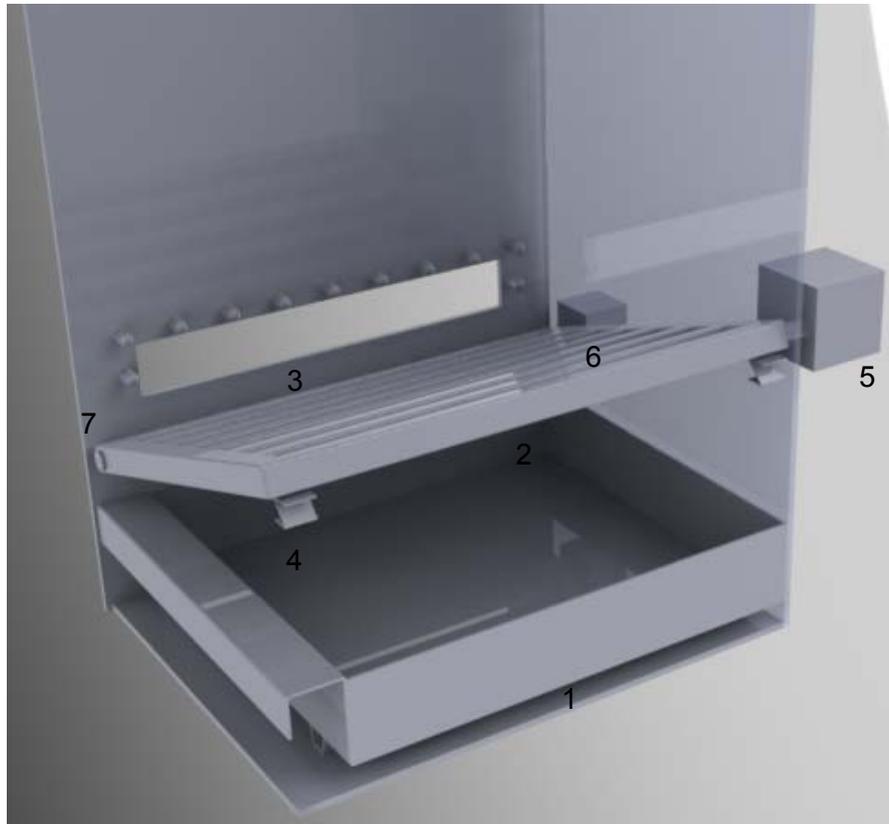


Abbildung 5.3 Konzept Modul 1 für die optimierte Stückholzfeuerung

Eine Schrägstellung des Rosts soll die Bewegungsrichtung des Holzes hin zur seitlichen Durchbrandöffnung (3) unterstützen. Um zu verhindern, dass die Durchbrandöffnung durch davorliegende Holzscheite blockiert wird, sind dort Abstandshalter (7) vorgesehen, welche den Übergang der Pyrolysegase in die Brennkammer sicherstellen. Im Bereich der Glutzone über dem Rost sollen die Kesselwände mit Schamotte ausgekleidet werden.

5.2 Konzept Modul 2

Wie bereits beschrieben ist es das Ziel, die Vermischungsqualität der Pyrolysegase mit der Sekundärluft in der Brennkammer gegenüber dem Stand der Technik maßgeblich zu verbessern, für

- eine optimierte Oxidation brennbarer Gase und Feststoffe
- eine Verbrennung bei tiefem Luftüberschuss mit hohem feuerungstechnischen Wirkungsgrad
- eine optimierte Oxidation der brennbaren Gase auch bei Teillast oder schwankender Brennstoffqualität.

Das Konzept für Modul 2 wird sich daher zunächst ausschließlich auf die Entwicklung einer optimierten Brennkammer konzentrieren. Als erster Schritt ist es von Bedeutung, die Strömung bzw. die Mischungsqualität einer Brennkammer nach dem Stand der Technik zu betrachten und damit eine Referenz zu schaffen. Hierzu wurde die Strömung in einer Brennkammer einer Stückholzfeuerung nach dem Stand der Technik mittels CFD (Computational Fluid Dynamics), ohne chemische Reaktionen (Verbrennung), simuliert. Nach dem Eintritt der Sekundärluft in die Pyrolysegase mischen sich diese Teilströme mehr oder weniger schnell. Bei einer vollständigen Vermischung hat sich unter wärmedichten Bedingungen (keine Wärmedurchgänge durch die begrenzenden Bauteile) die adiabate Mischtemperatur T_m eingestellt:

$$T_m = \frac{V_{sec} \times c_{sec} \times T_{sec} + V_{pyr} \times c_{pyr} \times T_{pyr}}{V_{sec} \times c_{sec} + V_{pyr} \times c_{pyr}} \quad \text{Formel (1)}$$

mit: T_m adiabate Mischtemperatur
 V_{sec} Volumenstrom Sekundärluft
 T_{sec} Temperatur Sekundärluft
 c_{sec} spezifische Wärmekapazität Sekundärluft
 V_{pyr} Volumenstrom Pyrolysegase
 T_{pyr} Temperatur Pyrolysegase
 c_{pyr} spezifische Wärmekapazität Pyrolysegase.

Somit kann eine erste Quantifizierung der Mischung der Pyrolysegase mit der Sekundärluft in einer Brennkammer über die adiabate Mischtemperatur erfolgen. In Tabelle 5.3 sind die Kenngrößen, welche für die Strömungssimulation berechnet bzw. angenommen wurden, angegeben.

Abbildung 5.4 zeigt die CFD-Simulation zur Visualisierung der Strömung mittels Strömungslinien in einer Brennkammer einer Stückholzfeuerung gemäß dem Stand der Technik.

Tabelle 5.3 Kenngrößen zur Strömungssimulation einer Brennkammer nach dem Stand der Technik

Kenngröße	Wert
Heizleistung	30 kW
Wirkungsgrad	86 %
Luftüberschußzahl	1,75
Sekundärluftvolumenstrom bei 100 °C	42,8 m ³ /h
Pyrolysegasvolumenstrom bei 800 °C	120,3 m ³ /h
adiabatische Mischtemperatur bei vollständiger Vermischung	468 °C

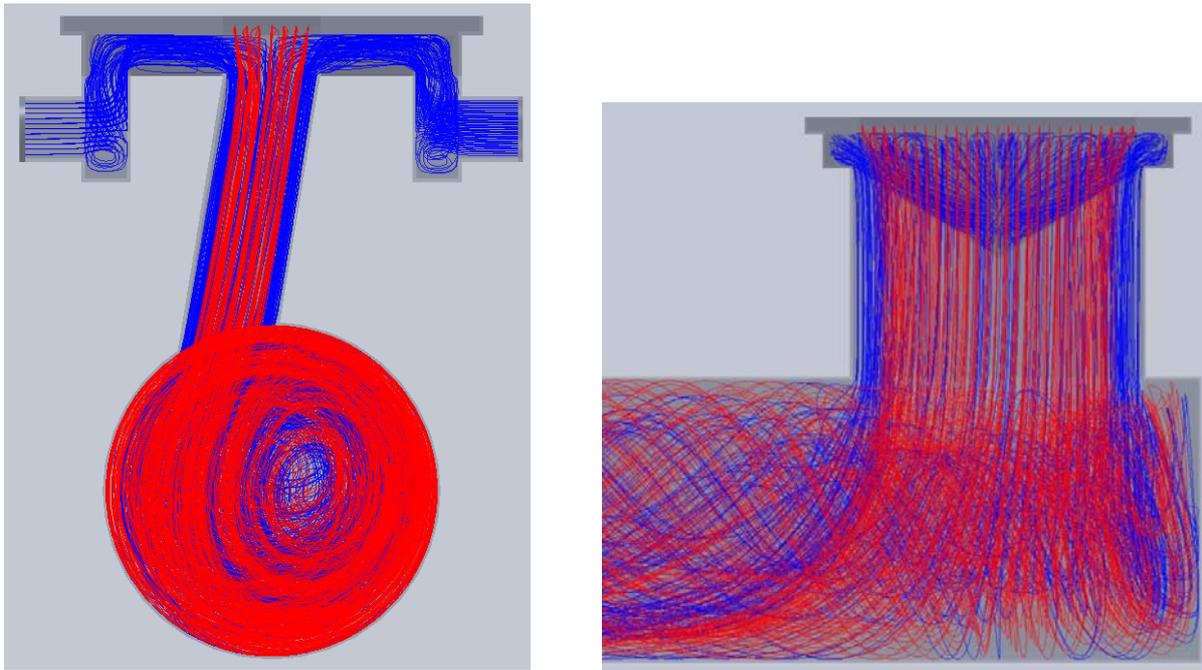


Abbildung 5.4 Strömungslinien in der Brennkammer eines Stückholzkessels nach dem Stand der Technik in einer Vorder- und einer Seitenansicht (blaue Linien: Sekundärluft; rote Linien: Pyrolysegase)

Die Strömungslinien zeigen, wie die Sekundärluft (blau) von rechts und links eingebracht wird und senkrecht auf den Pyrolysegasstrom (rot) trifft. Danach gelangen beide Teilströme gemeinsam über einen tangential angeordneten Kanal in die darunter liegende Wirbelbrennkammer und bilden dort einen Wirbel aus. Bei vollständiger Vermischung müsste sich eine adiabatische Mischtemperatur von ca. 468 °C einstellen. Der Längsschnitt durch die Brennkammer zeigt, dass sich die beiden Teilvolumenströme in dem tangential angeordneten Kanal kaum vermischen (Abbildung 5.5). Es ist eine starke Strähnenbildung sowohl im hinteren als auch im vorderen Bereich der Brennkammer erkennbar.

Am Ende der Brennkammer (Brennkammerlänge ca. 440 mm; Durchmesser 208 mm) liegt ca. 1/3 der Querschnittsfläche im Bereich der adiabaten Mischtemperatur (Abbildung 5.6). Auf Grundlage dieser Ergebnisse muss es das Ziel einer neukonzipierten Brennkammer sein, die Vermischung deutlich effizienter und gleichmäßiger zu gestalten. Die ersten Varianten einer neuentwickelten Brennkammer werden nachfolgend vorgestellt.

Die neuentwickelte Brennkammer basiert dabei auf dem Grundgedanken, durch ein Bauelement eine bessere Vermischung in der Brennkammer zu erzeugen. Abbildung 5.7 zeigt schematisch das Bauelement.

Aufbauend auf diesem Prinzip wurden, bis zum Projektende (Phase I), zwei grundsätzliche Ausführungsvarianten einer Brennkammer entwickelt (Abbildung 5.8). Diese sind beide aus einer zylindrischen Brennkammer aufgebaut, in deren Zentrum sich die Sekundärluftzuführung befindet. Variante 1 und Variante 2 unterscheiden sich von der Einströmung der Pyrolysegase in die Brennkammer. In Variante 1 erfolgt dies axial an der Stirnseite der Brennkammer, in Strömungsrichtung der Sekundärluft. Bei Variante 2 strömen die Pyrolysegase tangential in die Brennkammer.

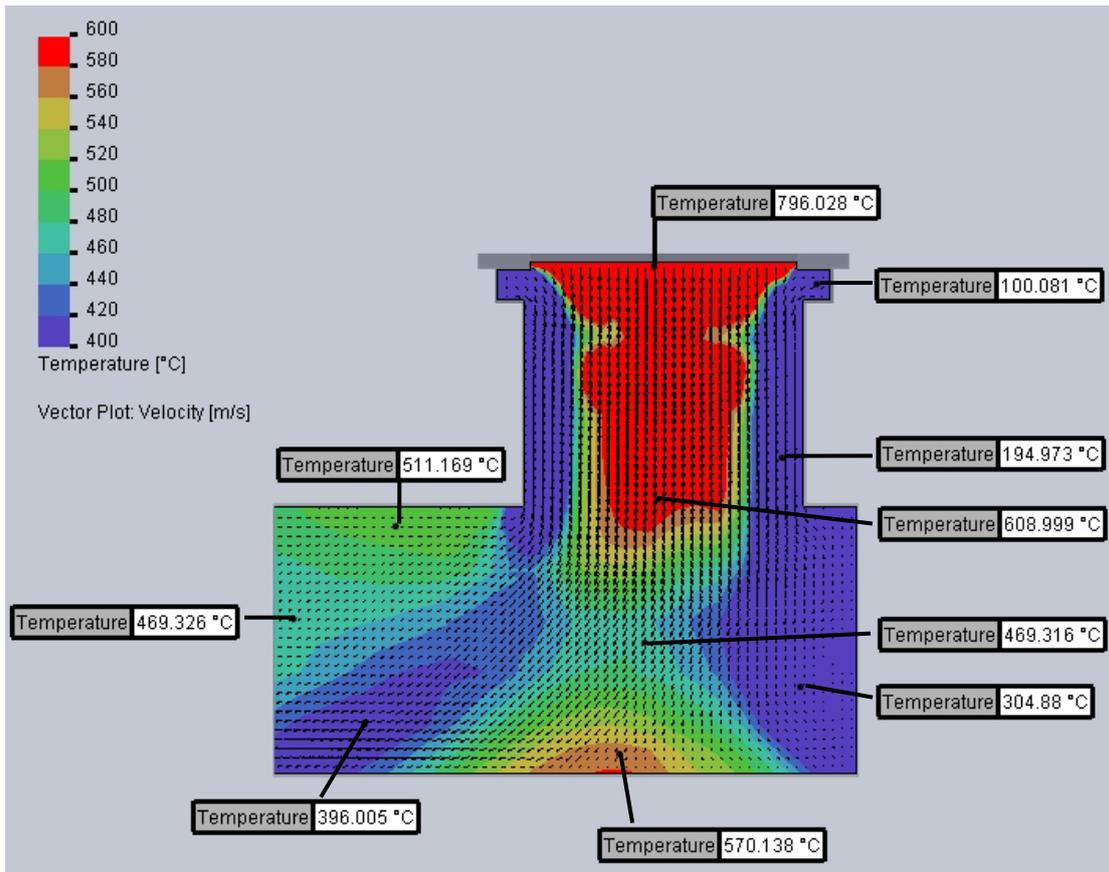


Abbildung 5.5 Temperaturverteilung in einer Brennkammer bei der Vermischung von Sekundärluft (100 °C) mit den Pyrolysegasen (800°C) (CFD-Simulation ohne chemische Reaktionen)

Häufigkeitsverteilung der Temperatur im Querschnitt (Brennkammerende)

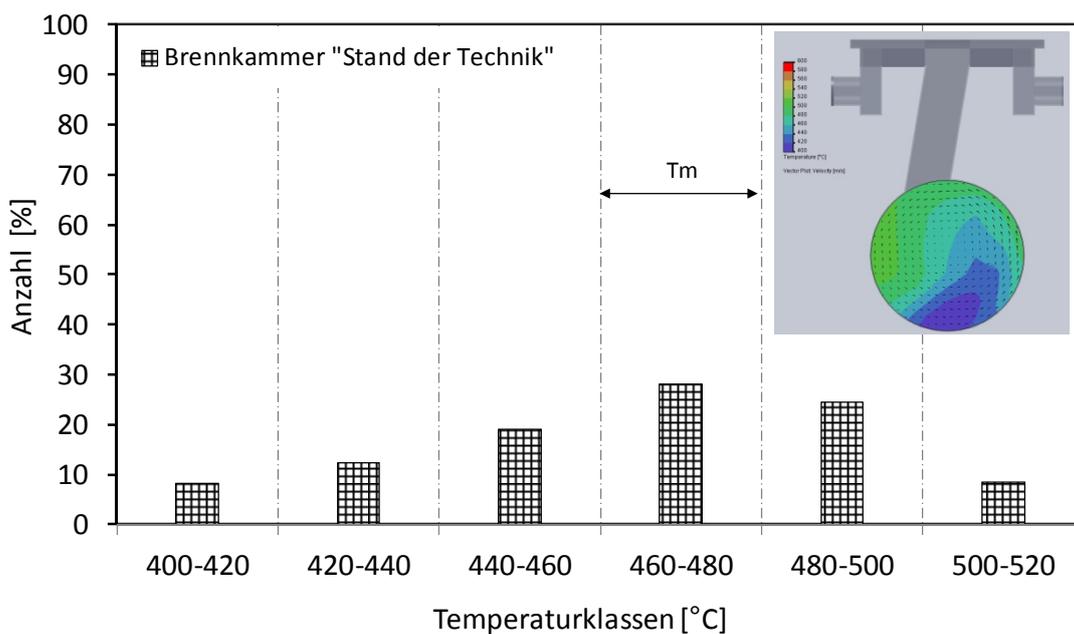


Abbildung 5.6 Häufigkeitsverteilung der Strömungstemperatur am Brennkammerende

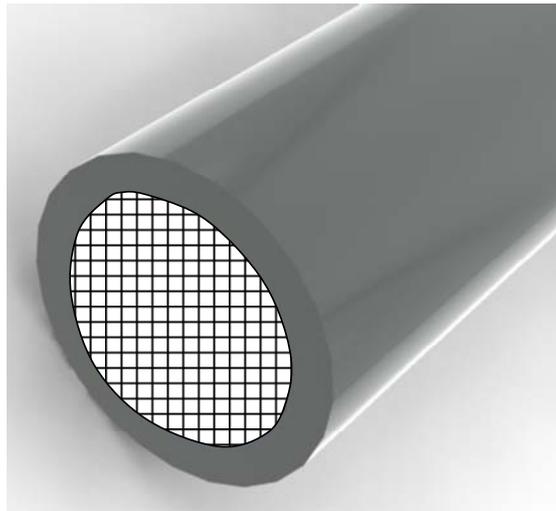
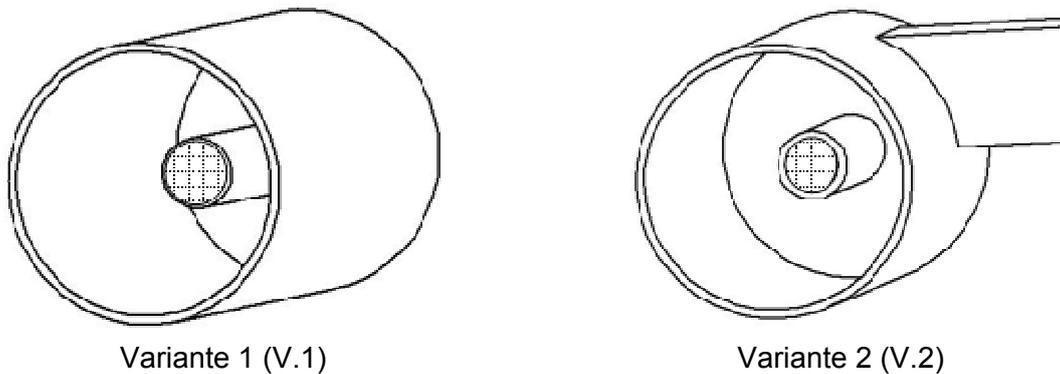


Abbildung 5.7 Bauelement zur besseren Vermischung (schematisch)



Variante 1 (V.1)

Variante 2 (V.2)

Abbildung 5.8 Ausführungsvarianten V.1 und V.2 der Brennkammer (Durchmesser 150 mm) mit Sekundärluftzuführung

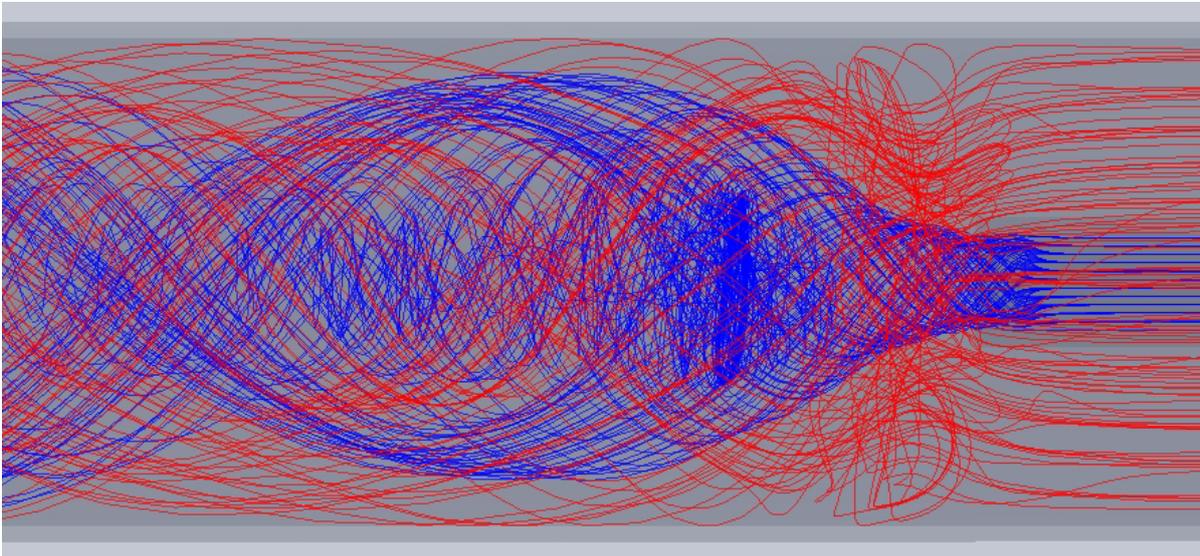
Zur Beurteilung der beiden Varianten wurden auch hier CFD-Simulationen durchgeführt. Die notwendigen Berechnungseingaben sind in Tabelle 5.4 angegeben.

