

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19114 N

Thema

Kleinf Feuerungen für Stroh pellets: Analyse und Modellierung der erforderlichen feuerungstechnischen Maßnahmen

Berichtszeitraum

01.05.2016 - 30.04.2019

Forschungsvereinigung

Deutsche Vereinigung für Verbrennungsforschung e.V. - DVV

Forschungseinrichtung(en)

Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik (LEAT), Ruhr-Universität Bochum

Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe (TEER), RWTH Aachen

Bochum, 28.10.2019

Prof. Dr.-Ing. Viktor Scherer

Aachen, 28.10.2019

Prof. Dr.-Ing Peter Quicker

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

Inhaltsverzeichnis

1	Forschungsthema.....	4
2	Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse	5
3	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung.....	7
3.1	Hintergrund und Stand der Technik.....	7
3.2	Aufgabenstellung	10
3.3	Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU.....	11
4	Lösungsweg und Ergebnisse	12
4.1	Herstellung der Strohpellets	12
4.1.1	Strohernte	12
4.1.2	Laugung.....	12
4.1.3	Pelletierung.....	13
4.2	Charakterisierung der eingesetzten Strohpellets und Verbrennungsrückstände	15
4.2.1	Ergebnisse der Immediat-, Elementar- und Heizwertanalyse	15
4.2.2	Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse	17
4.2.3	Ascheerweichungsverhalten.....	18
4.2.4	Pelletqualität	19
4.3	Aufbau der Versuchsfeuerungen.....	21
4.3.1	Abwurfheizung.....	21
4.3.2	Wanderrostheizung	24
4.4	Bestimmung einer Makrokinetik für Strohpellets basierend auf experimentellen Einzelpartikeluntersuchungen	27
4.5	Experimentelle Untersuchung des Abbrandverhaltens Strohpelletschüttungen	40
4.5.1	Aufbau des Versuchstandes BORA.....	40
4.5.2	Versuchsdurchführung	42
4.5.3	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen (BORA).....	43
4.6	Simulation der Versuchsanlage.....	47
4.6.1	Validierung des mechanischen Modells	47
4.6.2	Überprüfung des Verbrennungsmodells	49
4.7	Entwicklung/Optimierung eines Rostsystems zur Sicherstellung der Ascheabfuhr und Aufbrechen von Versinterungen.....	56

4.7.1	Vorauswahl geeigneter Rostkonzepte anhand von DEM Simulationen der mechanischen Wirkung der Schürmechanik.....	57
4.7.2	Kugelrostsystem.....	59
4.7.3	Kaltversuche	62
4.7.4	Vorauswahl der Betriebsparameter mittels DEM/CFD-Simulation des Pelletofens mit Kugelrostsystem	65
4.7.5	Verbrennungsversuche in der Fallschachtfeuerung mit Kugelrosttechnik	69
4.7.6	DEM/CFD Simulationen des Kugelrostsystems.....	90
4.7.7	Verbrennungsversuche in der Vergleichsfeuerung mit Wanderrosttechnik (VK1 und VK2)	96
4.8	Luftstufung, Langzeitversuche sowie PCDD/F-Messungen	103
4.9	Kriterienkatalog für die Auslegung von Kleinf Feuerungen für Stroh pellets.....	108
5	Verwendung der Zuwendung	111
5.1	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	114
6	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse für KMU.....	114
7	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	116
8	Umsetzung des Transferkonzeptes.....	118
8.1	Aussagen zur voraussichtlichen industriellen Umsetzung der FuE-Ergebnisse nach Projektende	118
9	Literaturverzeichnis	120
Anhang	124

1 Forschungsthema

Kleinfeuerungen für Strohpellets: Analyse und Modellierung der erforderlichen feuerungstechnischen Maßnahmen

Das IGF-Vorhaben 19114 N der Forschungsvereinigung DVV e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

2 Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse

Zur Verbrennung von Strohpellets in Kleinf Feuerungsanlagen wurde ein neuartiges Rostsystem konzipiert und getestet. Ziel dieses neuen Rostsystems ist die Erzeugung einer definierten Brennbettbewegung zur fortlaufenden Zerkleinerung sich bildender Ascheagglomerate. Die Erweiterung eines konventionellen statischen Rostsystems um zusätzliche thermisch belastete Bauteile bringt neben neuen Steuermöglichkeiten auch einige konstruktive Herausforderungen mit sich. Daher wurden mehrere alternative Schürkonzepte untersucht und mit Hilfe der Diskreten Elemente Methode (DEM) analysiert. Dazu wurde das Bewegungsverhalten einer mit verschiedenen Konzepten geschürten Strohpelletschüttung mittels DEM simuliert. Die Untersuchungen zeigten, dass eine horizontal rotierende Schürbewegung eine gleichmäßige und moderate Brennbettbewegung erzeugt, die vorteilhaft für den Dauereinsatz in einem kontinuierlich betriebenen Pelletofen ist.

Weiterführende Überlegungen führten dazu, dieses Konzept um eine Schüttung aus Inertkugeln zu erweitern. In Kaltversuchen wurden zunächst das grundsätzliche Prinzip des entwickelten Kugelrostsystems getestet und die Abbildung der Bewegungscharakteristik mit dem DEM-Modell verglichen. Bereits im Rahmen der Kaltversuche wurde die Bedeutung der Rührerdrehzahl und des Kugeldurchmessers für die Mischung und Transportgeschwindigkeit der Pellets durch die Kugelschüttung deutlich.

Aufgrund der starken Wechselwirkung zwischen Feststoffabbrand und Brennbettbewegung ist eine direkte Ableitung von Betriebsparametern auf Basis von Kaltversuchen problematisch. Daher wurden zunächst gekoppelte DEM/CFD-Simulationen des Rostsystems durchgeführt, um die zu wählenden Betriebsparameter einzugrenzen.

Die gekoppelten DEM/CFD-Simulationen des entwickelten Kugelrostes zeigten einen verminderten Transport von entgasten Pellets durch die Kugelschüttung bei einem Kugeldurchmesser von $d_k \leq 13$ mm. Die Simulationen lokalisierten einen Großteil der Aschebildung an der obersten Kugelschicht, was zu nachteiligen Bedingungen hinsichtlich der Vermeidung von Agglomeraten führt. Erst ab einem Kugeldurchmesser von $d_k \geq 15$ mm konnten die pyrolysierenden Pellets mit ausreichender Geschwindigkeit durch die Kugelschüttung transportiert werden. Zudem zeigten die Simulationen eine intensive Wechselwirkung zwischen Drehzahl der Schürgeometrie und der Hauptpyrolysezone der Pellets. Somit konnte die Drehzahl als entscheidender Betriebsparameter für den stabilen Betrieb der Anlage identifiziert werden.

Parallel zu den Simulationen erfolgten Verbrennungsversuche in einer Abwurffeuerng, die mit dem neu konzipierten Kugelrostsystem ausgestattet wurde. In Versuchen ohne Kugeln und mit einer einlagigen Kugelschicht konnte ein kontinuierlicher Ascheabtransport erreicht werden, jedoch war der Rührer einer zu großen Temperaturbelastung ausgesetzt. Die Welle des Rührers verformte sich und verursachte eine Blockade des Systems, in deren Folge die Versuche abgebrochen werden mussten. In weiteren Experimenten mit einer 60 mm hohen Kugelschüttung konnte eine ausreichende Wärmeabschirmung des Rührers vom Brennbett erreicht werden. Das Rostsystem wurde nicht beschädigt bzw. anderweitig beeinträchtigt. V2A-Edelstahl (Werkstoff: 1.4828) konnte als das am besten geeignete Kugelmaterial ermittelt werden. Andere Materialarten waren anfällig gegenüber Verzunderung, Korrosion und Anhaftungen.

Aus der Kombination der Simulationsergebnisse und der experimentellen Beobachtungen konnten die optimalen Parameter für den Dauerbetrieb des Pelletofens mit Kugelrost definiert werden:

- Rührerdrehzahl von $0,84 \text{ min}^{-1}$
- Schüttungshöhe von ca. 60 mm
- V2A-Edelstahlkugeln
- Kugeldurchmesser $d_K = 15 \text{ mm}$
- $0,7 \leq \lambda_{\text{Primär}} \leq 0,8$

Mit diesen Parametern erfolgte ein Langzeitversuch, bestehend aus fünf separaten Einzelversuchen. Bei drei der fünf Einzelversuche wurde die Pelletasche nahezu vollständig abtransportiert und es waren keine Anhaftung oder Ablagerungen an den Kugeln erkennbar. Bei zwei Versuchen verblieben jedoch 12 % bzw. 3 % der Aschegesamtmasse als Anhaftungen an den Kugeln. Die durchschnittlichen Kohlenmonoxid- und Stickoxidemissionen betragen 36 und $245 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr.,13 \% O}_2}$. Die Staubemissionen beliefen sich durchschnittlich auf $44 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr.,13 \% O}_2}$. Der Glühverlust der Asche betrug im Mittel $3,1 \text{ \%}$.

In einer kommerziellen Wanderrostfeuererng wurden Vergleichsversuche durchgeführt. Die Asche ließ sich mit dem Wanderrost kontinuierlich und ohne Anlagenstörung abtransportieren. Emissionen und Glühverlust der Asche waren auf vergleichbaren Niveau wie in den Versuchen mit dem Kugelrostsystem.

Es konnte gezeigt werden, dass mit der erheblich einfacheren und ökonomischeren Anlagentechnik des Kugelrostsystems im Vergleich zum Wanderrostsystem ein kontinuierlicher Verbrennungsprozess grundsätzlich möglich ist. Allerdings ließ sich aufgrund der gelegentlichen Bildung von Ascheagglomeraten kein zuverlässiges System entwickeln. Durch mögliche weitere Untersuchungen der Versuchsparameter ist ein zuverlässiger kontinuierlicher Betrieb in einer Kugelrostfeuerung jedoch denkbar.

3 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

3.1 Hintergrund und Stand der Technik

Feste Biomasse liefert einen Beitrag zu einer langfristigen, dezentralen, CO₂-neutralen und gesicherten Brennstoffversorgung. Im Jahr 2018 wurde in Deutschland etwa 20 % des Wärmebedarfs über Erneuerbare Energien gedeckt, wovon zwei Drittel auf die Wärmebereitstellung aus biogenen, insbesondere holzbasierten Festbrennstoffen entfallen [1, 2]. Der Anteil aus Biomassefeuerungen am gedeckten Gesamtwärmebedarf betrug in Deutschland ca. 14 %.

Ein energetisches noch nahezu ungenutztes Potenzial stellt in Deutschland Stroh dar. Aufgrund konkurrierender stofflicher Nutzungspfade, wie der notwendigen Humuserhaltung in Ackerböden und der Verwendung als Einstreu bzw. Futter für die Tierhaltung, wird derzeit bezüglich der jährlich insgesamt anfallenden Strohmasse (etwa 32 Mio. Mg [3]) von einem energetischen Nutzungspotenzial von bis zu 33 % ausgegangen [4]. Das würde einer Energiemenge von bis zu 186 PJ/a entsprechen [5, S. 294].

Der Einsatz von Stroh in Kleinfeuerungsanlagen wird nur dann umsetzbar sein, wenn Strohkleinfeuerungsanlagen mit holzartigen Festbrennstoffen und Öl bzw. Gas wirtschaftlich konkurrieren können. Die wichtigsten Parameter stellen dabei die Brennstoffkosten sowie die Investitions- und Wartungskosten dar. Wegen der niedrigen Energiedichte von Stroh und des damit verbundenen Transportaufwands ist fast ausschließlich die Nutzung in Pelletform für Kleinfeuerungsanlagen sinnvoll. Da es derzeit keinen Markt für Strohpellets gibt, ist ein seriöser Vergleich von Stroh- und Holzpelletpreisen kaum möglich. Bei der Recherche konnte ein

Lohnpelletierer für Strohpellets ermittelt werden. Dieser bietet die von ihm produzierten Strohpellets für 177 €/Mg an, während seine Holzpellets für 166 €/Mg erworben werden können [6]. Generell gilt es zu beachten, dass die Strohpreise aufgrund der variierenden Ausprägung der konkurrierenden Nutzungspfade regional sehr unterschiedlich ausfallen können. So betragen die aktuellen (Juni 2019) Strohpreise bspw. in Hessen 110 bis 180 €/Mg und im Rheinland 61 bis 67,50 €/Mg [7]. Da aktuell also nicht von einem nennenswerten Preisvorteil des Brennstoffs ausgegangen werden kann, müssen Investitions- und Wartungskosten einer Kleinfeuerungsanlage möglichst gering gehalten werden, um wirtschaftlich konkurrenzfähig zu sein.

Die Verbrennung von Biomasse erfordert zuverlässige und energieeffiziente Feuerungssysteme (hoher Wirkungsgrad, emissionsarm, wartungsarm, langlebig, hohe Verfügbarkeit). Stroh ist in diesem Zusammenhang als Brennstoff kritisch zu betrachten, da diese halmgutartige Biomasse gegenüber Holz einen erhöhten Brennstoffstickstoff- und Ascheanteil besitzt. Dabei ist die Asche in der Regel reich an Chlor, Kalium und Natrium. Chlor ist aufgrund erhöhten Korrosionspotentials problematisch und kann zur Bildung von PCDD/F führen. Der Kaliumgehalt hat Einfluss auf die Ascheerweichungstemperatur. Bei der Verbrennung entstehen über unterschiedliche Bildungspfade Kaliumsalze, wie Kaliumchlorid, Kaliumcarbonat und Kaliumsulfat [8, 9, 10, 11]. Zudem können sich Kaliumsilikate und -phosphate bilden [9, 12, 13, 14]. Diese Verbindungen weisen geringe Schmelztemperaturen von ca. 700 bis 1100 °C auf [12, 13, 14, 15].

Durch die Laugung von Stroh mit Wasser und der damit einhergehenden Verringerung der alkalischen Aschekomponenten und des Aschegehalts lassen sich die Ascheerweichungstemperaturen erhöhen [16, 17]. Darüber hinaus können während des Pelletierungsprozesses Additive, wie beispielsweise Kalkhydrat, zugegeben und somit das Ascheerreichungsverhalten maßgeblich verbessert werden [18]. Additive sind Mineralien bzw. Chemikalien (basierend auf Ca, Mg, Aluminiumsilikat), welche die Konzentration problematischer Aschekomponenten verringern und in Mechanismen bzw. Reaktionen des Ascheerweichungsverhaltens eingreifen [8]. Trotz dieser brennstoffseitigen Optimierungen zur Erhöhung der Ascheerweichungstemperaturen lässt sich die Sinterung der Asche bei üblichen Verbrennungstemperaturen von 800 bis 1100 °C nicht vollständig vermeiden [5, S. 619].

Aufgrund der beschriebenen Brennstoffproblematik ergeben sich erhebliche Anforderungen an die Anlagentechnik der Feuerungsanlagen. In Anlagen größerer Leistungsbereiche haben sich bereits Systeme etabliert, die für halmgutartige Brennstoffe ausgelegt sind. Mit einer

Feuerungswärmeleistung von 50 MW wurde in Emlichheim im Jahr 2013 ein Strohheizkraftwerk in Betrieb genommen. Als Rosttechnik wird dort ein in Dänemark mehrfach erprobter wassergekühlter Vibrationsrost verwendet. Darüber hinaus kann Stroh in sogenannten Zigarrenfeuerungen oder Feuerungen mit integrierter Ballenauflösung verbrannt werden. Auch hier kommen wassergekühlte Rostsysteme zum Einsatz. Zigarrenfeuerung lassen sich jedoch erst ab 2 MW und Halmgutfeuerungen integrierter Ballenauflösung ab ca. 500 kW wirtschaftlich betreiben. [19] In kleineren Leistungsbereichen bis minimal 49 kW sind auf dem Markt lediglich aufwendige und teure Strohfeuerungen mit wassergekühlten Rostsystemen verfügbar [20]. Darüber hinaus existieren Kleinfeuerungsanlagen mit verhältnismäßig aufwendigen Systemen, wie Wander- bzw. Kettenrosten mit Leistungsbereichen ab 20 kW [21, 22, 23].

In Patenten existieren einige weitere Rostsystemkonzepte für Kleinfeuerungsanlagen bei denen das Brennbett bewegt bzw. die Asche abtransportiert werden kann. Bei Abwurfffeuerungen sind unterschiedliche Systeme mit Kipp- oder Schieberosten bekannt. Ein Großteil der bewegten Rostsysteme dient lediglich dem Reinigungszweck nach längeren Betriebsphasen [24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31]. Zwei Systeme heben sich jedoch deutlich ab. Bei einem der Systeme ist ein Rührer über einer mit Löchern versehenen Rostplatte integriert. Die Asche soll mit Hilfe des Rührers durch die Rostlöcher abtransportiert werden [32]. Bei einem ähnlichen System, dem sogenannten Rondellbrenner, wird eine bewegliche runde Rostplatte mit einem starren Gehäuse kombiniert. Das Gehäuse hat eine seitliche Öffnung, wodurch die Asche durch die rotierende Rostplatte abtransportiert werden kann [33]. Über den Leistungsbereich, den Einsatz von Strohpellets im speziellen oder der kommerziellen Verwendung solcher Systeme in Feuerungsanlagen gibt es keine Erkenntnisse.

Brenntellersysteme, welche meist in Unterschubfeuerungen Anwendung finden, sind in ihren unterschiedlichen Ausführungen neben Abwurfffeuerungen die häufigste am Markt verfügbare Kleinfeuerungsart (< 40 kW) [34]. Die Brennteller weisen unterschiedliche Geometrien, Arten der Luftstufung und der Beschickung auf [35, 36, 37, 38, 39]. Informationen über die Verwendung von Stroh konnten nicht ermittelt werden.

In sogenannten Jet-Brennern werden Pellets in einem Rohr oder Kanal (Quereinschubsystem) verbrannt. Durch die nachgeschobenen Pellets wird die Asche über das Rohr- bzw. Kanalende abtransportiert [40, 41]. Solche Systeme existieren auf dem Markt für Leistungsbereiche u. a. unter 40 kW [34]. Erkenntnisse über die Verbrennung von Strohpellets sind jedoch nicht bekannt.

Zusätzlich existieren zwei Patente zu Walzenrostfeuerungen. Beide Systeme wurden explizit für Biomassen konzipiert, die zu Verschlackungen neigen [42, 43]. Anbieter für solche Systeme konnten jedoch nicht ermittelt werden.

3.2 Aufgabenstellung

Ziel dieses Projekts war die Entwicklung eines einfachen, robusten und kostgünstigen Rostsystems für die Verbrennung von Strohpellets in Kleinfeuerungsanlagen für den Leistungsbereich 10 kW bis 40 kW. Das entwickelte System soll hartnäckige Ascheversinterungen vermeiden oder gegebenenfalls noch in der Schüttung aufbrechen und aus dem Brennraum abtransportieren.

Dazu wurden die Erkenntnisse des Vorgängerprojekts „StrohEnergie.NRW“ [44] genutzt. Der Projektansatz verfolgte die Doppelstrategie einer optimierten Brennstoffkonfektionierung und angepassten Anlagentechnik. Weizenstroh wurde gelaugt und beim Pelletierungsprozess additiviert. Mit der Zugabe von 2 % Kalkhydrat konnten die Ascheerweichungstemperaturen bereits deutlich erhöht werden, sodass Verschlackungen erheblich reduziert wurden. In einer kommerziellen Pelletfeuerung mit 65 kW Nennwärmeleistung erfolgten Versuche mit einer provisorischen, aber keineswegs praxistauglichen Rostschürung. Durch solche Brennbettbewegungen ließen sich Ascheversinterungen vermeiden und ein kontinuierlicher Abtransport der Asche ermöglichen. [44]

An diesen methodischen Ansatz wurde im IGF-Vorhaben angeknüpft, indem Rostsysteme konzipiert und bewertet wurden. Zunächst erfolgten Kaltversuche, um die Bewegungs- bzw. Durchmischungscharakteristik sowie den Zerkleinerungseinfluss zu bestimmen. Nach Implementierung des als am geeignetsten bewerteten Systems in die bestehende Pelletfeuerung wurden in Verbrennungsversuchen Effektivität und Praxistauglichkeit erprobt sowie Auswirkungen auf die Schadstoffemissionen untersucht. Als Brennstoff wurde, wie im Projekt „StrohEnergie.NRW“ Weizenstroh verwendet, welches gelaugt, additiviert, pelletiert und analysiert wurde. Um das neuentwickelte Rostsystem mit einer bestehenden kommerziellen Kleinfeuerung zu vergleichen und seine Tauglichkeit zu bewerten, erfolgten vergleichende Verbrennungsversuche in einer Wanderrostfeuerung.

Die experimentellen Untersuchungen erfolgten durch das Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe (TEER) der RWTH Aachen. Der Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik (LEAT) der Ruhr-Universität Bochum begleitete die Konzipierung der

Rostsysteme und die experimentellen Untersuchungen mit Simulationen und korrespondierenden Experimenten.

3.3 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU

Von den Ergebnissen des durchgeführten Vorhabens profitiert neben der Brennstoff-Pelletbranche auch die Landwirtschaft. So kann die Landwirtschaft durch eine breitere Nutzung der Erntenebenprodukte einen Vorteil aus steigenden Brennstoffpreisen ziehen [45]. In diesem Zusammenhang könnten auch bisher unrentable Flächen bewirtschaftet werden, wodurch sich zusätzlich ein positiver Effekt hinsichtlich einer Minderung der Bodenerosionen einstellt [46]. Zudem können Erzeuger von Strohpellets, die sich bisher auf die Herstellung von Tier-Einstreu beschränken, von einem weiteren Absatzmarkt profitieren. Für Tier-Einstreu gelten andere Qualitätsanforderungen als für den Brennstoffeinsatz, sodass mit einer kostengünstigeren Produktion von Strohpellets als Brennstoff gerechnet werden kann [47, 48]. Pellethersteller, die sich derzeit auf den Rohstoff Holz beschränken, können auf ein breiteres Rohstoffangebot zurückgreifen und sich dadurch einen neuen Absatzmarkt erschließen. Insbesondere sind die Hersteller von automatisch beschickten Feuerungen biogener Festbrennstoffe mögliche Nutznießer der Ergebnisse des vorgeschlagenen Vorhabens. Es entsteht das Potential für neue Produktfamilien von Pelletöfen, die in der Lage sind, Erntereststoffe zu verwerten.

4 Lösungsweg und Ergebnisse

4.1 Herstellung der Strohpellets

4.1.1 Strohernte

Zur Bereitstellung des Weizenstrohs für die Analysen und Verbrennungsversuche stand ein Weizenfeld in Borgholzhausen im Kreis Gütersloh zur Verfügung. Aufgrund des niederschlagintensiven Sommers im Jahr 2016 erfolgte die Weizenernte am 17.08.2016 verhältnismäßig spät. Von der Erntemaschine wurde das Weizenkorn geerntet und das Stroh als Schwaden auf dem Feld ausgetragen (vgl. Abbildung 4.1). Für die Brennstoffanalysen des unbehandelten frisch geernteten Strohs fand am 18.08.2016 die Probenahme statt. Ca. 4 ha der 16 ha großen Feldfläche wurden abgesteckt und in neun gleiche Quadrate unterteilt. Die Beprobung erfolgte händisch, indem im Abstand von ca. 5 m eine Handvoll Stroh den Schwaden aus unterschiedlichen Schüttungshöhen entnommen wurde. Nach der Probenahme verdichtete eine mobile Ballenpresse die Strohschwaden zu Quaderballen. Insgesamt wurden 16 Mg Weizenstroh von der 4 ha großen Feldfläche als Quaderballen für die weiteren Bearbeitungsschritte witterungsgeschützt eingelagert.



Abbildung 4.1: Weizenstrohschwaden auf dem Weizenfeld in Borgholzhausen (l.), Feldbeprobungsplan (r.).

4.1.2 Laugung

Für die Pelletherstellung wurden von den 16 Mg Stroh ca. 5,9 Mg der Laugung unterzogen. Die Hauptlaugung erfolgte in einem Futtermischwagen mit zwei Rührern (vgl. Abbildung 4.2). Das Massenverhältnis von Wasser zu Stroh wurde auf 12:1 eingestellt und die Mischdauer betrug 30 Minuten. Weil das Stroh nach der Hauptlaugung von dem mit den ausgewaschenen Substanzen

kontaminierte Waschwasser benetzt war, wurde durch eine Nachlaugung das anhaftende Waschwasser abgewaschen. Das im Futtermischwagen gelaugte Stroh wurde auf Geovliesen von vier Metern Breite als Schwaden ausgebracht und ausgebreitet. Anschließend erfolgte die Nachlaugung mit einem Wasserschlauch und einem durchschnittlichen Wasser-Stroh-Massenverhältnis von durchschnittlich 10:1.

Das Stroh verblieb zur Trocknung für zehn Tage auf den Geovliesen. In der Zwischenzeit kam es zu keinen Niederschlägen in der Region. Aufgrund der Jahreszeit (Herbst) konnte eine ausreichende für die Lagerung notwendige Trocknung nicht gewährleistet werden. Aus diesem Grund wurde das Stroh in Trocknungsanhängern durch die Abwärme eines Blockheizkraftwerks (BHKW) einer regionalen Biogasanlage getrocknet. Die Temperatur der Trocknungsluft betrug ca. 75 °C. Das Stroh wurde im Trocknungsanhänger mehrfach händisch gewendet und gemischt, damit eine möglichst homogene Trocknung gewährleistet werden konnte.

Das Stroh wurde nach der Trocknung wieder zu Quaderballen gepresst und witterungsgeschützt bis zur Pelletierung eingelagert. Aufgrund von Verlusten bei der Hauptlaugung, Nachlaugung, Trocknung und Verpressung zu Quaderballen wurde die Strohmasse um 39 % auf ca. 3,6 Mg reduziert.



Abbildung 4.2: Hauptlaugung im Futtermischwagen (l.) und für die Nachlaugung ausgebreitete Schwaden auf einem Geovlies (r.).

4.1.3 Pelletierung

Die Pelletierung erfolgte mit einer Kollergangpresse bei der Fa. Kaliro GbR. Die Pelletierungsanlage verfügt über die Verfahrensschritte der Ballenauflösung, Strohzerkleinerung, Beimischung von Additiven und Wasser, Pelletierung, Abkühlung und Feingutabtrennung (vgl. Abbildung 4.3).

In einer ersten Pelletierungskampagne wurden 1,2 Mg der insgesamt 3,6 Mg des gelaugten Strohs verarbeitet, um bei möglichen Qualitätsproblemen eine ausreichend hohe Reserve vorzuhalten. Aus dem gelaugten Stroh wurden Pellets mit und ohne Additiv hergestellt. Die Zielvorgabe des Additivgehalts war mit ca. 2 % Kalkhydrat bezogen auf die Trockenmasse festgelegt. Bei gleicher Zielvorgabe wurden aus unbehandeltem Stroh, ebenfalls mit und ohne Additiv, Pellets produziert. Bei einer zweiten Pelletierungskampagne wurde das restliche gelaugte Stroh (ca. 2,4 Mg), ebenfalls mit der Zielvorgabe von ca. 2 % Kalkhydrat verpresst.

Aufgrund zu geringer Pelletqualität bei der Pelletierung des unbehandelten Strohs wurden die Pellets der Presse erneut zugeführt (zweistufige Pelletierung). Die Qualität konnte dabei zwar verbessert werden, allerdings gingen durch den zweistufigen Prozess ca. 50 % des Strohs verloren. Beim gelaugten Stroh reichte eine einstufige Pelletierung für die Herstellung ausreichend stabiler Pellets aus. Hier betragen die Verluste 30 %. Die zweite Pelletierungskampagne mit gelaugtem Stroh verlief signifikant zufriedenstellender. Neben einer deutlich höheren Pelletqualität (vgl. Kapitel 4.2) ließen sich die Feingutverluste auf ein Minimum von ca. 1 % reduzieren. Die Gründe dafür werden im Einsatz einer neuen Matrize zusammen mit einer erhöhten Wasserzugabe vermutet.

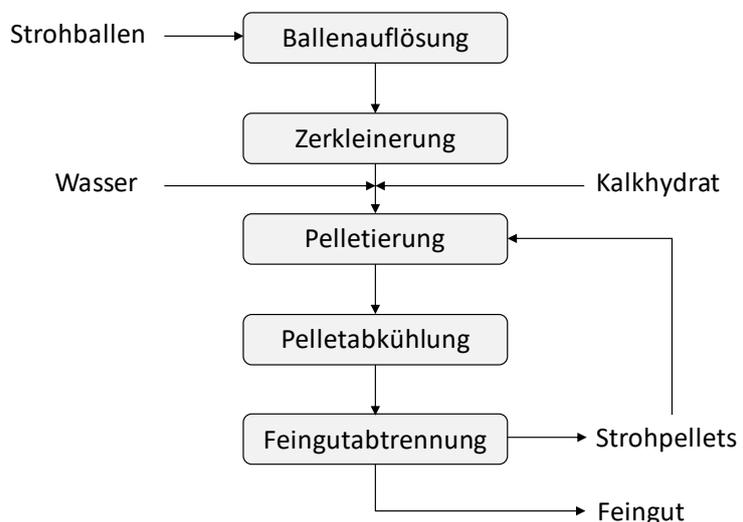


Abbildung 4.3: Kollergangpresse der Fa. Kaliro GbR (l.) und Verfahrensfliessbild des Pelletierungsprozesses (r.).

4.2 Charakterisierung der eingesetzten Strohpellets und Verbrennungsrückstände

Die einzelnen Chargen mit ihren Kürzeln sind in Tabelle 4.1 beschrieben und definiert. Die Pellets aus gelaugtem Stroh mit Additiv aus der zweiten Pelletierungskampagne (LSP+ (2)) wurden als Versuchsmaterial für die Verbrennungsversuche genutzt.

Bei Biomassen, insbesondere bei Halmgütern, ist aufgrund der hohen Inhomogenität grundsätzlich eine große Analysenanzahl anzusetzen. Die Analysen sind dadurch statistisch belastbarer. Aufgrund des Personalbedarfs, der Kosten und der Analysendauer wurde die Gesamtanalysenanzahl im Projektrahmen begrenzt. Der Umfang der Analysenanzahl unterschied sich je nach Charge und Analysenmethode. Die Pelletproben wurde mit einem Probenspeer aus den Bigbags entnommen.