Tabelle 5.4 Kenngrößen zur Strömungssimulation der neuentwickelten Brennkammer

Kenngröße	Wert
Heizleistung	18 kW
Wirkungsgrad	86 %
Luftüberschußzahl	1,75
Sekundärluftvolumenstrom bei 100 °C	25,7 m ³ /h
Pyrolysegasvolumenstrom bei 800 °C	72,2 m ³ /h
adiabatische Mischtemperatur bei vollständiger Vermischung	469°C

Die CFD-Simulationen zeigen, dass sich bei beiden Brennkammervarianten kurz nach der Sekundärluftfeinmischung ein starker Wirbel ausbildet (Abbildung 5.9). Bei Variante 1 ist ein deutliches Rückströmgebiet im Zentrum der Brennkammer vorhanden.

Variante 1



Variante 2

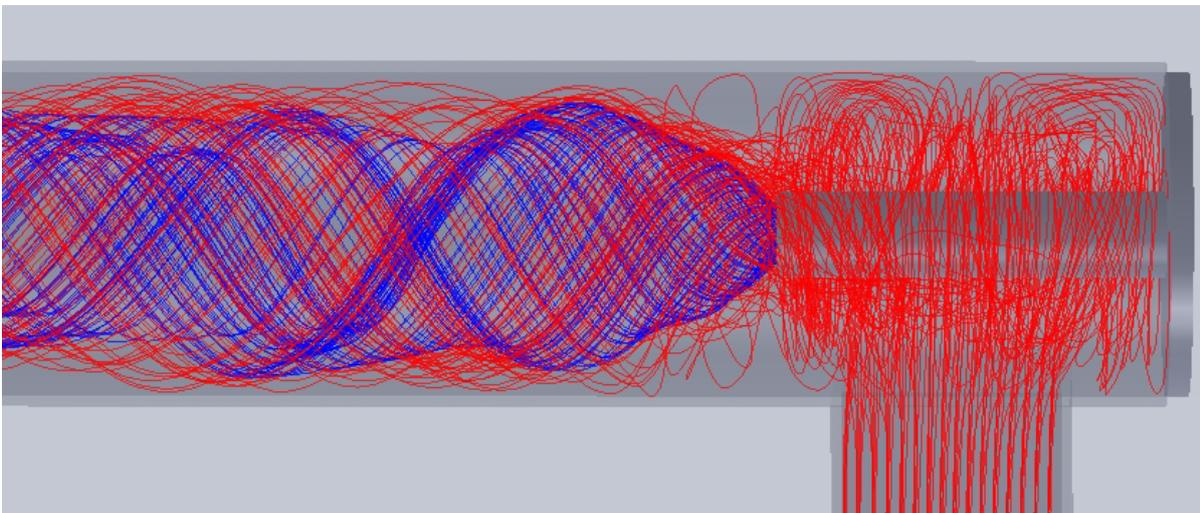
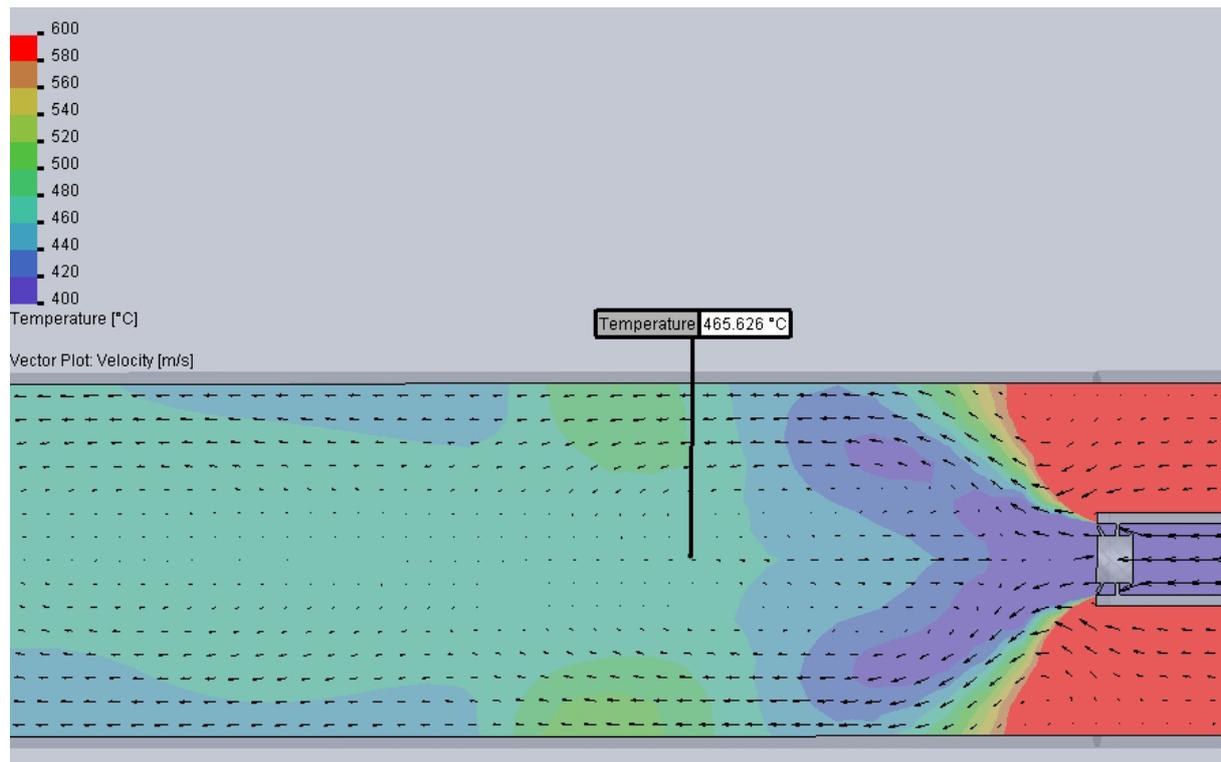


Abbildung 5.9 Strömungslinien der zwei berechneten Brennkammervarianten V.1 und V.2 (blaue Linien: Sekundärluft; rote Linien: Pyrolysegase) (CFD-Simulation ohne chemische Reaktionen)

Dass sich dieses Rückströmgebiet, wenn auch nicht so ausgeprägt, ebenfalls bei Variante 2 ausbildet, ist an den Geschwindigkeitsvektoren in Abbildung 5.10 erkennbar. Dieses Rückströmgebiet sorgt dafür, dass es bei beiden Varianten bereits kurz nach dem Sekundärluftaustritt zu einer intensiven Vermischung der Sekundärluft mit den Pyrolysegasen kommt. Lediglich im Wandbereich ist noch eine gewisse Strahlenbildung erkennbar. Ein derartiges Rückströmgebiet soll in Praxis auch zur Homogenisierung der Temperaturen in der Brennkammer beitragen und gleichzeitig die Flammenstabilität erhöhen.

Variante 1



Variante 2

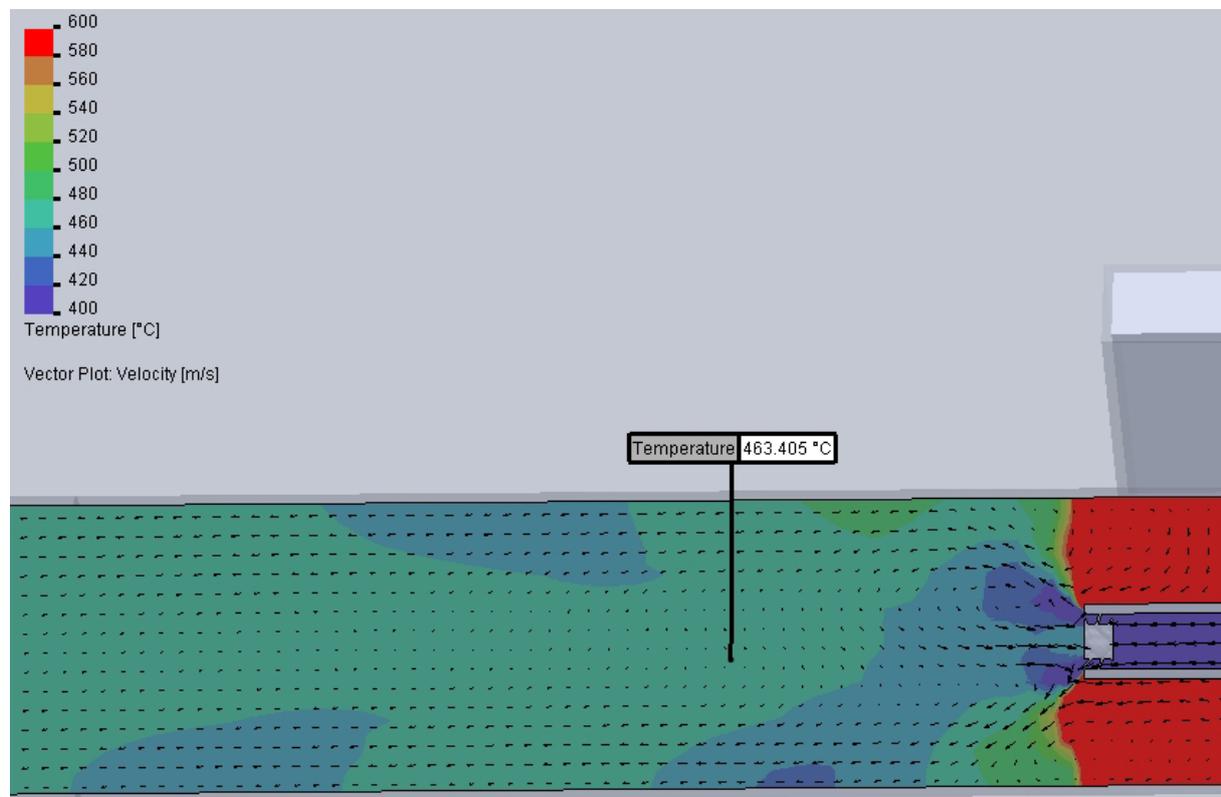


Abbildung 5.10 Temperaturverteilung der Brennkammervarianten V.1 und V.2 bei der Vermischung von Sekundärluft (100 °C) mit den Pyrolysegasen (800°C) (CFD-Simulation ohne chemische Reaktionen)

Da die Sekundärluft bis zu ihrem Auslass eine bestimmte Wegstrecke im heißen Bereich zurücklegen muss, ist diese gut vorgewärmt, was sich positiv auf die Verbrennung auswirkt. Mit diesen ersten Varianten einer neukonzipierten Brennkammer konnte die Vermischungsqualität und Vermischungsgeschwindigkeit der Sekundärluft mit den Pyrolysegasen deutlich gesteigert werden.

Die Brennkammer nach dem Stand der Technik zeigte ein breites Spektrum in der Temperaturhäufigkeitsverteilung auf (Abbildung 5.6). Demnach waren nur ca. 30 % der Strömungsfläche am Brennkammerende (Querschnitt bei 440 mm) vollständig vermischt. Dieses breite Spektrum konnte bei der neukonzipierten Variante 2 auf einen engen Temperaturbereich (2 Temperaturklassen) reduziert werden, wodurch auch die Strahlenbildung entsprechend abnimmt.

Durch die optimierte Zuführung der Sekundärluft sind bei Variante 2 bereits 250 mm nach der Sekundärluftzumischung 66 % der Strömung vollständig vermischt (vgl. Bereich der adiabaten Mischtemperatur in Abbildung 5.11). Ein Vergleich der simulierten Brennkammervarianten untereinander weist leichte Vorteile der Variante 2 gegenüber Variante 1 auf, da hier die Vermischung etwas schneller abläuft.

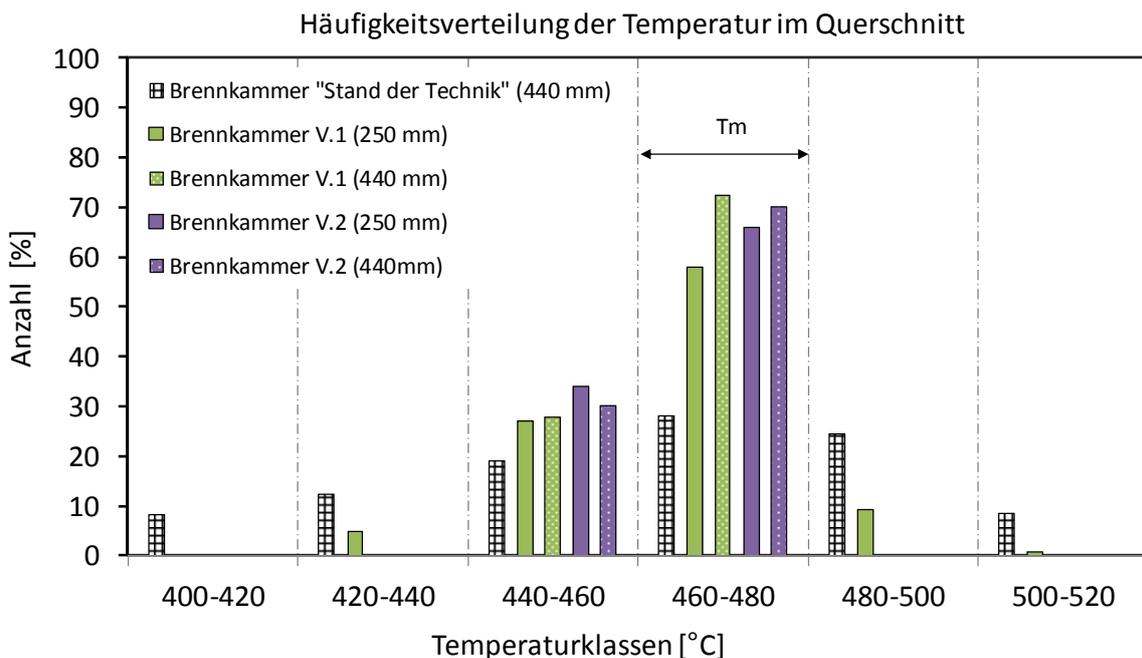


Abbildung 5.11 Häufigkeitsverteilung der Strömungstemperatur bei den zwei Brennkammervarianten V.1 und V.2 und einer Brennkammer nach dem Stand der Technik

Durch die Visualisierung in der CFD-Simulation hat sich das Konzept der optimierten Verbrennungsluftführung in der Nachbrennkammer (Variante 2) als vielversprechen gezeigt und soll in einer Versuchsfeuerung konstruktiv umgesetzt werden.

6 Experimentelle Validierung des optimierten Stückholzkessels

Aufbauend auf dem entwickelten Konzept eines verbrennungstechnisch und wirkungsgradoptimierten Stückholzkessels wurde eine vereinfachte Versuchsfeuerung mit dem Ziel aufgebaut, die Wirksamkeit des Brennkammerkonzeptes hinsichtlich geringer Abgasemissionen experimentell verifizieren zu können.

6.1 Beschreibung der Versuchsfeuerung

Abbildung 6.1 zeigt die realisierte Versuchsfeuerung, bestehend aus ihren Hauptkomponenten Primärkammer, Ascheraum, Sekundärbrennkammer und Abgasanschluss. Die Holzaufgabe erfolgte über eine Fülltüre in der Primärkammer. Eine weitere Türe im Bereich des Ascheraums ermöglichte das Entfernen der anfallenden Asche.

Die Primärkammer ist mit ca. 80 l Füllschachtvolumen ausreichend groß, so dass der maximal einfüllbare Holzvorrat für eine ununterbrochene Brenndauer (bei 18 kW Nennwärmeleistung) von ca. 4 h reicht. Um sicher zu stellen, dass der obere Teil des Brennstoffstapels, nur trocknet und nicht bereits frühzeitig entgast, wurde eine Wasserkühlung an den Außenwänden der Primärkammer angebracht.

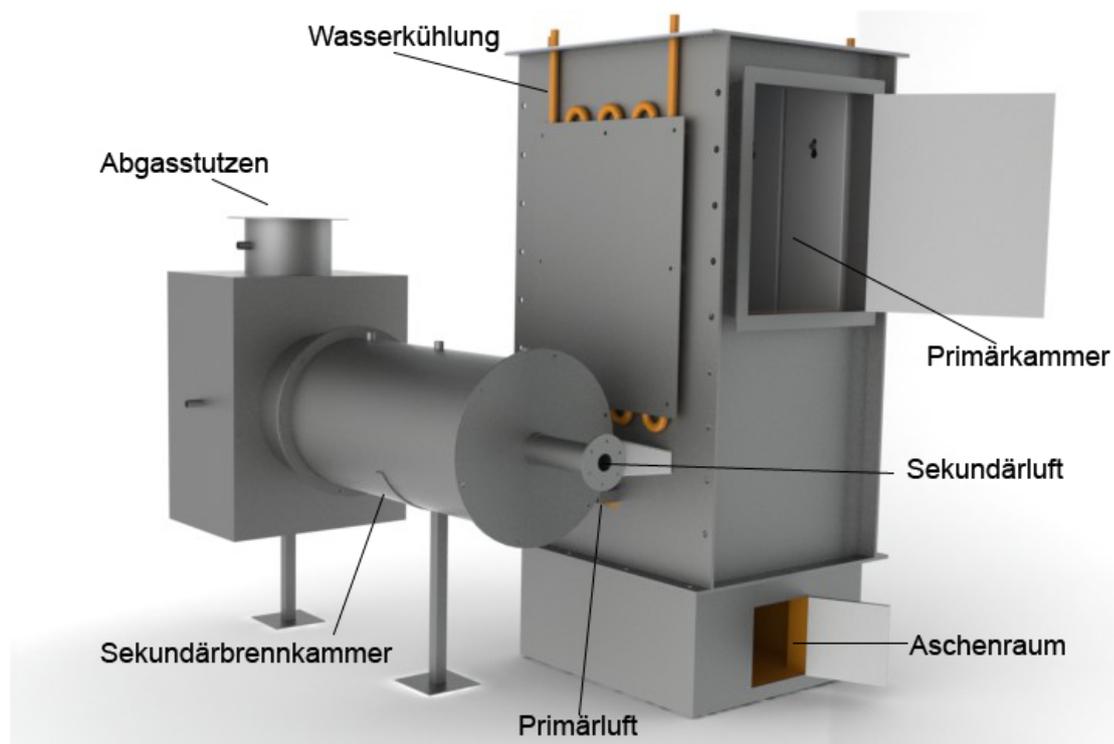


Abbildung 6.1 CAD-Ansicht der realisierten Versuchsfeuerung

Die Primärluftzufuhr erfolgte über gleichmäßig verteilte Bohrungen im Rost, wodurch ein homogenes Glutbett und somit eine gleichmäßige Umsetzung des Holzes erreicht werden soll (siehe Abbildung 6.2). Die Wärmeschutzisolierung im Bereich des Glutbettes soll den Entgasungsprozess durch möglichst hohe Temperaturen zusätzlich unterstützen.

Mit Abstandshaltern rund um die Austrittsöffnung der Primärkammer soll sichergestellt werden, dass die Entgasungsprodukte immer ungehindert in die Sekundärbrennkammer gelangen können. Dabei ist der Übergangskanal zwischen Primärkammer und Sekundärbrennkammer derart angeordnet, dass die Entgasungsprodukte tangential in die zylindrische Sekundärbrennkammer strömen und so in Rotation versetzt werden. Für die Dimensionierung des Übergangskanals und der Sekundärbrennkammer wurde eine CFD-Software verwendet, mit dem Ziel einer möglichst vollständigen Durchmischung (siehe Kapitel 5). Dabei erfolgt die axiale Sekundärluftzufuhr in die Sekundärbrennkammer über eine optimierte Zuführung der Sekundärluftrohr (siehe Abbildung 6.2). Hierdurch wird eine sehr gute Durchmischung der Holzgase mit dem Luftsauerstoff erreicht. Die Sekundärbrennkammer weist einen Durchmesser von 150 mm auf und wurde zur Reduzierung der Wärmeverluste mit feuerfester Wärmeschutzisolierung ausgestattet, um die notwendige Temperatur für eine optimale Verbrennung möglichst schnell erreichen zu können.

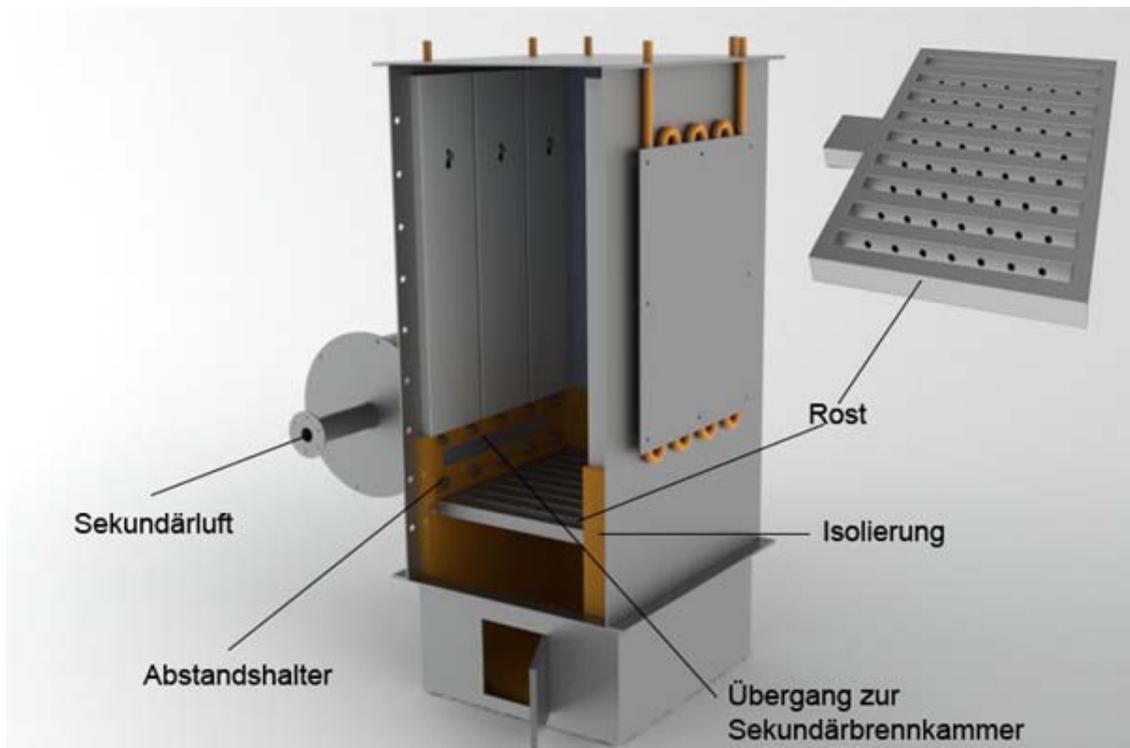


Abbildung 6.2 Blick in den Primärbereich der Versuchsfeuerung und vergrößerte Darstellung der Rostkonstruktion und der optimierten Sekundärluftzuführung

6.2 Versuchsaufbau und Messtechnik

Die Messungen wurden im Technikum des Instituts für Feuerungs- und Kraftwerktechnik (IFK) der Universität Stuttgart durchgeführt. Abbildung 6.3 gibt einen Überblick des Prüfstandsbaus und der wichtigsten Messstellen, welche kontinuierlich und diskontinuierlich aufgenommen wurden.

Für die kontinuierliche Abgasanalyse wurden Messgeräte der Fima Rosemount eingesetzt. Außerdem wurde weitere Sensorik verwendet, um Drücke und Temperaturen bestimmen zu können. Die Abgasprobe wurde mittels einer Rauchgassonde aus dem Abgasrohr entnom-

men, filtriert, entfeuchtet und über eine beheizte Leitung zu den Messgeräten geführt. Die verwendeten Messgeräte und Messprinzipien der Abgasanalyse, sowie die bei der Gerätekalibrierung verwendete Prüfgaskonzentration sind in Tabelle 6.1 aufgelistet. Vor jeder Messung wurden die einzelnen Kanäle der Gasanalytoren mit Prüfgas kalibriert. Die Nullpunkte wurden zuvor mit Stickstoff 5.0 überprüft und gegebenenfalls nachjustiert. Nach jeder Messung wurden noch einmal Stickstoff und Prüfgase aufgegeben, um die Drift festzustellen und diese in der Auswertung korrigieren zu können.

Stellvertretend für Produkte unvollständiger Verbrennung und zur qualitativen Beurteilung der Verbrennung wurden die Kohlenmonoxidkonzentrationen im Abgas gemessen. Auf Feinstaubmessungen wurde aufgrund des fehlenden Wärmetauschers verzichtet. Dieser scheidet bei Praxisanlagen die größeren Aschepartikel ab, so dass Partikelmessungen an der Versuchsfeuerung nicht repräsentativ gewesen wären. Bei niedrigen Kohlenmonoxidemissionen in der Hauptverbrennungsphase kann davon ausgegangen werden, dass dies auch mit geringen Konzentrationen an Ruß und organischen Feinstaubpartikeln einhergeht.



- 1: Volumenstrom Sekundärluft
- 2: Volumenstrom Primärluft
- 3: Temperatur Brennkammer Eingang
- 4: Temperatur Brennkammer Mitte
- 5: Abgasanalyse (Kohlenmonoxid (CO), Sauerstoff (O₂), Kohlendioxid (CO₂))

Abbildung 6.3 Darstellung der aufgebauten Versuchsfeuerung und der Messstellen

Zur Charakterisierung der Verbrennung wurde auch die Flammentemperatur in der Sekundärbrennkammer mit Temperatursensoren (NiCr-Ni) vom Typ K gemessen. Dabei stimmt die gemessenen Verbrennungstemperaturen nicht mit der theoretisch realisierbaren adiabaten Verbrennungstemperatur überein. Grund hierfür sind zum einen die unvermeidbaren Wärmeverluste in der Brennkammer. Zum anderen ist die gemessene Verbrennungstemperatur mit Thermoelementen wegen der Strahlungsverluste und der Wärmeableitung des Thermoelements niedriger als die reale Temperatur der Verbrennungsgase in der Flamme.

Tabelle 6.1 Messgrößen, Messprinzipien und die verwendeten Prüfgaskonzentrationen

Messgröße	Messgerät	Messprinzip	Prüfgas	Messbereich
CO ₂	Binos / Rosemont	nicht dispersive Infrarotabsorption	12,1 Vol%	0-20 Vol%
O ₂	Binos / Rosemont	Paramagnetismus	9,7 Vol%	0-25 Vol%
CO	Binos / Rosemont	nicht dispersive Infrarotabsorption	0,70 Vol%	0-3 Vol%
CO	Binos / Rosemont	nicht dispersive Infrarotabsorption	826 ppm	0-1.000 ppm

Sowohl die Primär- als auch die Sekundärverbrennungsluft wurde der Versuchsfeuerung mittels Druckluft zugeführt, wobei die Menge über Ventile einstellbar war. Die Volumenströme der zugeführten Verbrennungsluft wurden mit Hilfe von Schwebekörperdurchflussmessern bestimmt, jedoch nicht kontinuierlich aufgezeichnet, aber bei einer vorgenommenen Volumenstromänderung dokumentiert.

6.3 Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung

Die Verbrennungsversuche wurden bei kalter und bei warmer Feuerung, d.h. Holzaufgabe ohne bzw. mit bestehender Grundglut, durchgeführt. Als Brennstoff kam handelsübliches Buchenholz zum Einsatz, wobei immer eine Charge von 15 kg Holz eingefüllt wurde. Bei den Versuchen mit einer warmen Feuerung wurde die Holzcharge auf ein bereits bestehendes Glutbett gegeben, wobei über die Zeit (von 6 Vol% CO₂ bis 6 Vol% CO₂) und der aufgegebenen Brennstoffmenge die ungefähre Feuerungswärmeleistung der Anlage bestimmt werden konnte. Der Kaminzug lag konstant bei ca. 20 Pa. Für die durchgeführten Verbrennungsversuche wurde die Sekundärluft direkt am Anfang der Sekundärbrennkammer zugegeben und nicht 180 mm im Brennkammerinneren wie in den CFD-Simulationen (siehe Kapitel 5). Sämtliche Verbrennungsversuche wurden mit handgeregelter Verbrennungsluftzufuhr durchgeführt. Dabei wurde versucht, die Verbrennung bei einem Restsauerstoffgehalt im Abgas zwischen 4 bis 5 Vol% zu halten.

Die kontinuierlich erfassten Größen (Abgaskonzentrationen und Temperaturen) wurden als 1-Sekunden-Werte registriert. Aufgrund der fehlenden automatischen Leistungs- und Verbrennungsregelung war es schwierig, reproduzierbare Versuche über den gesamten Abbrand zu realisieren. Daher wurden die nachfolgend dargestellten gemittelten Messwerte jeweils nur für die Hauptverbrennungsphase bestimmt, d.h. ohne Anfeuer-, Start- und Ausbrandphase. Die Umrechnung der gemessenen mittleren Konzentration von CO auf einen einheitlichen Bezugssauerstoffgehalt von 13 Vol% erfolgte mittels der ebenfalls gemessener O₂-Konzentration nach folgender Formel [1. BImSchV, 2010]:

$$E_B = \frac{21 - O_{2,B}}{21 - O_{2,M}} * E_M \quad \text{Formel (2)}$$

mit: E_B Emissionskonzentration bezogen auf den Bezugssauerstoffgehalt
 E_M : gemessene mittlere Emissionskonzentration
 $O_{2,B}$: Bezugssauerstoffgehalt in Vol%
 $O_{2,M}$: gemessene mittlere Sauerstoffkonzentration in Vol%.

6.4 Ergebnisse der Verbrennungsversuche

Im Folgenden sollen zwei repräsentative Abbrände bei der Aufgabe von jeweils einer Charge 15 kg Holz auf ein bestehendes Glutbett bzw. bei kaltem Zustand der Versuchsfeuerung vorgestellt werden. In Tabelle 6.2 sind die Ergebnisse dieser Verbrennungsversuche zusammengefasst aufgeführt.

Tabelle 6.2 Ergebnisse der Verbrennungsversuche bei „kalter“ und „warmer“ Feuerung

		"kalt"	"warm"
Allgemein	Versuchsdauer [h]	4,0	4,0
	Brennstoff	Buchenholz	
	Brennstoffmenge [kg]	15	15
Emissionen Hauptverbrennungsphase	Brenndauer Hauptverbrennungsphase [h]	2,4	2,1
	O_2 [Vol.-%]	5,0	4,6
	CO_2 [Vol.-%]	16,1	17,1
	CO [mg/m^3 bez. 13 Vol.-% O_2]	33,7	27,6
	Min-Wert CO [mg/m^3 bez. 13 Vol.-% O_2]	5,5	17,8
	Max-Wert CO [mg/m^3 bez. 13 Vol.-% O_2]	649,9	101,6
	Temperatur Brennkammer Eintritt [$^{\circ}C$]	749	639
	Temperatur Brennkammer Mitte [$^{\circ}C$]	900	898
Feuerung	Feuerungsanlage	Versuchsfeuerung	
	Feuerungsleistung [kW]	16	16
	Schornsteinzug [Pa]	20	20

Nach dem Zünden des Brennstoffs, bei kalter Feuerung, benötigt die Versuchsfeuerung ca. 10 min, um die für eine vollständige Verbrennung notwendigen Temperaturen in der Sekundärbrennkammermitte von ca. 800 $^{\circ}C$ zu erreichen. Während der anschließenden Hauptverbrennungsphase wurden im Mittel ca. 34 mg/m^3 (bez. auf 13 Vol% O_2) Kohlenmonoxid gemessen. Dabei wurde versucht, den Luftüberschuss der Versuchsfeuerung bei ca. $\lambda=1,3$ (entsprechend 5 Vol% O_2) zu halten. Aus Abbildung 6.4 ist zu erkennen, dass beim Start der Feuerung noch viel Primärluft und wenig Sekundärluft zugegeben wurde. Während der Hauptverbrennungsphase muss hingegen nur noch verhältnismäßig wenig Primärluft, dafür aber mehr Sekundärluft zugeführt werden.

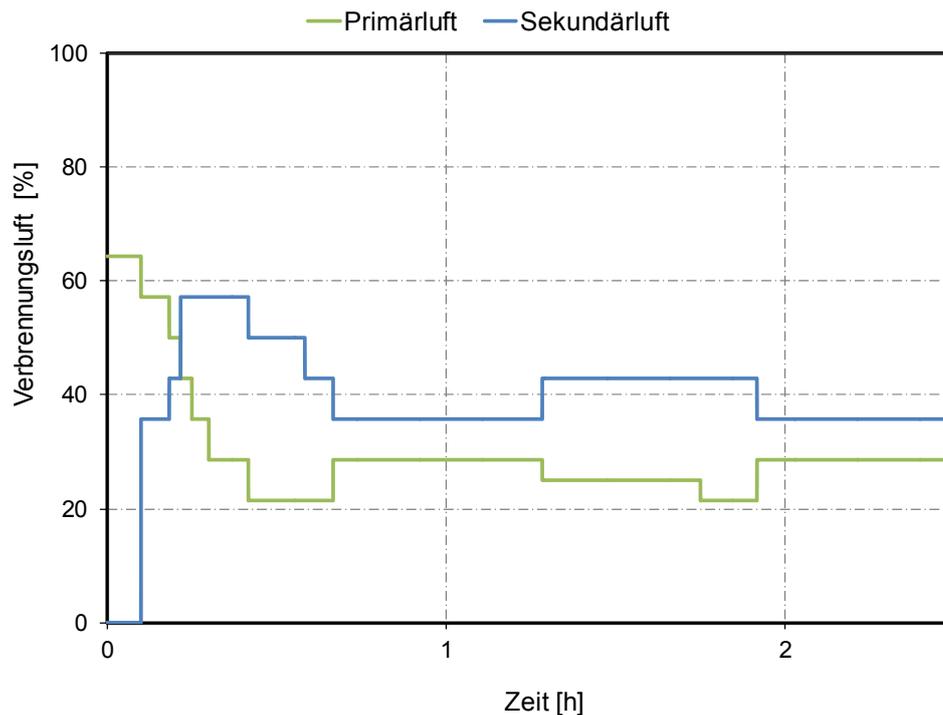


Abbildung 6.4 Verbrennungsluftvolumenströme beim Versuch mit „kalter“ Feuerung

Abbildung 6.5 zeigt, dass aufgrund der sehr guten Vermischung der Holzgase mit der Sekundärluft sehr niedrige CO-Emissionen bei einem geringen Luftüberschuss über die gesamte Hauptverbrennungsphase erreicht wurden. Die etwas höhere CO-Emissionsspitze (bei ca. 0,8 h) wurde durch zu schnelles Reduzieren der Primärluft verursacht. Dies hatte zur Folge, dass im Primärbereich der Holzgasungsprozess gedrosselt wurde, was wiederum eine deutliche Reduzierung der gemessenen Sekundärbrennkammertemperaturen mit sich brachte (siehe Abbildung 6.6) und somit die notwendigen Brennkammertemperaturen für eine vollständige Verbrennung nicht mehr gegeben waren. Mit einer funktionierenden Regelung könnten solche Zustände aber einfach vermieden werden.

Ab der Versuchszeit 0,8 h bis zum Ende der Hauptverbrennungsphase brennt die Versuchsf Feuerung sehr stabil und es werden sehr gute Verbrennungswerte erreicht. Die gemittelte CO-Konzentration über diese Zeitspanne beträgt rund 11 mg/m^3 (bez. auf 13 Vol% O_2). Insgesamt konnten mit der neuentwickelten Sekundärbrennkammer (aufgrund der optimierten Vermischung) über einen breiten Luftüberschussbereich sehr niedrige CO-Emissionswerte erreicht werden, wie die Darstellung der CO-Konzentrationen über dem Rest- O_2 im Abgas in Abbildung 6.7 verdeutlicht. Ab einem Rest- O_2 im Abgas von $< 5 \text{ Vol\%}$ steigen die Kohlenmonoxidemissionen zwar leicht an, befinden sich aber immer noch in einem für Holzfeuerungen sehr guten Bereich.

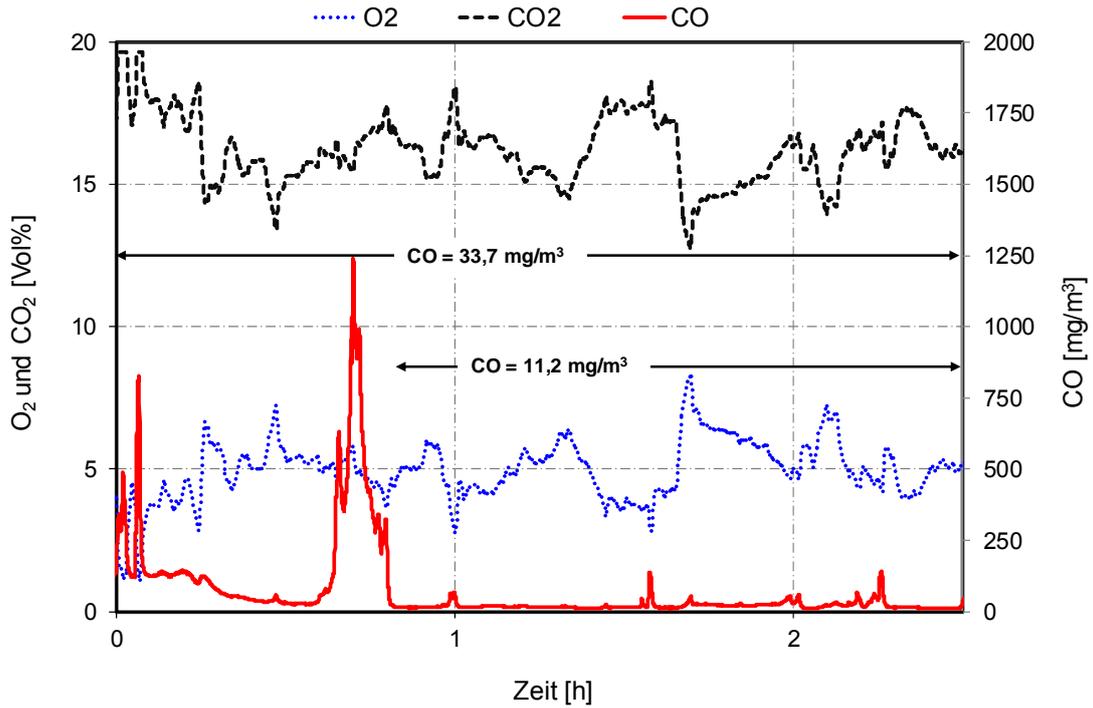


Abbildung 6.5 Zeitlicher Verlauf (Hauptverbrennungsphase) der gemessenen Abgaskonzentrationen bei „kalter“ Feuerung

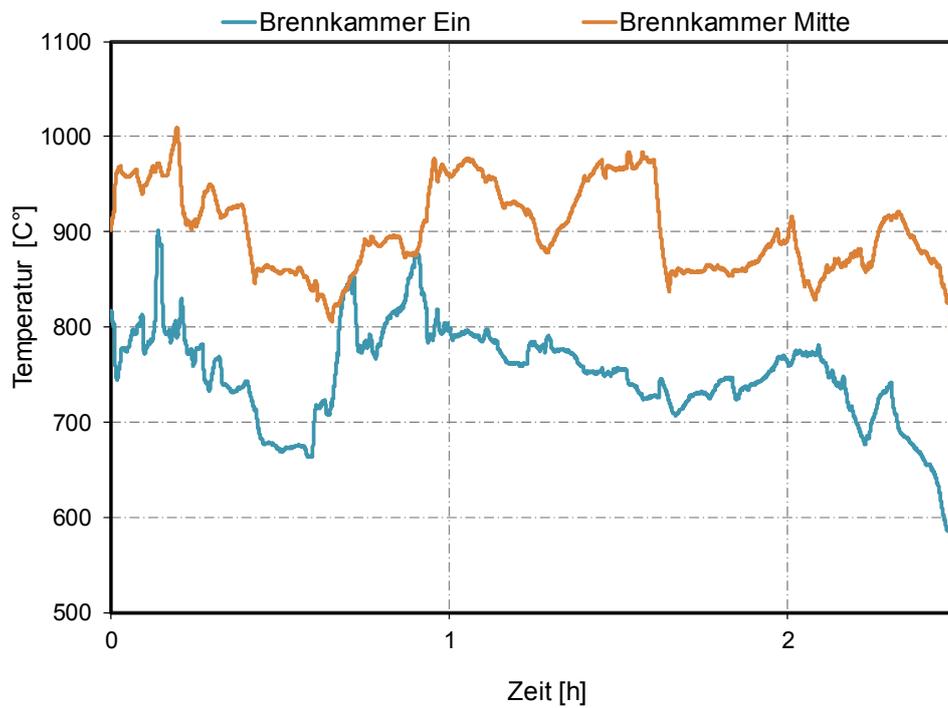


Abbildung 6.6 Verlauf der gemessenen Sekundärbrennkammertemperaturen und der Abgastemperatur bei „kalter“ Feuerung