Tabelle 4.1: Analytierte Chargen des Strohs und der Strohpellets.

Kürzel	p	g	a	Beschreibung
OS	-	-	-	unbehandeltes Stroh
LS	-	✓	-	gelaugtes Stroh
OSP	✓	-	-	Pellets aus unbehandeltem Stroh
OSP+	✓	-	✓	Pellets aus unbehandeltem Stroh mit Additiv
LSP	✓	✓	-	Pellets aus gelaugtem Stroh
LSP+ (1)	✓	✓	✓	Pellets aus gelaugtem Stroh mit Additiv der ersten Pelletierungskampagne
LSP+ (2)	✓	✓	✓	Pellets aus gelaugtem Stroh mit Additiv der zweiten Pelletierungskampagne

p = pelletiert; g = gelaugt; a = additiviert

4.2.1 Ergebnisse der Immediat-, Elementar- und Heizwertanalyse

In Abbildung 4.4 sind für die sieben Stroh(pellet)chargen die Ergebnisse der Immediat- und Heizwertanalyse dargestellt. Nach der Strohtrocknung konnten große Schwankungen des Wassergehalts von 2,8 bis 11 % festgestellt werden. Diese Schwankungen sind mit der nicht vollständig gelungenen Durchmischung des Strohs während der Trocknung zu erklären. Für die Strohpellets LSP und LSP+(2) konnte der Zielwassergehalt von ca. 10 % erreicht werden. Die Wassergehalte der übrigen Pelletchargen lagen deutlich unter diesem Wert. Dies kann an einer zu geringen Wasserzugabe und einer zu großen Wasserverdampfung während des Pelletierungsprozesses gelegen haben. Die großen Schwankungen des Wassergehalts des gelaugten Strohs (LS) konnten bei den daraus hergestellten Pellets (LSP) nicht bestätigt werden, was für eine hohe Durchmischung und Homogenisierung während der Pelletierung spricht.

Der Aschegehalt und die Schwankungen sind im Ausgangsmaterial mit 4,1 % (wf) für Getreidestroh gering. Durch die Laugung erfolgte wider Erwarten eine Erhöhung des Aschegehalts auf 5,7 % (wf). Bei einer Standardabweichung von 0,9 % reichen die Schwankungen der Aschegehalte von 5 bis 7,8 %. Die Erhöhung kann mit der Kontamination des Stroh durch bspw. Ackerboden oder Windeintragungen während der einzelnen Schritte bei der Laugungskampagne erklärt werden. Die erhöhten Aschegehalte der Pelletchargen OSP+, LSP+ (1) und LSP+ (2) sind mit der Zugabe von Kalkhydrat als Additiv zu erklären. Die genaue Zugabemasse konnte mithilfe der RFA-Ergebnisse ermittelt werden. Der Heizwert und fixe Kohlenstoff bzw. die Flüchtige Bestandteile sind bei allen Chargen ähnlich und weisen nur geringe Schwankungen auf. Entsprechend sind auch die C-, H- und O-Gehalte der Elementaranalyse sehr ähnlich (vgl. Tabelle 4.2). Die Stickstoff- und Schwefelgehalte im Ausgangsmaterial (OS) liegen mit 0,4 bzw. 0,05 % (roh) für Weizenstroh in einem üblichen Bereich. Der Chlorgehalt ist mit 0,03 % (roh) dagegen auffällig niedrig.

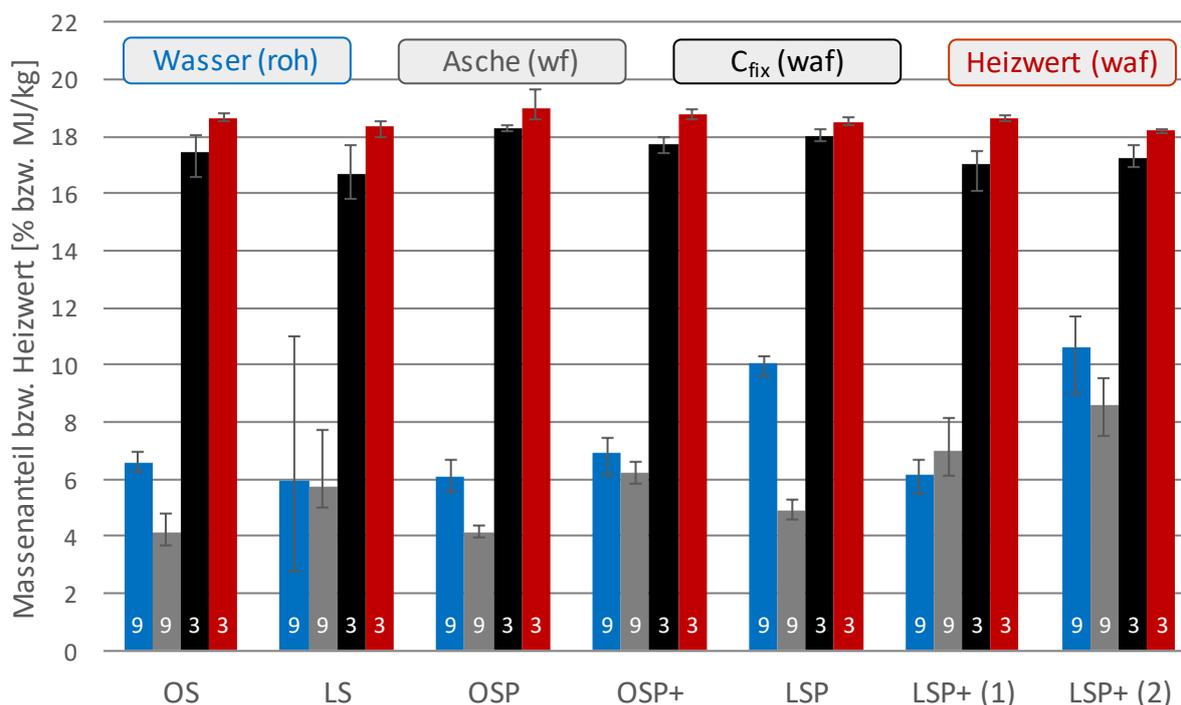


Abbildung 4.4: Ergebnisse der Immediat- und Heizwertanalyse der sieben Stroh- bzw. Strohpelletchargen unter Angabe der Mittelwerte mit Minimal- und Maximalwerten sowie der Analysenzahl.

Tabelle 4.2: Ergebnisse der Immediat-, Elementar- und Heizwertanalysen der Stroh- bzw. Strohpelletchargen im Rohzustand (roh).

Parameter	Einheit	OS	LS	OSP	OSP+	LSP	LSP+ (1)	LSP+ (2)
C	M.-%	44,7	43,6	44,0	43,1	42,1	42,6	40,27
H	M.-%	5,79	5,68	6,41	6,36	5,55	5,53	5,27
O	M.-%	38,8	38,9	39,0	37,3	37,5	38,7	36,47
N	M.-%	0,40	0,36	0,45	0,41	0,35	0,35	0,32
S	M.-%	0,05	0,04	0,07	0,07	0,04	0,05	0,03
Cl	M.-%	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,02
Wasser	M.-%	6,6	5,9	6,1	6,9	10,0	6,2	10,6
Asche	M.-%	3,9	5,4	3,9	5,8	4,4	6,6	7,7
Flüchtige	M.-%	73,9	73,9	73,6	71,8	70,2	72,4	68,2
Heizwert	MJ/kg	16,6	16,2	16,9	16,2	15,8	15,9	14,8

4.2.2 Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse

In Abbildung 4.5 sind die Gehalte (wf) der anorganischen Bestandteile des unbehandelten und gelaugten Strohs dargestellt. Ergänzend ist als Referenz für Weizenstroh das im Vorgängerprojekt „StrohEnergie.NRW“ [44] eingesetzte Stroh aufgeführt. Die Siliziumgehalte des Ausgangsmaterials (OS) und des Referenzstrohs sind mit ca. 12 g/kg sehr ähnlich. Der Calciumgehalt liegt beim Referenzstroh mit ca. 2 g/kg und beim Ausgangsmaterial mit ca. 4 g/kg in einem üblichen Bereich für Weizenstroh.

Durch die Laugung konnte der Kaliumgehalt deutlich um ca. 65 % gesenkt werden. Der Calciumgehalt und der Siliziumgehalt wurden um ca. 40 % auf 5,8 bzw. 17,5 g/kg erhöht. Die Erhöhung des Siliziums untermauert den Verdacht der Kontamination mit bspw. Bodensanden bzw. -silikaten.

Durch den Calciumgehalt im unbehandelten und gelaugten Stroh sowie in den additivierten Pelletchargen lässt sich auf den zugesetzten Kalkhydratgehalt schließen. Für die Pelletchargen OSP+ und LSP+ (1) der ersten Pelletierungskampagne konnte ein Kalkhydratgehalt von 2,1 bzw. 1,9 % (wf) ermittelt werden. Der Kalkhydratgehalt von LSP+ (2) bzgl. der zweiten Pelletierungskampagne beträgt 3,5 % (wf). In dem Fall wurde der Zielgehalt von 2 % deutlich überschritten.

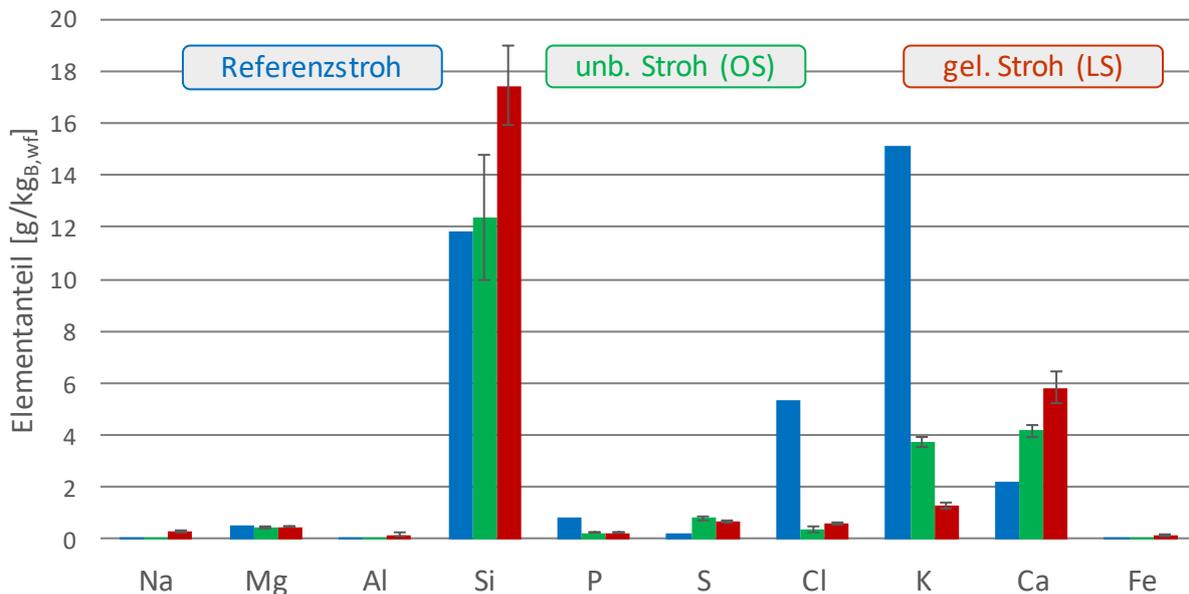


Abbildung 4.5: Ergebnisse der RFA des unbehandelten (OS) und gelaugten Strohs (LS), ausgedrückt als Mittelwerte mit der Standardabweichung (neun Messwerte) im Vergleich zu den Mittelwerten des Referenzstrohs aus dem „Stroh-Energie.NRW-Projekt“ [44] im wasserfreien Bezugszustand (wf).

4.2.3 Ascheerweichungsverhalten

Die Ergebnisse der RFA lassen aufgrund der Kaliumverminderung durch die Strohlaugung auf ein verbessertes Ascheerweichungsverhalten schließen. Durch die Analyse mit einem Erhitzungsmikroskop wurden die charakteristischen Ascheerweichungstemperaturen ermittelt. Die Messwerte der sieben Stroh(pellet)chargen sind in Abbildung 4.6 dargestellt.

Durch die Laugung konnte die Erweichungstemperatur von 914 °C auf 1.142 °C ($\Delta T = 228$ °C) und die Fließtemperatur von 1.132 °C auf 1.234 °C ($\Delta T = 102$ °C) signifikant erhöht werden. Durch die Additivierung mit ca. 2 % Kalkhydrat bei den Strohpellets OSP+ konnte ein ähnlich starker Effekt nachgewiesen werden. Ein Kombinieren von Laugung und Additivierung verstärkt die Ausprägung nochmal bedeutend. So ließen sich die Erweichungs- und Fließtemperaturen für Pellets der Charge LSP+ auf bis zu 1.320 bzw. 1.360 °C erhöhen. Auf die Sintertemperatur konnte die Laugung allein keinen nennenswerten Einfluss ausüben, während durch die unterschiedlich hohe Additivzugabe eine Erhöhung bis auf 937 °C (LSP+ (2)) gemessen wurde.

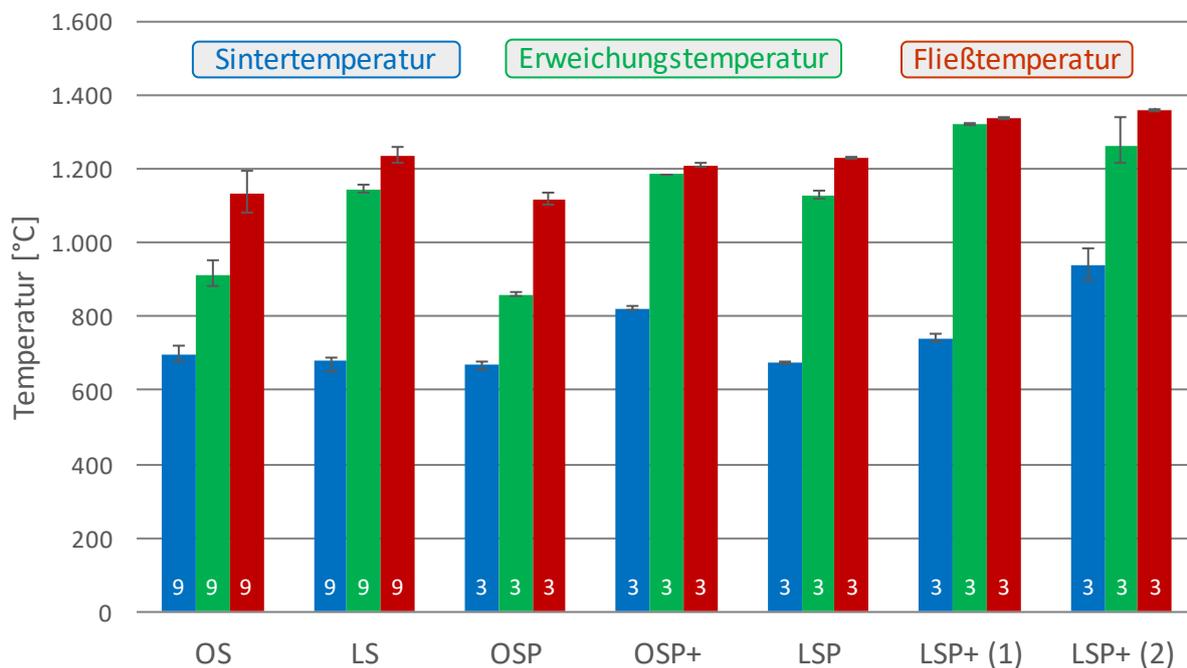


Abbildung 4.6: Charakteristische Temperaturen des Ascheerweichungsverhaltens der sieben Stroh- bzw. Strohpelletchargen.

4.2.4 Pelletqualität

Die Qualitätsanforderungen für Getreidestrohpellets sind in DIN EN ISO 17225-6 [49] definiert. Ergänzend zu den bereits vorgestellten Qualitätsmerkmalen, wie bspw. Wasser-, Asche und Elementgehalt, müssen Vorgaben für Pelletlänge und -durchmesser, mechanische Festigkeit, Schüttdichte und Feingutanteil eingehalten werden. In Tabelle 4.3 sind die Anforderungsparameter und die Werte der fünf Pelletchargen dargestellt. Alle Pelletchargen können die Vorgaben für Pelletdurchmesser und -länge, Stickstoff-, Schwefel- und Chlorgehalt einhalten. Die durchschnittliche Pelletlänge der Pelletcharge LSP+ (2) ist mit 14,79 mm signifikant größer als die Länge der Pellets LSP+ (1) mit 8 mm. Der Wassergehalt kann weitgehend eingehalten werden. Bei einem optimierten Pelletierungsprozess ließen sich die geringen Grenzwertüberschreitungen voraussichtlich vermeiden.

Deutliche Abweichungen von den Qualitätsanforderungen sind für die Parameter mechanische Festigkeit, Feingutanteil und Schüttdichte zu erkennen. Bis auf die Pelletcharge LSP+ (2), welche mit einem Wert der mechanischen Festigkeit von 97,1 % nahezu die Anforderung erfüllt, sind die Werte von 87,5 bis 51,8 % der übrigen Pelletchargen verhältnismäßig gering. Für den Feingutanteil gilt ähnliches. Dabei verfehlt LSP+ (2) die Anforderungen mit 1,7 % nur knapp, während die Werte der übrigen Pelletchargen mit 4,7 bis 9,4 % im Verhältnis hoch sind. Die

Pellets mit gelaugtem Stroh aus der ersten Pelletierungskampagne konnten die Anforderungen an die Schüttdichte nicht einhalten. Die Strohpellets der zweiten Pelletierungskampagne dagegen genügen den Anforderungen mit 651 kg/m³. Schwermetallgehalte wurden im Rahmen des Projekts nicht analysiert.

Tabelle 4.3: Angaben der Pelleteigenschaften nach den Anforderungen von DIN EN ISO 17225-6 [49] für Getreidestroh.

Parameter	Einheit	Anforderung	OSP	OSP+	LSP	LSP+ (1)	LSP+ (2)
Durchmesser	mm	6 - 25 ± 1	7,15	7,10	7,12	7,12	7,25
Länge	mm	3,15 - 40	9,52	8,05	12,85	8,00	14,79
Wassergehalt (roh)	%	≤ 10	6,1	6,9	10,0	6,2	10,6
Aschegehalt (wf)	%	≤ 6; > 6	4,2	6,2	4,9	7,0	8,7
Mech. Festigkeit	%	≥ 97,5 %	87,5	69,4	76,7	51,8	97,1
Feingutanteil	%	≤ 1	4,7	5,7	9,4	9,0	1,7
Schüttdichte	kg/m ³	≥ 600	641	627	522	579	651
Stickstoff (wf)	%	≤ 0,7	0,48	0,44	0,38	0,37	0,35
Schwefel (wf)	%	≤ 0,1	0,07	0,07	0,05	0,05	0,04
Chlor (wf)	%	≤ 0,1	0,03	0,05	0,03	0,04	0,03
Schwermetalle	mg/kg	divers	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

Orange: Geringe Abweichung bzw. Entfernung von der jeweiligen Anforderung

Rot: Signifikante Abweichung bzw. Entfernung von der jeweiligen Anforderung

Weil ausschließlich die Pelletcharge LSP+ (2) der zweiten Pelletierungskampagne für die Verbrennungsversuche verwendet wurde, erfolgte eine umfassendere Analyse der Pelletlängenverteilung nur für diese Pelletcharge. Die Länge wurde mit insgesamt 669 Pellets und der Durchmesser mit 71 Pellets gemessen. Eine exemplarische Pelletprobe der Pelletcharge LSP+ (2) ist in Abbildung 4.7 dargestellt. In Abbildung 4.8 ist die Pelletlängenverteilung wiedergegeben. Der überwiegende Anteil der Pellets weist mit 86 % eine Länge von 5 bis 25 mm auf. 4 % der Pellets sind kürzer als 5 mm und 10 % sind länger als 25 mm.



Abbildung 4.7: Zufällige Beispielprobe der Strohpellets LSP+ (2) (nicht repräsentativ für die Pelletlängenverteilung).

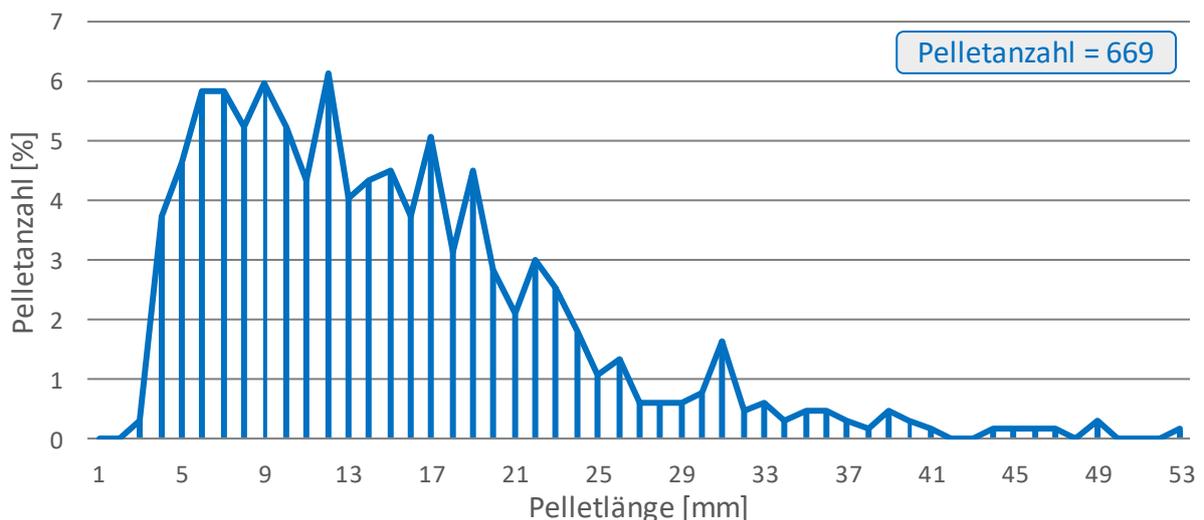


Abbildung 4.8: Durchschnittliche Pelletlängenverteilung der Strohpellets LSP+ (2).

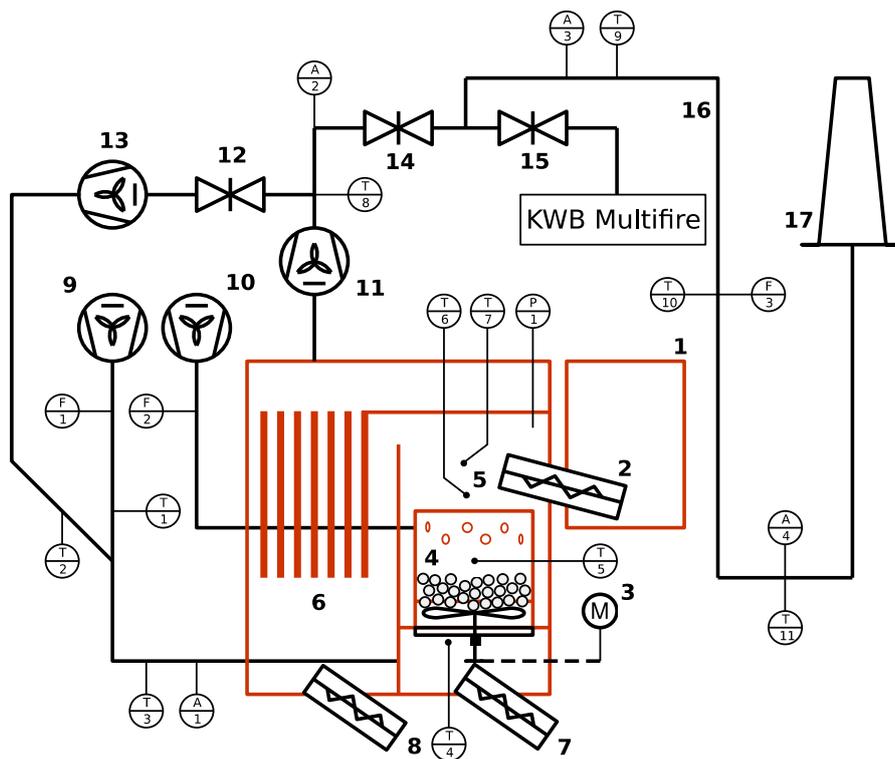
4.3 Aufbau der Versuchsfeuerungen

4.3.1 Abwurffeuering

Für das neu entwickelte und in Verbrennungsversuchen untersuchte Rostsystem wurde eine PZ65RL-Abwurffeuering [50] als Basis verwendet. Diese wurde auf das im Projektverlauf entwickelte Kugelrostsystem umgebaut (vgl. Abbildung 4.9). Die Entwicklung dieses Rostsystems und die detaillierte Funktionsweise sind in Kapitel 4.7 erläutert. Zusätzlich wurde die Feuerung mit Messtechnik ausgestattet. Da ein Teil der Messtechnik spezielle Strömungsverhältnisse benötigt, mussten weitere Modifikationen an der Feuerung vorgenommen werden. Der Versuchsaufbau wird nachfolgend beschrieben. In Abbildung 4.10 ist das zugehörige Verfahrensfliießbild dargestellt.



Abbildung 4.9: PZ65RL Abwurfheizung mit 64,9 kW bei 94,6 % Wirkungsgrad (l.), Kugelrostsystem (r.).



Aggregat/Bauteil		Messparameter	
1	Pelletbehälter	T1	Primärlufttemperatur
2	Pelletförderschnecke	T2	Rezirkulationsgastemperatur
3	Kugelrostmotor	T3	Mischtemperatur Rezirkulationsgas/Primärluft
4	Brennertopf	T4	Temperatur unter Kugelrost (T_{RU})
5	Brennkammer	T5	Brennbetttemperatur (T_{BB})
6	Wärmetauscher	T6	Gaszonentemperatur 1 (T_{GZ1})

7	Ascheschnecke Feuerraum	T7	Gaszonentemperatur 2 (T_{Gz2})
8	Ascheschnecke Wärmetauscher	T8	Abgastemperatur 1
9	Primärluftgebläse	T9	Abgastemperatur 2
10	Sekundärluftgebläse	T10	Abgastemperatur 3
11	Abgassaugzug	T11	Abgastemperatur 4
12	Absperrschieber Rezirkulationsgas	P1	Unterdruck in der Brennkammer
13	Rezirkulationsgasgebläse	F1	Primärluftmassenstrom
14	Absperrschieber PZ65RL	F2	Sekundärluftmassenstrom
15	Absperrschieber KWB Multifire	F3	Abgasmassenstrom
16	Abgasmessstrecke	A1	O ₂ -Konzentration Rezirkulationsgas/Primärluftgemisch
17	Kamin	A2	O ₂ -Konzentration Abgas
		A3	Abgaszusammensetzung
		A4	Abgasstaubkonzentration

Abbildung 4.10: Verfahrensfließbild des Versuchsaufbaus der PZ65RL-Abwurfheizung mit integriertem Kugelrostsystem.

Über eine getaktete Förderschnecke erfolgt die Pelletzuführung vom Pelletbehälter in die Feuerung. Der Rührer des Rostsystems wird über einen Kettenantrieb unterhalb des Rosts mit Elektromotor und Frequenzrichter angetrieben (vgl. Kapitel 4.7). Mithilfe des Primärluftgebläses strömt die Primärluft von unten durch den Rost. Über das Sekundärluftgebläse gelangt die Sekundärluft zu den Düsen und trifft im Brennertopf auf die zu oxidierenden Brenngase. Der Abgassaugzug wird mit einem Differenzdruckumformer auf einen konstanten Unterdruck im Brennraum geregelt. Nach dem Abgassaugzug lässt sich optional Abgas rezirkulieren. Die Abgase strömen in die nach VDI-Richtlinie 3950 Blatt 1 [51] ausgelegte Abgasmessstrecke. Mit den Ascheschnecken kann die Rost- und Flugasche kontinuierlich aus der Feuerung abtransportiert werden, welche jedoch aufgrund der verhältnismäßig kurzen Versuche nicht genutzt wurden.

In dem Brennraum wurden insgesamt drei Thermoelemente (Typ K) installiert. Unterhalb des Rosts befindet sich ein Thermoelement im direkten Kontakt mit den Haltestreben des Rostsystems, um die Materialtemperaturen des Rosts qualitativ zu erfassen. Des Weiteren werden die Abgastemperaturen unmittelbar nach dem Abgassaugzug und an drei weiteren Stellen in der Abgasmessstrecke in Nähe der Abgasmesstechnik gemessen. In der Rezirkulationsgasleitung sowie in der Primärluftleitung vor und nach dem Abzweig zur Rezirkulationsgasleitung sind ebenfalls Thermoelemente implementiert. Durch die kalorischen Durchflusssensoren (FlowVision FC03 TP04) werden die Volumen-/Massenströme von Primär-

und Sekundärluft erfasst. Im Abgas und Mischgas aus Primärluft und Rezirkulationsgas werden mit je einer Lambdasonde (LSU4.9 Bosch GmbH) die Sauerstoffkonzentrationen kontrolliert. Im Rahmen des Projektes wurde kein Rezirkulationsgas verwendet, weil erfolgreiche Ergebnisse zunächst auch ohne Rezirkulationsgas möglich erschienen und zeitlich keine weiteren Versuche möglich waren. In der Abgasmessstrecke wurde zudem der Abgasmassenstrom mit einer S.K.I. SDF-Durchflusssonde gemessen. Die Abgaszusammensetzung wurde mit einem SICK GMS800 Analysegerät erfasst. CO, CO₂, NO und SO₂ wurden mittels nicht-disperser Infrarot-Fotometrie (NDIR) und O₂ über einen elektrochemischen Sensor gemessen. Die kontinuierliche Messung des Gesamtstaubgehalts im Abgas erfolgte mit einer optischen Staubbmessung nach dem Prinzip der Streulichtmessung. Als Messgerät wurde eine Staubsonde des Typs des Typs SICK FW100 eingesetzt. Diese musste mittels einer diskontinuierlichen gravimetrischen Staubbmessung nach gemäß VDI-Dichtlinie 2066 Blatt 1 [52] kalibriert werden.