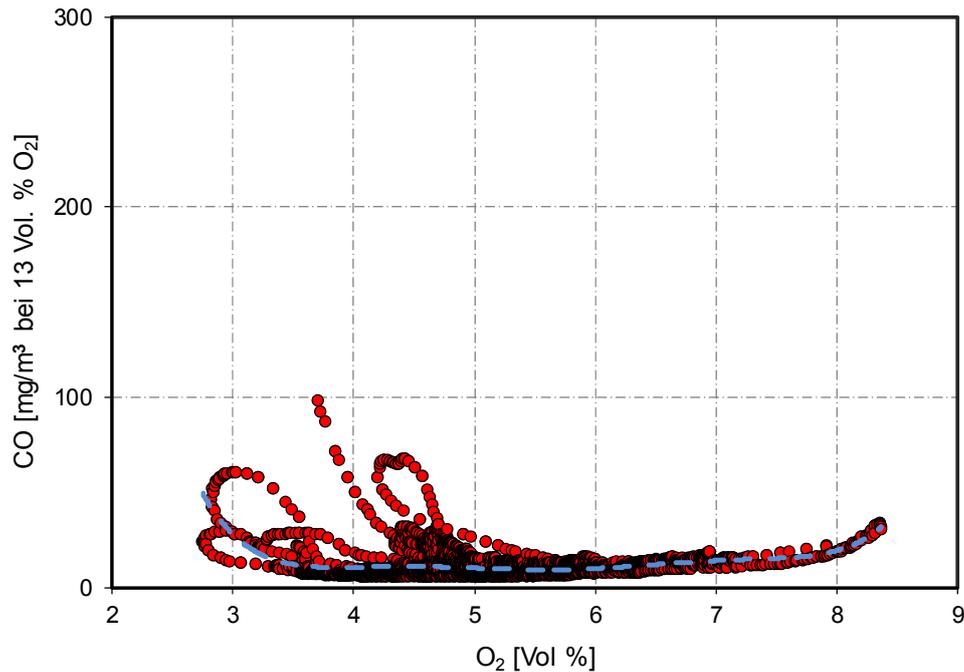


Abbildung 6.7 Abhängigkeit der Kohlenmonoxidkonzentration vom Rest-O₂ im Abgas (dargestellt sind hier Konzentrationen ab Stunde 1,0 aus Abbildung 6.5)

Bei marktüblichen Holzfeuerungen steigen die Emissionen, in dem hier beschriebenen Luftüberschussbereich (Rest-O₂ im Abgas < 5 Vol%), meist bereits um Größenordnungen an. Um minimalste Emissionswerte zu garantieren, darf der Rest-O₂ im Abgas der Versuchsfeuerung 3,5 Vol% nicht unterschreiten. Der Punkt, an welchem die Produkte unvollständiger Verbrennung schlagartig steil ansteigen, wird bei Rest-O₂-Konzentrationen im Abgas von < 2,5 Vol% erreicht.

Wird eine Charge von 15 kg Holz auf ein bestehendes Glutbett („warme“ Feuerung) gegeben, so ist für ein schnelles Zünden und das Erreichen ausreichend hoher Verbrennungstemperaturen die Zugabe einer ausreichenden Primärluftmenge entscheidend. Bei einem Volumenstrom von 18 m³/h Primärluft zündet die Versuchsfeuerung sehr gut und es werden nach ca. 4 min gute Emissionswerte erreicht (Abbildung 6.8). Während der Startphase wurde keine Sekundärluft zugeführt, was zur Folge hat, dass zu wenig Verbrennungsluft für eine vollständige Verbrennung zur Verfügung stand (zu erkennen durch den sehr geringen Rest-O₂ im Abgas). Durch die Zugabe von geringen Mengen Sekundärluft können die Kohlenmonoxidemissionen während der Startphase sicherlich weiter reduziert werden.

In der anschließenden Hauptverbrennungsphase (siehe Abbildung 6.9) liegen die Kohlenmonoxidkonzentrationen über einen Zeitraum von ca. 2 h auf einem konstant niedrigen Niveau, der CO-Konzentrationsmittelwert beträgt ca. 28 mg/m³ (bez. auf 13 Vol% O₂). Der CO-Verlauf ist dabei sehr ruhig und zeigt kaum Schwankungen auf. Die berechnete Standardabweichung der bezogenen Kohlenmonoxidkonzentration in Höhe von 7,4 mg/m³ zeigt, dass Änderungen im Luftüberschuss in der heißen und gut durchmischten Sekundärbrennkammer (siehe Abbildung 6.10) nahezu ohne Wirkung auf die Verbrennungsqualität bleiben (siehe Abbildung 6.11).

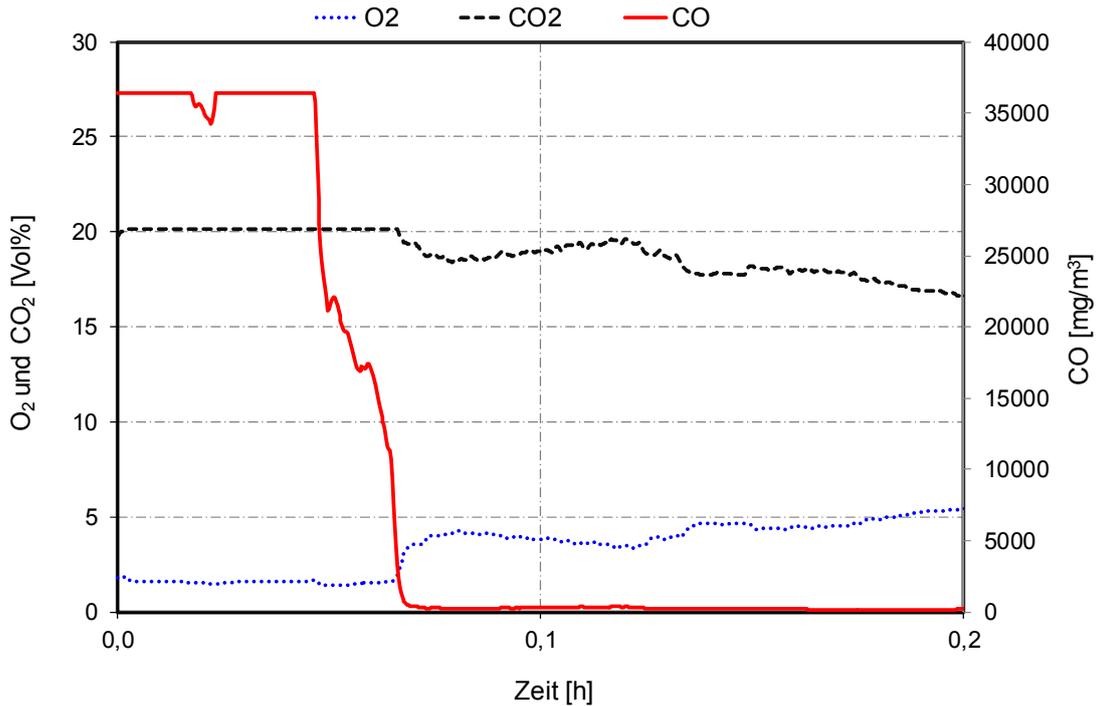


Abbildung 6.8 Zeitlicher Verlauf der gemessenen Abgaskonzentrationen während der Startphase bei der Aufgabe einer Holzcharge auf ein bestehendes Glutbett („warme“ Feuerung)

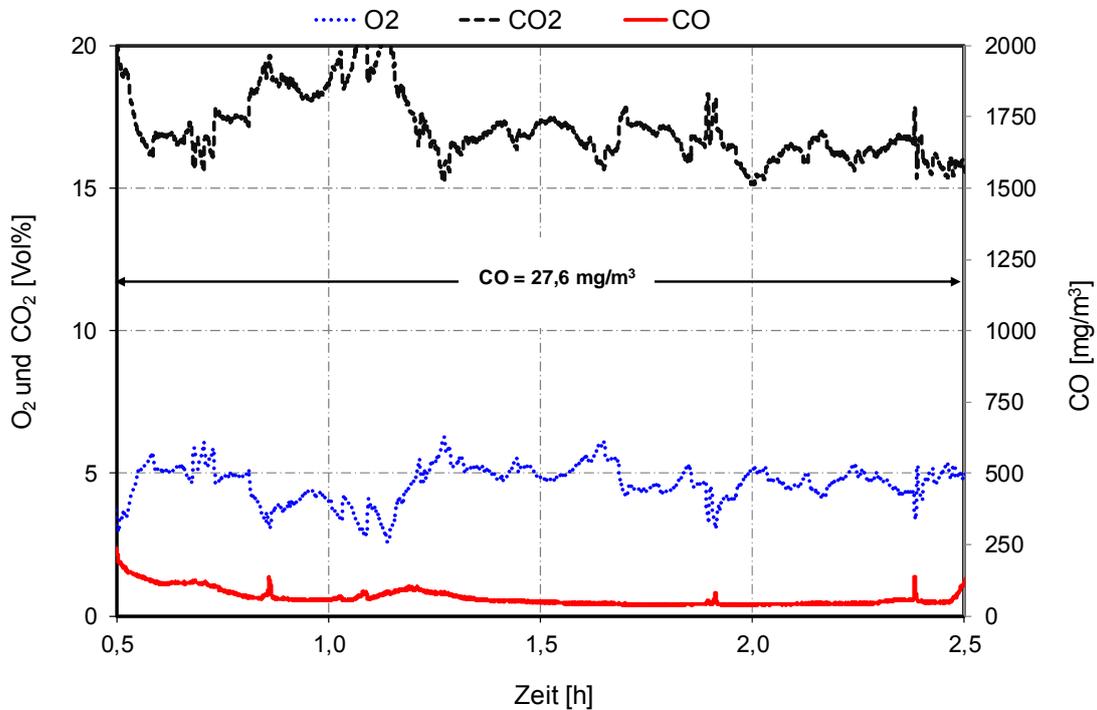


Abbildung 6.9 Zeitlicher Verlauf der gemessenen Abgaskonzentrationen während der Hauptverbrennungsphase bei der Aufgabe einer Holzcharge auf ein bestehendes Glutbett („warme“ Feuerung)

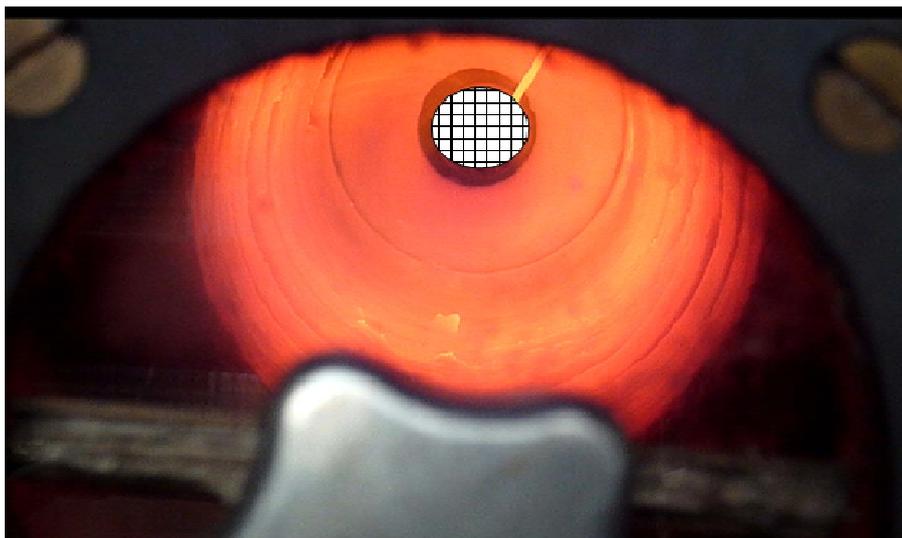


Abbildung 6.10 Blick in die heiße, gut durchmischte Sekundärbrennkammer der Versuchsfeuerung

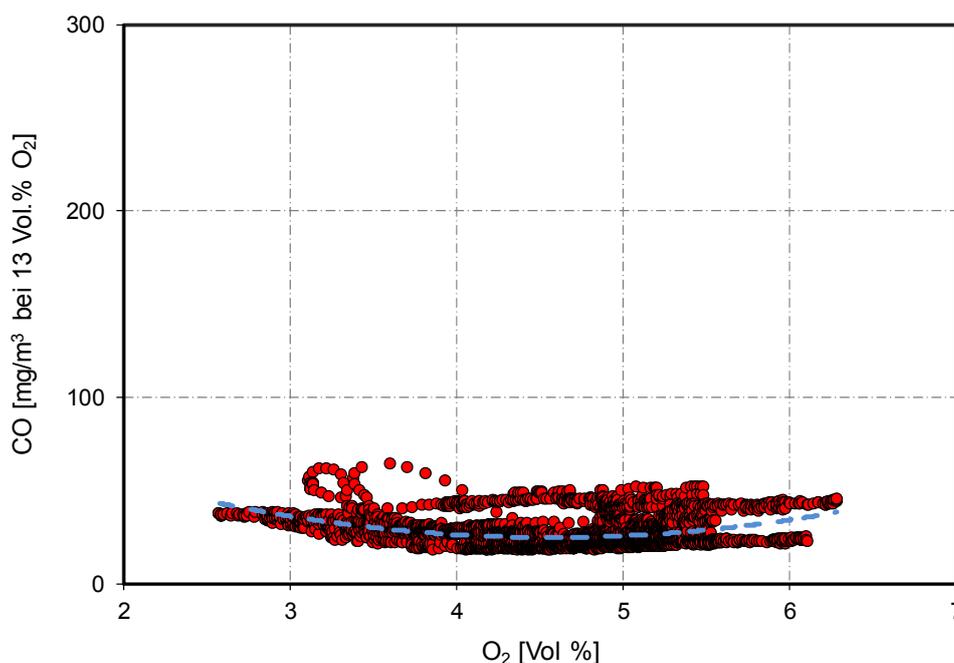


Abbildung 6.11 Abhängigkeit der Kohlenmonoxidkonzentration vom Rest-O₂ im Abgas (dargestellt sind hier Konzentrationen ab Stunde 0,5 aus Abbildung 6.9)

Sämtliche durchgeführten Feuerungsversuche verdeutlichen, dass dank der gleichmäßigen Primärluftverteilung über dem gelochten Feuerungsrost ein sehr homogenes Glutbett aufgebaut wird, was eine sehr gleichmäßige Entgasung des Brennstoffes in der Primärkammer ermöglicht. Das in der Praxis bei Stückholzkesseln häufig auftretende Problem der Holbrandbildung wurde – zumindest bei dem eingesetzten Buchenholz – nicht beobachtet. Ein beweglicher Rost, welcher in der Lage wäre derartige Blockaden in der Füllkammer mechanisch aufzulösen (siehe Kesselkonzept in Kapitel 5.2), ist somit zum jetzigen Stand der Entwicklung nicht notwendig.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen der Versuchsfeuerung wurde als nächster Schritt einer erster Prototyp eines Stückholzkessels angefertigt. Neben dem innovativen Sekundärbrennkammerkonzept wurde diese Feuerung nun auch mit einem Wärmetauscher ausgestattet. Ziel war es, diesen Musterkessel bei genau definierten Leistungsvorgaben (Volllast, Teillast) zu charakterisieren (inkl. Feinstaubmessung). Ein weiteres Ziel war die Erprobung eines Regelkonzepts, für eine möglichst stabile Verbrennung während der stationären Hauptverbrennungsphase.

7 Konzeptumsetzung als Stückholzmusterkessel

7.1 Beschreibung des Stückholzmusterkessels

Die verbrennungstechnische Charakterisierung des Stückholzmusterkessels wurde mit der in Abbildung 7.1 gezeigten Anlage durchgeführt, die vom Projektpartner BTT erstellt wurde. Diese wurde zum großen Teil aus Fertigungskomponenten aufgebaut. Als Grundgerüst kam dabei ein handelsüblicher Stückholzkessel vom Typ Logano S161 der Fa. Bosch Thermotechnik GmbH zum Einsatz. An diesem Stückholzkessel nach dem unteren Abbrandprinzip waren umfangreiche Modifikationen notwendig, um das Konzept eines optimierten Stückholzkessels umsetzen zu können. Feuerraumboden und Brennkammer wurden entfernt und durch den luftdurchströmten Rost ersetzt, so dass der obere Bereich fortan als Füllraum für das Holzreservoir und der untere Bereich als Ascheraum zur Verfügung stand. Die ursprüngliche Abgas- und Verbrennungsluftführung wurde still gelegt. Die neue Primärluftzufuhr erfolgte mittels Druckgebläse über viele gleichmäßig im Rost verteilte Bohrungen. Um einen seitlichen Abbrand zu ermöglichen, wurde in der linken Kesselwand eine Durchgangsöffnung geschaffen. Hieran konnte die verbrennungsoptimierte Sekundärbrennkammer angeflanscht werden. Die Sekundärluftzufuhr in die Sekundärbrennkammer erfolgte über ein weiteres Druckgebläse. Sowohl die Sekundärbrennkammer als auch Teile der Primärkammer wurden im Inneren mit Vermiculite wärmegeklämt.

Im Anschluss an die Sekundärbrennkammer geben die heißen Abgase den größten Teil ihrer Energie im Wärmetauscher an das zirkulierende Wasser ab. Ein kleinerer Teil der Energie wird bereits vorher, über die ebenfalls wassergekühlte Sekundärbrennkammer bzw. den wassergekühlten Füllraum, abgegeben. Im Wasserkreislauf sind Füllraum, Sekundärbrennkammer und Wärmetauscher hydraulisch in Reihe geschaltet. Für den notwendigen Unterdruck in dem Stückholzmusterkessel sorgt ein Abgasgebläse in Anschluss an den Wärmetauscher.

Die wichtigsten Eckdaten des Stückholzmusterkessels im Überblick sind:

- optimierter Feuerungsrost mit integrierter Primärluftverteilung für Holzscheite mit einer Kantenlänge von 330 mm und Abmessungen Füllraum (FR) 400x380x650 mm
- Nachverbrennung in optimierter Sekundärbrennkammer (SBK) mittels optimierter Sekundärluftzuführung
- Sekundärbrennkammerlänge 510 mm; Innendurchmesser 150 mm
- je ein separat ansteuerbares Druckgebläse für Primär- und Sekundärluftzufuhr, Abgasförderung über ein Abgasgebläse
- Wärmetauscher (WT).

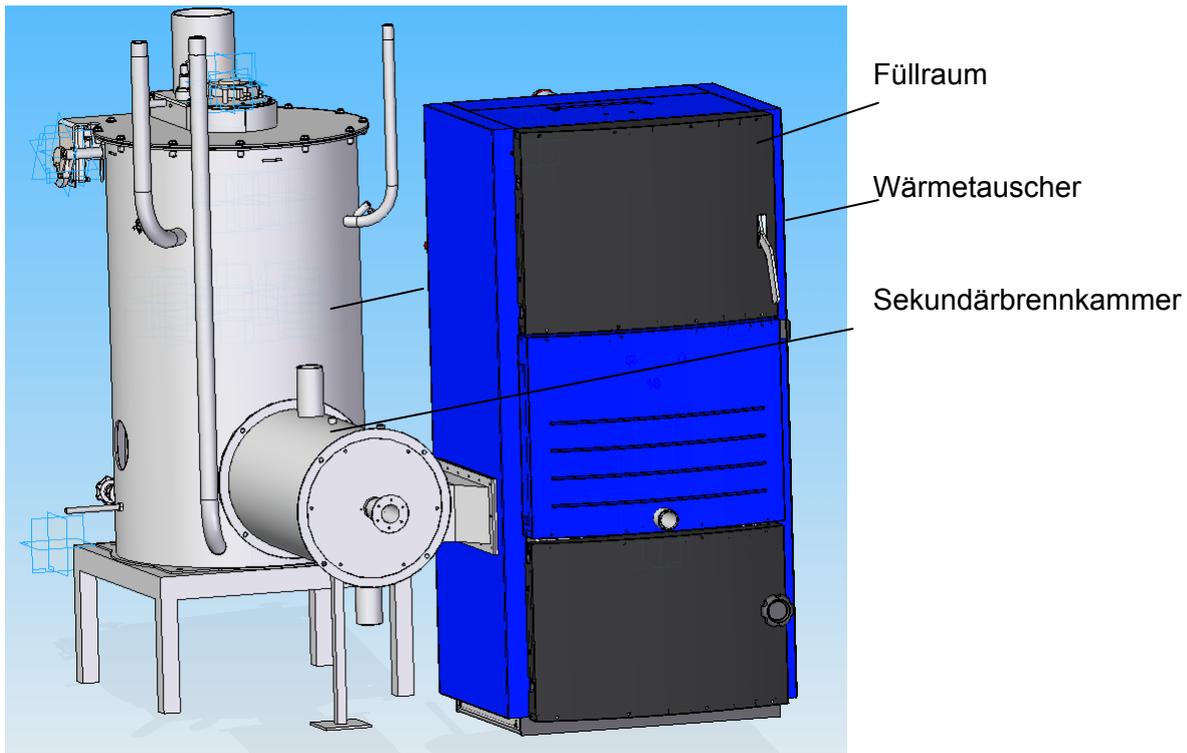


Abbildung 7.1 CAD-Modell des Stückholzmusterkessel

7.2 Versuchsaufbau und Messtechnik

Die verbrennungstechnische Charakterisierung des Stückholzmusterkessels erfolgte auf einem Prüfstand des Instituts für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart. Abbildung 7.2 gibt einen Überblick des Prüfstandaufbaus und der Messstellen. Abgasseitig wurde der Stückholzmusterkessel an einen Kamin angeschlossen. Die Wärmeenergie des Wärmetauschers wurde über den Heizkreisvor- und Rücklauf einer Wärmesenke zugeführt, wobei der Rücklauf über eine Rücklaufanhebung bei konstanten 60°C gehalten wurde und die Temperaturspreizung 20 K betrug. Neben den energetischen Daten des Heizungssystems wurden anlagen- und abgasspezifische Messgrößen kontinuierlich und diskontinuierlich aufgenommen.

Die verwendete Messtechnik und die Prüfgaskonzentrationen sind in Tabelle 7.1 aufgeführt. Bei dem Stückholzmusterkessel wurde eine Verbrennungsregelung mit einem elektronisch angesteuerten Druckgebläse für die Sekundärluft realisiert. Als Sensorik kam ein CarboSen-Sensor der Fa. ESCUBE zur Detektion der oxidierbaren Gase (CO, H₂, VOC) zum Einsatz.

Für die verbrennungstechnische Charakterisierung der Anlage wurde die Einstellung der jeweiligen Verbrennungsluftmenge „manuell“ von Hand durchgeführt, um das Betriebs- und Emissionsverhalten in den einzelnen Verbrennungsphasen darzustellen. In einem weiteren Untersuchungsschritt wurde dann eine „automatische“ Verbrennungsluftregelung in Form einer CO-Kantenregelstrategie umgesetzt.

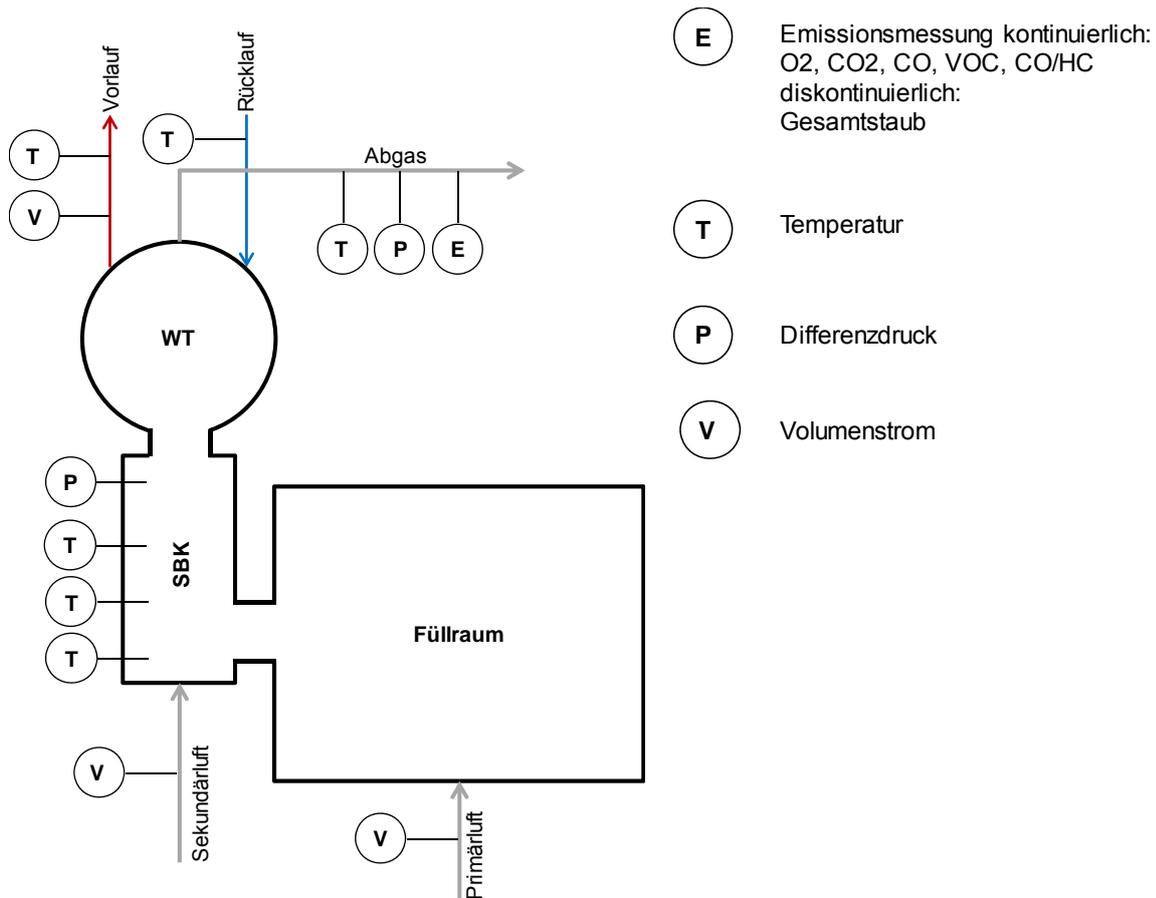


Abbildung 7.2 Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus und der Messstellen an dem Stückholzmusterkessel

Tabelle 7.1 Messgrößen, Messprinzipien und die verwendeten Prüfgaskonzentrationen

Messgröße	Messgerät	Messprinzip	Prüfgas	Messbereich
CO ₂	Binos / Rosemount	nicht dispersive Infrarotabsorption	16,1 Vol%	0-20 Vol%
O ₂	Binos / Rosemount	Paramagnetismus	5,0 Vol%	0-25 Vol%
CO	Binos / Rosemount	nicht dispersive Infrarotabsorption	0,70 Vol%	0-3 Vol%
CO	Binos / Rosemount	nicht dispersive Infrarotabsorption	80,6 ppm	0-1.000 ppm
VOC	FID 123 / Testa	Flammen Ionisation Detektor	80,0 ppm	0-1.000 ppm
Gesamtstaub	Filterkopfgerät / Paul Gothe	Gesamtstaub nach VDI 2066		
Strömungsgeschw.	SS 20.260 / Schmidt	Hitzdraht		0,2-10 m/s
Temperatur	NiCr-Ni / Thermodirekt	Thermospannung		-270 bis 1.372 °C
Druck	Airflow Airflow	pneumatisch elektrisch		0-100 Pa 0-250 Pa

7.3 Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung

Vor Beginn der Messungen wurde der Stückholzmusterkessel mit ca. 5 kg Holz angeheizt. Als Brennstoff kam handelsübliches Buchenholz mit einer Kantenlänge von 33 cm zum Einsatz. Erreichte die CO₂-Konzentration im Abgas einen Wert von 5 Vol% wurde durch Nachlegen einer abgewogenen Holzmenge von ca. 13-15 kg der Versuch gestartet. Der Buchenholzstapel wurde dabei quer zum Übergang in die Sekundärbrennkammer auf dem Rost platziert. Das jeweilige Versuchsende wurde bei einer CO₂-Konzentration im Abgas von ebenfalls 5 Vol% festgesetzt. Der Kaminzug lag konstant bei ca. 20 Pa. Für die verbrennungstechnische Charakterisierung des Stückholzmusterkessels wurden Parameter ausgewählt, welche zum einen die pyrolytische Zersetzung und Vergasung des Kohlenstoffs und zum anderen die in der Gasphase ablaufenden Verbrennungsprozesse prinzipiell beeinflussen. Folgende Einflussfaktoren wurden ausgesucht, um die Betriebsweise des Stückholzmusterkessels zu variieren:

- zugeführte **Primärluftmenge**: Einflussfaktor für pyrolytische Zersetzung des Brennstoffes (freigesetzte Brenngasmenge)
- zugeführte **Sekundärluftmenge, Position und Art der Sekundärluftzuführung**: Einflussfaktor auf die Güte der Verbrennungsqualität.

Sämtliche Verbrennungsversuche - außer mit automatischer Verbrennungsregelung - wurden mit manuell geregelter Verbrennungsluftzufuhr durchgeführt. Dabei wurde versucht, den Restsauerstoffgehalt im Abgas so gering wie möglich zu halten, bei gleichzeitig minimaler CO-Konzentration.

Die kontinuierlich erfassten Größen (Abgaskonzentrationen und Temperaturen) wurden als 10-Sekunden Mittelwerte registriert. Die Staubprobenahmen wurden im Anbrand (ca. 2-3 min nach der Brennstoffaufgabe), während der Hauptverbrennungsphase und im Ausbrand gestartet und jeweils 30 min lang durchgeführt.

Folgende Definitionen wurden für die Unterscheidung der Verbrennungsphasen gemacht:

Anbrand: nach Brennstoffaufgabe bis die Anlage stabil eingeregelt wurde (ca. 5-10 min nach Brennstoffaufgabe)

Hauptverbrennung: Zeitraum zwischen Anbrand und Ausbrand

Ausbrand: ab einer CO-Konzentration von > 200 mg/m³ bis zum Erreichen der Grundglut.

Um die Emissionskonzentrationen zwischen verschiedenen Betriebszuständen vergleichbar zu machen, wurden sie auf einen Bezugssauerstoffgehalt von 13 Vol% bezogen. Die Umrechnung erfolgt nach Formel (2) (siehe Kapitel 6.3).

7.4 Verbrennungstechnische Charakterisierung des Stückholzmusterkessels

Während den Emissionsmessungen an dem Stückholzmusterkessel wurden verschiedene Parameter verändert, um deren Einfluss auf den Verbrennungsprozess zu untersuchen und so das charakteristische Verbrennungsverhalten des Stückholzmusterkessels zu beschreiben.

Grundsätzlich kann die Betriebsweise einer Stückholzfeuerung anhand der Feuerungswärmeleistung und dem Luftüberschuss beschrieben werden. Übergeordnete Qualitätskriterien sind der Wirkungsgrad und die Emissionen der Anlage, welche wiederum von der Betriebsweise abhängig sind.

Bei einer Holzfeuerung werden der Luftüberschuss und damit auch die Verbrennungsqualität über das Verhältnis von Luft- zu Brennstoffzufuhr bestimmt. Obwohl sich die Holzzufuhr einer Stückholzfeuerung nicht kontinuierlich steuern lässt, kann über die getrennte Zuführung von Primär- und Sekundärluft der Holzabbrand in gewissen Bereichen beeinflusst werden. Die Sekundärluft hat Einfluss auf die Verbrennungsqualität (Emissionen), wobei die Primärluftmenge bestimmt, wie viel Holz abgebrannt wird (Wärmeleistung).

7.4.1 Einfluss der Primärluftmenge

Stückholzkessel nach dem heutigen Stand der Technik sind ggf. in der Lage, über die Primärluftmenge ihre Leistung in einem Bereich von etwa 50 % bis 100 % zu modulieren. Bei einer anvisierten Wärmeleistung des Stückholzmusterkessels von 18 kW entspräche das einer minimalen Leistung von 9 kW. Um den Einfluss der Primärluft auf die Entgasungsreaktion und damit auf die Teillastfähigkeit des Stückholzmusterkessels zu untersuchen, wurde die Schrittantwort einer Primärluftreduzierung auf die Wärmeleistung gemessen. Hierzu wurde die Primärluftzufuhr im 10 Minuten Interwall schrittweise reduziert, die Wärmesenke wurde auf 20 kW eingestellt. Abbildung 7.3 zeigt die Reaktion der Verbrennung auf die Reduzierung der Primärluft.

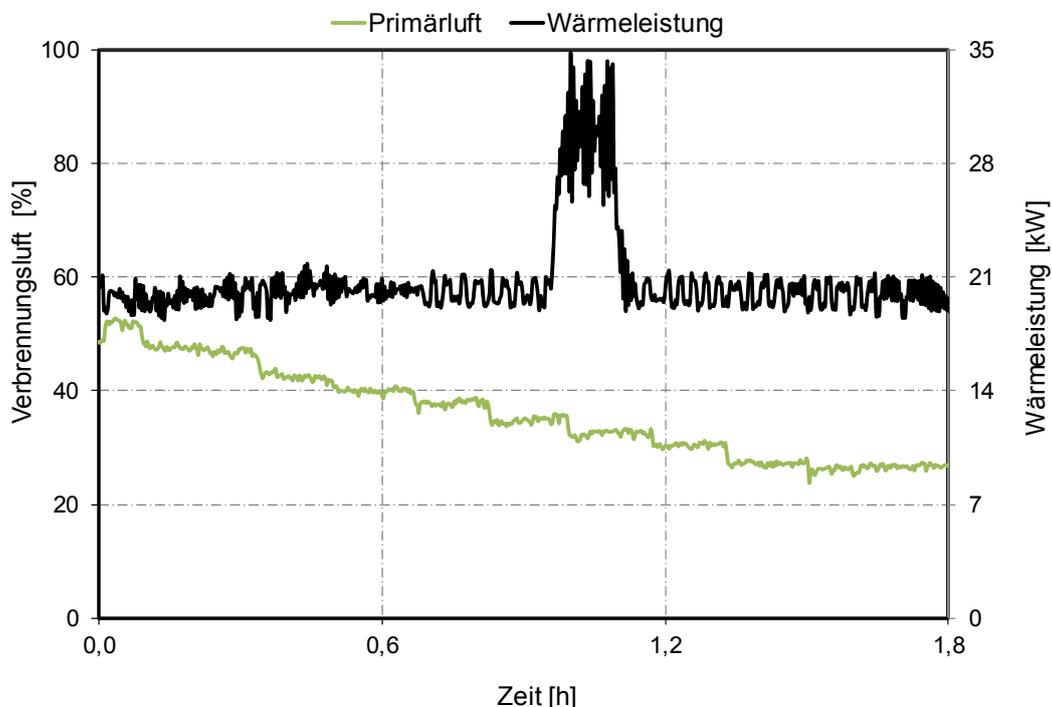


Abbildung 7.3 Reaktion der Wärmeleistung auf ein schrittweises Reduzieren der Primärluftmenge

Dabei konnte kein eindeutiger Zusammenhang der Primärluft auf die Entgasungsreaktion und damit auf die Wärmeleistung festgestellt werden. Obwohl die Primärluft in den ersten 1,5 h um ca. 50 % reduziert wurde, konnte die Wärmeleistung nicht unter 20 kW abgesenkt werden. Ein weiteres Absenken der Primärluft hatte ein Erlöschen der Flamme zur Folge. Nach einer Stunde Versuchszeit musste die Wärmeleistung der Wärmesenke kurzzeitig auf 35 kW hochgesetzt werden, um ein Auslösen der thermischen Ablaufsicherung (Vorlauftemperatur > 95 °C) zu verhindern.

Ursache für dieses Verhalten des Stückholzmusterkessels könnte die Tatsache sein, dass durch den luftdurchströmten Rost und den zum größten Teil wärmegeprägten Füllraum eine extrem heiße Glut erzeugt wird, so dass über dem Glutbett aufgrund der Reaktionswärme eine intensive Vergasung stattfindet, welche durch eine primärseitige Reduzierung des Sauerstoffangebotes nicht steuerbar ist. Durch die Absenkung des Sauerstoffangebots unter ein bestimmtes Niveau wird der Sauerstoff bereits im Glutbett aufgebraucht, so dass die Oxidationsreaktionen ein abruptes Ende finden. Die weitere verbrennungstechnische Charakterisierung des Stückholzmusterkessels wurde bei der kleinsten noch einstellbaren Leistung von ca. 23 kW bis 25 kW durchgeführt.

7.4.2 Ergebnisse der Gasmessungen

Abbildung 7.4 zeigt einen typischen Verlauf eines Abbrandes mit Buchenscheitholz und manueller Primär- und Sekundärluftregelung. Nach der Aufgabe von Brennstoff auf die Grundglut laufen verschiedene physikalische und chemische Prozesse gleichzeitig, allerdings mit unterschiedlicher Intensität ab. Zuerst ist eine Anbrennphase mit geringer CO₂-Konzentration und damit einhergehendem hohem Luftüberschuss erkennbar. Niedrigere Brennkammertemperaturen, eine nur lokal begrenzte Flammenausbildung und örtliche Zersetzungsreaktionen ohne Flammenausbildung führen in dieser Anbrandphase zu erhöhten Kohlenwasserstoff-, Partikel- und Kohlenmonoxidemissionen. In der Anbrennphase hat eine optimierte Durchmischung in der Sekundärbrennkammer nur einen geringen Einfluss, da hier die Temperatur für ein schnelles Durchzünden der schon freigesetzten Entgasungsprodukte fehlt. Die Zugabe großer Mengen von Sekundärluft ist in dieser Verbrennungsphase kontraproduktiv, da diese ein Kühlen der noch nicht gezündeten Entgasungsprodukte bewirkt. Für die Dauer und Höhe der Emissionen in der Anbrennphase sind ebenfalls die Grundglutmenge (diese bestimmt auch die momentane Temperatur im Füllraum) und die aufgelegte Brennstoffmasse (sowie die Stückgrößen des aufgelegten Brennstoffs) von großer Bedeutung. Bei einem guten Kontakt des Brennstoffes mit dem Glutbett und ausreichend großer Glutmenge kann ein schnelles Durchzünden erfolgen. Diese Varianz ist auch in den Mittelwerten der Kohlenmonoxidemissionen für den Anbrand in Tabelle 7.2 zu erkennen.

Im Anschluss an den Anbrand geht die Verbrennung in die stabile Hauptverbrennungsphase über (Abbildung 7.4), dabei steigen die Verbrennungstemperaturen in der Sekundärbrennkammer rasch an. Während der Hauptverbrennungsphase wurde die Primärluft relativ konstant gehalten, die Sekundärluft wurde je nach Entgasungsmenge angepasst (siehe Abbildung 7.5).