4.3.2 Wanderrostfeuerung

Als Vergleichsfeuerung wurde eine KWB Multifire Wanderrostfeuerung (vgl. Abbildung 4.11) mit 20 kW Nennwärmeleistung ausgewählt. Diese wurde zuvor beim Hersteller in Versuchen mit Strohpellets (LSP+ (1)) erfolgreich getestet. Eine Kettenfeuerung der Fa. Döpik Energietechnik GmbH wurde ebenfalls erfolgreich getestet. Wegen eines erheblichen Unterschieds im Angebotspreis wurde letztendlich die KWB Multifire Wanderrostfeuerung beschafft.

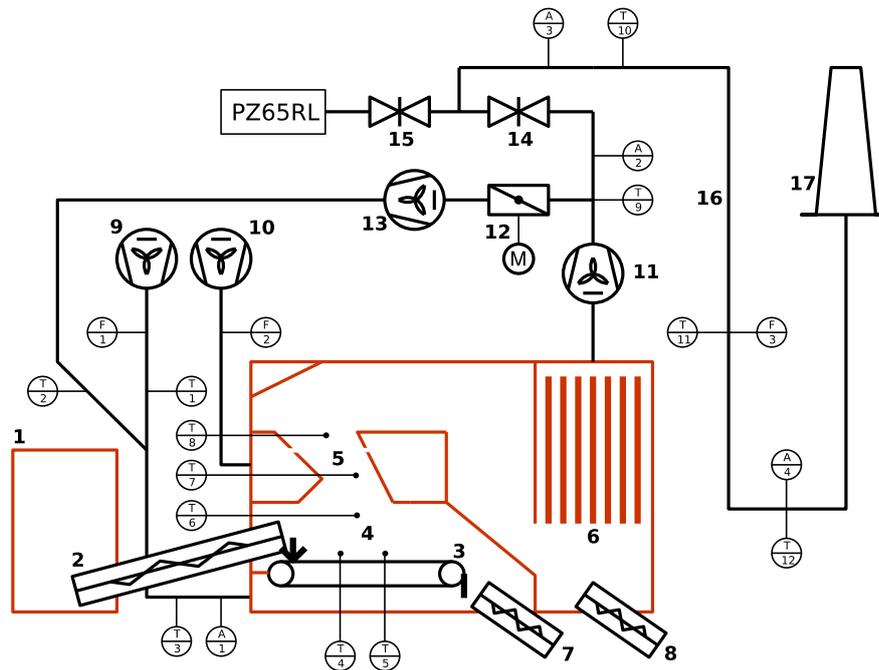
Die Feuerung wurde im Technikum des TEER aufgebaut, hydraulisch angeschlossen und mit derselben Abgasmessstrecke der PZ65RL mit der bereits beschriebenen Messtechnik verbunden. Die Feuerung selbst musste jedoch ebenfalls mit der entsprechenden Messtechnik und den damit verbundenen anlagentechnischen Veränderungen versehen werden. In Abbildung 4.12 ist das Verfahrensfliessbild dargestellt.



Abbildung 4.11: KWB Multifire mit 20 kW bei 93,8 % Wirkungsgrad (l.) und Wanderrosttechnik (r.) [21].

Mit der periodisch getakteten Pelletförderschnecke, dem sog. Stoker, wird der Wanderrost aus dem Pelletbehälter beschickt. Zwischen den Lamellen des Wanderrosts strömt die über das Primärluftgebläse eingebrachte Primärluft in das Brennbett, welches durch den bewegten Wanderrost zum Aschekanal transportiert wird. Die Sekundärluft strömt mittels Sekundärluftgebläse zur Oxidation der Brenngase in die Brennkammer oberhalb des Wanderrosts. Dabei regelt das Sekundärgebläse nach dem Restsauerstoffgehalt im Abgas (Lambdaregelung). Der Abgassaugzug ist ebenfalls wie bei der PZ65RL unterdruckgeregelt. Die Rezirkulationsgasleitung zweigt von der Hauptabgasleitung über eine ansteuerbare Klappe ab.

Bis auf die Temperaturmessungen im Feuerraum sind die Messtechnik und -stellen identisch mit der Abwurffeurung. Daher werden nachfolgend nur die fünf Thermoelemente (Typ K) in der Feuerung beschrieben. Zwei Thermoelemente befinden sich direkt oberhalb des Wanderrosts. Die anderen drei Thermoelemente befinden sich deutlich oberhalb des Brennbetts. Diese werden im weiteren Verlauf zwar als Gaszonentemperaturen beschrieben, können jedoch nicht mit jenen der Abwurffeurung verglichen werden, da diese unterhalb der Sekundärluftzone positioniert sind. Ein Einbau von Thermoelementen in bzw. oberhalb der Sekundärluftzone wäre nur mit großem Aufwand und hohen Kosten möglich gewesen.



Aggregat/Bauteil		Messparameter	
1	Pelletbehälter	T1	Primärlufttemperatur
2	Pelletförderschnecke	T2	Rezirkulationsgastemperatur
3	Raupenbrenner	T3	Mischtemperatur Rezirkulationsgas/Primärluft
4	Feuerraum	T4	Brennbetttemperatur 1 (T_{BB1})
5	Brennkammer	T5	Brennbetttemperatur 2 (T_{BB2})
6	Wärmetauscher	T6	Gaszonentemperatur 1 (T_{GZ1})
7	Ascheschnecke Feuerraum	T7	Gaszonentemperatur 2 (T_{GZ2})
8	Ascheschnecke Wärmetauscher	T8	Gaszonentemperatur 3 (T_{GZ3})
9	Primärluftgebläse	T9	Abgastemperatur 1
10	Sekundärluftgebläse	T10	Abgastemperatur 2
11	Rauchgasgebläse	T11	Abgastemperatur 3
12	Rezirkulationsgasklappe	T12	Abgastemperatur 4
13	Rezirkulationsgasgebläse	F1	Primärluftmassenstrom
14	Absperrschieber zur KWB Multifire	F2	Sekundärluftmassenstrom
15	Absperrschieber zur PZ65RL	F3	Abgasmassenstrom
16	Abgasmessstrecke	A1	O ₂ -Konzentration Rezirkulationsgas/Primärluftgemisch
17	Kamin	A2	O ₂ -Konzentration Abgas
		A3	Abgaszusammensetzung
		A4	Abgasstaubkonzentration

Abbildung 4.12: Verfahrensfließbild des Versuchsaufbaus der KWB Multifire Wanderrostföhrung.

4.4 Bestimmung einer Makrokinetik für Strohpellets basierend auf experimentellen Einzelpartikeluntersuchungen

Mit Hilfe der DEM/CFD Simulationen soll das Abbrandverhalten des Partikelkollektivs unter Bewegungseinfluss untersucht werden. Da diese Simulationsmethodik eine diskrete Beschreibung der individuellen Einzelobjekte vorsieht, müssen die brennstoffspezifischen Daten für das Einzelpartikel untersucht und definiert werden. Die thermochemische Umsetzung eines festen Biomassepartikels kann in drei Phasen unterteilt werden:

1. Trocknung
2. Pyrolyse
3. Koksreaktion

Um die jeweiligen Prozesse zu modellieren und in eine Simulation einzubinden, können prinzipiell mikro- und makrokinetische Ansätze verwendet werden. Ziel von mikrokinetischen Ansätzen ist dabei die tatsächlich auftretenden partikelinternen chemischen Einzelreaktionen in den jeweiligen Phasen der thermochemischen Konversion abzubilden (Wärmeleitung, Diffusion, Konversion im Partikelinneren). Die Verwendung solch aufwendiger Ansätze ist sehr rechenzeitintensiv und daher weniger geeignet zur Simulation der Verbrennung einer Vielzahl an Einzelobjekten in technisch relevanten Systemen. Makrokinetische Ansätze hingegen beschreiben die integrale Umsetzung des festen Brennstoffes auf einem gröberen Auflösungs niveau. Für die globale Fragestellung des Projekts, bei der die Wechselwirkungen zwischen der Bewegung und des Abbrandverhaltens des Partikelkollektivs von zentraler Bedeutung ist, kann ein effizienter makrokinetischer Ansatz mit hinreichend genauer Abbildungsgüte verwendet werden.

Zur Bestimmung der makrokinetischen Daten für die in diesem Vorhaben hergestellten Strohpellets wurden zunächst Einzelpartikeluntersuchungen am „Large-scale Oven for Kinetics Investigation“ (LOKI) Reaktor des Fraunhofer Instituts Umsicht durchgeführt. In diesem Reaktor werden die Masse und die Kerntemperatur einzelner Strohpellets während der thermochemischen Umsetzung gemessen. Durch Variation der thermischen Randbedingungen und des Sauerstoffgehaltes der zugeführten Verbrennungsluft können temperaturabhängige Massenumsatzraten für unterschiedliche Phasen der thermochemischen Konversion experimentell ermittelt werden. Auf Basis dieser Daten wurden dann die Parameter für das thermochemische Modell der Einzelpartikel für die gekoppelten DEM/CFD Simulationen bestimmt.

Linearsystems bewegt und für die Untersuchung innerhalb von drei Sekunden in den Reaktor eingefahren. Während des Hochfahrens der Probe ist die Waage Erschütterungen ausgesetzt, und das Messsignal wird stark durch diese Schwankungen beeinflusst. Nach Erreichen der Endposition kann der Massenverlust der Probe störungsfrei aufgezeichnet werden. Der Probenkorb besteht aus einem temperaturbeständigen, textilen Material (Glasfaser) und ermöglicht durch eine netzartige, weitmaschige Struktur eine weitgehend gleichmäßige Um- und Durchströmung der Probe.

Getrennt von der Massenverlustmessung erfolgt die Kerntemperaturmessung, bei der die Probe auf einem Thermoelement positioniert wird, das sich auf dem unteren Flansch der OZ1 befindet (siehe auch Abbildung 4.13). Mittels eines unten angeordneten pneumatischen Linearsystems wird der Flansch zusammen mit dem Thermoelement und der Probe aus der unteren Schleuse in die heiße Ofenzone eingefahren. Die Erfassung der Kerntemperatur im Brennstoff erfolgt mit einem Thermoelement (Durchmesser 1,5 mm; Typ K), dessen Messspitze jeweils im Schwerpunkt des Brennstoffpartikels angebracht wird. Zusätzlich wurde eine Kerntemperaturmessung (Doppelbestimmung) bei 900 °C in oxidierender Atmosphäre mit einem Thermoelement mit 1 mm Durchmesser durchgeführt. Probe und Thermoelement befinden sich während des Versuchs zur Kerntemperaturmessung an derselben Position wie der Probenkorb bei der Massenverlustmessung.

Die Ofenzonen können unabhängig voneinander mit Stickstoff und/oder technischer Luft beaufschlagt werden. Der Volumenstrom ist mittels Durchflussregler jeweils variabel einstellbar. Die Erzeugung einer inerten Umgebungsbedingung bzw. Atmosphäre in der OZ1 ist mittels ausschließlicher Stickstoffeingabe möglich. Die entstandenen Pyrolysegase werden im Anschluss in der OZ2 durch Zugabe von technischer Luft oxidiert. Durch die Spülung der Waage mit Stickstoff, der anschließend durch die Waagenaufhängung in die OZ1 gelangt, wird in der OZ1 bei Untersuchungen mit technischer Luft eine Atmosphäre mit 19 Vol.-% O₂ erreicht. Bei einer Beaufschlagung der OZ1 mit technischer Luft sind Untersuchungen zum Abbrandverhalten des nach der Entgasung entstehenden Koks möglich. Mit gezielt eingestellten Mischungen von Stickstoff und technischer Luft kann eine definierte Gasatmosphäre erzeugt werden.

Um eine Vermischung der für jede Untersuchung speziell eingestellten Reaktoratmosphäre mit der Umgebungsluft zu verhindern, befindet sich die Reaktoröffnung in einer Schleuse, die mit Stickstoff gespült werden kann. Oberhalb des Probenkorbs ist ein weiteres Thermoelement (TE Ofen) positioniert. Die Messung der Rauchgaskonzentrationen (Feuchtigkeit/Wasser (H₂O), Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Kohlenstoffmonoxid (CO)) erfolgt hinter der OZ2 am Ende der Rauchgasleitung in der Gasanalytik. Die Messgase werden nach dem Prinzip der

nichtdispersiven Infrarot-Fotometrie (NDIR) gemessen. Sauerstoff (O₂) wird separat mit einer elektrochemischen Messung bestimmt.

Durch die systemintegrierte Waage ist eine Echtzeitmessung der Probenmasse während des Versuchsvorgangs möglich. Der Kraftaufnehmer der Waage befindet sich oberhalb der OZ2. Die Verbindung zwischen Probenkorb und Kraftaufnehmer wird mittels eines Drahts hergestellt, der durch ein Keramikrohr durch die OZ2 geführt wird.

Die Untersuchungen wurden bei Heizelementtemperaturen. Von 700, 800 und 900 °C durchgeführt. Die obere Ofenzone OZ2 (Nachoxidation) wurde auf 1000 °C und die untere Ofenzone OZ1 anschließend auf Versuchstemperatur aufgeheizt. Die Luftzugabe (technische Luft) erfolgte mit 5 NI/min in OZ2. Die Waage wurde zum Spülen mit 2 NI/min N₂ beaufschlagt. Für die Oxidation der Brennstoffproben wurden 10 NI/min technische Luft in OZ1 aufgegeben. Um eine Sauerstoffatmosphäre mit weniger als 21 Vol.-% O₂ zu erreichen, wurde ein Luft-Stickstoff-Gemisch in OZ1 eingeleitet. Um inerte Bedingungen zu erhalten, wurde 10 NI/min N₂ in OZ1 aufgegeben. Die Pyrolyseversuche wurden bei max. 2 Vol.-% O₂ durchgeführt.

Für die Kerntemperaturmessung wurde nach der Aufheizung beider Ofenzonen der Brennstoff auf dem Thermoelement positioniert. Das Thermoelement befindet sich auf dem Schließflansch des Ofens, der sich zum Zeitpunkt der Brennstoffpositionierung unterhalb der OZ1 in der Schleuse befindet. Auch die Aufhängung des Probenkorbs an der Waage für die Massenverlustmessung befindet sich unterhalb der OZ1 innerhalb der Schleuse. Bei der Pyrolyse der Brennstoffe wird die Schleuse nach der Positionierung des Brennstoffs zusätzlich mit N₂ gespült. Anschließend werden die Aufhängung der Waage und der Schließflansch zusammen mit den Thermoelementen und der Probe schlagartig innerhalb von 3 Sekunden in die aufgeheizte OZ1 eingefahren. Für die Messung des Massenverlustes wird nach der Aufheizung beider Ofenzonen die Probe in den Korb (3), der mit der Waage verbunden ist, platziert. Zu diesem Zeitpunkt befinden sich der Schließflansch mit den Thermoelementen und die Probenaufhängung unter der OZ1 in der Schleuse. Anschließend werden die Aufhängung der Waage (2), an der der Probenkorb befestigt ist, und der Schließflansch schlagartig (1) in die aufgeheizte OZ1 eingefahren. Während des schlagartigen Einfahrens der Probe wird das Messsignal bzw. die Waagenfrequenz in den ersten Sekunden durch die Erschütterung der Messeinrichtung gestört.

Die Datenaufzeichnung umfasst den Massenverlust bzw. die Kerntemperatur, Heizelementtemperatur, die Temperatur über der Probe (TE Ofen), die Gasflüsse und die

Gaskonzentrationen (CO₂, CO, H₂O und O₂) im Rauchgas. Die Rückstände wurden zusätzlich nach der Oxidation oder Pyrolyse mit einer Laborwaage gewogen.

Die Koksreaktion an der Oberfläche eines makroskopischen Einzelpartikels aus Holz ist sauerstoff- und temperaturabhängig, während die Trocknung und Pyrolyse lediglich temperaturabhängig sind. Allerdings überlagern sich die einzelnen Phasen der thermochemischen Konversion bei den hier vorliegenden „thermisch dicken“ Strohpellets. Durch die Versuche in nahezu inerte Atmosphäre können die Umsatzraten der Trocknung und Pyrolyse entkoppelt von der heterogenen Koksreaktion gemessen werden. Um zunächst den Einfluss der Temperatur und des Sauerstoffgehaltes auf die thermochemische Umsetzung bestimmen zu können, wurden folgende Experimente in der LOKI-Anlage durchgeführt.

Tabelle 4.4: Versuchsmatrix der Einzelpartikelexperimente (LOKI).

Massenverlust			Kerntemperatur		
700 °C	2 Vol.-% O ₂	Doppelbestimmung	700 °C	2 Vol.-% O ₂	Doppelbestimmung
800 °C	2 Vol.-% O ₂	Doppelbestimmung	800 °C	2 Vol.-% O ₂	Einfachbestimmung
900 °C	2 Vol.-% O ₂	Doppelbestimmung	900 °C	2 Vol.-% O ₂	Doppelbestimmung
700 °C	3-7 Vol.-% O ₂	Einfachbestimmung	700 °C	10 Vol.-% O ₂	Einfachbestimmung
700 °C	10 Vol.-% O ₂	Doppelbestimmung	800 °C	10 Vol.-% O ₂	-
800 °C	10 Vol.-% O ₂	Doppelbestimmung	900 °C	10 Vol.-% O ₂	Einfachbestimmung
900 °C	10 Vol.-% O ₂	Dreifachbestimmung	700 °C	19 Vol.-% O ₂	Einfachbestimmung
700 °C	19 Vol.-% O ₂	Doppelbestimmung	800 °C	19 Vol.-% O ₂	Einfachbestimmung
800 °C	19 Vol.-% O ₂	Doppelbestimmung	900 °C	19 Vol.-% O ₂	Doppelbestimmung
900 °C	19 Vol.-% O ₂	Doppelbestimmung	900 °C	19 Vol.-% O ₂	Doppelbestimmung*

Anhand eines Vergleichs der thermochemischen Umsetzung bei verschiedenen Temperaturen und Sauerstoffgehalten, soll der Einfluss der beiden Parameter auf die verschiedenen Phasen kurz skizziert werden, um im Anschluss die Modellierung der thermochemischen Umsetzung in einer DEM-Simulation zu veranschaulichen.

Einfluss des Sauerstoffs

Durch die Variation des Sauerstoffgehaltes der Luft in der Brennkammer, kann deren Einfluss auf die Verbrennung eines Partikels bestimmt werden. Am Beispiel einer Ofentemperatur (OZ1) von 700 °C ist der Einfluss des Sauerstoffs auf die Kerntemperatur und die Massenabnahmerate in Abbildung 4.14 und 4.15 dargestellt.

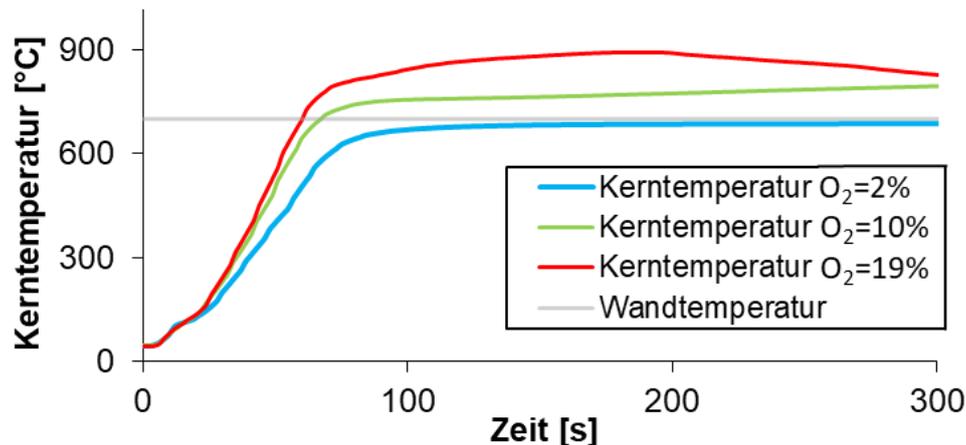


Abbildung 4.14: Kerntemperatur unterschiedlicher Proben bei verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen und einer konstanten Temperatur der OZ1 von 700°C.

Abbildung 4.14 zeigt die zeitlichen Verläufe der Kerntemperaturen der jeweiligen Probe für die LOKI-Versuche bei unterschiedlichen Sauerstoffgehalten. Zum Zeitpunkt Null wurde das Partikel in den Ofen gefahren und die Messung gestartet. Zu Beginn sind die Temperaturen jedoch nicht nahe den Umgebungsbedingungen. Die Partikel erwärmen sich während der Aufheizphase der OZ1. Sobald die Aufzeichnung der Temperatur startet haben die Partikel eine erhöhte Kerntemperatur und auch einen geringeren Wassergehalt als zuvor. Mit zunehmender Versuchszeit steigt dann die Partikelkerntemperatur aufgrund der zugeführten Strahlungswärme an. Nach ca. 100 Sekunden erreichen die Graphen ein Plateau bei dem sich die Kerntemperatur kaum verändert. An dieser Stelle wird auch der Einfluss des Sauerstoffgehaltes bzw. der Koksreaktion auf die Partikeltemperatur deutlich. Während die Kerntemperatur bei 2% nicht über die Wandtemperatur von 700 °C in der OZ1 ansteigt, führt die Reaktionswärme der Koksreaktion bei 10% und 19% zu einer weiteren Aufheizung des Partikels. Durch einen Vergleich der Kerntemperaturkurve von 10% und 19% wird deutlich, inwieweit die Koksreaktion zur Erhöhung der Partikeltemperatur beiträgt.

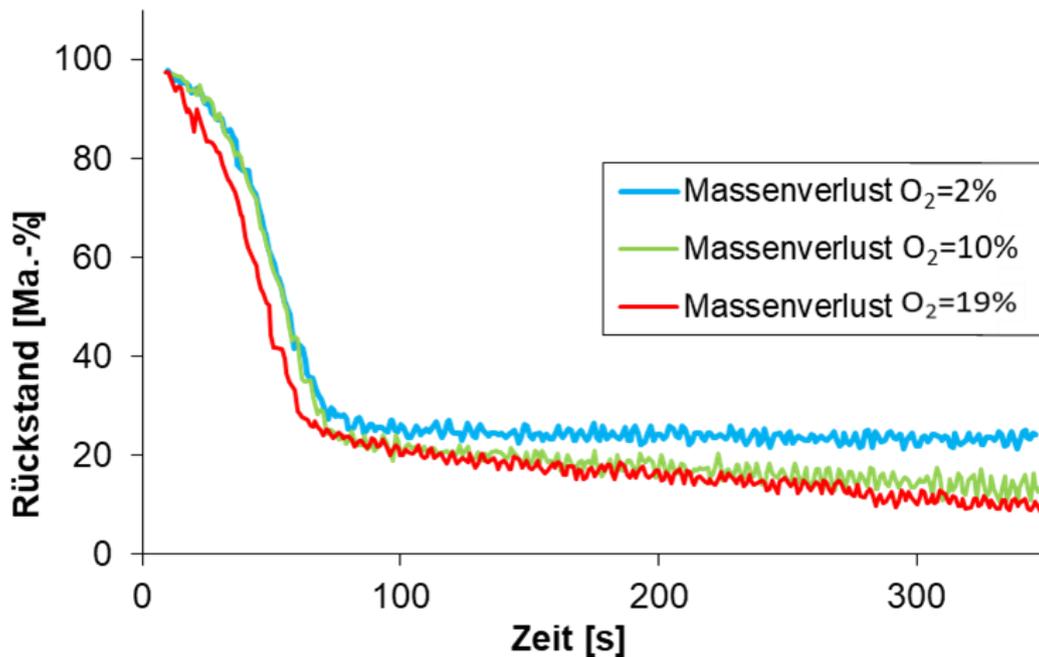


Abbildung 4.15: Massenabnahme unterschiedlicher Proben bei verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen und einer konstanten Temperatur der OZ1 von 700°C.

Abbildung 4.15 zeigt den zeitlichen Verlauf der relativen Massenabnahme eines Partikels bei unterschiedlichen Sauerstoffgehalten. Die Messung der Masse wird in den ersten Sekunden durch die Erschütterung der Messeinrichtung gestört. Mit zunehmender Partikeltemperatur durch die Strahlungswärme kommt es zu einer thermochemischen Umsetzung des Partikels nach den zuvor beschriebenen Phasen. Die Trocknung ist mit einer geringen Massenabnahme verbunden und die darauffolgende Pyrolyse setzt den größten Teil der Masse thermochemisch um. Nach ca. 90 Sekunden erreichen die Graphen ein unteres Plateau. Während die Masse im unteren Plateau bei einem Sauerstoffgehalt von 2% konstant bleibt, sinkt die Masse bei 10% und 19% stetig. Dieser Effekt ist wiederum auf die Koksreaktion zurückzuführen, durch welche in der letzten Phase der thermochemischen Umsetzung noch etwas Masse umgesetzt wird. Hierdurch ist auch die gesamte relative Massenabnahme der Partikel bei 10 und 19% höher. Durch den Vergleich der Kurven für 10% und 19% lässt sich feststellen, dass der Umsatz in der Koksreaktion umso größer ist je mehr Sauerstoff im System vorhanden ist.

Einfluss der Temperatur

Der Einfluss des Sauerstoffs auf die Koksreaktion sowie die gesamte thermochemische Umsetzung ist anhand der vorangegangenen Auswertung zu erkennen. Um die makrokinetischen Daten der Pyrolyse zu bestimmen, wurden Versuche mit niedrigen Sauerstoffgehalten

durchgeführt. Dadurch wird eine Koksreaktion unterdrückt und es können die temperaturabhängigen Massenverläufe der Pyrolyse dargestellt werden. In Abbildung 4.16 und Abbildung 4.17 sind die relative Massenabnahme und der Verlauf der Kerntemperaturen verschiedener Proben bei unterschiedlichen Temperaturen der OZ1 mit einer konstanten Sauerstoffkonzentration von 2 Vol-% abgebildet.

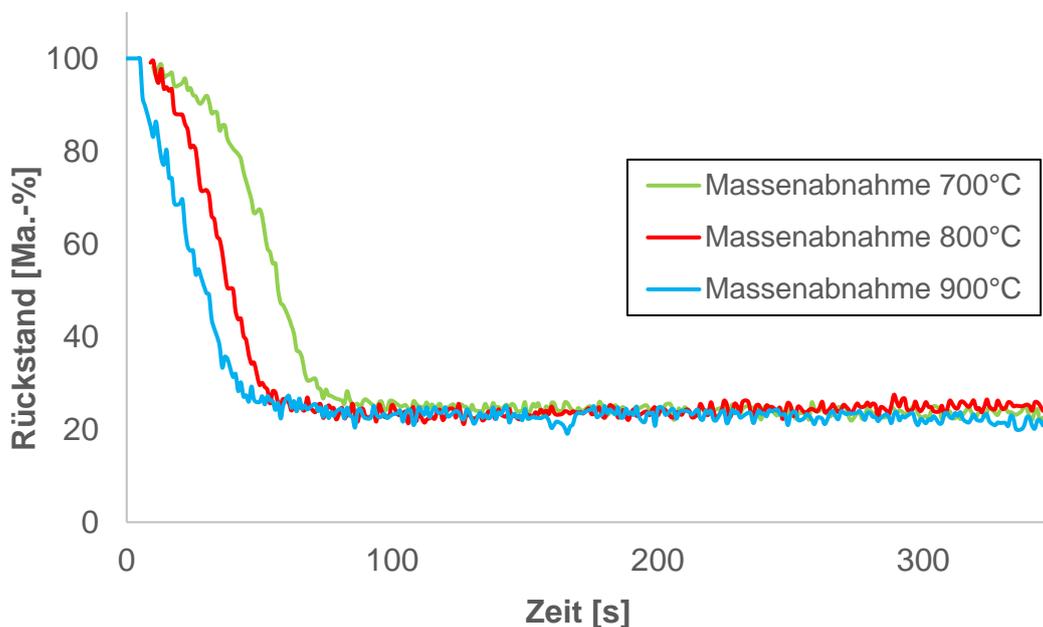


Abbildung 4.16: Massenabnahme unterschiedlicher Proben bei verschiedenen Temperaturen und einer festen Sauerstoffkonzentration von 2 Vol-%.

Durch die Erschütterung des Messapparates startet die Aufzeichnung der Masse in Abbildung 4.16 erst einige Sekunden später als die Aufzeichnung der Kerntemperatur. Nach einer geringfügigen Massenabnahme aus der Trocknungsphase, sinkt die Masse des Partikels während der Pyrolyse deutlich. Ab ca. 100 Sekunden gibt es ein unteres Plateau mit einer konstant bleibenden Masse (wegen der ähnlichen Aufheizraten kaum Unterschiede der Koksreste). Eine Koksreaktion mit einem weiterem Massenumsatz findet demnach nicht statt. Durch einen Vergleich der verschiedenen Massenabnahmeraten kann deren Erhöhung mit steigender Strahlungstemperatur der OZ1 festgestellt werden.