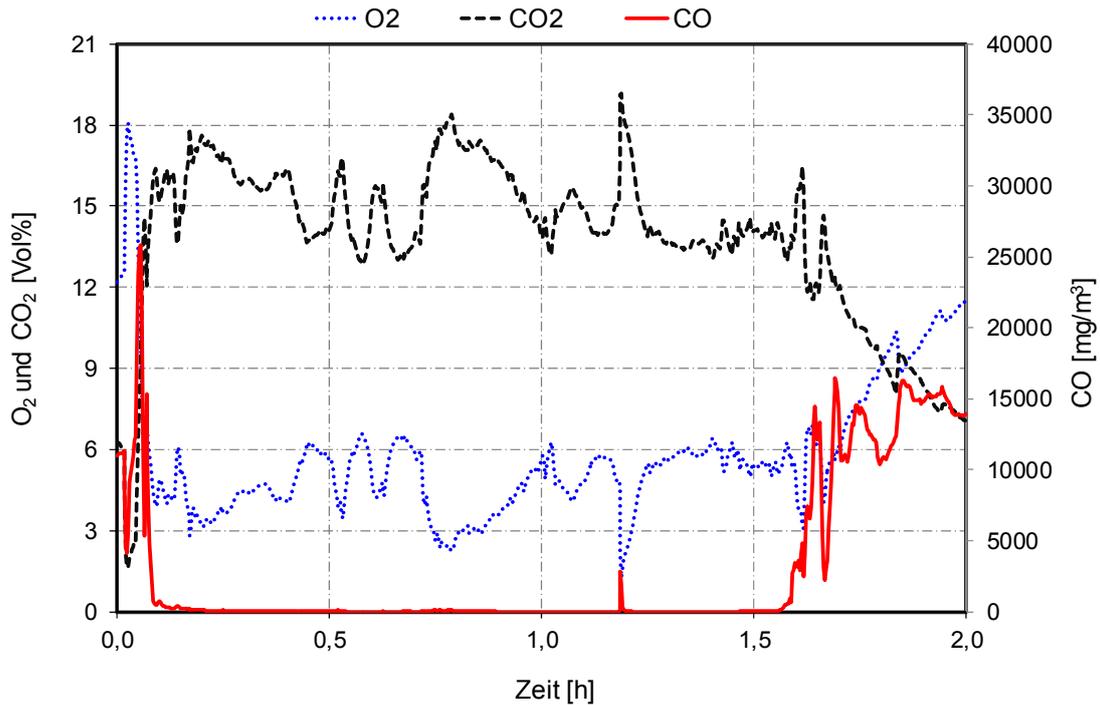


Abbildung 7.4 Zeitlicher Verlauf der Abgaskonzentrationen eines Abbrandes mit Anbrand-, Hauptverbrennungs- und Ausbrandphase beim Stückholzmusterkessel

Tabelle 7.2 Mittelwerte von Abbrandversuchen mit dem Stückholzmusterkessel

Abbrandversuche mit Holz						Gesamtabbrand	
	O ₂ Vol%	CO ₂ Vol%	CO * mg/m ³	VOC * mgC/m ³	Dauer h	WL kW	Holz kg
Anbrand	3,2	17,2	2.525	-	0,3		
Hauptverbrennung	4,5	15,8	23	-	1,7	>20	15
Ausbrand	7,7	12,4	1.139	-	0,9		
Anbrand	11,8	7,4	10.397	-	0,2		
Hauptverbrennung	5,3	15,0	23	-	1,7	25	14
Ausbrand	12,0	8,0	2.556	-	0,4		
Anbrand	7,2	11,9	23.038	-	0,2		
Hauptverbrennung	4,5	15,8	39	-	1,4	22	13,5
Ausbrand	8,4	11,6	1796		0,7		
Anbrand	4,1	16,0	1.535	493	0,2		
Hauptverbrennung	5,5	14,8	15	3	1,5	23	15
Ausbrand	7,5	12,4	4.219	152	0,8		

* Angaben bezogen auf 13 Vol% O₂
 grün optimale Einstellung für den Kessel
 WL Wärmeleistung

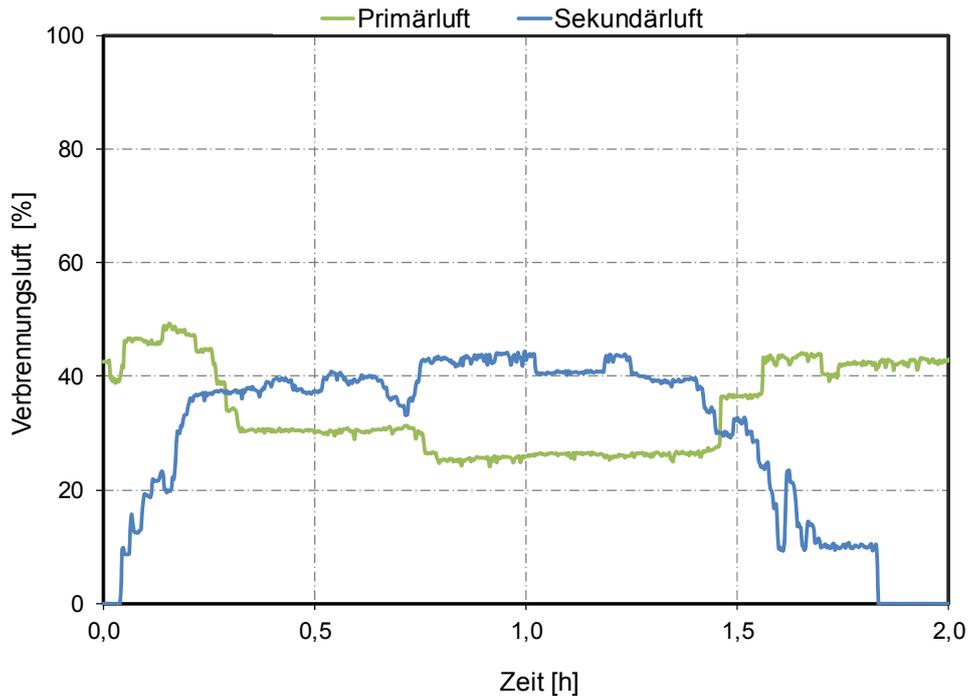


Abbildung 7.5 Zeitlicher Verlauf der zugeführten Verbrennungsluft während eines Abbrandes mit Anbrand-, Hauptverbrennungs- und Ausbrandphase

Ab ca. 800 °C in der Sekundärbrennkammermitte (siehe Abbildung 7.6) ist die Temperatur ausreichend hoch, um durch die Zugabe von Sekundärluft und der optimalen Vermischung der Reaktionspartner in der Sekundärbrennkammer eine sehr emissionsarme Verbrennung zu realisieren. In dieser Hauptverbrennungsphase betragen die Mittelwerte der Kohlenmonoxidemissionen niedrige 23 mg/m³ bis 39 mg/m³ (vgl. Tabelle 7.2 Mittelwerte von Abbrandversuchen mit dem Stückholzmuster). Aufgrund der optimierten Durchmischung in der Sekundärbrennkammer kann die Verbrennung bei einem sehr geringen Luftüberschuss und bei stabilen Bedingungen stattfinden. Noch niedrigere Emissionswerte werden bei optimaler Einstellung des Kessels erreicht (ausführlicher beschrieben in Kapitel 7.4.3), der Mittelwert der CO-Konzentration beträgt dann nur noch 15 mg/m³, die Kohlenwasserstoffkonzentration (VOC) liegt bei 3 mg/m³ (vgl. Tabelle 7.2 Mittelwerte von Abbrandversuchen mit dem Stückholzmuster). Im optimalen Einstellpunkt des Stückholzmusterkessels wurden auch die Partikelmessungen durchgeführt (vgl. Kapitel 7.4.4).

Gegen Abbrandende steigt die CO-Konzentration wieder an. Bei der Verbrennung von Holz erfolgt dies innerhalb kürzester Zeit (siehe auch Abbildung 7.4). Hierbei geht die Verbrennung von einer Gasphasenverbrennung in die Feststoffverbrennung der Holzkohle über und es stellt sich nach Boudouard ein temperaturabhängiges Gleichgewicht zwischen CO₂ und CO ein (vgl. Abbildung 7.7). Durch erhöhen der Temperaturen im Glutbett verschiebt sich das Gleichgewicht in Richtung CO, welches allerdings auf Grund zu geringer Temperaturen im Feuerraum nicht mehr zündet bzw. nicht mehr zu CO₂ oxidieren kann. Daher lassen sich die CO-Emissionen bei Abbrandende nur durch Sekundärmaßnahmen, wie z.B. durch den Einsatz eines Oxidationskatalysators, reduzieren. Eine Verbrennungsregelung oder eine optimierte Luftführung kann gegen Abbrandende keinen Einfluss auf die CO-Emissionen mehr nehmen.

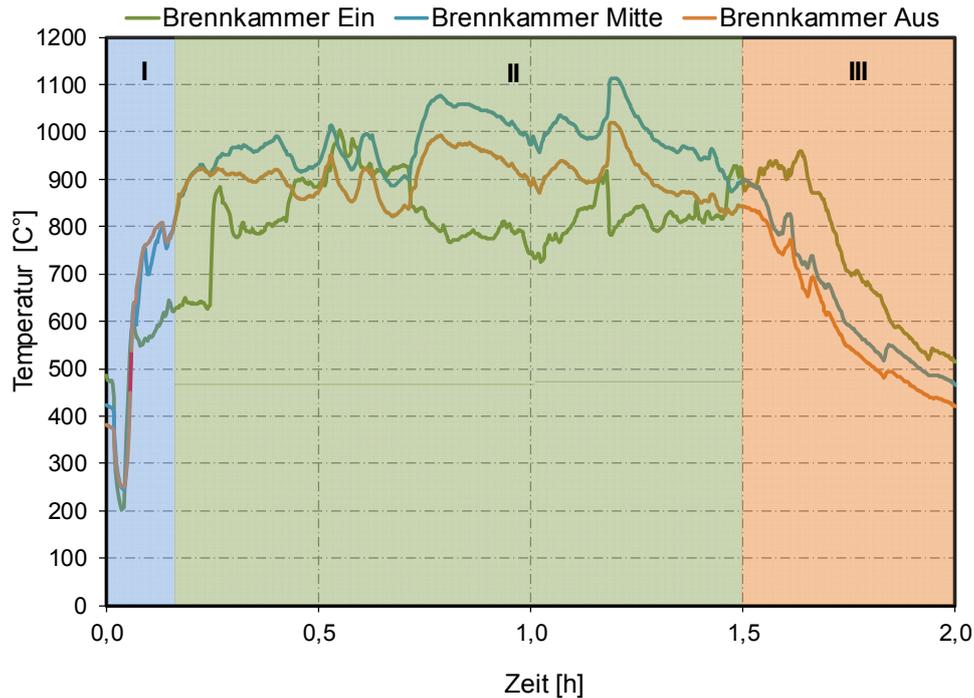


Abbildung 7.6 Zeitlicher Verlauf der Temperaturen in der Sekundärbrennkammer während der Anbrand- (I), Hauptverbrennungs- (II) und Ausbrandphase (III)

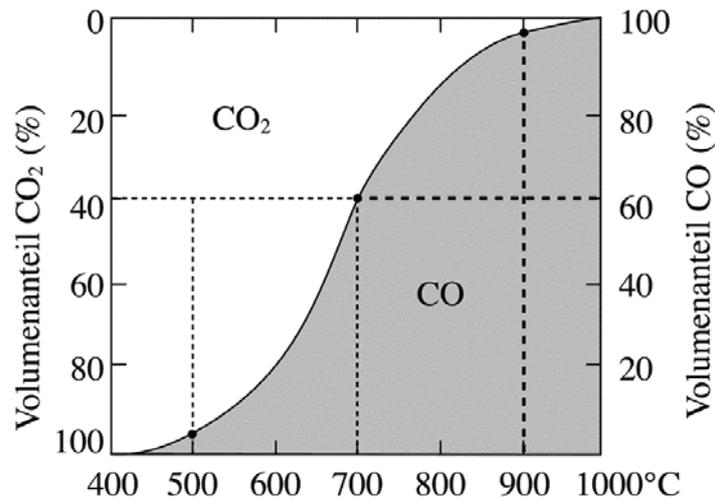


Abbildung 7.7 Boudouard-Gleichgewicht [Gerthsen, 2006]

Obwohl dem Stückholzmusterkessel in der Ausbrandphase immer die gleiche Menge Primärluft zugeführt wurde, sind die Mittelwerte der CO-Konzentrationen doch unterschiedlich hoch. Dabei wurde die Beobachtung gemacht, dass am Abbrandende noch Brennstoffstücke übrig bleiben, die thermisch noch nicht vollständig zersetzt wurden. Diese Brennstoffreste zersetzen sich thermisch während der Ausbrandphase noch weiter, werden aber aufgrund des geringen Brennstoffumsatzes und der geringeren Sekundärbrennkammertemperatur nicht vollständig oxidiert. Liegen diese Brennstoffreste mittig oder nahe der rechten Füllraumwand sind die Emissionen höher, liegen sie dagegen direkt vor dem Übergang in die Sekundärbrennkammer, kann die relativ kurze Flamme noch in die Sekundärbrennkammer gelangen, was wiederum geringere CO-Emissionen zu Folge hat.

7.4.3 Einfluss der Sekundärluftmenge

Das Konzept eines extrem emissionsarmen Stückholzkessels wurde basierend auf dem Grundgedanken entwickelt, die Vermischung der Entgasungsprodukte mit der zugeführten Sekundärluft in der Sekundärbrennkammer zu optimieren. Dabei soll die Sekundärluft die Vermischung aktiv unterstützen. Um die Wirkung der Sekundärluft zu überprüfen wurde diese soweit reduziert, bis aufgrund eines Sauerstoffmangels ein deutlicher Anstieg der CO-Konzentrationen erfolgte (Detektion der CO-Kante).

Des Weiteren wurde der Einfluss der Sekundärluftposition auf die Verbrennung innerhalb der Brennkammer untersucht. Abschließend wurde die Wirkung der optimierten Sekundärluftzuführung auf die Verbrennungsqualität selbst untersucht, hierzu wurden Versuche mit und ohne optimierte Sekundärluftzuführung durchgeführt.

Die CO/O₂-Charakteristik in Abbildung 7.8 zeigt den Einfluss des Luftüberschusses auf die Vollständigkeit der Verbrennung beim Stückholzmusterkessel während der Hauptverbrennungsphase. Die Verbrennung in der Sekundärbrennkammer erreicht über einen breiten Luftüberschussbereich (O₂ < 7 Vol% bis O₂ > 2,5 Vol%) konstant niedrige Emissionswerte und damit eine annähernd vollständige Verbrennung. Die Tatsache, dass die vollständige Verbrennung auch bei sehr niedrigem Luftüberschuss realisiert werden konnte (O₂ im Abgas ~ 2,5 Vol%), kann als Beleg für die sehr gute Vermischungsqualität der Sekundärluft mit den brennbaren Gasen herangezogen werden. Um einen guten Wirkungsgrad zu erreichen, aber auch einen gewissen Puffer in Richtung der CO-Kante zu haben, wird der optimale Betriebspunkt des Stückholzmusterkessels bei 3,5 - 4,5 Vol% O₂ im Abgas gesehen. Unterhalb von 2,5 Vol% O₂ treten in der Sekundärbrennkammer mehr oder weniger ausgeprägte Zonen mit Sauerstoffmangel auf, wodurch die Konzentrationen von Produkten unvollständiger Verbrennung im Abgas zunehmen.

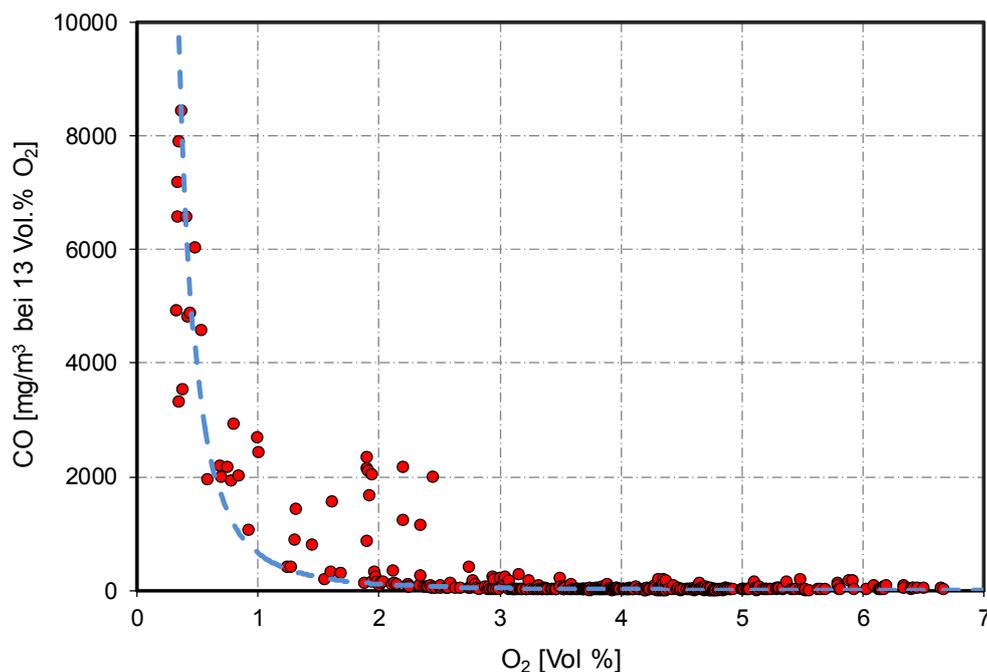


Abbildung 7.8 Abhängigkeit der Kohlenmonoxidkonzentration vom Rest-O₂ im Abgas während der Hauptverbrennungsphase beim Stückholzmusterkessel

Die Position und damit auch der Zeitpunkt des Zusammentreffens der Sekundärluft mit den brennbaren Gasen aus der Primärkammer haben einen Einfluss auf die Vollständigkeit der Verbrennung. Erfolgt die Einmischung der Sekundärluft zu spät, hat sich die Verbrennung bereits etwas abgekühlt oder die Verweilzeit der Reaktionspartner reicht für eine gute Durchmischung in der Brennkammer nicht mehr aus.

Daher erfolgt die Zumischung der Sekundärluft bei Stückholzkesseln nach dem Stand der Technik direkt in der Flammenwurzel. Eine Sekundärluftzuführung direkt in die Sekundärbrennkammer hat daher Innovationscharakter. Um den Einfluss der Sekundärluftposition untersuchen zu können, wurden Versuche mit unterschiedlichen Sekundärluftpositionen durchgeführt. Die drei untersuchten Sekundärluftpositionen sind in Tabelle 7.3 dargestellt.

Tabelle 7.3 **Untersuchte Sekundärluftpositionen innerhalb der Sekundärbrennkammer**



Tabelle 7.4 zeigt die Ergebnisse zum Einfluss der Sekundärluftposition auf die mittleren Gaskonzentrationen während der Hauptverbrennungsphase beim Stückholzmusterkessel. Mit Sekundärluftposition 2 wurden die besten Verbrennungswerte erreicht, die mittlere CO-Konzentration beträgt hier nur noch 15 mg/m³.

Tabelle 7.4 **Einfluss der Sekundärluftposition auf die Gaskonzentrationen während der Hauptverbrennungsphase beim Stückholzmusterkessel**

Abbrandversuche mit Holz	Gesamtabbrand					
	O ₂ Vol%	CO ₂ Vol%	CO * mg/m ³	Dauer h	WL kW	Holz kg
Hauptverbrennung SL-Position 1	4,9	15,4	43	1,6	23	14,9
Hauptverbrennung SL-Position 2	4,8	15,5	15	1,4	23	13,2
Hauptverbrennung SL-Position 3	4,5	15,8	39	1,4	22	13,5

* Angaben bezogen auf 13 Vol% O₂

WL Wärmeleistung

Durch die optimierte Sekundärluftzuführung wird die Durchmischung der Verbrennungsluft mit brennbaren Gasen in der Sekundärbrennkammer unterstützt. Um die Wirksamkeit dieser Maßnahme zu überprüfen, wurden Versuche mit und ohne optimierte Sekundärluftzuführung durchgeführt. Die Ergebnisse bestätigen, dass die Durchmischung der Brenngase mit der

Sekundärluft positiv unterstützt wird. Der Mittelwert der CO-Konzentration während der Hauptverbrennungsphase ist ohne optimierte Zuführung ca. 4-fach höher (siehe Abbildung 7.9).

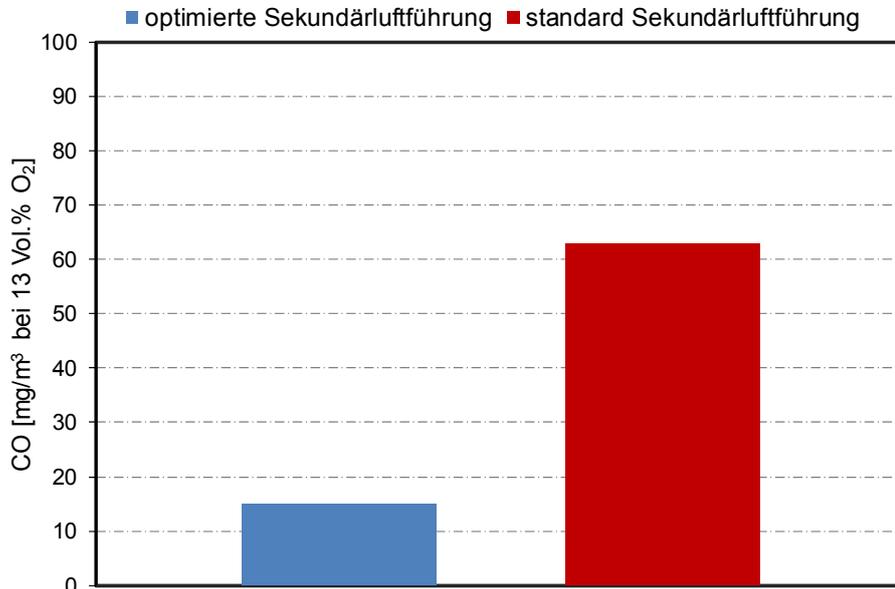


Abbildung 7.9 CO-Konzentration mit und ohne optimierter Sekundärluftzuführung während der Hauptverbrennungsphase beim Stückholzmusterkessel

7.4.4 Ergebnisse der Partikelmessungen

Für die gravimetrische Staubmessung wurde ein Teil des Abgasstroms isokinetisch über eine Sonde abgesaugt und über einen Quarzfaserfilter geleitet. Nach der Messung wird die Sonde bis zum Quarzfilter mit einem Isopropanol / Aceton-Gemisch gespült, um Ablagerungen in der Sonde mit zu erfassen. Diese Spülung wird anschließend eingedampft und ausgewogen. Aus der Gewichtszunahme des Filters, dem Gewicht der Spülung und dem abgesaugten Volumenstrom bei der Messung wird der Staubgehalt im Abgas bestimmt. Dieses Messverfahren entspricht der VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 [VDI-Richtlinie 2066, 2006].

Bei der Verbrennung von Holz kommt es zu verschiedenen Partikelbildungsmechanismen, welche in Abhängigkeit von den Verbrennungsbedingungen unterschiedlich stark zu den Gesamtstaubemissionen beitragen. Der Fest-Dampf-Partikel-Pfad ist hierbei der wichtigste Bildungsmechanismus. Hierbei verdampfen die Komponenten im Glutbett ($> 600\text{ °C}$) und bilden bei der Temperaturabnahme im Abgas, über Nukleation, Koagulation und heterogene Kondensation Partikel. Bei den so entstandenen Partikeln handelt es sich um anorganische Salze, im Größenbereich von $0,1\text{ }\mu\text{m}$ ($=100\text{ nm}$), hauptsächlich um Kaliumverbindungen wie K_2SO_4 und KCl .

Läuft die Verbrennung unvollständig ab, werden zusätzlich Kohlenstoff-Partikel mit dem Abgas emittiert, die bei der pyrolytischen Zersetzung freigesetzt und anschließend nicht vollständig oxidiert wurden (z.B. Teere und Ruß). Die anorganischen Salze, welche auf dem Fest-Dampf-Partikel-Pfad entstehen bilden daher eine Grundfracht an Partikeln die auch bei einer annähernd vollständigen Verbrennung immer emittiert wird. Allerdings kann auch die Verdampfung der anorganischen Holzkomponenten aus dem Fest-Dampf-Partikel-Pfad be-

einflusst werden. Einen Einfluss auf die Verdampfung hat die Menge zugeführter Primärluft bzw. des zugeführten Sauerstoffs in das Glutbett [Nussbaumer, 2003]. Hohe Sauerstoffkonzentrationen im Glutbett können zudem zu örtlich höheren Temperaturen führen und damit den Verdampfungsprozess begünstigen.

In Tabelle 7.5 sind die Ergebnisse der Partikelmessungen für die einzelnen Verbrennungsphasen Anbrand, Hauptverbrennung und Ausbrand aufgelistet. Die Probenahmedauer betrug jeweils 30 min, wobei die Probenahme im Anbrand ca. 2 min nach Brennstoffauflage gestartet wurde. Auffällig ist, dass die Partikelemissionen in der ersten halben Stunde nach Brennstoffauflage (Anbrandphase) mit $9,6 \text{ mg/m}^3$ bzw. $10,5 \text{ mg/m}^3$ (bei 13 Vol% O_2) am geringsten sind. Mit $12,8$ und $12,0 \text{ mg/m}^3$ (bei 13 Vol% O_2) während der stabilen Hauptverbrennungsphase steigen die Partikelemissionen etwas an. Die höchsten Partikelemissionen wurden während der Ausbrandphase gemessen. Außerdem unterscheiden sich die zwei ermittelten Partikelkonzentrationen im Ausbrand mit $22,4 \text{ mg/m}^3$ und $37,3 \text{ mg/m}^3$ (bei 13 Vol% O_2) relativ stark.

Nach aktuellem Erkenntnisstand wäre zu erwarten gewesen, dass die höchsten Partikelemissionen in der Anbrandphase, aufgrund der teilweise noch unvollständigen Verbrennung und der damit verbundenen Entstehung von Kohlenstoffpartikeln, auftreten. In der darauffolgenden Hauptverbrennungsphase wären dann geringere und beim reinen Holzkohleabbrand in der Ausbrandphase sehr geringe Partikelkonzentrationen zu erwarten gewesen. Die Tatsache, dass bei dem vorliegenden Stückholzmusterkessel die Primärluft vollflächig und gleichmäßig durch das Glutbett geführt wird, sorgt für ein hohes Sauerstoffangebot und entsprechend hohen Temperaturen im Glutbett. Daher dürfte der beschriebene Fest-Dampf-Partikel-Pfad der anorganischen Salze die dominierende Partikelquelle des Stückholzmusterkessels sein. Dies würde auch die niedrigen Partikelemissionen in der Anbrandphase erklären. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich nur wenig Glut auf dem Feuerungsrost und die Glutbetttemperaturen sind durch das frisch aufgelegt Holz abgesunken, so dass weniger anorganische Salze wie Kalium- und Calciumverbindungen in leicht flüchtige Verbindungen umgewandelt werden. In der Anbrandphase trägt auch die Bildung von organischen Kohlenstoff-Partikeln einen gewissen Anteil zur Gesamtstaubmasse mit bei, wie die schwarze Färbung des Filtermaterials in Tabelle 7.5 erkennen lässt.

In der stationären Hauptverbrennungsphase hat sich ein hochreaktives und mehrere Zentimeter hohes Glutbett aufgebaut. Die Partikelemissionen in dieser Phase der vollständigen Verbrennung bestehen hauptsächlich aus kondensierten anorganischen Verbindungen. Auch der ockerfarbene Quarzfilter der Ausbrandphase deutet darauf hin, dass die Partikelemissionen definitiv nicht aus unverbrannten Bestandteilen herrühren.

Während des Ausbrands ist das Glutbett am höchsten, zudem wurde die Primärluftmenge erhöht (siehe Abbildung 7.5), um diese Phase möglichst kurz zu halten. Dies sorgt für eine erhöhte Verdampfungsrate anorganischer Partikel und erklärt, warum die Partikelkonzentrationen in dieser Phase der Verbrennung des Stückholzmusterkessels am höchsten sind.

Tabelle 7.5 Partikelkonzentrationen während der jeweiligen Verbrennungsphasen zweier Abbrände beim Stückholzmusterkessel

Verbrennungsphase	O ₂ Vol%	CO ₂ Vol%	CO * mg/m ³	Partikel * mg/m ³	Dauer min	Quarzfilter der 2. Staubprobenahme
1. Anbrand	3,8	16,5	82	10,5	30	
2. Anbrand	4,2	16,0	312	9,6	30	
1. Hauptverbrennung	4,8	15,5	22	12,8	30	
2. Hauptverbrennung	4,4	15,9	8	12,0	30	
1. Ausbrand	7,9	12,1	3531	22,4	30	
2. Ausbrand	7,4	11,8	7583	37,3	30	

* Angaben bezogen auf 13 Vol% O₂

7.4.5 Einfluss der Verbrennungsregelung

Bei modernen Stückholzkesseln nach dem Stand der Technik kommt als Verbrennungsregelung in der Regel eine Lambda-Regelung zum Einsatz, wobei die Messung des Luftüberschusses mittels einer Lambda-Sonde erfolgt. Der Luftüberschuss wird dabei über die Verbrennungsluftmenge (Primär- und Sekundärluftmenge) auf einen fest eingestellten Sollwert (Leistungsabhängig) geregelt. Um Luftmangelsituationen zu vermeiden, muss der Sollwert in der Praxis eher zu hoch bemessen werden. Dadurch wird eine Einbuße beim Wirkungsgrad in Kauf genommen. Da der Luftüberschuss im Abgas keinen direkten Aufschluss auf die Güte der Verbrennung gibt, bleiben Phasen unvollständiger Verbrennung, z.B. hervorgerufen durch schwankende Brennstoffqualitäten oder sich verändernde Bedingungen im Feuerraum, unberücksichtigt.

Bei der umgesetzten CO-Kantenregelung wird die Summe der unverbrannten Bestandteile des Abgases von einem Sensor vom Typ CarboSen der Firma Escube erfasst. Das Signal erlaubt einen direkten Rückschluss auf die Güte der Verbrennung. Besteht ein Luftüberschuss und wird die Verbrennungsluftmenge kontinuierlich über das geregelte Sekundärluftgebläse reduziert, bis der Übergang von vollständiger zu unvollständiger Verbrennung durch einen exponentiellen Anstieg der unverbrannten Abgasbestandteile sichtbar wird (siehe Abbildung 7.10). Anschließend muss die Regelung wieder einen Schritt aus diesem Bereich herausfahren, so dass sich die Verbrennung wieder im optimalen Arbeitspunkt (geringe CO-Konzentration bei gleichzeitig hohem Wirkungsgrad) befindet (gekennzeichnet durch die senkrechte gestrichelte Linie). Das in diesem Fall für Holzfeuerungen umgesetzte Regelkonzept ist basierend auf einer parameterfreien Statistik und wurde für den Einsatz an einem Pelletofen getestet [Diez, 2011].

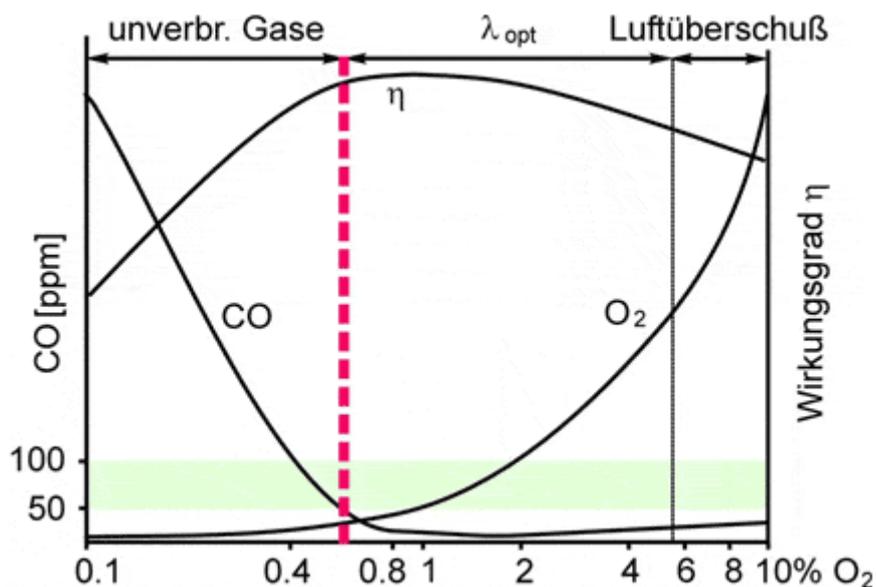


Abbildung 7.10 Zusammenhang zwischen Emissionskante, Luftüberschuss und Wirkungsgrad [Hammer et al., 2008]

Die CO-Kantenregelstrategie wurde während der Hauptverbrennungsphase am Stückholzmusterkessel getestet. In Abbildung 7.11 ist der zeitliche Verlauf der gemessenen Gaskonzentrationen im Abgas mit Regelung dargestellt. Dabei wurde die Sekundärluft aus einem gewissen Luftüberschuss heraus bis zum Erreichen der Emissionskante reduziert. Die Emissionskante liegt bei ca. 2,5 Vol% O₂ (siehe Kapitel 7.4.3).

Da das Regelkonzept noch relativ träge eingestellt war, konnte ein weiteres Absinken des Luftüberschusses nicht verhindert werden, so dass sich die Verbrennung im absoluten Luftmangel befand und kein Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung stand, was mit einem starken CO-Anstieg verbunden war.

Das Messprinzip des CarboSen-Sensors beruht auf der Festkörperelektrolyse und arbeitet nach dem Nicht-Nernstschen Prinzip, wobei Sauerstoff im Abgas nötig ist um ein Messsignal erzeugen zu können. Befindet sich die Verbrennung im Luftmangel (O₂ im Abgas < 1 Vol%), geht das Sensorsignal auf den Wert Null zurück. Der Regelalgorithmus geht nun fälschli-

cherweise von sehr guten Verbrennungswerten aus, so dass eine weitere Reduzierung der Sekundärluft erfolgt. Hier wurde die Regelung abgebrochen und der Luftüberschuss manuell erhöht. In dem dargestellten Messzeitraum wurde die Emissionskante insgesamt sechsmal angefahren, viermal davon musste der Regelvorgang aufgrund absoluten Luftmangels unterbrochen werden. Dies verdeutlicht, dass für eine funktionierende CO-Kantenregelstrategie am Stückholzmusterkessel mit dem CarboSen-Sensor eine zweite Messgröße, wie z.B. der Sauerstoffgehalt im Abgas, oder andere Maßnahmen (z.B. Anpassung des Regelalgorithmus) notwendig sind.

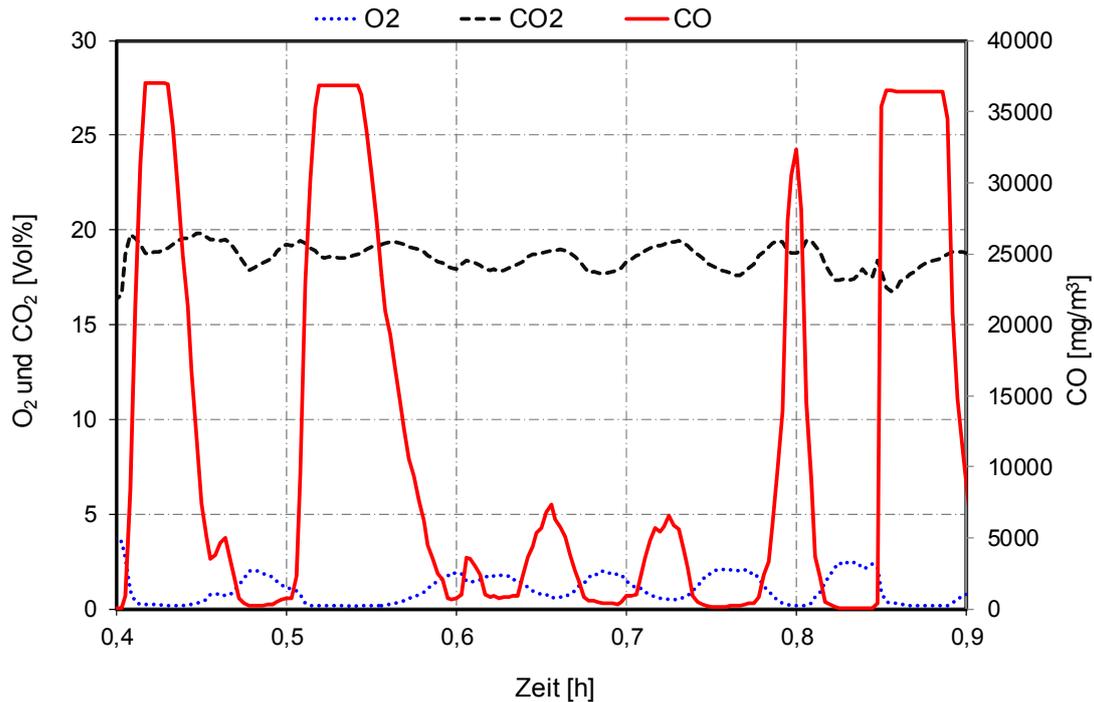


Abbildung 7.11 Zeitlicher Verlauf der gemessenen Emissionen beim Einsatz der CO-Kantenregelstrategie mit CarboSen-Sensor als Messglied

Um die Regelstrategie trotzdem anwenden zu können, wurde als Regelgröße das Signal des CO-Analysators verwendet. Das Ergebnis ist in Abbildung 7.12 zu sehen. Die Regelung ist nun in der Lage, die CO-Kante sicher zu erkennen und auch wieder aus ihr herauszufahren. Allerdings ist die Regelung noch nicht in der Lage die Verbrennung konstant im optimalen Arbeitspunkt zu halten, so dass die gemessenen Emissionen noch stärker schwingen. Für einen vollkommen automatisierten Regelungsbetrieb mit konstant niedrigen Emissionen muss der Regelalgorithmus noch weiter optimiert werden und auch in der Lage sein, die Anbrand- und Ausbrandphasen, sowie Teillastzustände sicher und Emissionsarm regeln zu können.

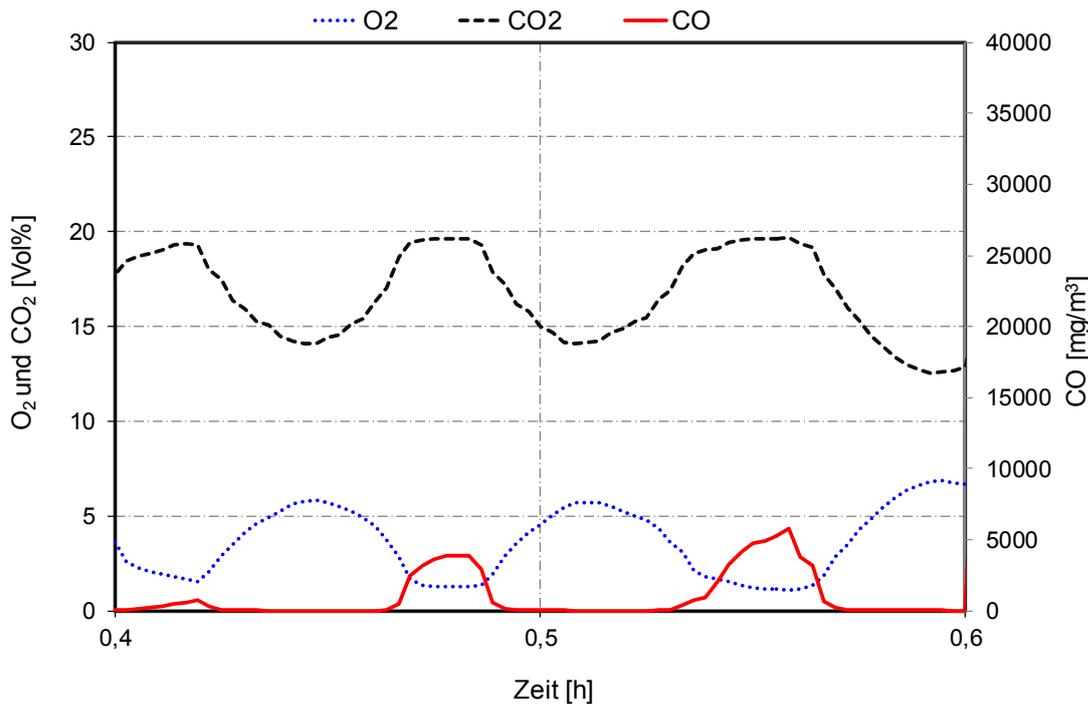


Abbildung 7.12 Zeitlicher Verlauf der gemessenen Emissionen beim Einsatz der CO-Kantenregelstrategie mit CO-Gasanalysator als Messglied

Die vom IFK hier erstmals an einem Stückholzkessel untersuchte CO-Kantenregelstrategie unter Einsatz eines CarboSen-Sensors verfolgt einen völlig anderen Ansatz, als das vom Projektpartner ISIS propagierte Regelkonzept. Die wesentlichen Unterschiede sind, dass es sich bei der CO-Kantenregelung um einen geschlossenen Regelkreis handelt sowie keine Absolutwerte des CarboSen-Sensors und keine umfangreichen Parameterstudien zur Anpassung von Kenngrößen notwendig sind. Allerdings zeigen diese ersten Versuche, dass der Regelalgorithmus für die CO-Kantenregelung noch verbessert und ggf. eine zweite Messgröße für ein sicheres Betriebsverhalten des Reglers notwendig sein könnte.

7.4.6 Schlussfolgerungen

An dem entwickelten Stückholzmusterkessel wurden im Bereich der Entgasungszone (Füllraum) und der Nachverbrennungszone (Sekundärbrennkammer) Primärmaßnahmen umgesetzt, um den Schadstoffausstoß solcher Anlagen im stationärem Dauerbetrieb, aber auch im praxisnahen Betrieb deutlich zu senken. Durch die homogene Primärluftverteilung konnte eine sehr gleichmäßige Entgasung des Holzes erreicht werden. Hohlbrände, wie sie bei marktüblichen Anlagen oft auftreten, konnten nicht beobachtet werden. Ein modulierender Betrieb und das Einstellen von Teillastzuständen waren mit dieser Primärluftführung allerdings nicht möglich. Es konnte keine Korrelation zwischen der Entgasungsmenge (Leistung) und der Primärluft festgestellt werden.

In der Anbrand- und insbesondere in der Ausbrandphase kommt es aufgrund der physikalischen Grenzen bei der thermochemischen Umwandlung von Holz zu erhöhten Emissionen, die sich durch Primärmaßnahmen kaum beeinflussen lassen. Zumindest beim Anbrand konnte ein schnelles Durchzünden erreicht werden, so dass die Anlage schnell in die stationäre Hauptverbrennungsphase übergeht. In der Anbrandphase gibt es bedingt beeinflussba-

re Faktoren, wie die aufgegebene Holzmenge, oder die Morphologie der Holzstücke und deren Kontakt zur Grundglut, welche die Anbranddauer beeinflussen. Durch ein heißes Glutbett und die optimale Menge Primärluft kann diese Phase aber auf ein Minimum reduziert werden.