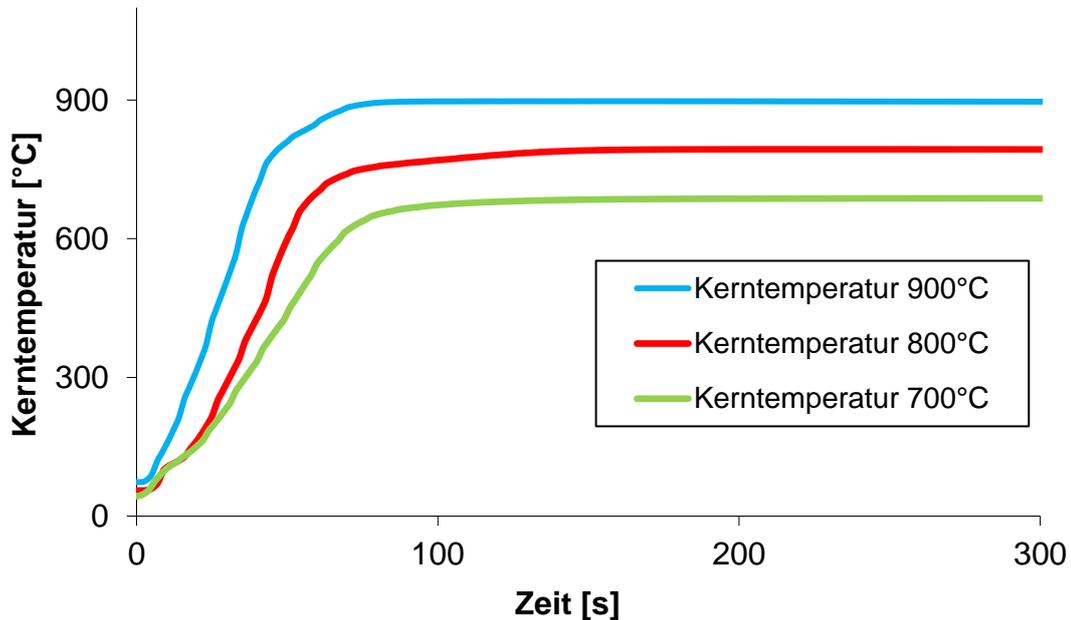


Abbildung 4.17: Kerntemperatur unterschiedlicher Proben bei verschiedenen Temperaturen und einer festen Sauerstoffkonzentration von 2 Vol-%.

Zu Beginn der Versuche in Abbildung 4.17 sind die Kerntemperaturen der Partikel nicht mehr nahe der Umgebungsbedingungen, weil die Partikel sich in der Aufheizphase der OZ1 leicht erhitzen. Dies beeinflusst auch den Wassergehalt der Partikel. Sobald die Temperatur aufgezeichnet wird, werden die Partikel durch die Strahlungswärme der OZ1 aufgeheizt bis ab ca. 100 Sekunden ein oberes Plateau mit einer konstant bleibenden Kerntemperatur erreicht wird. Die Aufheizrate bei einer Strahlungstemperatur von 900°C ist verglichen mit den darunterliegenden Temperaturen größer.

Modellierung der thermochemischen Umsetzung

Durch die Daten aus den LOKI-Versuchen sind die Aufheiz- und Masseabnahmeraten bekannt. Um diese mithilfe von DEM/CFD Simulationen darstellen zu können ist ein Modellierungsansatz notwendig, welcher die thermochemische Umsetzung der einzelnen Strohpellets wiedergeben kann.

Da es sich bei den Strohpellets um „thermische dicke“ Objekte ($Bi > 1$) handelt, können grundsätzlich auch dreidimensional verteilte partikelinterne Gradienten der Temperatur und des Grades der thermochemischen Umwandlung auftreten. Um dies bei der Modellierung zu berücksichtigen wird jedes Pellet durch einen Zylinder mit Kugelkappen (Spherozylinder)

approximiert (Abb. 4.18 a)) und mit Hilfe eines tetraederförmigen Finite-Volumen Gitters diskretisiert (Abb. 4.18 b)).

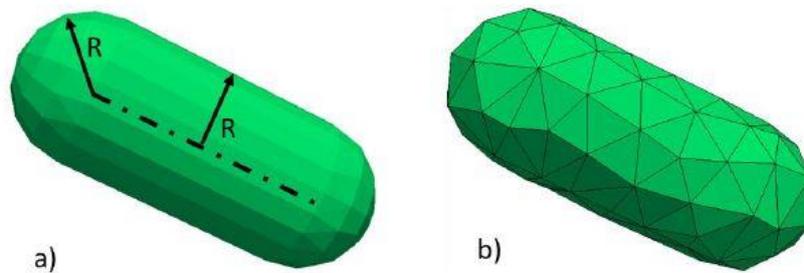


Abbildung 4.18: a) Durch ein Spherozylinder approximiertes Strohpellet, b) Mit Finite-Volumen Netz diskretisiertes Strohpellet.

Auf Basis dieser diskreten Partikelapproximation kann die dreidimensionale Temperaturverteilung im inneren des Partikels durch lösen der Wärmeleitungsgleichung bestimmt werden. Anschließend sind die Temperaturen jedes individuellen finiten Volumens im inneren des Einzelpartikels bekannt. Auf Basis dieser Temperaturverteilung werden dann die thermochemischen Umwandlungsraten für jedes individuelle finite Volumen bestimmt.

Die Modellierung der thermochemischen Umwandlung eines Einzelpellet innerhalb der DEM Simulation erfolgt für jedes individuelle Kontrollvolumen („Zelle“ des Tetraedergitters) sequentiell in den Schritten: Trocknung, Pyrolyse, Koksumwandlung. Für jede dieser Phasen werden eigene Massen- und Energiebilanzen durchgeführt. Die Freisetzungsraten in den jeweiligen Phasen werden über makrokinetische Ansätze gemäß Gleichung 4.1 bis 4.5 berechnet.

$$Q_V = m_{cell} c_{p,cell} (T_{cell} - T_S) \quad (4.1)$$

$$\Delta m_{H_2O} = \frac{Q_V}{h_V} \quad (4.2)$$

$$\Delta m_{pyr} = k_{pyr} e^{\frac{-E_1}{R_m T_{cell}}} dt \quad (4.3)$$

$$\Delta m_{Koks} = \frac{8M_C \Omega_C C_{O_2}}{\frac{1}{r_{Koks} A_{sf}} + \frac{1}{\beta_{O_2} A_{sf}}} dt \quad (4.4)$$

Mit

$$r_{Koks} = k_{Koks} T e^{\frac{-E_2}{R_m T}} \quad (4.5)$$

In Gleichung 4.1 ist m_{cell} die Masse einer Zelle, $cp_{p,cell}$ die isobare Wärmekapazität einer Zelle, T_{cell} die Temperatur einer Zelle, T_S die Siedetemperatur sowie Q_V die Wärme, welche bei der Verdampfung des Wasseranteils entsteht. In Gleichung 4.2 ist Δm_{H_2O} der Masseverlust in einem Simulationsschritt und h_V die Verdampfungsenthalpie Wassers bei Umgebungsdruck. In Gleichung 4.3 ist Δm_{pyr} der Massenverlust infolge der pyrolytischen Zersetzung des biogenen Materials innerhalb eines Simulationszeitschrittes. Dabei sind k_{pyr} und E_1 die zunächst unbekanntenen Modellparameter des verwendeten Arrhenius Ansatzes und R_m die universelle Gaskonstante. In Gleichung 4.4 ist Δm_{Koks} der Massenverlust in der Phase der Koksreaktion, M_C die molare Masse von Kohlenstoff, Ω_C der stöchiometrische Koeffizient nach Evans und Emmons [54], C_{O_2} Die Konzentration und β_{O_2} der Diffusionskoeffizient des Sauerstoffs an der jeweiligen Oberflächenzelle, A_{sf} die Fläche der jeweiligen Oberflächenzelle sowie k_{Koks} die Reaktionsrate des festen Kohlenstoffs mit der Luft.

Der Betrag der Pyrolyserate und dessen Sensitivität bezüglich der lokalen Temperatur ist durch die Modellparameter k_{pyr} und E_A definiert. Für die korrekte Modellierung der temperaturabhängigen Pyrolyseraten müssen die unbekanntenen Modellparameter k_{pyr} und E_A mit Hilfe der experimentellen Untersuchungen am LOKI Reaktor kalibriert werden. Die entsprechenden Parameter für die Koksumwandlung (k_{Koks} und E_2) können aus der Literatur (Evans und Emmons [54]) entnommen werden.

Dazu wurde ein Python-Skript verwendet, welches in der Lage ist mit Hilfe eines nichtlinearen Least Square Fittings (LSF) die besten Werte von k_{pyr} und E_1 automatisiert und iterativ für die vorgegebenen Modellgleichung (Gl 4.3) zu bestimmen. Für die Anpassung dieser Werte sind die Massenabnahmerate sowie die Aufheizrate von entscheidender Bedeutung. Diese müssen daher aus den LOKI-Versuchen extrahiert werden, um die Modellparameter auf Basis des Vergleichs zwischen experimentellen und numerischen Daten anpassen zu können. Die Funktionsweise des Python-Tools ist in einem Flussdiagramm in Abbildung 4.19 dargestellt.

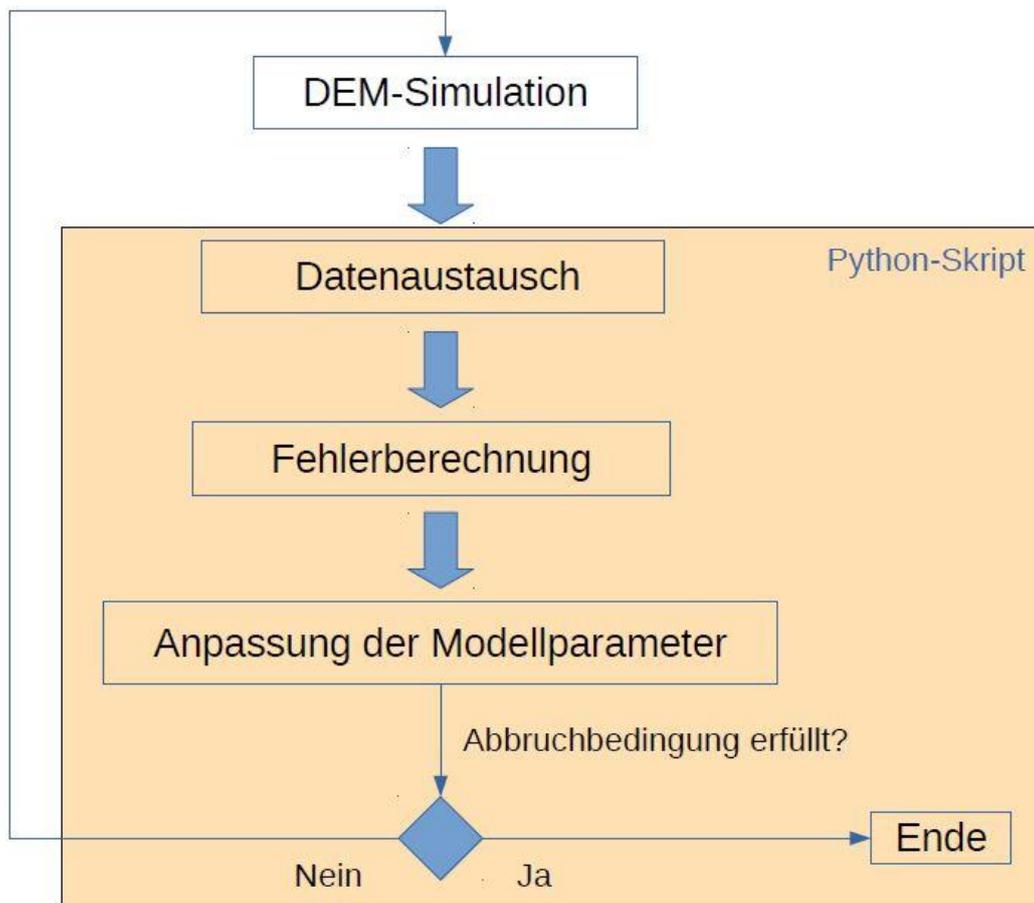


Abbildung 4.19: Flussdiagramm des Python-Tools für einen Least Square Fit der DEM-Simulationsdaten.

Zu Beginn der Parameterbestimmung wird eine DEM-Simulation mit angenommenen Startwerten für die Modellparameter k_{pyr} und E_1 mit einer konstanten Zeitschrittweite für thermochemischen Berechnungen von $\Delta t = 0,01s$ ausgeführt. Die aktuelle Partikelmasse und die entsprechende Kerntemperatur werden gemäß der Messfrequenz der LOKI Versuche von 1/s aktualisiert und gespeichert. Anschließend werden sowohl die Temperatur- und Massedaten der Experimente als auch die der Simulationen mit Hilfe des Python-Skriptes eingelesen. Anhand der Differenz der berechneten und der gemessenen Pelletmasse zu den jeweiligen Zeitpunkten kann der mit den aktuell verwendeten Modellparametern resultierende Unterschied zwischen Experiment und Simulation quantifiziert werden. Mit Hilfe dieses Unterschieds werden dann auf Basis der Ableitungen der Einzeltermine die Anteile der Modellparameter am Gesamtfehler entsprechend gewichtet. Anschließend werden Modellparameter entsprechend der Gewichtungsfaktoren und der Differenzen zum Messwert für die nächste Iteration angepasst, um näher zu den experimentell erfassten Werten zu gelangen. Am Ende des Python Skriptes wird

überprüft ob eine zuvor definierte Abbruchbedingung erfüllt ist. Die Überprüfung der Abbruchbedingung erfolgt durch einen Vergleich der Summe der Fehlerquadrate der durchgeführten Iteration mit der Summe der Fehlerquadrate der letzten Iteration. Ist die Bedingung erfüllt, beendet das Skript den iterativen Prozess. Ist dies nicht der Fall wird mit den neuen Modellparametern eine weitere DEM-Simulation mit anschließender Ausführung der Python Skriptes gestartet.

In Abbildung 4.20 sind die Ergebnisse der simulierten Massenabnahme und Pelletkerntemperatur mit den endgültigen, per LSF bestimmten Parametern gemäß Tabelle 4.5 dargestellt (gestrichelte Linie). Anhand des Vergleichs mit den experimentellen Daten (durchgezogene Linien) kann die Abbildungsgüte der verwendeten Makrokinetik quantifiziert werden.

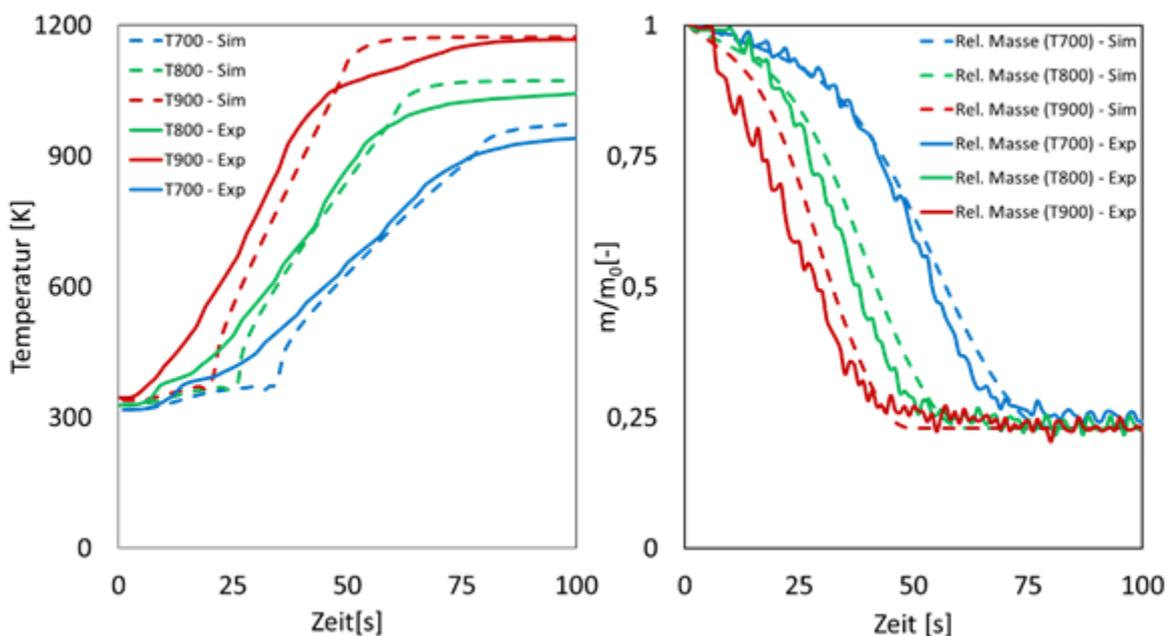


Abbildung 4.20: Vergleich der experimentellen Kerntemperaturen und Massenabnahmen mit den Ergebnissen des Least Square Fits aus der Anwendung des Python-Tools.

Tabelle 4.5: Finale Modellparameter nach abgeschlossenem Least Square Fit.

Flüchtigenfreisetzung		Koksverbrennung	
$k_{pyr} = 3,44e - 8 [kg/s]$	$E_A = 9861 [J/mol]$	$k_{Koks} = 1,715 [m/sK^{-1}]$	$E_A = 75000 [J/mol]$

In

Abbildung 4.20 sind die Pelletkerntemperaturen und Massenabnahmen von drei verschiedenen Einzelpartikelversuchen am LOKI-Reaktor mit Strohpellets abgebildet. Die gestrichelten Linien stellen die per DEM berechneten und die durchgezogenen Linien die messtechnisch bestimmten Ergebnisse dar. In beiden Fällen wurden Strahlungstemperaturen von 700, 800 und 900°C mit

jeweils zwei Volumenprozent Sauerstoff gewählt. Insgesamt lässt sich eine qualitativ gute Übereinstimmung der Aufheizraten und der korrespondierenden Massenabnahme für die pyrolysierenden Pellets identifizieren. Auch quantitativ können größtenteils gute Übereinstimmungen der Temperaturabhängigkeit der Massenumsatzraten festgestellt werden.

Leichte quantitative Abweichungen zu den experimentellen Daten der Kerntemperaturen und der Massen können vor allem am Versuchsanfang beobachtet werden. Diese Abweichungen können auf die kurzzeitig undefinierten Randbedingungen zum Start der Messung in der LOKI-Anlage zurückgeführt werden. Da für die angestrebten Verbrennungssimulationen vor allem die temperaturabhängigen Raten der Massenabnahme in der Hauptpyrolysephase von Bedeutung sind, können die Modellparameter des Arrhenius-Ansatzes als hinreichend genau zur makrokinetischen Beschreibung der thermochemischen Konversion im Temperaturbereich zwischen 700 und 900°C angenommen werden.

4.5 Experimentelle Untersuchung des Abbrandverhaltens von Strohpelletschüttungen

Das Abbrandverhalten eines Partikelkollektivs unterscheidet sich aufgrund der in der Schüttung stattfindenden komplexen Wärme- und Stofftransportvorgänge drastisch von dem eines Einzelpellet. Zudem hat auch die im Projekt vorgesehene Schürung des Brennbettes erheblichen Einfluss auf das Abbrandverhalten einer Schüttung. Daher wird in Ergänzung zu den Einzelpartikeluntersuchungen (Abschnitt 4.4) im Rahmen dieses Kapitels die thermochemische Zersetzung einer Schüttung aus Strohpellets diskutiert und deren Wechselwirkung mit der Brennbettbewegung analysiert. Gleichzeitig dienen die Messdaten als Verifizierungsgrundlage für das für den Pelletofen vorgesehene Simulationsmodell.

4.5.1 Aufbau des Versuchstandes BORA

Zur Untersuchung des Einflusses kontrollierter Schürung auf den Verbrennungsprozess wurde die Versuchsanlage **Batch-Operated Reactor for Agitated beds (BORA)** des LEAT verwendet. Dieser ermöglicht die Messung der Massenabnahme der Schüttung, die Variation der Luftstufung, Temperaturmessungen im Brennraum und an der Bettoberfläche sowie eine Analyse des Rauchgases während des Verbrennungsprozesses bei definierten Schürbewegungen. Der Aufbau des Versuchstandes und die Funktion des Schürkonzeptes sind in Abbildung 4.21 schematisch dargestellt.

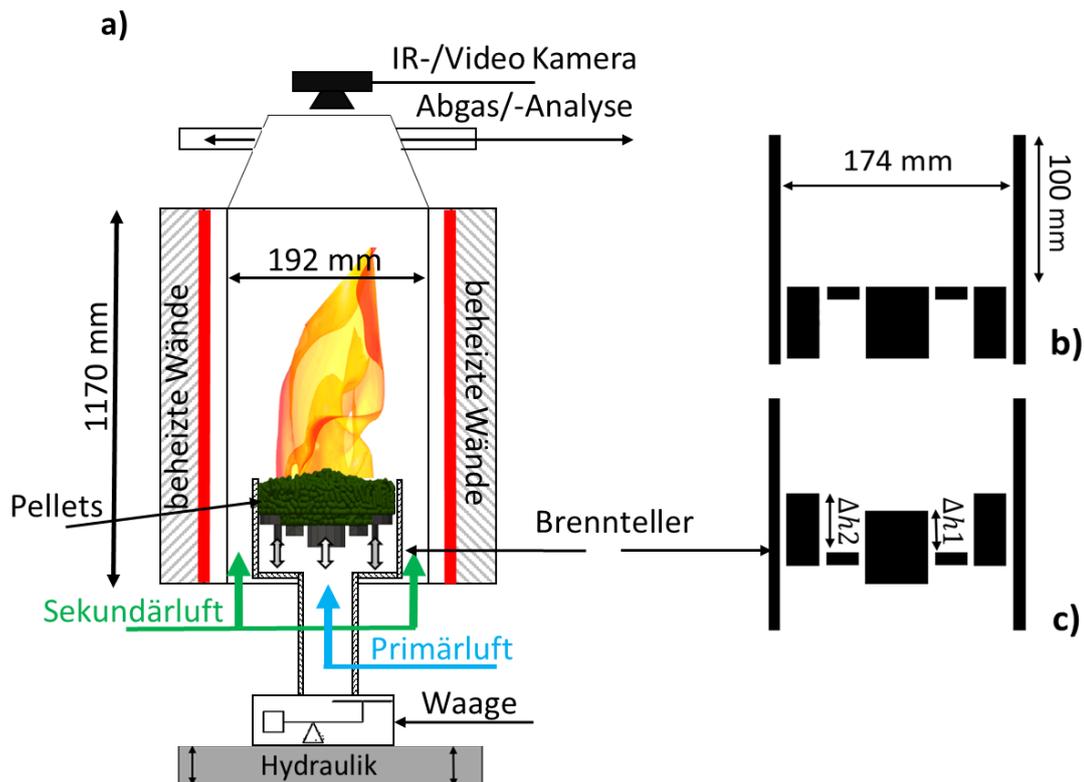


Abbildung 4.21: a) Schema der BORA und b), c) der Brennerschale mit verfahrbaren Elementen.

Abbildung 4.21a zeigt den schematischen Aufbau der Versuchsanlage BORA, Abbildung 4.21 b, c eine Detailansicht des Brenntellers mit verfahrbaren Elementen im initial Zustand (b) und mit voll ausgefahrenen Schürkörpern (c). Dieser Reaktor besteht aus einem zylindrischen, mit Strohpellets gefüllten Brennteller aus Edelstahl, der von einer zylindrischen Brennkammer aus Quarzglas umschlossen ist. Wärme für die Aufheizung und Zündung der Gasphase sowie des Feststoffes wird von einer das Quarzglasrohr umschließenden elektrischen Heizeinheit zur Verfügung gestellt. Diese Heizeinheit sorgt während des Umwandlungsprozesses für eine konstante thermische Randbedingung von 923 K an der Außenwand der Brennkammer. Zwei separate Luftzufuhrleitungen, die jeweils mit Massendurchflussmessern ausgestattet sind, sorgen für einen definierten Massenstrom der Verbrennungsluft am Primär- und Sekundärlufteinlass. Die Primärluft wird in den Brennteller eingeleitet, passiert die Spalte (3 mm) zwischen den Ringelementen und der Wand des Brenntellers, bevor sie in das Brennbett gelangt. Die Sekundärluft wird durch den Spalt zwischen Brennteller und Wand geführt. Der Brennteller ist von einer Edelstahlschale mit einer Höhe von 200 mm und einem Innendurchmesser von 174 mm umschlossen und entspricht damit typischen Abmessungen von Schüttungen in haushaltsüblichen Pelletöfen. Dieser befindet sich auf einer Waage, um den Massenverlust

während der gesamten Feststoffkonversion zu messen. Die Genauigkeit beträgt $\pm 0,1$ g des angezeigten Wertes. Der Boden des Brenntellers (Abb. 4.20 b) besteht aus drei runden Elementen. Der Außenring und das innere zylindrische Schürelement können, angetrieben von separaten Linearantrieben, einzeln in vertikaler Richtung bewegt werden (Abb. 4.20 c). Die beweglichen Ringelemente ermöglichen die Programmierung beliebiger Schürmuster durch Einstellung der Hublänge, der Hubgeschwindigkeit sowie des zeitlichen Versatzes von Innen- und Außenring. Der innere Zylinder kann bis zu einem maximalen Hub von 30 mm und der äußere Ring kann bis zu einem maximalen Hub von 40 mm verfahren werden. Die verwendeten Parameter für das in diesem Vorhaben verwendete Schürmuster sind in Tabelle 4.6 zu finden. Bei gleicher Vertikalgeschwindigkeit von 5 m/s, unterschiedlichen Hublängen und zeitlichem Versatz des Startzeitpunktes eines Bewegungszyklus ergibt sich ein Bewegungsmuster mit variierenden Relativpositionen der Schürkörper zueinander. Wie initiale Experimente zeigten, führt so ein Bewegungsmuster zu einer ausreichend hohen Durchmischung des Brennbettes.

Tabelle 4.6: Parameter des Verwendeten Schürmusters (BORA)

Innerer Schürkörper	Äußerer Schürkörper
$\Delta h_1 = 30 \text{ mm}$	$\Delta h_2 = 40 \text{ mm}$
$v_z = 5 \text{ m/s}$	$v_z = 5 \text{ m/s}$
$t_0 = 0.0 \text{ s}$	$t_0 = 9.0 \text{ s}$

4.5.2 Versuchsdurchführung

Um den Einfluss der Bettbewegung auf den Massenumsatz der Strohpelletschüttung zu bewerten, wurden Experimente sowohl für den statischen als auch für den geschürten Betriebsmodus mit identischen Parametern durchgeführt (Tabelle 4.6). Die Schüttguthöhe wurde auf 50 mm festgelegt und entspricht typischen Betthöhen in Pelletöfen für Haushalte. Diese Höhe führt zu einer gleichen Anfangsbettmasse von 793 g für jedes Experiment. Das Quarzglasrohr (923 K) und die Wand des Brenntellers (483 K) wurden vor jedem Versuch vorgewärmt, um vergleichbare Ausgangsbedingungen zu gewährleisten. Die Primär-/Sekundärluftverhältnisse wurden von 0,1 bis 0,6 mit einer Schrittweite von 0,1 sowohl für den statischen als auch für den geschürten Betrieb variiert. Die resultierenden Primärluftmassenströme sind in Tabelle 4.7 dargestellt. Die gewählten Luftmengen liefern bezogen auf die gemessene

Gesamtmassenumsatzrate der Schüttung unterstöchiometrische Bedingungen im Brennbett und überstöchiometrische Bedingungen im Reaktorvolumen oberhalb des Brennbettes während des instationären Verbrennungsprozesses mit vorhandener Gasphasenflamme. Diese Luftstufung liefert vergleichbare Bedingungen zu einem im häuslichen Gebrauch betriebenen Pelletofen.

Tabelle 4.7: Betriebsparameter der durchgeführten Messungen.

$\dot{m}_{Luft,global}$	17,3 g/s
$T_{Quarzglas}$	923 K
$\dot{m}_{Luft,Primär}$	$\dot{m}_{Pr,0,1} = 1,73 \text{ g/s}$ $\dot{m}_{Pr,0,2} = 3,46 \text{ g/s}$ $\dot{m}_{Pr,0,3} = 5,19 \text{ g/s}$ $\dot{m}_{Pr,0,4} = 6,92 \text{ g/s}$ $\dot{m}_{Pr,0,5} = 8,65 \text{ g/s}$ $\dot{m}_{Pr,0,6} = 10,38 \text{ g/s}$
$T_{Brennteller}$	483 K
<i>Schütthöhe</i>	50 mm

4.5.3 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen (BORA)

In diesem Abschnitt werden die experimentellen Ergebnisse der Verbrennungsexperimente zum Abbrand einer bewegten Schüttung aus Strohpellets in der Versuchseinrichtung BORA dargestellt und diskutiert. Dazu werden die temporären Maxima der Massenumsatzraten in den jeweiligen Versuchen als charakteristische Größe für die unterschiedlichen Betriebsbedingungen diskutiert.

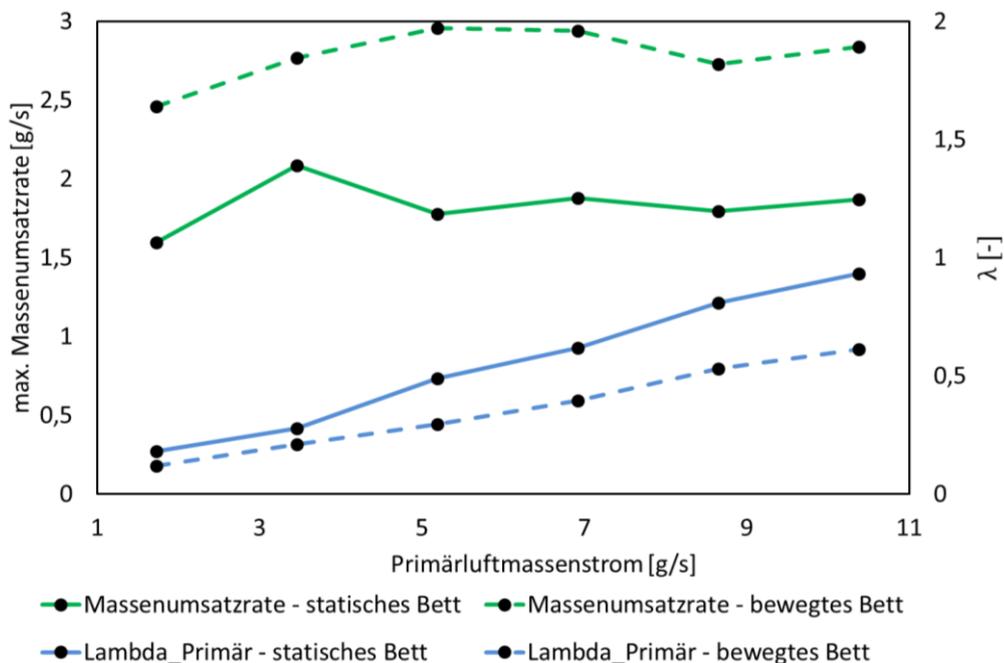


Abbildung 4.22: Massenumsatzraten und Primärluftzahlen bei verschiedenen Primärluftmengen.

Abbildung 4.22 zeigt die maximalen Massenumsatzraten (grün, Primärachse) während der Verbrennungsexperimente mit Strohpellets unter verschiedene Betriebsbedingungen. Zusätzlich sind die korrespondierenden Primärluftzahlen (blau, Sekundärachse) aufgetragen. Diese ergibt sich aus dem eingestellten Luftmassenstrom, der gemessenen Massenumsatzrate der Brennstoffschüttung und der zugrundeliegenden Stöchiometrie auf Basis der elementaren Zusammensetzung der Flüchtigen. Auf der Abszisse sind jeweils die aus der Luftstufung bei konstanter Globalluftmenge von 17,3 g/s resultierenden Primärluftmassenströme aufgetragen. Die durchgezogenen Linien zeigen die Ergebnisse der Experimente mit statischem Brennbett und die gestrichelten Linien repräsentieren die korrespondierenden Ergebnisse für Experimente mit bewegtem Brennbett. Generell lässt sich eine signifikante Erhöhung der Massenumsatzrate (32% - 66%) infolge der Schürung des Brennbettes für alle in den Experimenten variierten Primärluftmengen erkennen. Infolge der Schürung werden kontinuierlich weitgehend unverbrannte und kältere Partikel an die Bettoberfläche transportiert und der intensiven Strahlungswärmequelle durch die Flüchtigenflamme ausgesetzt. Infolge der Durchmischung werden zusätzlich bereits aufgeheizte Pellets in das Brennbett transportiert, welche lokal zu einer weiteren Erwärmung benachbarter Pellets führt. Zusätzlich wird durch den Transport kälterer Pellets an die Brennbettoberfläche eine konstant hohe Temperaturdifferenz zwischen den am Strahlungswärmeaustausch teilnehmenden Oberflächen aufrechterhalten. Beide Mechanismen führen zu einem erhöhten Wärmetransport in das Brennbett und folglich zu einer erhöhten

Massenumsatzrate, bei ansonsten gleichen Bedingungen. Bezüglich des Einflusses der Primärluftmenge auf den Abbrandprozess lässt sich ein Unterschied hinsichtlich der Sensitivität auf die Primärluftmenge zwischen bewegtem und statischem Bett identifizieren. Für das statische Bett wurde die geringste Massenumsatzrate von ca. 1,6 g/s bei einem Primärluftmassenstrom von 1,73 g/s gemessen. Eine Erhöhung der Primärluftmenge bis zu 3,46 g/s führt ebenfalls zu einer Erhöhung der Massenumsatzrate bis zum Maximum von 2,09 g/s für das statische Bett. Eine weitere Zunahme der Primärluftmenge bis 5,19 g/s führt wiederum zu einer Abnahme der Massenumsatzrate bis zu ca. 1,8 g/s und verbleibt bei weiterer Erhöhung der Primärluftmenge bis zu 10,38 g/s mit geringen Schwankungen auf diesem Niveau.

Im Betrieb mit bewegtem Brennbett (gestrichelte Linie) sind sowohl zu den Ergebnissen des ungeschürten Betriebs analoge als auch unterschiedliche Abhängigkeiten der Massenumsatzrate von der zugeführten Primärluftmenge zu beobachten. Die geringste Massenumsatzrate des geschürten Falls ist mit 2,45 g/s ebenfalls bei der geringsten zugeführten Primärluftmenge von 1,73 g/s zu finden. Eine Zunahme der Primärluftmenge führt zunächst ebenfalls zu einer Zunahme der Massenumsatzrate bis zu einem Plateau mit maximaler Massenumsatzrate von 2,95 g/s bei Primärluftmengen zwischen 5,19 – 6,92 g/s. Bei weiterer Erhöhung der zugeführten Primärluftmenge bis zu 8,65 g/s ist eine Abnahme der Massenumsatzrate bis zu einem lokalen Minimum von 2,57 g/s zu beobachten. Mit weiter zunehmender Primärluftmenge bis 10,38 steigt dagegen die Massenumsatzrate im geschürten Fall.

Anhand der theoretischen Primärluftzahlen die für den ungeschürten und geschürten Fall Werte zwischen 0,16 und 1,0 bzw. 0,1 und 0,68 aufweisen, ist zu erkennen, dass global betrachtet kein Sauerstoffüberschuss in der Primärluftzone vorhanden ist. Dies entspricht typischen Konfigurationen in handelsüblichen Pelletöfen mit Luftstufung ($0,4 < \lambda_{\text{primär}} < 0,8$). Die stöchiometrischen Bedingungen in den Experimenten sind demnach vergleichbar zu denen in konventionellen Haushaltsfeuerungen. Daher eignen sich diese Messdaten als Verifizierungsgrundlage für das angestrebte Modellierungskonzept zur Simulation eines mit Schürtechnik ausgestatteten Pelletofens.

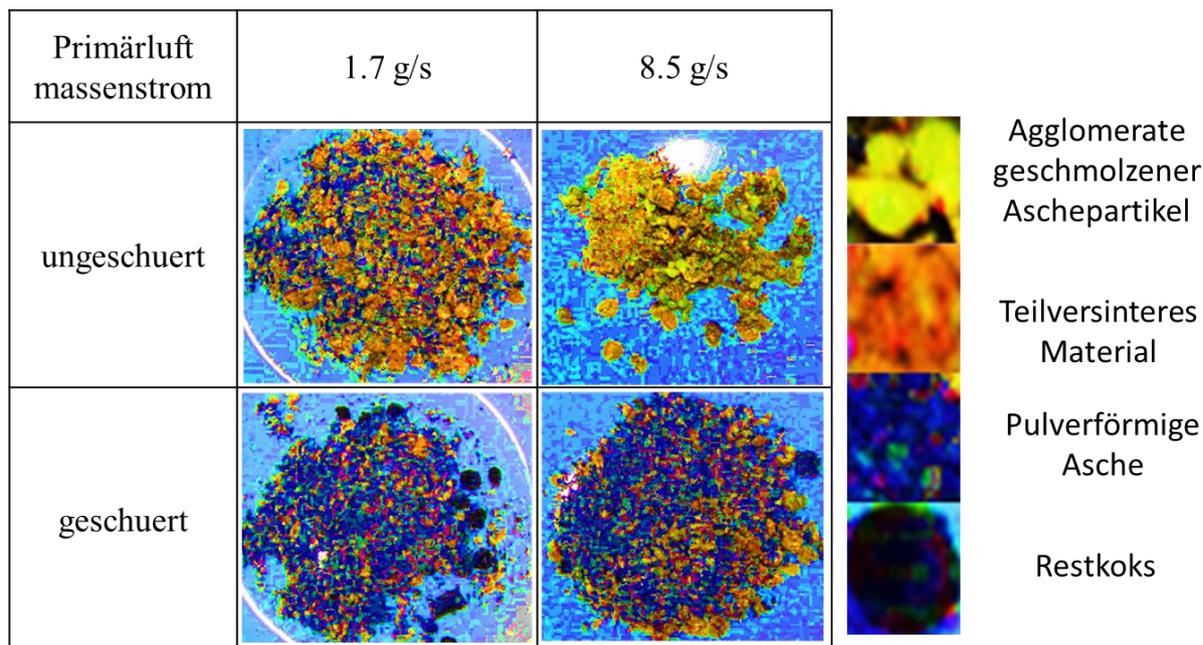


Abbildung 4.23: Falschfarben-Darstellung der Restmaterialproben nach den Experimenten.

Abbildung 4.23 zeigt Falschfarbenbilder von Proben des Restmaterials, die nach den Verbrennungsversuchen im bei einem Primärluftmassenstrom von 1,73 g/s und 8,65 g/s im geschürten und ungeschürten Betriebsmodus entnommen wurden. Die natürliche Farbverteilung wurde modifiziert, um die visuelle Beurteilung der charakteristischen Strukturen der Reststoffe, wie sie bei den verschiedenen Betriebsbedingungen auftraten, zu erleichtern. Die Legende rechts veranschaulicht die repräsentativen Pixelansammlungen für die unterschiedlichen Formen der Reststoffproben, wie sie bei den verschiedenen Betriebsbedingungen auftraten.

Im statischen Fall, bei einer Primärluftmenge von 8,65 g/s, besteht das Restmaterial aus relativ großen Ansammlungen wiedererstarrender Tropfen geschmolzener Asche. Mit geringerem Primärluftmassenstrom (1,73 g/s) nimmt die Menge der agglomerierten Ascheteilchen ab. Hauptsächlich partiell versinteres Material, welches sich auch vermehrt in kleinen separaten Einheiten bildet und nicht zu größeren Agglomeraten führt, kann für die minimale Primärluftmenge bei statischem Betrieb identifiziert werden.

Proben, die nach Experimenten im geschürten Betrieb entnommen wurden, zeigen generell eine wesentlich geringere Bildung von versinteren Ascheteilchen. Selbst bei hohen Primärluftmassenströmen (8,65 g/s) können nur wenige partiell versinterete Aschepartikel identifiziert werden. Der Großteil des Reststoffes besteht aus pulverförmiger Asche. Mit abnehmendem Primärluftmassenstrom (1,73 g/s) steigt der Anteil an pulverförmiger Asche weiter an. In den

Restmaterialproben für die geschürte Verbrennung bei dem minimalen Primärluftmassenstrom von 1,73 g/s konnten zudem auch unverbrannte Restkokspartikel gefunden werden.

4.6 Simulation der Versuchsanlage

Während in Kapitel 4.4 das Abbrandverhalten einzelner Strohpellets und die Abbildungsgüte des thermochemischen Modells quantifiziert wurden, wird in diesem Abschnitt das Modellierungskonzept zur Simulation des Abbrandverhaltens einer ganzen Pelletschüttung unter Bewegungseinfluss überprüft. Zunächst wird die Abbildungsgüte des mechanischen Modells der Strohpellets des hauseigenen DEM-Codes überprüft. Dazu werden zunächst kalte Versuche mit aktivierter Schürung am Versuchstand BORA aus Abschnitt 4.5 durchgeführt. Aus den Messdaten können dann quantifizierbare Größen für das Mischungsverhalten der Schüttung abgeleitet und mit korrespondierenden Ergebnissen der DEM-Simulationen verglichen werden. Anschließend wurde das Abbrandverhalten einer bewegten Schüttung im BORA mit dem hauseigenen DEM/CFD-Simulationsansatz modelliert. Zur Überprüfung des Simulationsansatzes werden dann die gemessenen mit den berechneten Massenabnahmeraten der Schüttung im Betrieb mit und ohne Bewegungseinfluss bei verschiedenen Luftstufungen mit einander verglichen.

4.6.1 Validierung des mechanischen Modells

Zur Überprüfung des mechanischen Modells der Strohpelletschüttung wurden kalte Durchmischungsversuche an der BORA Anlage durchgeführt. Dazu wurden die Pellets zuvor in anteilig gleichen Mengen der Farben Blau, Grün und Rot eingefärbt. Die Pellets wurden in geordneten Schichten übereinander in den Brennteller (vgl. Abbildung 4.21b) eingefüllt. Demnach bilden die blauen Pellets die unterste Schicht, die grünen Pellets die mittlere und die roten Pellets die oberste Schicht. Anschließend wurde das Bett entsprechend den Schürparametern aus Tabelle 4.6 in Bewegung versetzt. Infolge der Brennbettbewegung ändert sich dann die an der Schüttungsoberfläche sichtbare Farbverteilung.

Abbildung 4.24. zeigt die sichtbaren Pelletoberflächen an der Bettoberfläche in einer Draufsicht zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ s und $t_{840} = 840$ s. Dargestellt ist jeweils ein Ausschnitt des Experimentes (links) und der Simulation (rechts). Zur eindeutigen Identifizierung der gefärbten Partikel wurden die RGB Farbwerte für die entsprechenden Farben auf deren Maximalwert verstärkt. Zum Zeitpunkt t_0 sind fast ausschließlich rote Pixel an der Schüttungsoberfläche zu erkennen. Mit

fortschreitender Dauer der Schürlbewegung erhöhen sich die Durchmischung der Schüttung und folglich auch die an der Bettoberfläche sichtbare Verteilung der unterschiedlich eingefärbten Pellets (t_{840}). Der visuelle Vergleich zwischen Experiment (links) und Simulation (rechts) deutet in diesem Fall schon eine gute Abbildung des Mischungsverhaltens durch die Simulation an.

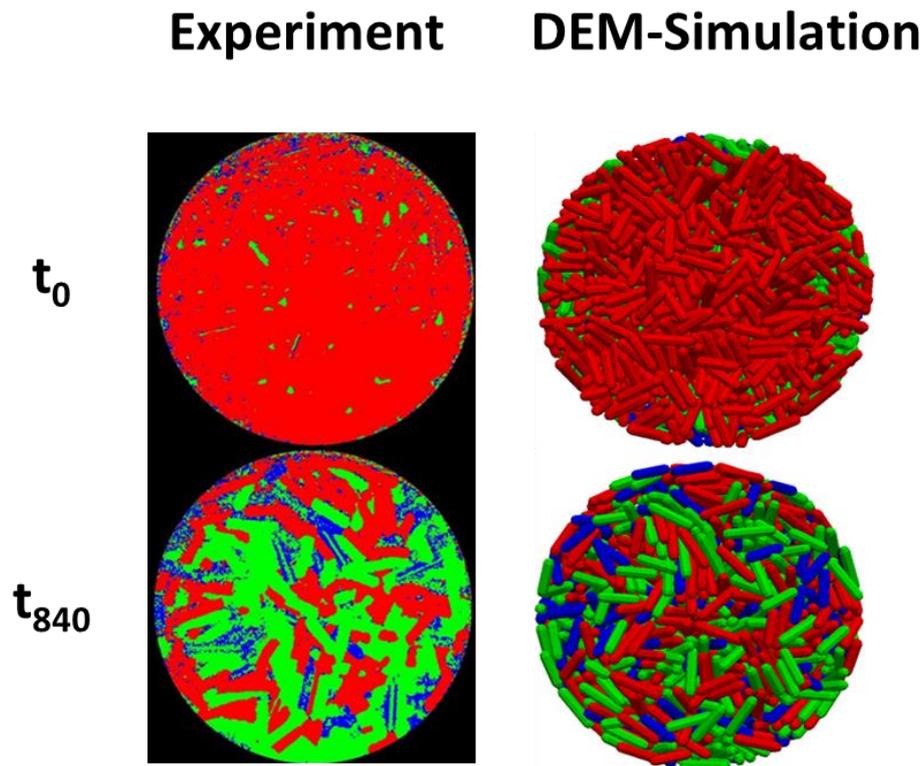


Abbildung 4.24: Mischung der geschürten Strohpelletschüttung an der Bettoberfläche.

Mit Hilfe einer entsprechenden Bildauswertung kann der jeweilige Anteil der Pellets an der Oberfläche bestimmt werden. Anhand eines Mischungsindex gemäß Gleichung 4.6 kann der Zeitverlauf des Mischungsvorgangs quantifiziert werden. Diese Daten ermöglichen dann einen direkten Vergleich des mechanischen Verhaltens zwischen Experiment und Simulation.

$$Mix_{t_i} = 0,5 - \sum_1^{\text{Anzahl der Farben}} \int_{i-1}^i \text{Farbanteil}_{kum,t_0} \frac{di}{\text{Anzahl der Farben}} \quad (4.6)$$

Abbildung 4.25 zeigt den zeitlichen Verlauf der detektierten Farbverteilung und den nach Gleichung 4.6 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** berechneten Mischungsindex des Experimentes (durchgezogene Linien) und der Simulation (gestrichelte

Linie). Analog zu den Beobachtungen in Abbildung 4.24 sinkt der Anteil an detektierten roten Pixeln an der Bettoberfläche mit zunehmender Zeit bei aktiver Schürbewegung, während der entsprechende Anteil an grünen und blauen Pixeln ansteigt. Während sich die Farbverteilungen bis ca. 420 s (6 Schürzyklen) mit einem vergleichsweise steilen Gradienten verändert, sind im folgenden Zeitraum bis 840 s lediglich geringe Änderung der Farbverteilung an der Oberfläche zu erkennen. Analog zu diesen Verläufen der Anteile der blauen, grünen und roten Pixel entwickelt sich auch der gemäß Gleichung 4.6 berechnete Mischungsindex (schwarze Linien) der Schüttung. Der Vergleich zwischen Experiment (durchgezogene Linien) und Simulation (gestrichelte Linien) zeigt, dass sowohl die Verteilung der einzelnen Schichten (blau, grün, rot) als auch der daraus resultierende Mischungsindex (schwarz) hinreichend genau durch die DEM-Simulation berechnet wird.

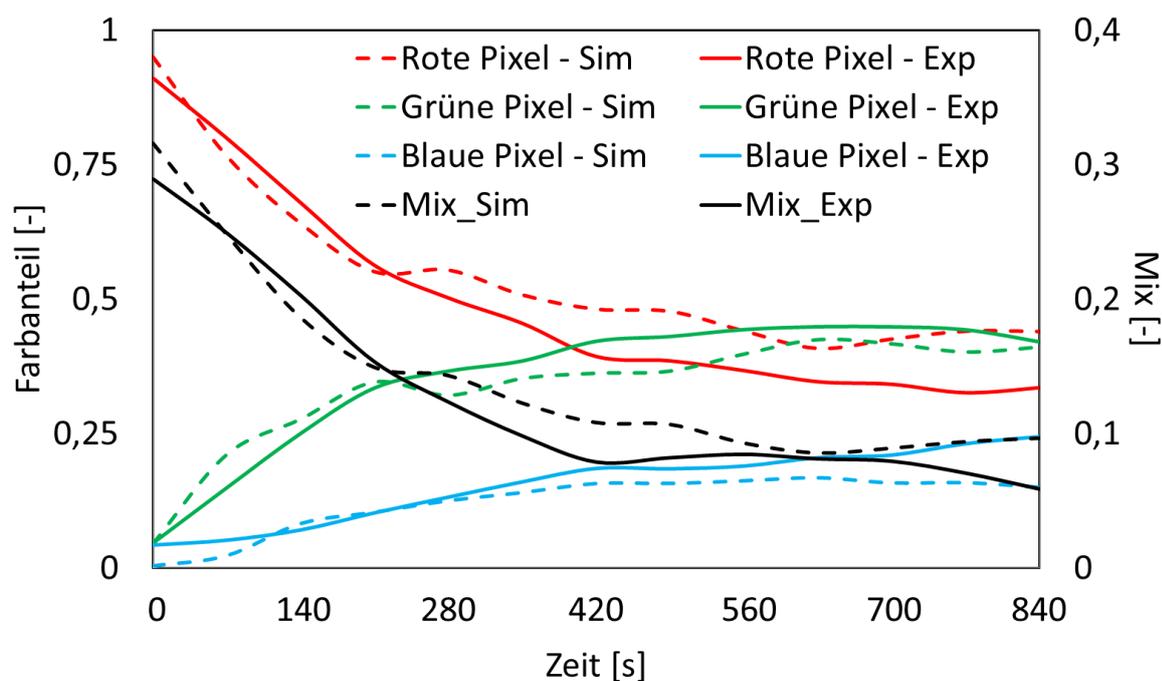


Abbildung 4.25: Mischungsindex der geschürten Strohpelletschüttung an der Bettoberfläche.

4.6.2 Überprüfung des Verbrennungsmodells

Zur Überprüfung des Modellierungsansatzes zum Abbrandverhalten bewegter Strohpelletschüttungen wurden zu den Experimenten aus Abschnitt 4.5 analoge Simulationen des Abbrandes einer Schüttung mit und ohne aktivierter Schürung in der BORA Anlage mit der

hauseigenen DEM/CFD-Kopplung simuliert. Abbildung 4.26 zeigt das verwendete Modell zur Simulation der BORA Anlage:

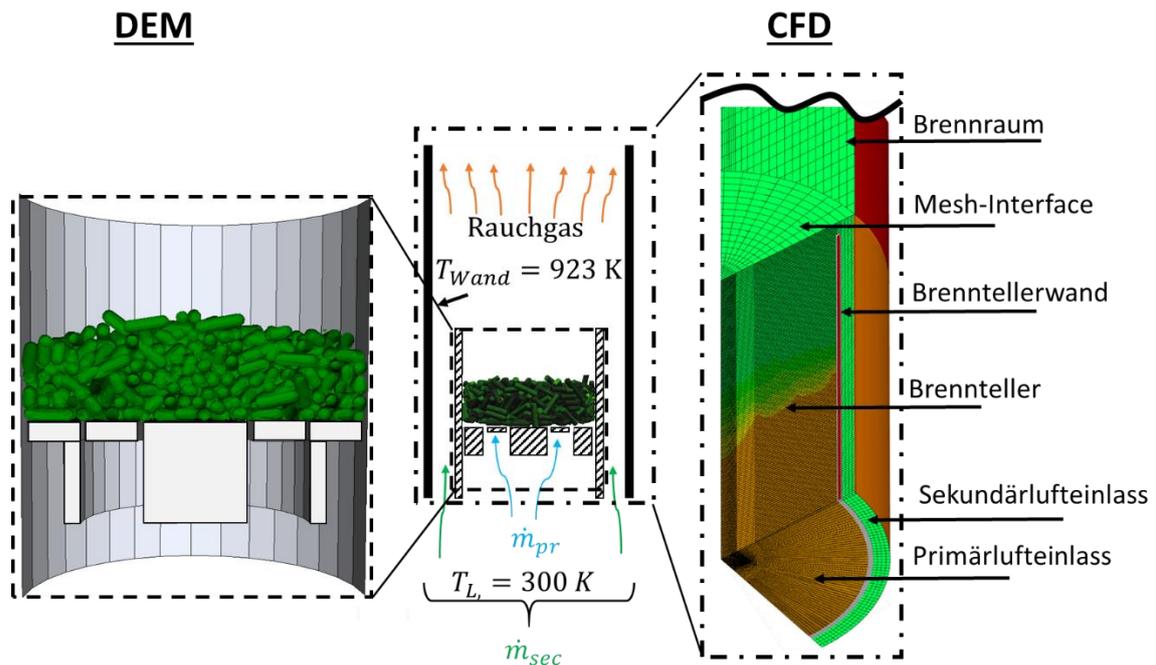


Abbildung 4.26: DEM/CFD Modell der BORA Anlage.

Abbildung 4.26 zeigt das Schema (Mitte) der Versuchsanlage BORA (vgl. Abb. 4.20) und die verwendeten Diskretisierungsstrategien der Festkörper (DEM, links) und des Fluidkontinuums (CFD, rechts). Zur besseren Visualisierung des DEM bzw. CFD Modells sind in Abbildung 4.26 Schnittansichten der Berechnungsdomänen dargestellt. Tatsächlich wird das gesamte Reaktor- bzw. Brenntellervolumen dreidimensional diskretisiert und berechnet. Der BORA wird vereinfacht als Zylinder mit dem entsprechenden Durchmesser und der entsprechenden Höhe gemäß des Brennraumes in Abbildung 4.21 betrachtet. Die angeschlossene Peripherie oberhalb und unterhalb des Reaktorvolumens wird nicht modelliert. Neben den das Quarzglasrohr repräsentierenden Außenwänden wird lediglich die statische Brenntellerwand im CFD Gitter berücksichtigt, um eine räumlich getrennte Definition der Randbedingungen für Primär- und Sekundärluftzugabe zu ermöglichen. Die Festkörper im Inneren des Brenntellers werden lediglich auf Seiten der DEM Simulation (links) definiert. Dabei werden die Schürkörper über im Kreis extrudierte, geschlossene Polygonzüge mit jeweils vier Knotenpunkten beschrieben. Die

Pelletschüttung wird mit einer Einzelobjektdefinition als Spherozylinder über ein finite Volumen Gitter aus Tetraederzellen gemäß Abbildung 4.18 definiert. Im Anfangszustand besitzt die Schüttung bestehend aus 1356 Pellets bei einer Pelletdichte von 1370 kg/m^3 eine Gesamtmasse von $796,8 \text{ g}$ und bildet damit näherungsweise die Schüttungen aus den Experimenten ab. Mit dem dreidimensionalen CFD-Gitter (rechts) wird der Brennraum auf zwei unterschiedlichen Detailierungsniveaus diskretisiert. Im Bereich des Brenntellers, in dem sich potentiell Feststoffobjekte aufhalten können wird ein feines Gitter zur Auflösung der Objektgeometrien verwendet. Im freien Strömungsfeld darüber wird ein gröberes Gitter verwendet. Beide Gitter sind über ein statisches Gitter-Interface, an dessen Übergang die Flussgrößen interpoliert werden, miteinander verknüpft. Die Temperatur der Außenwand wird gemäß Tabelle 4.6 auf 923 K gesetzt und dient somit als thermische Randbedingung für die Aufheizung und Konversion der Strohpellets. Die Anfangstemperatur der Schüttung und der zugeführten Verbrennungsluft wird vereinfacht auf 300 K festgelegt. In den jeweiligen Simulationen wurden die Primär-/Sekundärluftverhältnisse gemäß Tabelle 4.6 sowohl für das bewegte als auch das statische Bett variiert.

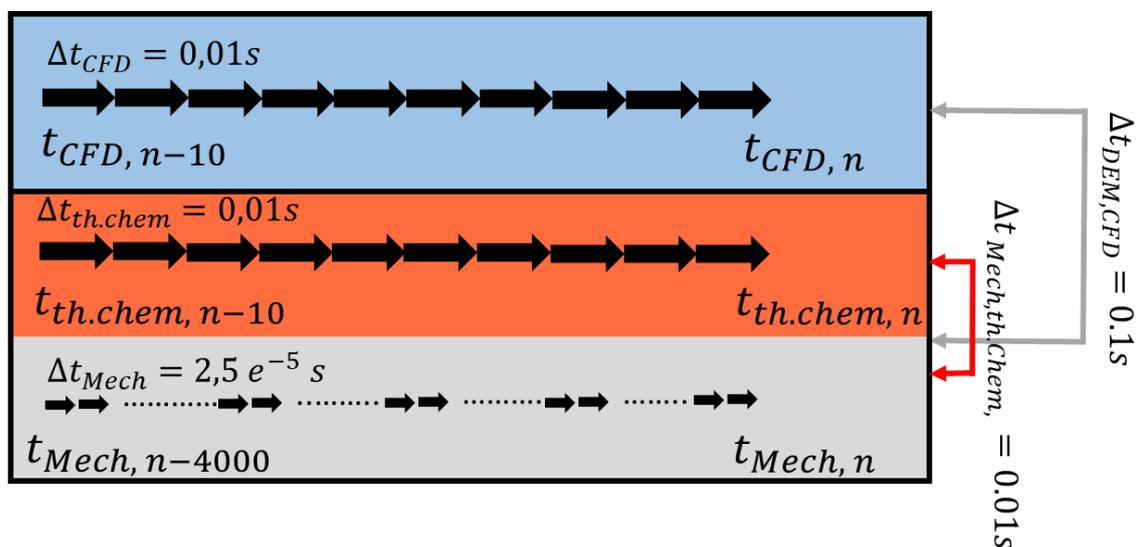


Abbildung 4.27: Zeitschrittweiten der Sub-Modelle.

Abbildung 4.27 illustriert die verwendeten Zeitskalen der einzelnen Sub-Modelle und die Kommunikationszeitpunkte der DEM/CFD Kopplung. Innerhalb des DEM-Codes werden sowohl die mechanischen als auch die thermochemischen Vorgänge der einzelnen Feststoffobjekte berechnet. Für die mechanische Interaktion und Bewegung der Feststoffobjekte wurde ein Zeitschritt von $\Delta t_{Mech} = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ gewählt. Die thermochemischen Berechnungen werden jeweils nach $\Delta t_{th.chem} = 0,01 \text{ s}$ durchgeführt. Die instationäre Strömung wird mit einer

Zeitschrittweite von $\Delta t_{CFD} = 0,01 s$ aufgelöst. Der nicht auflösbare Anteil der feineren Wirbelstrukturen auf kleineren Zeitskalen wird anteilig über das verwendete k- ϵ -Turbulenzmodell berücksichtigt. Der Kommunikationszeitpunkt zwischen DEM und CFD Simulation wurde mit $\Delta t_{DEM/CFD} = 0,1 s$ entsprechend klein gewählt. Somit werden die Änderungen der Positionen und Konversionszustände der Schürmechanik und der Pellets fein genug für eine stabile CFD Lösung diskretisiert. Demnach werden pro Datenaustausch zwischen DEM und CFD Simulation 4000 Mechanik-Zeitschritte, 10 Thermochemie-Zeitschritte und 10 CFD-Zeitschritte berechnet.

In diesem Abschnitt werden die Experimente aus Abschnitt 4.5 mit den Ergebnissen korrespondierender DEM/CFD Simulationen verglichen. Zunächst werden die Details der zeitlich aufgelösten Entwicklung der Massenumsatzraten für das bewegte und das statische Bett exemplarisch anhand der Versuchskonfiguration mit einem Primärluftmassenstrom von 6,92 g/s (Primär-/Sekundärluftverhältnis = 0,4/0,6) diskutiert. Anschließend wird die Sensitivität der Simulation hinsichtlich der zugeführten Primärluftmenge anhand der gemessenen und für den Prozess charakteristischen maximalen Massenumsatzraten (vgl. Abbildung 4.22) für das bewegte und das statische Bett diskutiert.