Der Anstieg der CO-Konzentrationen im Ausbrand, nach dem Übergang von den Gasphasenreaktionen zu den Gas-Feststoff-Reaktionen des Holzkohleabbrandes, kann durch primärseitige Maßnahmen nur wenig beeinflusst werden. Mit einem kompakten, am Übergang zur Nachbrennkammer konzentrierten Glutbett kann die Emissionshöhe allerdings begrenzt werden. Die Schadstoffemissionen im Ausbrand lassen sich allerdings nur durch Sekundärmaßnahmen weitgehend reduzieren.

Die Ergebnisse des handgeregelten Stückholzmusterkessels mit dem umgesetzten Konzept eines neuen Feuerungsrostes und einer Sekundärbrennkammer mit optimierter Vermischung haben gezeigt, dass in der stationären Hauptverbrennungsphase sehr niedrige Emissionswerte bei den gasförmigen Abgaskomponenten erreicht werden. Obwohl der Bildungsmechanismus anorganischer Staubpartikel bei der vorliegenden Rostkonstruktion (sauerstoffreiches und heißes Glutbett) eher begünstigt wird, liegen die partikelförmigen Emissionen auf einem sehr niedrigen Niveau. Die vorgeschriebenen Grenzwerte der 1. BImSchV für die 2. Stufe für Kohlenstoffmonoxid und Staub konnten deutlich unterschritten bzw. klar eingehalten werden.

Die ambitionierten Emissionszielwerte (siehe Tabelle 1) wurden im stationären Dauerbetrieb (Wärmeleistung ca. 22-25 kW) für CO und VOC erreicht. Die Emissionsziele bezüglich der partikelförmigen Emissionen wurden nicht ganz erreicht. Gegenüber den Prüfstandsmittelwerten von Stückholzkesseln nach dem Stand der Technik konnten die Emissionen aber deutlich abgesenkt werden (Abbildung 7.13).

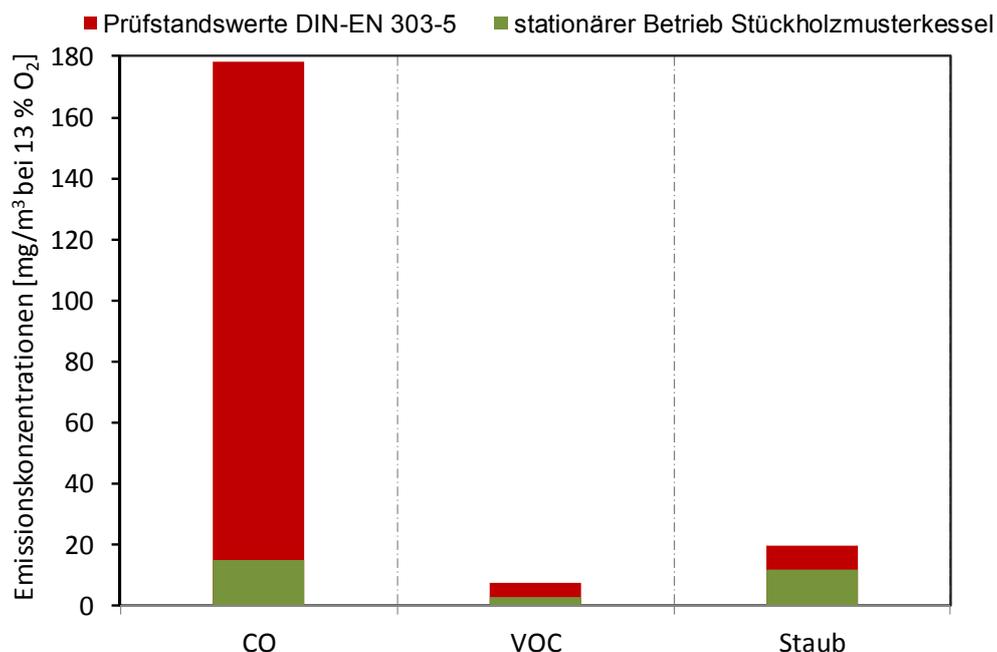


Abbildung 7.13 Vergleich der Emissionskonzentrationen von gemittelten Prüfstandswerten nach dem Stand der Technik (siehe Tabelle 4.3) mit dem Stückholzmusterkessel

Die gesetzten Emissionsziele eines simulierten Praxisbetriebs des Stückholzmusterkessels konnten aufgrund der nicht möglichen Leistungsmodellierung nicht verifiziert werden.

Durch den Einsatz einer Verbrennungsregelung in Form der CO-Kantenregelstrategie konnte gezeigt werden, dass dieses Regelkonzept prinzipiell für Stückholzfeuerungen geeignet ist und dementsprechend die CO-Emissionskante auch von der Regelung detektiert wird. Allerdings war noch kein kontinuierlicher Betrieb im optimalen Arbeitspunkt der Anlage möglich, hierzu sind weiter Entwicklungsarbeiten notwendig. Mit einer funktionierenden Leistungs- und Verbrennungsregelung können die Emissionen beim Stückholzmusterkessel sicherlich noch weiter reduziert bzw. auf dem äußerst geringen Niveau stabilisiert werden.

Zusammenfassend wurden folgende Ziele erreicht:

- Reduzierung der Hohlbrandgefahr durch eine homogene Temperatur- und Sauerstoffverteilung in der Entgasungszone (weniger Emissionsspitzen)
- schnelle Aufheizzeiten der Nachbrennkammer durch Verwendung von Bauteilen mit geringer Masse (kürzere Emissionsspitzen beim Kesselstart)
- robuste Nachbrennkammer mit optimiertem Vermischungsprozess der Reaktionspartner
- gleichbleibend sehr niedriges Emissionsniveau in der stationären Hauptverbrennungsphase über einen breiten Luftüberschussbereich
- deutliche Minimierung des Luftüberschusses durch die angestrebten Verbrennungsverbesserungen (höherer feuerungstechnischer Wirkungsgrad).

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde der wissenschaftliche Stand zur Emissionsbildung bei der thermochemischen Umwandlung von Holz aufgezeigt. Besonderes Augenmerk wurde auf die Bildungsmechanismen der Partikelemissionen gelegt. Zu den Gesamtstaubemissionen tragen sowohl organische als auch anorganische Partikelemissionen bei. Bei vollständigen Verbrennungsbedingungen können die organischen Partikelemissionen (Ruß und Teere) auf ein Minimum reduziert werden. Hingegen ist der Bildungsmechanismus der anorganischen Partikel (Salze und Oxide) unabhängig von der Verbrennungsqualität und somit durch Primärmaßnahmen kaum beeinflussbar. Eine Reduzierung der Gesamtstaubemissionen unter ein bestimmtes Niveau ist daher – selbst bei bester Verbrennungsqualität – nur durch Sekundärmaßnahmen (z.B. Elektrofilter) erreichbar.

In der Anbrand- und insbesondere in der Ausbrandphase (Holzkohleabbrand) kommt es aufgrund der physikalischen Grenzen bei der thermochemischen Umwandlung von Holz zu erhöhten Emissionen (CO, VOC, Staub), welche sich durch Primärmaßnahmen kaum beeinflussen lassen. In der Anbrandphase sind die niedrigen Feuerraumtemperaturen ausschlaggebend für die Emissionsentstehung. Auch in der Ausbrandphase nimmt die Verbrennungstemperatur deutlich ab und der Restkohlenstoff des entgasten Holzes wird in einer Gas-Feststoff-Reaktion oxidiert, wodurch vor allem die CO-Emissionen nahezu unvermeidlich ansteigen. Während der Hauptverbrennungsphase treten bei Holzfeuerungen meist die geringsten Emissionen auf, allerdings kann es in dieser Phase zu erhöhten Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung kommen, wenn die Feuerung zur Leistungsanpassungen auf einen veränderten Wärmebedarf reagiert, so dass die Stückholzfeuerungen ge-

wisse Teillastpunkte anfährt, in den Luftmangelbereich gerät oder gar in einen Gluthalbetrieb schaltet. Im Gluthalbetrieb ist eine sinkende Flammentemperatur maßgebend verantwortlich für den Anstieg von Produkten unvollständiger Verbrennung. Zum anderen kann es aber auch zu Verbrennungsstörungen - bedingt durch das Hohlbrandphänomen, Holzaufgabe des Betreibers oder schwankende Brennstoffeigenschaften - während der Hauptverbrennungsphase kommen. Dieses Bild zeigt sich auch in der Emissionsbewertung von Stückholzkesseln, welche im Zuge dieses Forschungsvorhabens durchgeführt wurde. Die Emissionsbewertung von Stückholzkesseln kann z.B. anhand der Ergebnisse von Normprüfungen, von Überwachungsmessungen nach der 1. BImSchV oder durch einen praxisnahen Betrieb der Heizkessel auf dem Prüfstand oder durch mehrmonatige Messungen an installierten Feuerungsanlagen erfolgen. Letzteres Verfahren liefert zwar die realistischsten Ergebnisse, ist aber nur mit großem Aufwand möglich. Aufgrund dieser völlig unterschiedlicher Testbedingungen können die Ergebnisse nicht oder nur in Teilaspekten verglichen werden.

Bei Normprüfungen werden die Heizkessel unter optimierten und definierten Randbedingungen bei konstanter Wärmeleistung betrieben. Diese Ergebnisse zeigen vor allem, welche minimalen Emissionen und welcher maximale feuerungstechnischer Wirkungsgrad mit der Feuerung bei Nennwärmeleistung bzw. bei minimaler Wärmeleistung erreicht werden kann.

Bei Überwachungsmessungen im Rahmen der 1. BImSchV erfolgen die Messungen bei Nennwärmeleistung bzw. maximal möglicher Wärmeleistung im ungestörten Dauerbetriebszustand. Mit diesen Ergebnissen kann das Emissionsverhalten bezüglich CO und Staub unter stationären Bedingungen bei hoher Leistung unter praxisüblichen Randbedingungen bewertet werden.

In beiden Fällen ist es das Ziel, instationäre Betriebsbedingungen, wie Anheizen aus dem kalten Zustand, Regelvorgänge oder Teillastverhalten bei wechselndem Wärmeabfluss sowie die Ausbrandphase (Holzkohleverbrennung) bei der Messung zu vermeiden und damit nicht zur Bewertung heranzuziehen. Bei den Überwachungsmessungen gelingt dies aufgrund der Randbedingungen und den besonderen Verhältnissen vor Ort nicht immer.

Da jedoch das Emissionsaufkommen der Heizkessel vor allem durch die instationären Betriebszustände und deren Anteile an der Gesamtbetriebszeit bestimmt wird, liegen in Abhängigkeit vom Anteil der instationären Betriebsphasen die Emissionen von CO, VOC und Staub für den praktischen Betrieb deutlich höher als für den stationären Dauerbetrieb. Jedoch muss gesehen werden, dass bei Stückholzkesseln, die zur Gebäudeheizung in üblicher Form eingesetzt werden, lang andauernde stationäre Betriebszustände unter guten Betriebsbedingungen nur dann auftreten, wenn die Randbedingungen (z.B. richtige Bedienung, gute Holzqualität, fachgerechte Installation und Einstellung der Anlage) entsprechend günstig sind. Aufgrund des stark schwankenden Heizwärmebedarfs der Gebäude (tägliche und saisonale Schwankungen) und des chargenweisen Betriebs der Heizkessel ist davon auszugehen, dass die instationären Betriebszustände einen bedeutenden bis hohen, in einigen Fällen gar überwiegenden Anteil an der Gesamtbetriebszeit haben. Letzteres gilt vor allem für Stückholzkessel (Bestandskessel), die ohne Pufferspeicher betrieben werden. Folglich gilt hinsichtlich der Bilanzierung des Schadstoffausstoßes: geringe CO-, VOC- und Staub-Emissionen im stationären Dauerbetrieb der Heizkessel sind zwar eine notwendige aber keine hinreichende Anforderung an die Feuerungsanlagen. Daher wurde als Ziel definiert, dass sich die niedrigen Emissionswerte des stationären Dauerbetriebs bei instationären Betriebszuständen nur unwesentlich verschlechtern dürfen. Dies kann nur durch eine kontinuierliche,

sensorbasierte Regelung am Optimum in allen Phasen des Verbrennungsprozesses und durch eine Optimierung der Verbrennungstechnik geschehen.

Bei der Entwicklung eines neuen Stückholzkessels mit optimierter Verbrennungstechnik wurde die Gesamtfunktion „Stückholzkessel“ abstrahiert und in Teilfunktionen geringer Komplexität zerlegt und entsprechende Lösungsprinzipien entwickelt.

Die dadurch gefundene Konzeptvariante eines neu entwickelten Stückholzkessels sollte verbrennungstechnisch in folgenden Punkten, gegenüber den besten marktverfügbaren Kesseln erheblich verbessert werden:

- Reduzierung der Hohlbrandgefahr durch eine homogene Temperatur- und Sauerstoffverteilung in der Entgasungszone (weniger Emissionsspitzen) mittels eines luftdurchströmten Feuerungsrostes
- Erhöhung der Mischungsgüte in der Nachbrennkammer durch optimierte Strömungsbedingungen, unterstützt durch eine optimierte Zuführung der Sekundärluft (geringere Emissionen im Dauerbetrieb, bei Teillast und im praxisnahen Betrieb)
- schnelle Aufheizzeiten der Nachbrennkammer durch Verwendung von Bauteilen mit geringer Masse (kürzere Emissionsspitzen beim Kesselstart)
- Minderung des Luftüberschusses durch die angestrebten Verbrennungsverbesserungen (höherer feuerungstechnischer Wirkungsgrad).

Das Kesselkonzept wurde zunächst in Form einer Versuchsfeuerung validiert und in einem zweiten Schritt in einem Stückholzmusterkessel umgesetzt. Der Stückholzmusterkessel weist eine Feuerungswärmeleistung von 25 kW bei einem Wirkungsgrad von 94% auf. Mit der Konzeptumsetzung eines luftdurchströmten Rosts in der Primärzone konnte eine gleichmäßige, hohlbrandfreie Entgasung erreicht werden. Diese Art der Primärluftzuführung ließ allerdings in der bisherigen technischen Umsetzung keinen Teillastbetrieb zu.

Mit der neuentwickelten Nachbrennkammer konnte der Vermischungsprozess zwischen brennbaren Gasen und dem Luftsauerstoff (Sekundärluft) optimiert werden. Die Zielwerte für die CO- und VOC-Konzentrationen konnten im stationären Dauerbetrieb des Stückholzmusterkessels mit einer mittleren CO-Konzentration von 15 mg/m³ (bez. auf 13 Vol% O₂) und einer mittleren VOC-Konzentration von 3 mg/m³ (bez. auf 13 Vol.%) erreicht werden. Aufgrund des optimierten Vermischungsprozesses in der Nachbrennkammer war es möglich den Luftüberschuss, bei gleichbleibend niedrigen Emissionen, bis auf 3,5 Vol% O₂ zu reduzieren und so den Wirkungsgrad deutlich zu steigern.

Im Hinblick auf die Partikelemissionen wurden die Zielwerte im stationären Dauerbetrieb mit rund 13 mg/m³ knapp verfehlt. Hierbei war die Färbung des Filtermaterials hellgrau, was im Wesentlichen auf anorganische Partikel schließen lässt. Der Bildungsmechanismus für Partikel anorganischer Herkunft wird aufgrund des extrem heißen und mit viel Sauerstoff versorgten Glutbetts durch die gewählte Rostkonstruktion verstärkt angeregt.

Zusammenfassend wurden folgende Ziele erreicht:

- Reduzierung der Hohlbrandgefahr durch eine homogene Temperatur- und Sauerstoffverteilung in der Entgasungszone (weniger Emissionsspitzen)
- schnelle Aufheizzeiten der Nachbrennkammer durch Verwendung von Bauteilen mit geringer Masse (kürzere Emissionsspitzen beim Kesselstart)

- robuste Nachbrennkammer mit optimiertem Vermischungsprozess der Reaktionspartner
- gleichbleibend niedriges Emissionsniveau in der stationären Hauptverbrennungsphase über einen breiten Luftüberschussbereich
- deutliche Minimierung des Luftüberschusses durch die angestrebten Verbesserungen (höherer feuerungstechnischer Wirkungsgrad).

Die Ergebnisse des neu entwickelten Stückholzmusterkessels haben gezeigt, dass die Verbrennungsqualität durch einen optimierten Vermischungsprozess in der Nachbrennkammer drastisch erhöht werden konnte. Im Teillastbereich muss der Stückholzmusterkessel seine sehr guten Verbrennungseigenschaften noch unter Beweis stellen. Hierzu muss die Primärluftführung entsprechend modifiziert werden. Mit einer modifizierten Primärluftführung kann sicherlich auch ein weiteres Minderungspotential hinsichtlich der Partikelemissionen anorganischer Herkunft erreicht werden. Diese Aspekte sind Themen zukünftiger Untersuchungen. Deutlich wird aber jetzt schon, dass eine vollflächige Markteinführung des neu entwickelten Stückholzmusterkessels zu einer erheblichen Umweltentlastung und zu einer effizienten und ressourcenschonenden Biomassenutzung beitragen kann.

9 Literatur IFK

1. BImSchV (2010):

Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV) vom 15. Juli 1988 (BGBl. I, S. 1059), zuletzt geändert am 26. Januar 2010 (BGBl. I, Nr. 4, S. 38-56).

Arca (2009):

Produktdatenblatt Holzkessel O2, Arca Heizsysteme e.K., Lauf a.d.P., Deutschland.

BAFA (2009):

Liste der förderfähigen Stückholzkessel. Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, Eschborn.

G. Baumbach (1994):

Luftreinhaltung. 3. Auflage. Springer Verlag, Heidelberg.

K. Diez (2011):

Untersuchungen zum Einsatz der CO-Kantenregelung bei einem Pelletofen. Diplomarbeit. Universität Stuttgart, Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik, Stuttgart.

ETA (2008):

Prospekt ETA-SH, ETA Heiztechnik GmbH, Hofkirchen an der Trattnach, Österreich, Juli 2008.

FNR - Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2007):

Marktübersicht Scheitholzvergaserkessel und Scheitholz-Pellet-Kombinationskessel. Im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow.

Fröling (2009):

Prospekt S4 Turbo, Fröling Heizkessel- und Behälterbau GmbH, Grieskirchen, Österreich, Januar 2009.

Gerthsen, T (2006):

Anorganische Chemie für Werkstoffe und Verfahren. Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe.

Guntamatik (2009):

Stückholzprogramm Guntamatik, Guntamatik Heiztechnik GmbH, Peuerbach, Österreich, Februar 2009.

F. Hammer, H. Weber (2008):

Sensorgesteuerte CO-Regelung zur Optimierung des Verbrennungsprozesses für Feuerungsanlagen kleiner und mittlerer Leistung, ESCUBE GmbH & Co KG, Stuttgart und LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co KG, Walldorf.

H. Hartmann, V. Schmid, H. Link (2003):

Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzzentralheizungsanlagen kleiner Leistung. Partikelgrößenverteilung, Gesamtstaub und weitere Kenngrößen. Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamt im Unterauftrag durch das Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart. Technologie- und Förderzentrum, Straubing.

H. Hartmann, P. Roßmann, P. Turowski (2006):

Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden. Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamt im Unterauftrag durch das Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart. Technologie- und Förderzentrum, Straubing.

Hoval (2007):

Prospekt AgroLyt, Hoval GmbH, Vaduz, Lichtenstein, September 2007.

F. Joos (2006):

Technische Verbrennung. Verbrennungstechnik, Verbrennungsmodellierung, Emissionen. Springer Verlag, Heidelberg.

M. Kaltschmitt, H. Hartmann (2001):

Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Heidelberg.

Künzel (2009):

Produktübersicht Holzvergaserkessel, Paul Künzel GmbH & Co., Prisdorf, Mai 2009.

Lopper (2004):

Prospekt Holzkessel, Lopper Kesselbau GmbH, Rohr-Alzhausen, Deutschland, Februar 2004.

T. Nussbaumer (2003):

Grundlagen der Aerosolbildung in Holzfeuerungen. Projekt im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Energie und des Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Verenum, Zürich.

M. Struschka, O. Emich, G. Baumbach (2004):

Untersuchung an einem Stückholzkessel mit und ohne Wärmespeicher zur Ermittlung optimaler Speichergrößen. Forschungsvorhaben der LUBW. Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Stuttgart.

M. Struschka, D. Kilgus, M. Springmann, G. Baumbach (2007):

Effiziente Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Luftreinhaltung. Forschungsvorhaben der BMU. Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Stuttgart.

VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 (2006):

Messen von Partikeln. Staubmessung in strömenden Gasen. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf.

U. Zuberbühler (2002):

Maßnahmen zur feuerungsseitigen Emissionsminderung bei der Holzverbrennung in gewerblichen Feuerungsanlagen. Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Stuttgart.