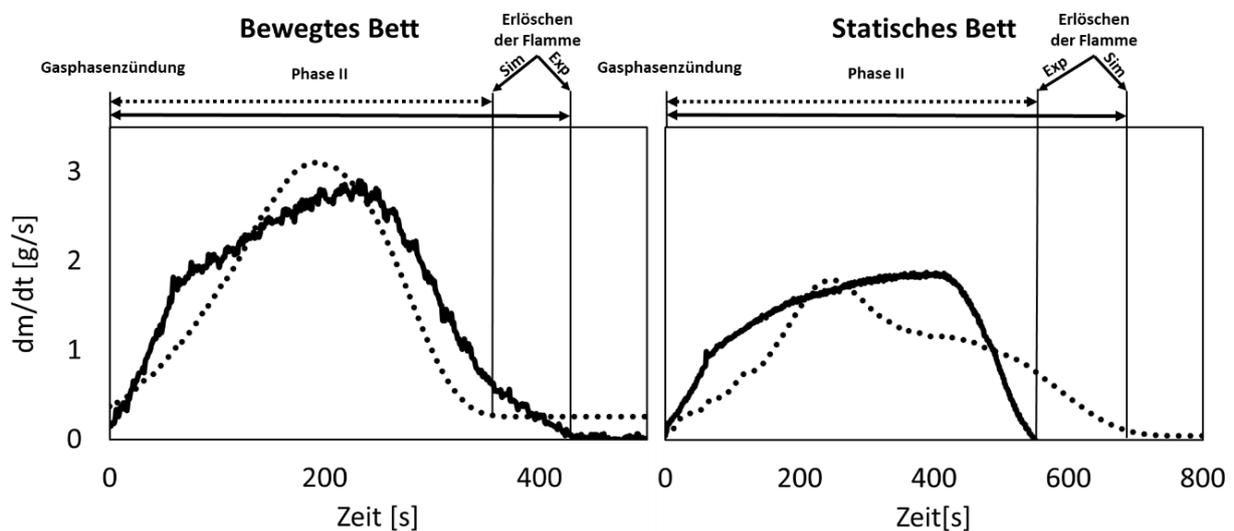


Abbildung 4.28: Vergleich der gemessenen und simulierten Massenumsatzrate für das bewegte und das statische Bett bei einem Primärluftmassenstrom von 6,92 g/s.

In Abbildung 4.28 markiert der Zeitpunkt $t = 0$ auf der Abszisse den Moment der Gasphasenzündung. Die vertikal eingezeichneten Linien deuten den jeweiligen Zeitpunkt des Erlöschens der Fluchtigenflamme an. Für das bewegte Bett steigt die Massenumsatzrate nach Zündung der Gasphase im Experiment zunächst mit vergleichsweise steilem und

näherungsweise konstantem Gradienten innerhalb von 60 s bis auf ca. 1,8 g/s an. Anschließend erfolgt eine weitere Zunahme der Massenumsatzrate mit flacherem Gradienten bis zum charakteristischen Maximum von 2,9 g/s nach 235 s. Im Folgenden sinkt die Massenumsatzrate wieder mit vergleichsweise steilem Gradienten bis zum Erlöschen der Flüchtigenflamme (430 s). Der Massenumsatz schreitet in der hier beginnenden Ausbrandphase, in der hauptsächlich der verbliebende feste Kohlenstoff heterogen mit der Verbrennungsluft reagiert, mit annähernd konstanter Rate von ca. 0,06 g/s fort.

In der Simulation steigt die Massenumsatzrate für das bewegte Bett nach Zündung der Gasphase ($t = 0$ s) im Gegensatz zum Experiment mit einem kontinuierlichen Gradienten bis zum charakteristischen Maximum von 3,1 g/s nach ca. 193 s an. Bis zum Zeitpunkt des schlagartig flacher werdenden Gradienten der Massenumsatzrate im Experiment nach 60 s ist der Gradient in der Simulation flacher und anschließend steiler als im Experiment. Nach dem Erreichen des charakteristischen Maximums nach 193 s sinkt die Massenumsatzrate wieder mit einem zum Experiment vergleichbaren Gradienten bis zum Erlöschen der Flüchtigenflamme (360 s). Der Massenumsatz schreitet in der darauffolgenden Ausbrandphase mit einer annähernd konstanten Rate von ca. 0,26 g/s fort.

Im statischen Fall steigt die Massenumsatzrate nach Zündung der Gasphase im Experiment für 60 s mit vergleichsweise steilem und konstantem Gradienten bis auf ca. 1 g/s an. Anschließend steigt die Massenumsatzrate mit zunehmend flacher werdendem Gradienten bis zum charakteristischen Maximum bei 1,87 g/s. Zwischen 320 und 420 s nach der Gasphasenzündung stellt sich ein Plateau mit annähernd konstanter Massenumsatzrate ein. Anschließend sinkt die Massenumsatzrate schlagartig bis auf 0 g/s nach 550 s ab.

Die korrespondierende Massenumsatzrate verläuft in der Simulation qualitativ analog zu dem Verlauf der simulierten Massenumsatzrate für das bewegte Bett mit zunächst flacherem und anschließend steilerem Gradienten im Vergleich zum Experiment. Das charakteristische Maximum von 1,78 g/s ist nach 241 s erreicht. Im Gegensatz zum Experiment verbleibt diese nicht für einen längeren Zeitraum konstant, sondern fällt früher auf ein Niveau um ca. 1,16 g/s ab. Ab ca. 530 s sinkt die Massenumsatzrate wieder mit steilerem, jedoch im Vergleich zum Experiment deutlich flacherem, Gradienten bis zum Erlöschen der Flamme nach ca. 700 s ab und verbleibt anschließend auf einem annähernd konstanten Niveau um 0,05 g/s während Phase III des Verbrennungsprozesses.

Bezüglich der temporär auftretenden Gradienten der Massenumsatzraten sind noch einige Abweichungen zwischen Experiment und Simulation zu identifizieren. Qualitativ wird die generelle Erhöhung der Massenumsatzrate infolge der Brennbettbewegung allerdings gut durch die Simulation abgebildet. Auch die für die jeweilige Konfiguration der Betriebsweise charakteristische maximale Massenumsatzrate wird quantitativ hinreichend genau durch das Modell berechnet.

In den Simulationen des Abbrandes mit und ohne geschürtem Brennbett bei weiteren Luftstufungen ergeben sich vergleichbare Übereinstimmungen und Abweichungen der zeitlichen Verläufe zwischen Experiment und Simulation. Lediglich die Ausprägung der einzelnen Segmente des Verlaufs der Massenabnahmerate variieren von Fall zu Fall. Zur Analyse der Modellsensitivität hinsichtlich der Wechselwirkung zwischen Abbrand, Bewegungseinfluss und zugeführter Primärluftmenge (vgl. Abbildung 4.22) zeigt Abbildung 4.29 den Vergleich der charakteristischen Maxima der Massenumsatzrate aus dem Experiment und der Simulation. In den Experimenten ergaben sich bei den Primärluftmengen zwischen 5,19 und 10,38 g/s Luftzahlen zwischen 0,3 und 0,93. Die Experimente bei den genannten Primärluftmassenströmen decken also den Bereich technisch relevanter Konfigurationen der Luftstufung ab. Für die Modellüberprüfung wird im Folgenden nur der technisch relevante Bereich zugeführter Primärluftmengen zwischen 5,19 und 10,38 g/s betrachtet.

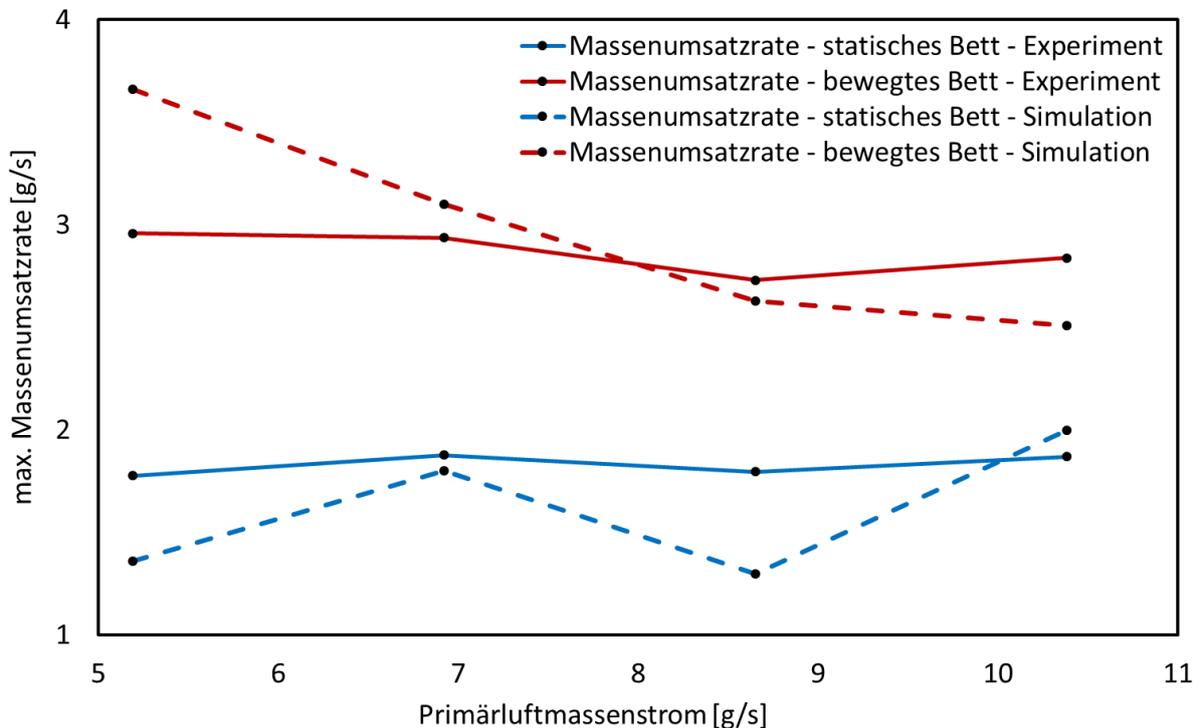


Abbildung 4.29: Vergleich der gemessenen und simulierten Massenumsatzrate für das bewegte und das statische Bett bei einem Primärluftmassenstrom von 6,92 g/s.

Abbildung 4.29 zeigt den Vergleich zwischen Experiment (durchgezogene Linien) und Simulation (gestrichelte Linien) hinsichtlich des charakteristischen Maximums der Massenumsatzrate für die verschiedenen Primärluftmassenströme in analoger Darstellung zu Abbildung 4.22.

Sowohl für das Experiment als auch für die Simulation ist die maximale Massenumsatzrate bei der Verbrennung eines bewegten Bettes für alle betrachteten, technisch relevanten Primärluftzahlen gegenüber dem statischen Bett mit gleichen Primärluftmengen deutlich erhöht.

Beim Vergleich der charakteristischen Massenumsatzraten für den statischen Fall fällt auf, dass die Simulation die Abhängigkeit der Massenumsatzrate von der Primärluftmenge qualitativ abbildet. Allerdings reagiert die Simulation zu sensitiv auf die Erhöhung des Primärluftmassenstromes. Generell wird die Massenumsatzrate für nahezu alle Primärluftmassenströme quantitativ unterschätzt. Bezogen auf die Simulationsergebnisse des bewegten Bettes ist eine gute quantitative Übereinstimmung der berechneten Massenumsatzraten bei Primärluftmassenströmen zwischen 6,92 g/s und 10,38 g/s zu erkennen. Bei einem Primärluftmassenstrom von 5,19 g/s hingegen ist eine Überschätzung der Massenumsatzrate durch die Simulation zu beobachten.

Die quantitativen Abweichungen zwischen Experiment und Simulation können vor allem auf den begrenzten Temperaturbereich (700-900°C, vgl. Tabelle 4.4), für den die kinetischen Daten der Pyrolyse gültig sind, zurückgeführt werden. Da im Falle des statischen Bettes die Pyrolyse in tieferen Schichten des Bettes, also bereits auf niedrigerem Temperaturniveau (ab ca. 250°C) stattfindet, sind zur korrekten Abbildung der lokalen Umsatzraten der Pellets zusätzliche Messdaten im niedrigen bis moderaten Temperaturbereich (200 - 700° C) notwendig. Im geschürten Fall hingegen findet infolge der Brennbettdurchmischung eine homogenere Aufheizung der Schüttung statt. Der Temperaturgradient zwischen den einzelnen Pellets in unterschiedlichen Regionen im Brennteller ist demnach geringer. Aus diesem Grund fallen die quantitativen Abweichungen der berechneten Pyrolyseraten im moderaten Temperaturbereich weniger stark ins Gewicht und führen zu einer geringeren quantitativen Abweichung der simulierten Gesamtmassenumsatzrate der Schüttung.

Insgesamt und vor allem in Bezug auf die Wechselwirkung zwischen Bewegung und Massenumsatzrate der Schüttung kann die Abbildungsgüte der Simulation als hinreichend genau im technisch relevanten Bereich der Primärluftzahlen angesehen werden.

Der Vergleich zwischen Experiment und Simulation zeigt allerdings auch, dass noch einige Verbesserungen der Sub-Modelle (thermochemische Konversion der Einzelpellets) zur weiteren Optimierung der quantitativen Abbildungsgüte der globalen Massenumsatzraten einer reagierenden, bewegten Schüttung notwendig sind. Für das Ziel dieses Vorhabens ist allerdings die makroskopische Beschreibung der Wechselwirkung zwischen der Brennbettbewegung der zugeführten Primärluftmenge und des Feststoffumsatzes entscheidend. Die charakteristischen Maxima, die sich aus den konkurrierenden Mechanismen der Aufheizung durch Strahlungswärme von der Flamme und der konvektiven Kühlung durch kalte von unten zugeführte Primärluft in Wechselwirkung mit der mechanischen Durchmischung des Brennbettes ergeben werden für diesen Zweck hinreichend genau durch die Simulation wiedergegeben.

4.7 Entwicklung/Optimierung eines Rostsystems zur Sicherstellung der Ascheabfuhr und Aufbrechen von Versinterungen

Zur Konzeptionierung eines geeigneten Rostsystems zur Verbrennung von Strohpellets können folgende allgemeine Anforderungen formuliert werden:

- Verhindern bzw. Aufbrechen von Ascheversinterungen
- Kontinuierlicher Abtransport der Asche aus dem Brennraum
- Gewährleisten eines hohen Ausbrands
- Wärmebeständiges System (Materialanforderungen)
- Einfache und robuste Technik

Dazu wurden zunächst unterschiedliche Rostkonzepte entwickelt und im Rahmen des Projekts diskutiert. Abbildung 4.30 zeigt die grundlegenden Rostkonzepte im Rahmen der Vorüberlegungen.

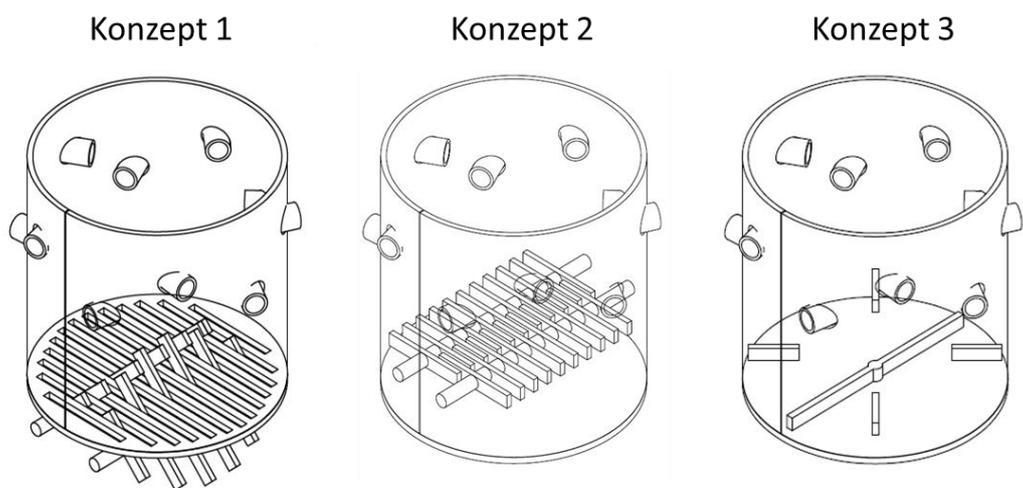


Abbildung 4.30: Schematische Darstellung der diskutierten Rostkonzepte.

1. Horizontale Doppelwelle mit vertikalen Schürkörpern unter dem Rost
2. Horizontale Doppelwelle mit vertikalen Schürkörpern über dem Rost
3. Vertikale Welle mit horizontalem Schürelement.

Die drei unterschiedlichen Rostkonzepte beruhen auf den zunächst widersprüchlichen Anforderungen an ein Rostsystem. Einerseits sind hohe Kraftübertragungen auf die gesamte Schüttung notwendig, um jegliche lokal entstandene Versinterung ohne etwaige Totzonen aufzubrechen (Konzept 2). Andererseits soll das mechanisch belastete Bauteil möglichst wenig Kontakt zum heißen Brennraum haben (Konzept 1). Letztlich soll die Technik möglichst robust und wartungsfrei sein (Konzept 3). Zur Analyse der tatsächlichen Wirkung der Rostkonzepte auf das mechanische Verhalten einer Schüttung wurden zunächst DEM-Simulationen durchgeführt.

4.7.1 Vorauswahl geeigneter Rostkonzepte anhand von DEM Simulationen der mechanischen Wirkung der Schürmechanik

Um eine Vorauswahl geeigneter Schürkonzepte vor der aufwendigen Konstruktion, Fertigung und Montage des neuen Rostkonzeptes treffen zu können, wurde die mechanische Wirkung verschiedener Rostkonzepte auf eine kalte Strohpelletschüttung mit Hilfe von DEM Simulationen zunächst ohne gekoppeltes CFD Modell analysiert.

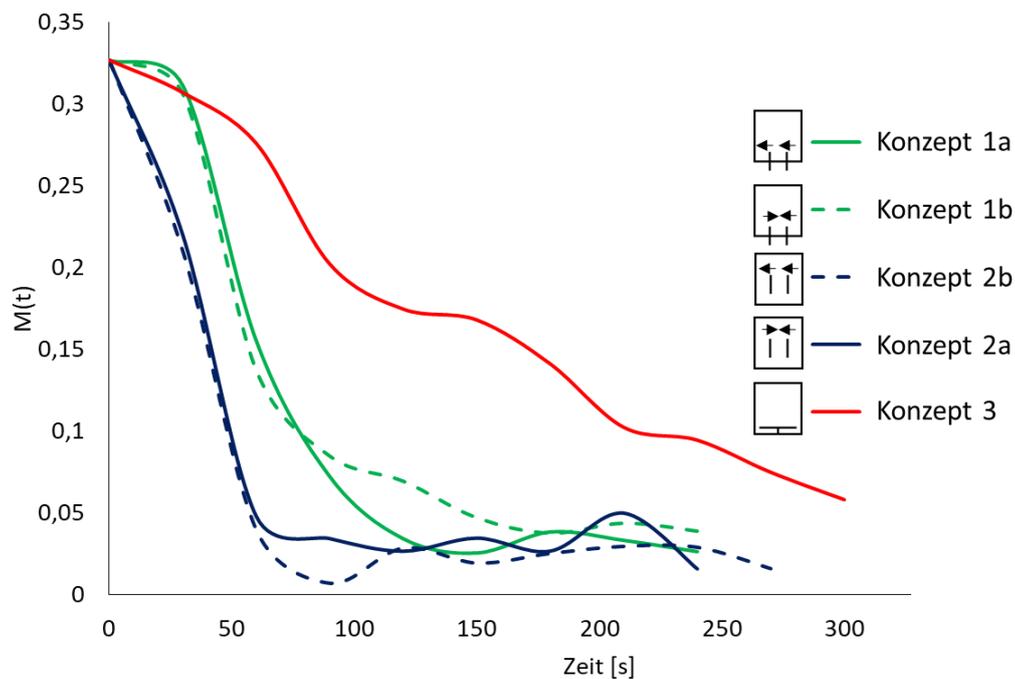


Abbildung 4.31: Mischungsindex verschiedener Rostkonzepte.

Abbildung 4.31 zeigt die Mischungsindizes aus den DEM-Simulationen der betrachteten Rostsysteme. Untersucht wurden die Schürkonzepte 1-3. Zusätzlich wurde, soweit sinnvoll, die Bewegungsrichtung der Einzelkomponenten eines Schürkonzeptes variiert. Die Piktogramme in der Legende stellen jeweils vereinfachend das Konzept und die Bewegungsrichtung der Schürelemente dar. Dabei zeigen die gestrichelten Linien (in der Legende jeweils mit b gekennzeichnet) das alternative Bewegungsmuster der Einzelkomponenten eines Konzeptes. Es ist ersichtlich, dass eine Positionierung eines Schürelementes mitten in der Schüttung zu einer schlagartigen Umwälzung der Pellets führt (Konzept 2). Eine Positionierung der Elemente mit Ihrer Rotationsachse auf Rosthöhe (Konzept 1) führt zu einer verzögerten Mischung mit annähernd gleichem Gradienten. Ein flacher und kontinuierlicher Gradient des Mischungsindex kann über eine horizontale Mischbewegung (Konzept 3) erreicht werden.

Eine abrupte Schürung wie sie in den Konzepten 1 und 2 auftritt führt zu einer hohen mechanischen Belastung der metallischen Bauteile und ist daher für den Einbau in einen

kontinuierlich betriebenen Pelletofen, der einen möglichst wartungsfreien Dauerbetrieb erfordert, weniger geeignet. Mit dem horizontalen Schürelement werden vergleichsweise geringe Kräfte auf eine aus teilweise versinterter Material bestehende Schüttung übertragen. Dies erleichtert einerseits einen wartungsarmen Betrieb der mechanisch beweglichen Bauteile, zeigt andererseits allerdings die Problematik, dass die übertragenen Kräfte nicht ausreichen um die wieder erstarrten Agglomerate an geschmolzenen Aschepartikeln aufzubrechen. Allerdings reicht eine moderate aber kontinuierliche Schürung, wie es bei Konzept 3 der Fall ist aus, um möglicherweise bereits die Bildung von Ascheversinterungen zu verhindern.

Ein Problem des horizontalen Rührers ist vor allem die geringe Reichweite des Schürkörpers in die Schüttung. So werden unter Umständen nur die untersten Pellets der Schüttung von dem Schürkörper beeinflusst. Zudem befindet sich der horizontale Schürkörper dauerhaft im Brennraum. Dies kann unter Umständen zu werkstofftechnischen Schwierigkeiten aufgrund der thermischen Belastung des mechanischen Bauteils führen.

Aus diesen Vorüberlegungen heraus wurde als Entwicklungsziel ein Rostsystem mit horizontalem Schürelement nach Konzept 3 mit der Erweiterung um eine Kugelschüttung aus Inertmaterial definiert. Dieser „Kugelrost“ wird in den nachfolgenden Kapiteln detailliert beschrieben.

4.7.2 Kugelrostsystem

Funktionsprinzip

Die grundlegende Idee des Kugelrostes beruht auf der Annahme, dass bereits geringe Bewegungen des Brennbetts zu einem ausreichend hemmenden Effekt auf die Bildung von Ascheversinterungen führen. Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 4.32 dargestellt. Langsame horizontale Rührerumdrehungen sorgen für eine Bewegung der Kugeln, wodurch auch das Brennbett aus Strohpellets auf und in der Kugelschüttung bewegt wird. Die entgasenden Pellets werden langsam in tiefere Schichten der Kugelschüttung transportiert und durch die Primärluft oxidiert. Die Asche wird durch die Kugelbewegung zerkleinert und aufgrund ihrer geringen Partikelgröße schneller durch die Schüttung zum Rührer transportiert. Der Rührer schiebt die Asche über die 6-mm-breiten Rostschlitze, wodurch sich die Asche aus dem Brenntropf abtransportieren lässt. Die Chancen und potenziellen Probleme des Kugelrostsystems sind in Tabelle 4.8 dargestellt.

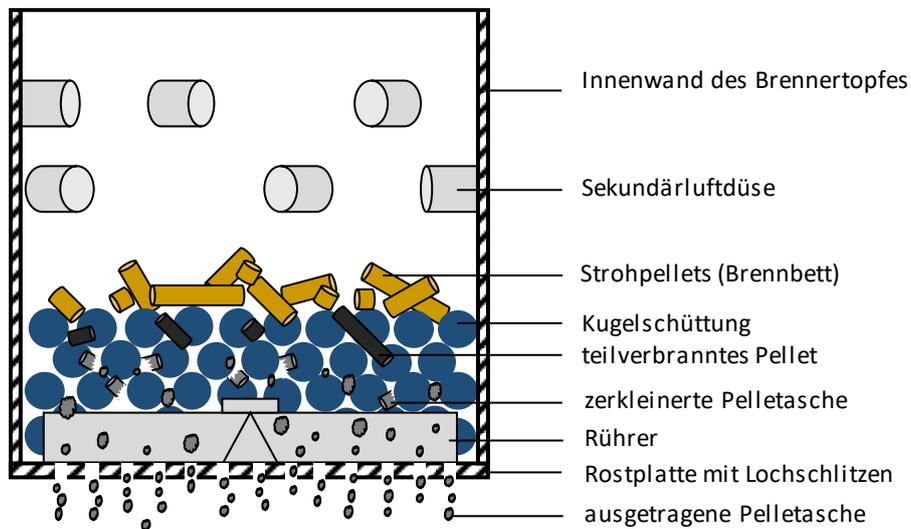


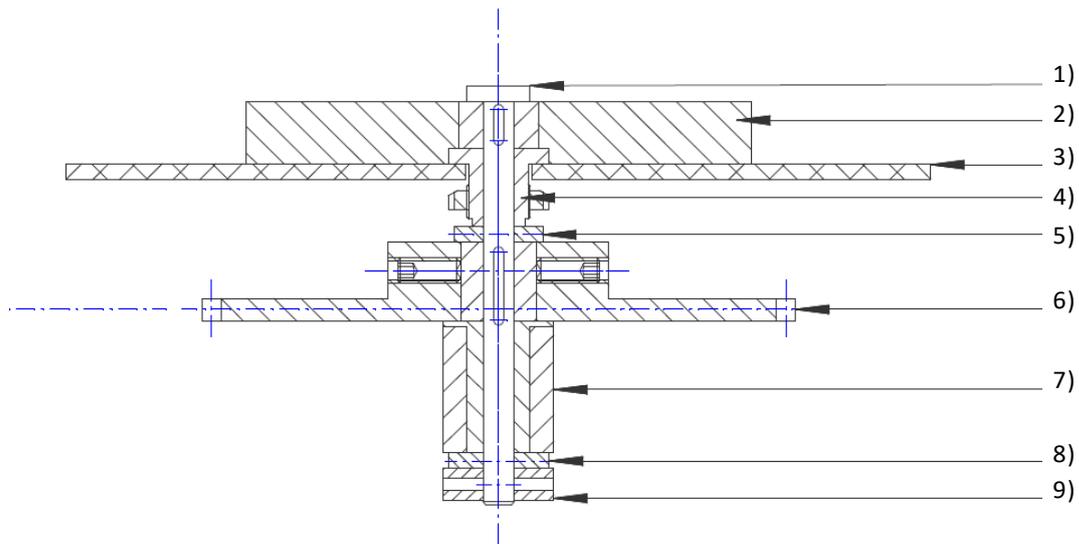
Abbildung 4.32: Funktionsschema des Kugelrostsystems.

Tabelle 4.8: Chancen und potenzielle Probleme des Kugelrostsystems.

Chancen	potenzielle Probleme
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Transport der Asche durch die Kugelschüttung aufgrund der Kugelbewegungen ▪ Zerkleinerung der Asche durch die bewegten Kugeln ▪ Fernhalten hoher Temperaturbelastungen von der Rührereinheit durch ausreichend hohe Kugelschüttung ▪ geringe Staubbildung durch moderate Kugelbewegungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ggf. zu geringe Zerkleinerungswirkung ▪ Asche kann an Kugeln anhaften und verbacken ▪ zu hoher Feuerungsverlust aufgrund unvollständig ausgebrannter Pellets ▪ je nach Schüttungshöhe hohe Wärmebelastung der Rührereinheit ▪ hohe Wärmebelastung der Kugeln

Technische Umsetzung

Bei der technischen Umsetzung des Kugelrostsystems wurde auf eine robuste und temperaturbeständige Bauform geachtet. Über Zahnrad und Kette erfolgt der Wellenantrieb. In Abbildung 4.33 ist die technische Zeichnung des Kugelrosts im Querschnitt abgebildet.



- | | | | | |
|------------|---------------|----------------------|---------------------------------|---------------------|
| 1) Welle | 2) Rührer | 3) Rostplatte | 4) Stützlager | 5) Oberer Gleitring |
| 6) Zahnrad | 7) Hauptlager | 8) Unterer Gleitring | 9) Abschlussring mit Spannstift | |

Abbildung 4.33: Auflistung der Komponenten des im Querschnitt dargestellten Kugelrostsystems in einer technischen Zeichnung nach Müllenders (2018) [55].

Der 20 mm hohe Rührer ist mit seinen vier Rührerarmen über eine Nut mit der Welle ($d=20$ mm) verbunden. Beide Bauteile bestehen aus wärmebeständigem Edelstahl (Werkstoff: 1.4828). Die Welle läuft durch ein auf der Rostplatte befestigtes Stützlager (Werkstoff: Rotguss RG7). Das Zahnrad (Werkstoff: C45-Stahl) misst einen Durchmesser von 188 mm. Das Zahnrad weist über seine Fläche große Öffnungen auf, sodass die Asche durch diese Öffnungen fallen kann und sich nicht auf dem Zahnrad ablagert (vgl. Abbildung 4.34). Die Welle ist durch das Hauptlager (Werkstoff: RG7) unterhalb des Zahnrads gelagert und an der Brennerplatte befestigt. Über eine Rollenkette wird das Zahnrad von einem Elektromotor außerhalb der Feuerung angetrieben (vgl. Abbildung 4.35). Die Leistung des Elektromotors mit Schneckengetriebe beträgt 60 W. Die Kette wird durch zwei Öffnungen ($d=25$ mm) von der Außenseite in das Innere der Feuerung geleitet. Sicherheitstechnisch ist das außenliegende Antriebssystem mit einer anschraubbaren Blechhaube abgeschirmt.

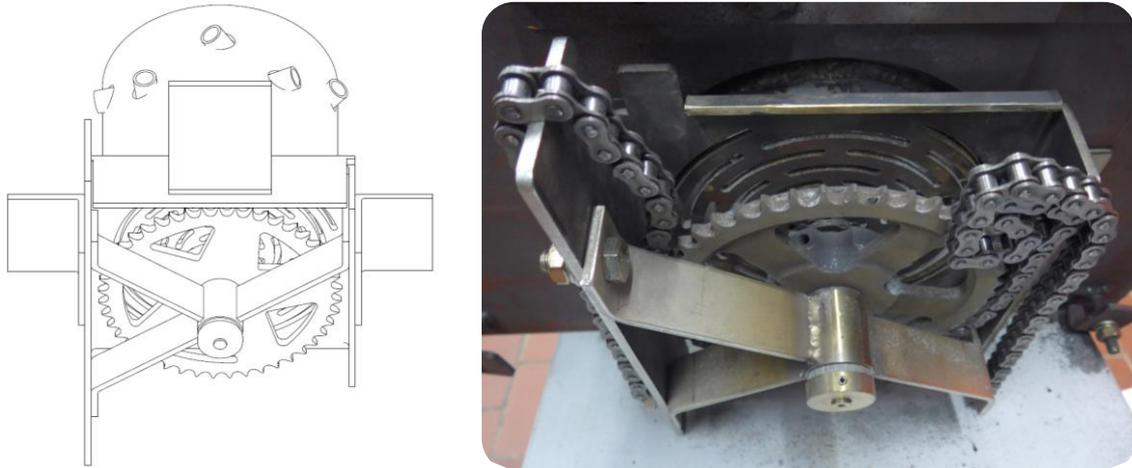
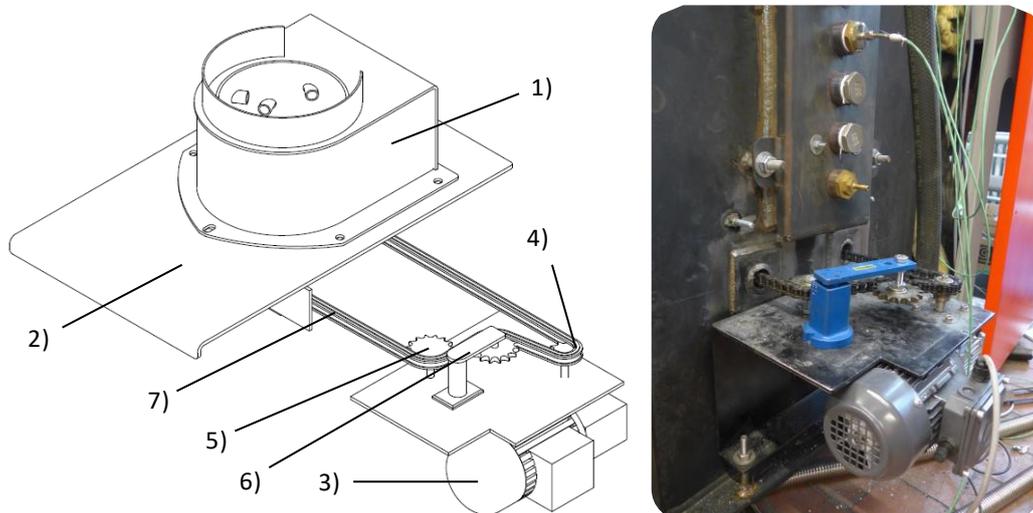


Abbildung 4.34: Kugelrostsystem mit Blick auf Zahnrad und Hauptlager.



- | | | | |
|------------------------|------------------|-----------------|--------------------|
| 1) Brennertopf | 2) Brennerplatte | 3) Elektromotor | 4) Antriebszahnrad |
| 5) Ausrichtungszahnrad | 6) Kettenspanner | 7) Rollenkette | |

Abbildung 4.35: Darstellung des Gesamtsystems des Kugelrosts mit Kettenantrieb und Elektromotor.

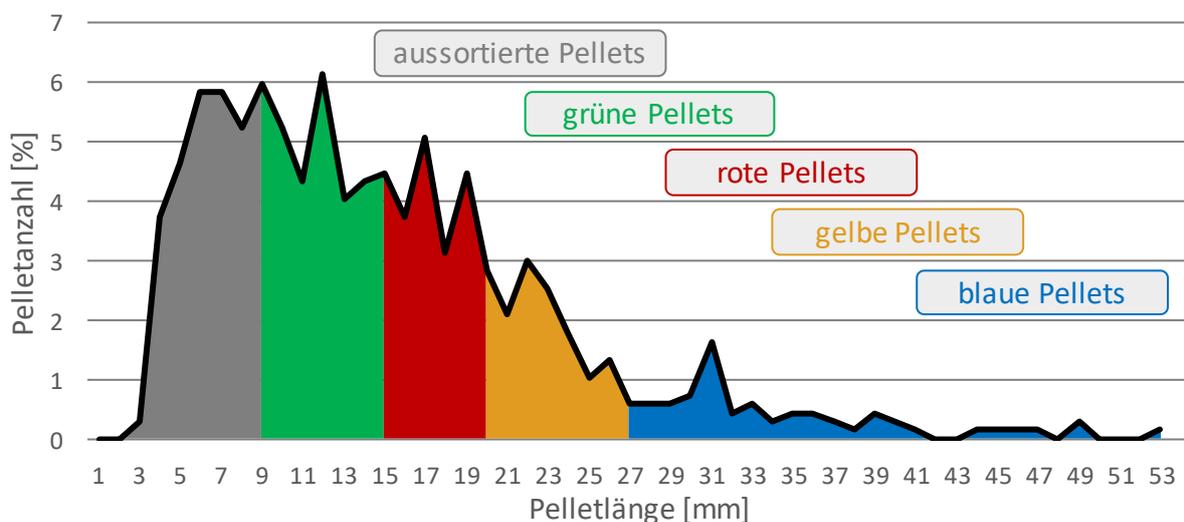
4.7.3 Kaltversuche

Um das beschriebene Funktionsprinzip des Kugelrosts zu überprüfen bzw. Einflussparameter zu charakterisieren, wurden Kaltversuche in einem separaten Versuchsstand durchgeführt. Dabei erfolgten Messungen der Pelletbewegungen sowie des Zerkleinerungsverhaltens. Aus den Erkenntnissen sollten für die Verbrennungsversuche Einflussparameter identifiziert und eingegrenzt werden.

Versuchsstand, -methodik und -durchführung

Ein separater Versuchsstand wurde zur Durchführung der Kaltversuche aufgebaut, der dem Brennerkopf und der Rostplatte geometrisch vollständig entspricht. Unterhalb des Rosts wird der Rührer von einem Spaltnotor mit einer definierten Drehzahl von $1,5 \text{ min}^{-1}$ und einer Leistung von 15 W angetrieben. Die Bewegungscharakteristik der Pellets wurde mittels Auswertung einer bildgestützten Dokumentation identifiziert. Die Pellets wurden dazu farblich unterschiedlich markiert und die Pixelanzahl mit der Software Fiji [56] erfasst. Die Versuche wurden von LEAT modelliert und mit der gleichen Methode ausgewertet. Aufgrund der Pelleteinfärbung mit Farblack muss mit Einflüssen gerechnet werden. Durch das Lackieren mit Farbe lässt sich die Festigkeit und Stabilität von Pellets erhöhen. Zudem ist ein Einfluss auf die Bewegungscharakteristik aufgrund der veränderten Oberflächenrauigkeit wahrscheinlich, was dennoch eine qualitative Bewertung der Bewegungscharakteristik zulässt.

Die Pelletfärbung erfolgte in vier verschiedenen Farben bzgl. vier verschiedener Längenintervalle (vgl. Abbildung 4.36). Die Grundlage dafür stellte die bereits gemessene Pelletverteilung dar (vgl. Kapitel 4.1). Die Probenmasse wurde auf 150 g festgelegt. Weil Pellets unter 9 mm infolge geringer Abriebserscheinungen bereits durch die Rostschlitze fallen können und für die Modellierung aufwendig sind, wurden Pellets kleiner 9 mm aussortiert. Die Längenintervalle wurden entsprechend gewählt, dass Pelletlänge, Pelletmenge und -masse der vier Intervalle nicht zu unterschiedlich bzw. unterrepräsentiert waren. Zur Erfassung der Zerkleinerungswirkung wurden die Pelletverteilung nach den Versuchen kontrolliert und die Massen der Chargen erfasst. Es wurden 181 Keramikugeln mit einem Durchmesser von 19,5 mm gewählt. Die Schüttungshöhe der Kugeln betrug ca. 60 mm.



Parameter	Einheit	grüne Pellets	rote Pellets	gelbe Pellets	blaue Pellets	Summe
Länge	mm	9 - 14	15 - 19	20 - 26	> 26	-
Anzahl	-	76	53	38	22	189
Masse	g	34,2	42,4	39,5	33,9	150

Abbildung 4.36: Einteilung der Farbkategorien der Pellets anhand ihrer Längenverteilung.

Versuchsergebnisse

Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Versuche, wurden jeweils drei identische Versuche durchgeführt und mit den Simulationsergebnissen von LEAT verglichen. In Abbildung 4.37 sind exemplarische Bildaufnahmen während eines Versuchs im Ausgangszustand, nach einer Umdrehung und nach drei Umdrehungen dargestellt. Das Diagramm in Abbildung 4.38 zeigt die dazugehörige Pixelauswertung der Versuche und der Simulation. Der Pixelanteil beschreibt das Verhältnis der Pixelanzahl der jeweiligen Farbe zu der Gesamtpixelanzahl der betrachteten kreisförmigen Schüttung.



Abbildung 4.37: Bildaufnahmen während eines exemplarischen Kaltversuchs mit Pellets im Ausgangszustand (l.), nach einer Umdrehung (m.) und nach drei Umdrehungen (r.).

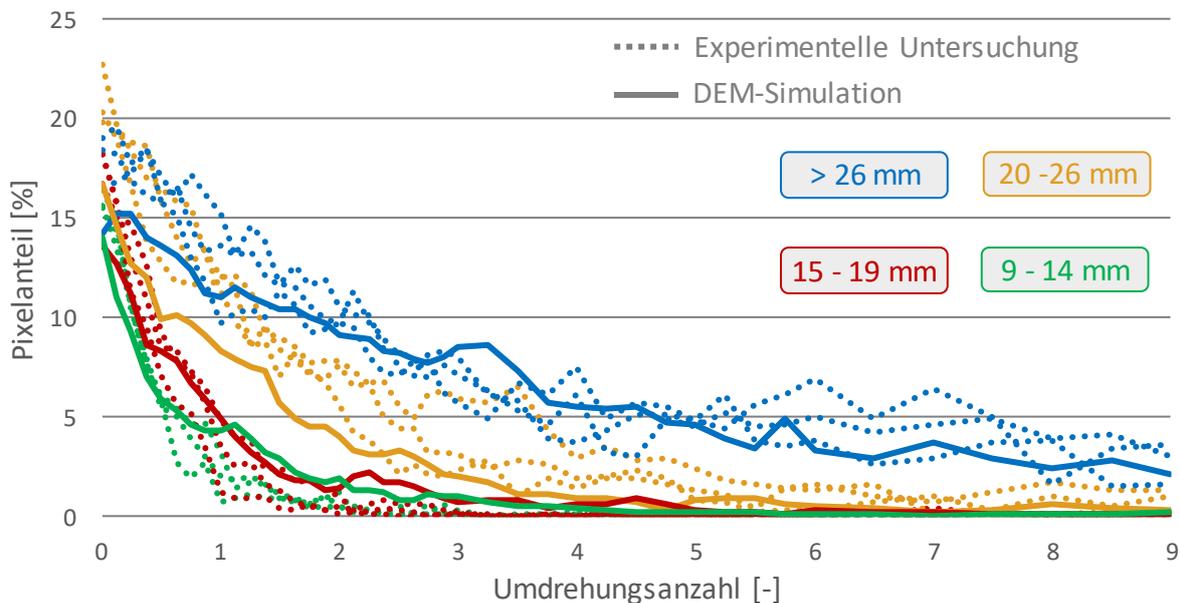


Abbildung 4.38: Charakteristisches Bewegungsverhalten von Pellets durch die Kugelschüttung in Abhängigkeit der Umdrehungsanzahl (drei Versuche); Kategorisierung der Pelletlängen in die Farben blau (> 26 mm), gelb (20-26 mm), rot (15-19 mm) und grün (9-14 mm).

Die Kurvenverläufe zeigen den schnellen Transport der kurzen Pellets (grüne und rote Kategorie) in tiefere Schüttungsregionen. Deutlich langsamer bewegten sich die längeren Pellets der gelben und blauen Kategorie durch die Kugelschüttung. Zwar weichen die Kurvenverläufe der einzelnen Versuche voneinander ab, weisen jedoch qualitativ ähnliche Verläufe auf. Die Kurvenverläufe zeigen zudem eine gute Übereinstimmung zwischen den experimentellen Untersuchungen und der Simulation. Die Validierung der Bewegungskarakteristik war ein erster wichtiger Schritt, um die Rostweiterentwicklung durch Simulationen zu unterstützen.

Bzgl. der Zerkleinerung von Pellets konnte kein signifikanter Einfluss festgestellt werden. Der Abrieb betrug im Durchschnitt nur 2,5 %. Die Pelletmasse wurde durch den Lackauftrag um 5 % erhöht.

4.7.4 Vorauswahl der Betriebsparameter mittels DEM/CFD-Simulation des Pelletofens mit Kugelrostsystem

Das entwickelte Kugelrostsystem bietet eine Reihe zu definierender Konfigurations- und Betriebsparameter. Neben der Rotordrehzahl sind der Kugeldurchmesser des Inertmaterials und die Schüttungshöhe zu wählende Parameter, die maßgeblichen Einfluss auf den Verbrennungsprozess eines bewegten Bettes haben. Da die Kombination der Parameter eine Vielzahl an unterschiedlichen Betriebskonfigurationen bietet, die zudem noch in komplexer

Wechselwirkung mit den thermochemischen Vorgängen im Brennraum in der Schüttung stehen, ist eine rein experimentelle Identifizierung der optimalen Betriebsparameter schwierig. Daher wurden die grundsätzlichen Mechanismen und Wirkungen der einzelnen Parameter auf den Abbrandprozess zunächst mit Hilfe von gekoppelten DEM/CFD Simulationen evaluiert.

Aufgrund des hohen Bedarfs an Rechenzeit für die Simulationen, eignen sich diese nicht zur Betrachtung des Gesamtprozesses im Dauerbetrieb und können daher auch nicht die experimentellen Untersuchungen ersetzen. Vielmehr ermöglicht das DEM/CFD Simulationskonzept (Abschnitt 4.6) die detaillierte Betrachtung schüttungsinterner Vorgänge für einen begrenzten Zeitraum, und damit die Ermittlung von Daten, die messtechnisch im Prinzip nicht zugänglich sind. Diese Daten erweitern das grundsätzliche Verständnis der Wechselwirkungen zwischen der Bewegung und dem Abbrande der Strohpelletschüttung. Auf Basis dieses erweiterten Verständnisses können dann bestimmte Konfigurationen ausgeschlossen, bzw. kann der Bereich der zu wählenden Parameter für die Langzeitversuche signifikant eingeschränkt werden

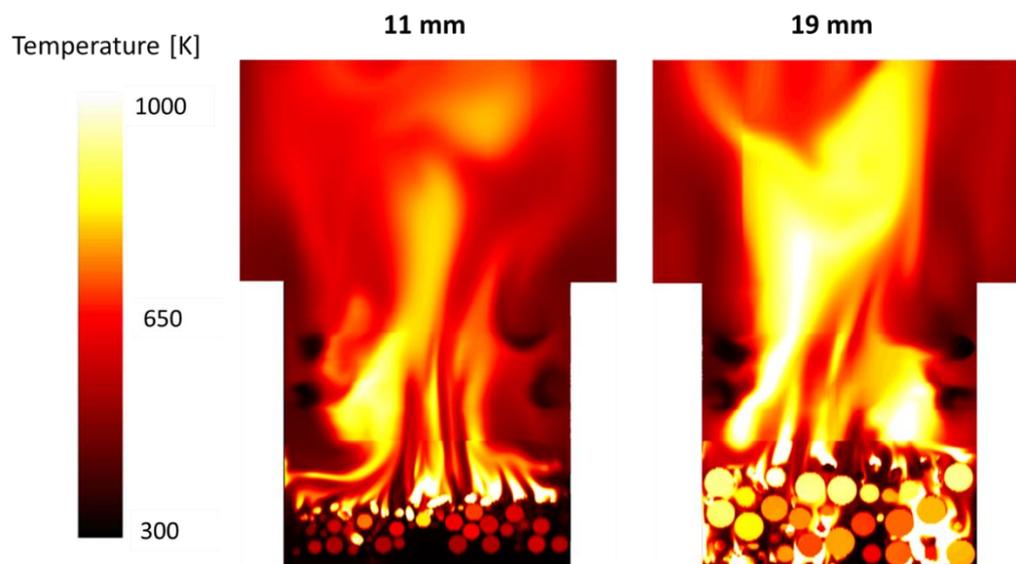


Abbildung 4.39: Temperaturverteilung in der Schüttung mit Inertkugeln mit 11mm und 19 mm Durchmesser.

Abbildung 4.39 zeigt die Temperaturverteilung im Brennerkopf mit installiertem Kugelrostsystem für eine Kugelschüttung aus 11 mm (links) und 19 mm (rechts) Kugeln nach 70 s Betriebszeit mit kontinuierlicher Brennstoffzufuhr und einer Rotordrehzahl von 0,65 1/min. Zu diesem Zeitpunkt der Simulation ist noch kein stationärer Betriebspunkt erreicht. Das Temperaturniveau in der Gasphase ist mit max. 1000 K vergleichsweise niedrig. Allerdings werden schon nach der kurzen Simulationsdauer die Tendenzen der zu wählenden Parameter deutlich. Im Falle der

Kugelschüttung mit einem Kugeldurchmesser von 11 mm beschränkt sich die freigesetzte Reaktionswärme in Form des reagierenden Pyrolysegases auf den Bereich oberhalb der Kugelschüttung. Die Pellets pyrolysieren demnach weitestgehend an der obersten Schicht der Schüttung. Damit ergibt sich ein Temperaturgradient in der Schüttung von heißen Objekten an der Schüttungsoberfläche zu kalten Objekten am Boden der Schüttung. Die Schürmechanik ist in diesem Fall durch ausreichenden Abstand vom heißen Feuerraum getrennt. Allerdings werden in diesem Fall wenige entgaste Pellets in tiefere Schichten der Schüttung transportiert. In Konsequenz bleiben entsprechende Aschepartikel an der Oberfläche der Schüttung zurück und werden konstant der dort generierten Reaktionswärme ausgesetzt. Dies führt zu erhöhter Gefahr von Ascheversinterung an den oberen Schichten der Kugelschüttung. Im Falle der Kugelschüttung mit einem Kugeldurchmesser von 19 mm stellt sich die Temperaturverteilung anders dar. Infolge der größeren freien Volumina zwischen den einzelnen Kugeln gelangen die entgasenden Pellets in tiefere Schichten der Schüttung. Die dort freigesetzten Pyrolysegase führen zu einer lokalen Freisetzung von Reaktionswärme und letztlich zu einer Aufheizung der Kugelschüttung in tieferen Lagen. Daher gelangen die infolge der Feststoffkonversion entstandenen Aschepartikel an den Boden des Kugelrostes und können prinzipiell durch den Rost in den Ascheauffangbehälter gelangen. Allerdings sind diese Partikel und der mechanisch angetriebene Rotor der lokal freigesetzten Reaktionswärme ausgesetzt. Letztlich führt auch dies zu potentiell erhöhter Gefahr von Agglomeration versinterter Ascheteilchen und erhöhter thermischer Belastung der Schürmechanik.

Ein Kugelrostsystem zur Vermeidung von Ascheagglomeraten muss also einerseits in ausreichender Geschwindigkeit teilumgesetzte Pellets in vertikaler Richtung bis zum Boden des Brenntellers transportieren. Andererseits muss ein solches System auch verhindern, dass entgasende Partikel in tieferen Schichten der Kugelschüttung zu lokalen Temperaturspitzen des Inertmaterials und der mechanisch beweglichen Bauteile infolge lokal freigesetzter Reaktionswärme infolge der Flüchtignoxidation führen. Demnach sollte im Idealfall ein Großteil der Entgasung an der obersten Schicht stattfinden. Erst die geschrumpften und teilumgesetzten Partikel werden dann in tiefere Schichten des Bettes transportiert. Sobald das Strohpellet vollständig umgesetzt wurde, gelangen die Ascheteilchen an die unterste Schicht des Kugelrosts. So wird die Reaktionswärme im Wesentlichen im Brennraum oberhalb der Schüttung freigesetzt. Die während des vertikalen Transportes durch die Kugelschüttung entstandenen Ascheteilchen werden von der Reaktionswärme aus dem Brennraum durch das darüber liegende Inertmaterial abgeschirmt. Die Ascheteilchen erreichen nicht die kritische Ascheschmelztemperatur und fallen mit pulverförmiger Struktur durch die Schlitze der Rostplatte.

Die mechanisch beweglichen Bauteile bleiben ebenfalls vom heißen Brennraum abgeschirmt. Ein System welches diese widersprüchlichen Anforderungen erfüllen soll, benötigt eine entsprechend genaue Einstellung der wechselwirkenden Betriebsparameter Rotordrehzahl und Kugeldurchmesser.

Die Ergebnisse aus Abbildung 4.39 zeigen, dass bei einer Schüttung aus vergleichsweise kleinen Kugeln ($d_K = 11 \text{ mm}$) die entgasenden Strohpellets nicht ausreichend durch die Kugelschüttung transportiert werden. Gleichzeitig deuten diese Ergebnisse an, dass die entgasenden Pellets bei einer Inertschüttung aus vergleichsweise großen Kugeln ($d_K = 19 \text{ mm}$) zu schnell durch die sich bewegende Kugelschüttung transportiert werden. Auf Basis dieser initial durchgeführten DEM/CFD Simulationen kann der zu wählende Kugeldurchmesser zunächst auf den Bereich $11 \text{ mm} < d_K < 19 \text{ mm}$ eingeschränkt werden.

Zur weiteren Einschränkung der zu wählenden Parameter hinsichtlich der Rotordrehzahl wurden DEM/CFD Simulationen einer vierlagigen Kugelschüttung mit einem Einzeldurchmesser von 15 mm durchgeführt.

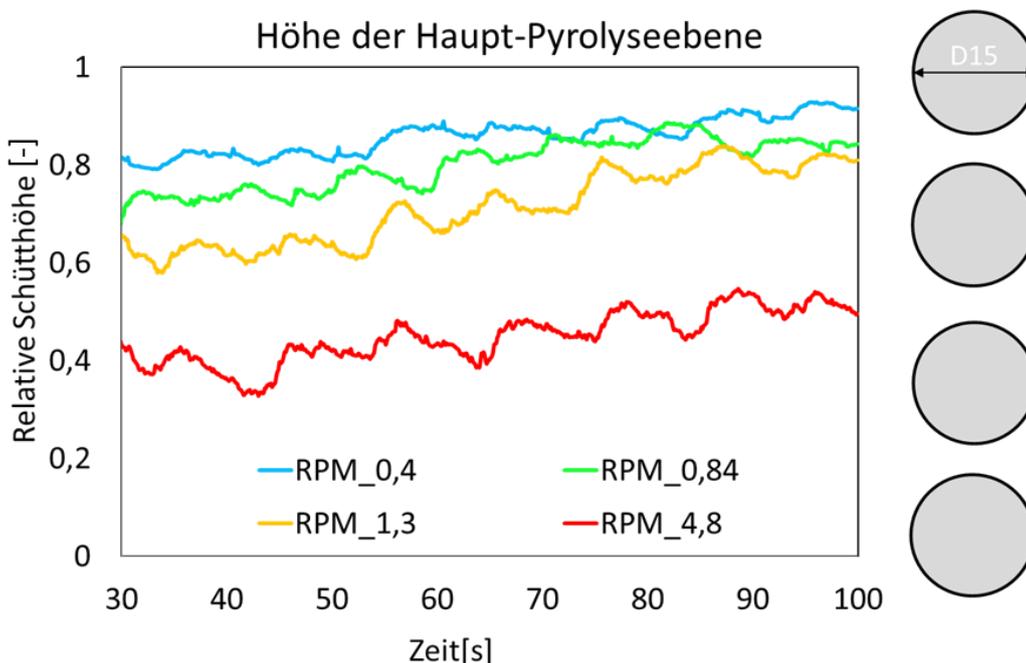


Abbildung 4.40: Höhe der Hauptpyrolyseebene bei unterschiedlichen Drehzahlen.

Abbildung 4.40 zeigt die sich einstellende Höhe in der Schüttung, in welcher der Wesentliche Teil der pyrolytischen Zersetzung stattfindet. In diesen Simulationen wurde ein Zeitraum von 100 s im stationären Betrieb mit konstanter Strahlungstemperatur aus dem Brennraum durchgeführt. Die

farblich markierten Linien zeigen die Mittelwerte der relativen Höhe in der Kugelschüttung in der sich pyrolysierende Pellets aufhalten, bei unterschiedlichen Drehzahlen. Zusätzlich illustrieren die seitlich übereinander angeordneten Kugeln die korrespondierende Schicht der relativen Schütthöhe in der monodispersen Kugelschüttung. Für die durch die Motorleistung nach oben hin begrenzte Drehzahl von 4,8 1/min kann die Hauptpyrolyseebene zwischen der von oben betrachtet zweiten und dritten Schicht identifiziert werden. Bei Drehzahlen zwischen 0,4 und 1,3 1/m in kann die Hauptpyrolyseebene dagegen zwischen der ersten und zweiten Schicht lokalisiert werden. Auf Basis der zuvor definierten Zielvorgabe, einen Großteil der Pyrolyse in den oberen Schichten der Kugelschüttung stattfinden zu lassen, kann daher die Empfehlung einer Drehzahl zwischen 0,4 – 1,3 1/min bei einer vierlagigen Kugelschüttung mit einem Einzelpartikeldurchmesser von $d_k = 15$ mm für die weiteren Untersuchungen ausgesprochen werden.

4.7.5 Verbrennungsversuche in der Fallschachtfeuerung mit Kugelrosttechnik

Bewertungskriterien

Ziel der Verbrennungsversuche war die Bewertung des Kugelrostsystems in der Abwurfffeuerung. Zusätzlich sollte die kommerzielle Wanderrostfeuerung als Benchmark mit dem neuentwickelten Rostsystem der Abwurfffeuerung verglichen werden. Dafür müssen zunächst die Bewertungskriterien definiert werden:

- Abtransport der Asche aus dem Feuerraum
- Qualität des Verbrennungsprozesses (Emissionen, Ausbrand, Temperaturen, Luftzahl)
- Funktionalität und materialtechnische Beschaffenheit der Rostsystemkomponenten

Der Abtransport der Asche aus dem Feuerraum stellt das zentrale Kriterium zur Bewertung der Systemeffektivität dar. Durch die gravimetrische Erfassung der Asche im Ascheaustrag lässt sich dieses Kriterium quantitativ ausdrücken. Die Qualität des Verbrennungsprozesses wird durch den Ascheausbrand (Glühverlust), die Emissionen, die Temperaturen und die Luftzahl dargestellt. Durch den Feststoffausbrand, die CO-Abgaskonzentrationen in Verbindung mit der Luftzahl und den Verbrennungstemperaturen in der Sekundärluftzone lässt sich das Maß der vollständigen Verbrennung beschreiben.

Ein weiteres wichtiges Kriterium stellt die Erhaltung der Funktionalität und der materialtechnischen Beschaffenheit der Rostkomponenten dar. Detaillierte werkstoffchemische

Veränderungen lassen sich nur durch aufwendige Untersuchungen erfassen. Daher erfolgte bei den Versuchen nur eine qualitative Bewertung. Bspw. konnten farbliche Veränderungen, Materialrisse, -verformungen und -brüche identifiziert werden. Die Beschaffenheit der Kugeln des neuentwickelten Rostsystems gibt qualitativ Aufschluss über die Langzeittauglichkeit unterschiedlicher Materialien und Betriebsparameter.

Versuchsparameter

Die Verbrennungsversuche erfolgten mit der Strohpelletcharge LSP+ (2) (vgl. Kapitel 4.2). Darüber hinaus erfolgte ein Versuch in der Wanderrostfeuerung mit der unbehandelten Strohpelletcharge OSP. Die Versuche in der Abwurfffeuerung (65 kW) wurden aufgrund der begrenzten zur Verfügung stehenden Versuchsmaterialmasse bei einer Kesselteillast von ca. 60 % durchgeführt. Bei der Wanderrostfeuerung (20 kW) erfolgten die Versuche bei Nennlast. Bei den Vergleichsversuchen in der Wanderrostfeuerung wurde lediglich der Primärluftmassenstrom als variabler Parameter eingestellt, während alle weiteren Parameter (Pelletförderschneckenaktung, Sekundärluftmassenstrom, Unterdruck etc.) durch die Regelung vorgegeben waren.

Die einstellbaren variablen Parameter der Abwurfffeuerung sind nachfolgend aufgelistet:

- Kugeldurchmesser
- Kugelschüttungshöhe
- Kugelwerkstoff
- Drehzahl des Rührers
- Primärluftlambda (Volumenstrom)

Als Kugeldurchmesser wurden 13 und 15 mm ausgewählt. Kugeln kleiner als 13 mm bleiben in den Rostschlitzen klemmen was zum Blockierungen des Rostsystems führt. Die Kugelschüttungshöhe wurde von einer Monolage bis zu mehreren Schichten gewählt (15 bis 60 mm). Als Kugelwerkstoffe wurden Edelstahl (Werkstoffnummer: 1.4305), Stahl (Werkstoffnummer: 1.0616 und 1.0301) sowie Keramik (Al_2O_3) verwendet.

Die Rührerdrehzahl wurde von 0,59 bis 4,82 min^{-1} (Drehzahlmaximum) variiert. Für die Einstellung des Primärluftmassenstroms sollten die Angaben bzgl. der Primärluftzahl aus der Literatur von 0,4 bis 0,8 [57] nach Möglichkeit eingehalten werden. Wegen des kühlenden Effekts wurde tendenziell eher die obere Grenze angestrebt. Die Sekundärluft wurde anhand von Temperatur, Restsauerstoffgehalt und CO -Konzentration entsprechend manuell geregelt.

Versuchsmatrix

Die in Tabelle 4.9 abgebildete Versuchsmatrix beinhaltet die Bezeichnungen und Parameter der Verbrennungsversuche. Darüber hinaus wurden Vorversuche durchgeführt, welche im Rahmen des Berichts jedoch nicht weiter erläutert werden. Als Grundlage zur Beschreibung und Verdeutlichung des Ausgangsproblems der Strohverbrennung in einer Abwurfheizung mit Brennertopf wurde ein Referenzversuch ohne Einsatz des Kugelrostsystems (VP1) durchgeführt. Danach erfolgte ein Versuch mit Rührer ohne Kugeln (VP2), gefolgt von Versuchen mit einer einzigen durch den Rührer bewegten Kugelschicht (VP3 und VP4). Dabei wurden die Einflüsse von zwei verschiedenen Drehzahlen untersucht. Im Anschluss wurde die maximal angestrebte Schüttungshöhe von 60 mm mit dem kleinstmöglichen Kugeldurchmesser von 13 mm getestet (VP5 und VP6). In den darauffolgenden Versuchen bei der annähernd gleichen Schüttungshöhe wurden 15 mm Kugeln unterschiedlicher Materialien (Edelstahl 1.4305, Stahl 1.0616 und Keramik) getestet (VP7 bis VP10). In der Wanderrostheizung wurden zwei verschiedene Primärluftmassenströme untersucht (VK1 und VK2). In einem ergänzenden Versuch sollte getestet werden, ob ein solcher Heizungstyp auch mit unbehandelten Strohpellets eine hohe Prozessqualität ermöglichen kann (VK3).

Tabelle 4.9: Versuchsmatrix der durchgeführten Verbrennungsversuche in der Abwurfheizung zur Erprobung des Kugelrostsystems und der Wanderrostheizung (Vergleichsheizung).

Kürzel	d_k [mm]	h_s [mm]	Werkstoff [-]	n_R [min ⁻¹]	λ_{PL} [-]
VP1	-	-	-	-	0,82
VP2	-	-	-	4,82	0,84
VP3	15	15	1.4305	4,82	0,92
VP4	15	15	1.4305	0,84	0,76
VP5	13	57	1.0301	4,82	0,48
VP6	13	57	1.0301	1,34	0,75
VP7	15	59	1.4305	0,84	0,80
VP8	15	59	1.4305	0,59	0,79
VP9	15	59	1.0616	0,84	0,59
VP10	15	59	Al ₂ O ₃	0,84	0,76
VK1	-	-	-	-	0,66
VK2	-	-	-	-	0,98
VK3 ¹⁾	-	-	-	-	0,69

d_k =Kugeldurchmesser; h_s =Kugelschüttungshöhe; n_R =Rührerdrehzahl; λ_{PL} =Primärluftlambda

1) Versuch wurde mit Strohpelletcharge OSP durchgeführt

Versuchsdurchführung Abwurfheizung

Die zu verbrennende Pelletmasse wurde gewogen und anschließend in den Pelletbehälter gefüllt. Die Zündung der Anlage erfolgte mit Holzpellets, um mögliche Einflüsse der Strohpelletverbrennung im Anfahrprozess zu vermeiden. Im Anschluss wurden der Rostmotor, der Abgassaugzug und die Datenaufzeichnung gestartet. Im Laufe der Versuche erfolgte eine Änderung dahingehend, dass der Rostmotor erst nach dem Brennstoffwechsel gestartet wurde. Die Holzpellets wurden wegen des geringeren Durchmessers und der geringeren Oberflächenrauigkeit zu schnell durch die Kugelschüttung und in den Ascheaustrag unter dem Rost transportiert, was wegen unverbrannter Pelletreste zu einer signifikanten Beeinflussung der Ascheglühverluste führte. Der Abgassaugzug regelte den Unterdruck auf einen Sollwert von 27 Pascal. Nach Erreichen eines näherungsweise stationären Anlagenzustands (Feuerraum- und Abgastemperaturen sowie O₂- und CO-Konzentrationen) wurde die Brennstoffzuführung auf Strohpellets umgestellt. Zum Abfahren der Anlage wurde die Pelletförderschnecke gestoppt. Nach Abkühlen der Feuerung konnten die Kugeln und die Asche aus dem Brennertopf entnommen werden. Die drei Aschechargen aus dem Brennertopf, auf der Brennerplatte außerhalb des Topfes und die Asche unterhalb des Rosts wurden gewogen, in einer Scheibenschwingmühle zerkleinert und im Labor analysiert (Glühverlust und z. T. TOC).

Versuchsdurchführung Wanderrostheizung

Die Versuchsdurchführung war bis auf einen Unterschied mit jener bei den Verbrennungsversuchen in der Abwurfheizung identisch. Im laufenden Betrieb ist bei der Wanderrostheizung ein definierter Materialwechsel unter sicherheitstechnischen Gesichtspunkten nicht möglich. Im Pelletbehälter befindet sich eine an die Pelletförderschnecke gekoppelte Mischapparatur. Ein Anhalten der Pelletzuführung und somit auch der Mischapparatur ist im Betrieb ohne Weiteres nicht möglich. Das Herausnehmen von Pellets aus dem Behälter ist somit im laufenden Betrieb aus Sicherheitsgründen nicht möglich. Die Zündung erfolgte über ein Zündgebläse mit elektrischem Heizdraht. Die Parameter der Pelletförderschnecke für die Nennwärmeleistung von 20 kW wurden in Vorversuchen ermittelt und als Startwert der iterativ regelnden Steuerung eingestellt. Damit regelte die Anlage sich auf die Nennwärmeleistung selbstständig ein, sodass der Pellet- und Primärluftmassenstrom kaum variierten. In den Vorversuchen wurde die Wanderrostgeschwindigkeit ebenfalls getestet. Für einen ausreichenden Transport des Brenn- bzw. Aschebetts waren die Werkseinstellung geeignet. Die Taktung beträgt 3 Sekunden Förderzeit bei 60 Sekunden Stillstandzeit. Zum Abfahren der Anlage wird der Kessel abgeschaltet, wodurch eine einprogrammierte Abfahrprozedur startet. Auch hier wird die

Pelletzufuhr sofort gestoppt. Nach Abkühlen der Anlage wurde die sich auf dem Wanderrost befindende Strohasche über das separate Ansteuern des Wanderrosts in den Aschekanal und von dort mit der Ascheschnecke in den Aschebehälter transportiert. Die Asche wurde anschließend aus dem Behälter entnommen, zerkleinert und analysiert.

Versuchsergebnisse: Referenzversuch (VP1)

Zur Verdeutlichung der Problematik der Strohpelletverbrennung ohne bewegte Rostsysteme wurde ein Referenzversuch ohne Einsatz des entwickelten Kugelrostsystems durchgeführt. Nach einer Versuchszeit von 2:50 musste der Versuch aufgrund zu hoher CO-Emissionen beendet werden. Die dargestellten Kurvenverläufe der Temperaturen und Luftmassenströmen (vgl. Abbildung 4.41) sowie der Abgaskonzentrationen (vgl. Abbildung 4.42) beginnen mit dem Brennstoffwechsel auf Strohpellets.

Die beiden Temperaturen in der Gaszone (T_{GZ1} und T_{GZ2}) zur Verbrennung der Brenngase, die Brennbetttemperatur (T_{BB}) und die Luftmassenströme befanden sich bis zu einer Versuchszeit von ca. 1:30 zunächst in einem unauffällig stationären und typischen Bereich. Der Sekundärluftmassenstrom war konstant, während der Primärluftmassenstrom eine etwas abfallende Tendenz zeigt. Eine deutlich sinkende Tendenz weist die Temperatur der Rostunterseite auf. Die Kurvenverläufe verändern sich ab einer Versuchszeit von ca. 1:40 sich zum Teil signifikant. Die Brennbetttemperatur stieg zunächst an, brach anschließend ein und stieg unter großen Schwankungen erneut an. Darauf folgend fiel die Brennbetttemperatur schnell auf ca. 50 °C ab. Die Gaszonentemperaturen sanken um mehr als 100 °C und unterlagen ebenfalls deutlichen Schwankungen. Die Luftmassenströme verringerten sich ebenfalls sukzessive.

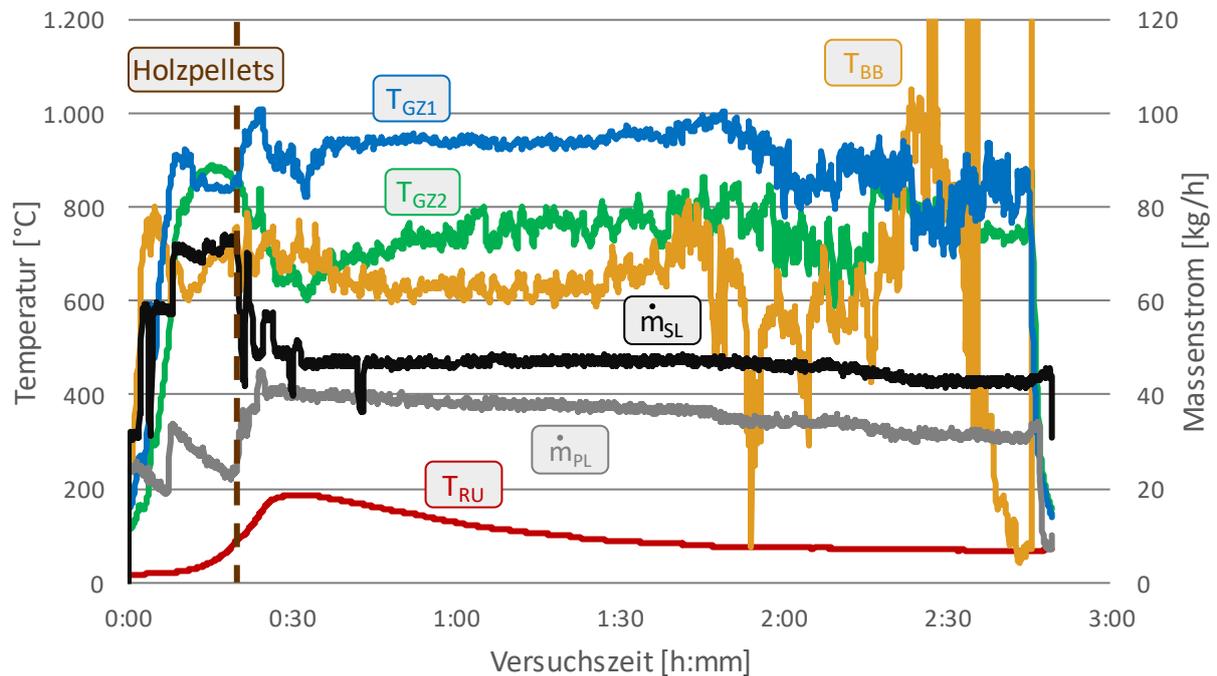


Abbildung 4.41: Temperaturen und Luftmassenströme des Referenzversuchs (VP1).

Die CO-Emissionen lagen zunächst auf einem relativ hohen Niveau, nahmen dann jedoch deutlich ab. Nach etwa 2 Stunden erhöhten sich die CO-Emissionen auf Werte $> 600 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr., 13 \% O}_2}$, was den Versuchsabbruch zur Folge hatte. Die Staubemissionen stiegen ebenfalls deutlich, auf Werte von $> 100 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr.}}$ an. Der Restsauerstoffgehalt nahm analog zur Reduzierung der Luftmassenströme (vgl. Abbildung) ab. Die NO- und SO₂-Emission befanden sich in einem üblichen Bereich. Durch die erhöhten CO-Emissionen ab der Versuchszeit von ca. 2:15 verringerten sich die NO-Emissionen durch die CO bedingte NO-Reduktion.

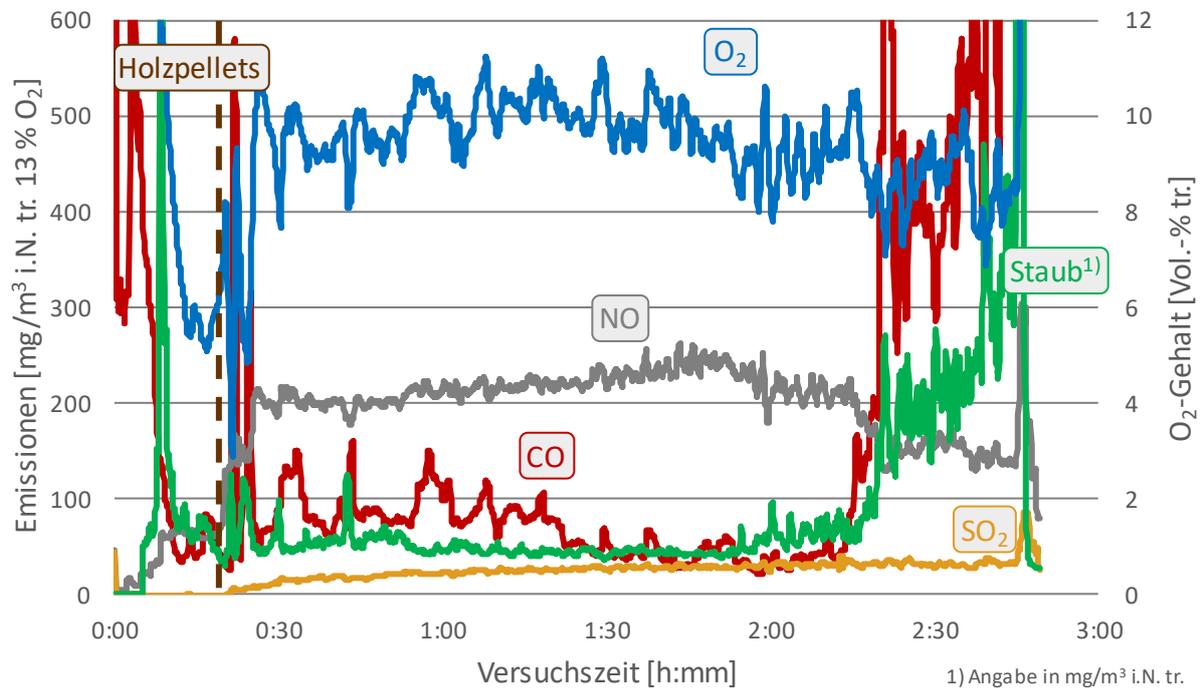


Abbildung 4.42: Abgaskonzentrationen des Referenzversuchs (VP1).

Die Asche hatte sich nach dem Versuch bis zum Rand des Brennerkopfs angehäuft (vgl. Abbildung 4.43). Die Sekundärluftdüsen waren dadurch vollständig überdeckt. Die Asche konnte mangels Bewegung nicht zerfallen und durch die Rostschlitze abtransportiert werden, sondern versinterte zu leicht auflösbaren Ascheagglomeraten. 23,3 kg Strohpellets wurden insgesamt verbrannt. Die Asche im Brennerkopf konnten mit 1,37 kg und die Asche auf der Brennerplatte neben dem Brennerkopf mit 0,05 kg gewogen werden. Nur ca. 20 g sind durch den Rost gefallen. Der Glühverlust war aufgrund der hohen Verweilzeit mit 0,24 % sehr gering.



Abbildung 4.43: Ansammlung der Pelletasche im Brennerkopf (l.) und Nahaufnahme typischer versinteter Aschestrukturen aus dem Brennerkopf (r.) nach dem Referenzversuch (VP1).

Versuchsergebnisse: Rührer ohne Kugeln (VP2)

Um den Einfluss des Rührers auf die Strohasche bzw. deren Abtransport zu untersuchen, wurde ein Versuch ohne Kugeln bei maximaler Rührerdrehzahl ($4,82 \text{ min}^{-1}$) durchgeführt. Der Versuch wurde nach einer Versuchszeit von 2:30 aufgrund einer Blockierung des Rührers wegen wärmeinduzierter Werkstoffverformung der Rührerwelle abgebrochen.

Auffällig war das hohe Niveau der Brennbetttemperatur im Vergleich zum Referenzversuch (vgl. Abbildung 4.44). Charakteristisch ist zudem der Temperaturverlauf unmittelbar über dem Brenntopf (Gaszone 1). Diese periodische Temperaturabsenkung gefolgt von einem spontanen Wiederanstieg ist auf Flugasche, welche am Thermoelement anhaftete und nach einer gewissen Zeit wieder abfiel, zurückzuführen. Die Rostunterseitentemperatur war verhältnismäßig hoch und deutet auf eine höhere Wärmebelastung des Systems hin. Die Luftmassenströme waren mit Ausnahme einer plötzlichen Erhöhung des Primärluftmassenstroms bei 1:20 konstant. Die Erhöhung ist auf eine automatische Änderung der Steuerungseinstellung des Primärluftgebläses zurückzuführen. Einflüsse auf die Temperaturen sind dadurch jedoch nicht erkennbar. Es gab während des Versuchs keine Auffälligkeiten bei der Abgas- und Staubanalyse (vgl. Abbildung 4.45). Die CO-Emissionen betragen durchschnittlich $47 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr., 13 \% O}_2}$. Die Staubemissionen waren für die Strohverbrennung mit durchschnittlich $45 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr.}}$ relativ niedrig, jedoch über den gesetzlichen Grenzwert. Die beschriebene Änderung des Primärluftmassenstroms ab Versuchszeit 1:20 zeigte keinen Effekt auf die Abgaskonzentrationen.

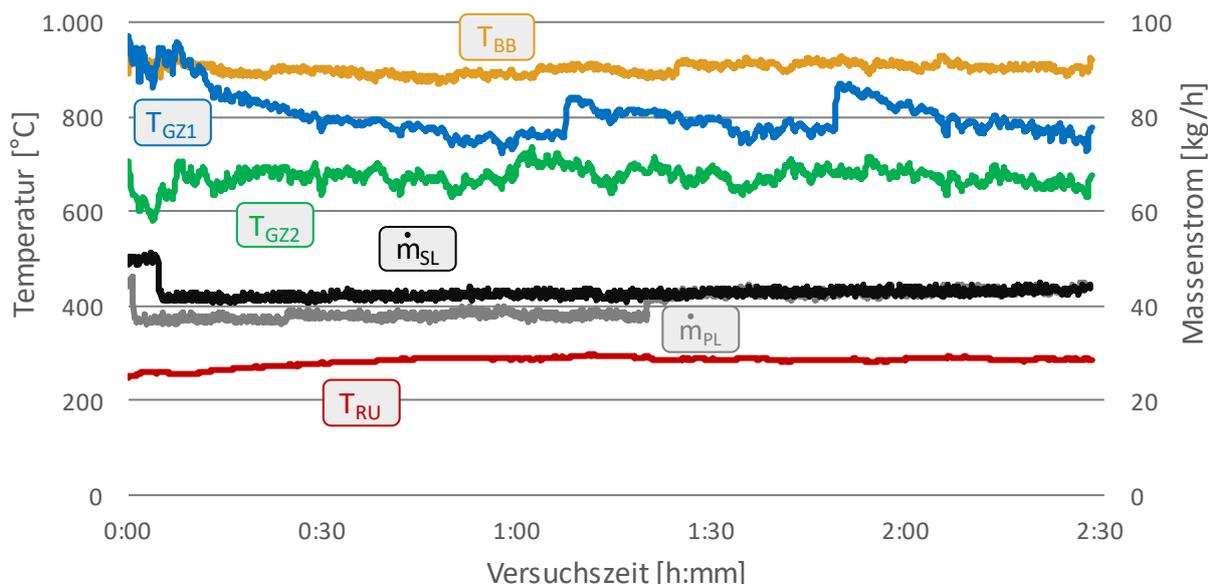


Abbildung 4.44: Temperaturen und Luftmassenströme des Versuchs mit Rostsystem ohne Kugeln (VP2).

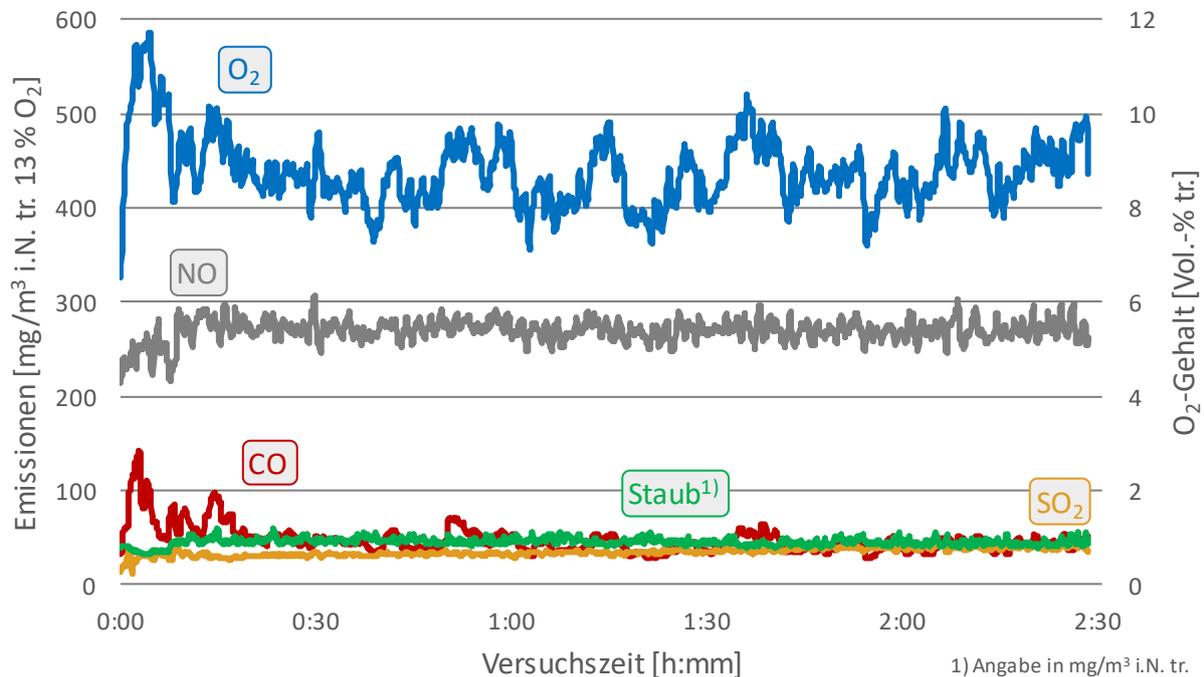


Abbildung 4.45: Abgaskonzentrationen des Versuchs mit Rostsystem ohne Kugeln (VP2).

Das Innere des Brennertopfs und die durch das System abtransportierte Asche sind in Abbildung 4.46 dargestellt. Nachdem der Rührer aufgrund thermischer Verformungen der Rührerwelle blockierte, wurde der Versuch abgebrochen. Die Rührerwelle musste nach dem Versuch erneuert werden, während der Rührer selbst augenscheinlich nicht beschädigt oder verformt wurde. Die Aschemenge im Brennertopf war mit 15 g verhältnismäßig gering. Es wurden 27,9 kg Strohpellets verbrannt und unter dem Rost 0,87 kg Asche und auf der Brennerplatte neben dem Brennertopf 0,76 kg Asche zurückgewogen. Der Glühverlust der Asche betrug durchschnittlich 6,7 %. Dabei sind die Unterschiede zwischen der Asche auf der Brennerplatte (Glühverlust von 2,3 %) und im Ascheaustrag unter dem Rost (12,5 %) groß.

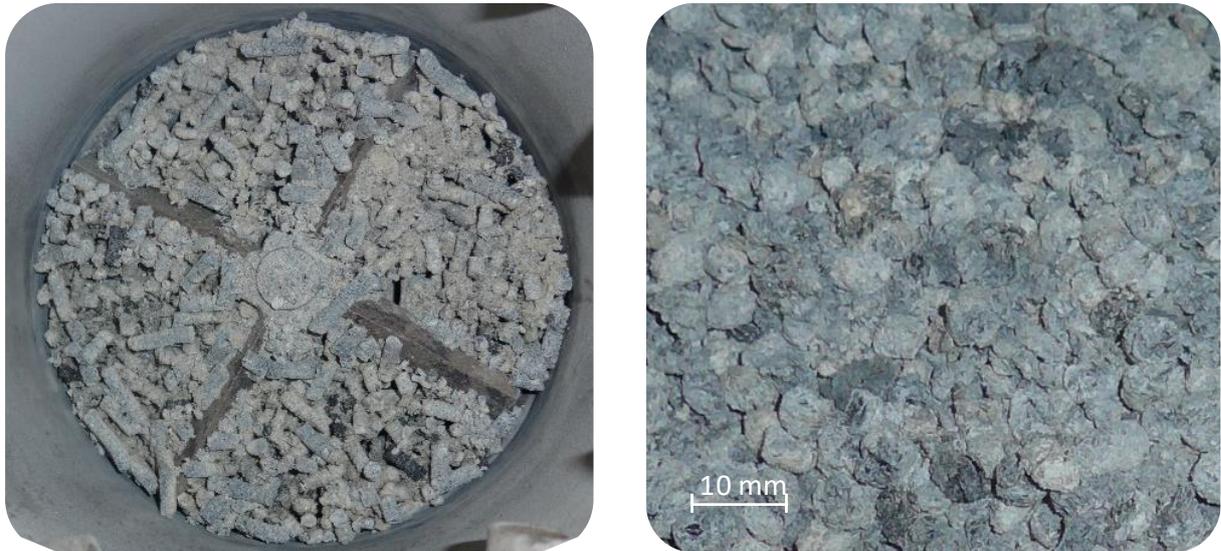


Abbildung 4.46: Ansammlung der Pelletasche im Brennerkopf (l.) und Nahaufnahme der durch den Rost abtransportierten Asche (r.) nach dem Rührerversuch (VP2).

Versuchsergebnisse: Versuche mit einlagiger Kugelschicht (VP3 und 4)

Im nächsten Schritt wurde eine Kugelschicht aus 80 Edelstahlkugeln (1.4305) mit einem Durchmesser von 15 mm untersucht. Als Drehzahlen wurden $0,84 \text{ min}^{-1}$ (VP3) und $4,82 \text{ min}^{-1}$ (VP4) getestet. Wegen einer unbemerkten Brückenbildung der Förderschneckenöffnung im Pelletbehälter wurden bei VP3 für kurze Zeit keine Pellets in die Brennkammer befördert. Die Folgen waren ein Einbruch des Verbrennungsprozesses und der Versuchsabbruch. Aufgrund einer Blockierung des Rostsystems durch die thermische Schädigung der Rührerwelle musste auch VP4 abgebrochen werden.

Die Kurvenverläufe der Temperaturen, Luftmassenströme und Abgaskonzentrationen von VP3 sind in Abbildung 4.47 und Abbildung 4.48 dargestellt. Die Temperatur von Gaszone 1 fiel bei VP3 mit der Zeit, was ebenfalls auf die bereits diskutierten Ascheablagerungen am Thermoelement zurückzuführen ist. Ansonsten sind die Temperaturen und Abgaskonzentrationen ohne Auffälligkeiten. Die CO-Emissionen lagen durchschnittlich bei $23 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr., 13 \% O}_2}$ und die Staubemission bei $33 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr.,}}$.

Die Brennbetttemperatur und die Verbrennungstemperatur in Gaszone 1 waren bei VP4 geringer als bei VP3 (vgl. Abbildung 4.49). Charakteristisch ist auch hier der bereits diskutierte sägezahnartige Kurvenverlauf. Auffällig ist zudem die steigende Rostunterseitentemperatur. Die CO-Emissionen bewegten sich auf einem sehr hohen Niveau mit durchschnittlichen $285 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr., 13 \% O}_2}$ bei starken Schwankungen von 143 bis $708 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr., 13 \% O}_2}$ (vgl. Abbildung 4.50). Die Staubkonzentrationen wiesen mit einem Mittelwert von $83 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr.,}}$ ebenfalls hohe Werte auf.

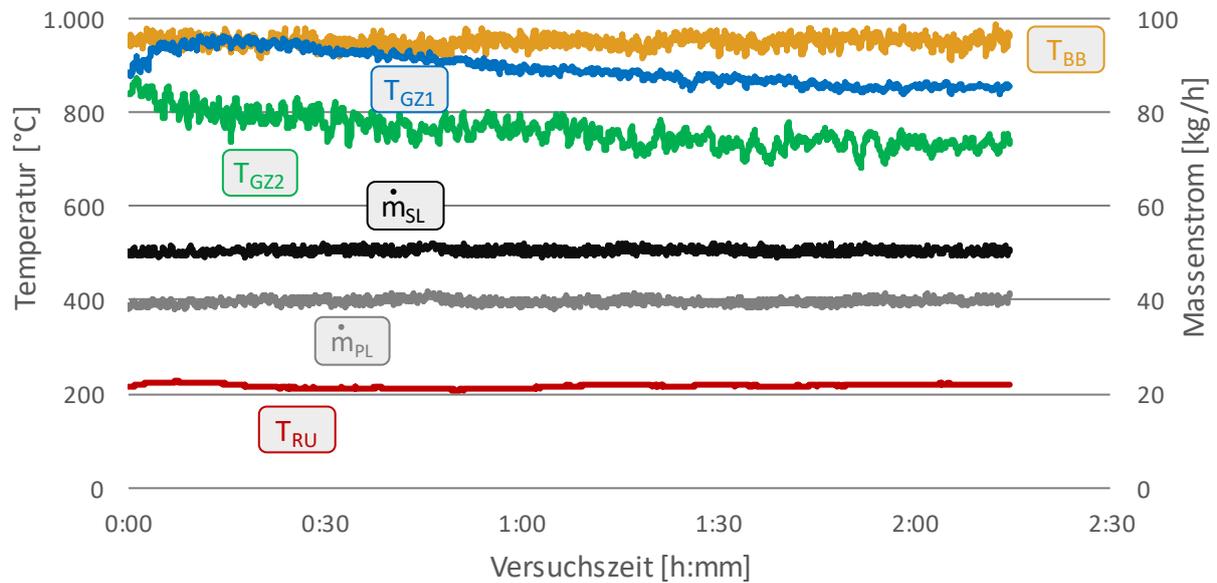


Abbildung 4.47: Temperaturen und Luftmassenströme des Versuchs mit einlagiger Kugelschicht bei einer Drehzahl von 0,84 min⁻¹ (VP3).

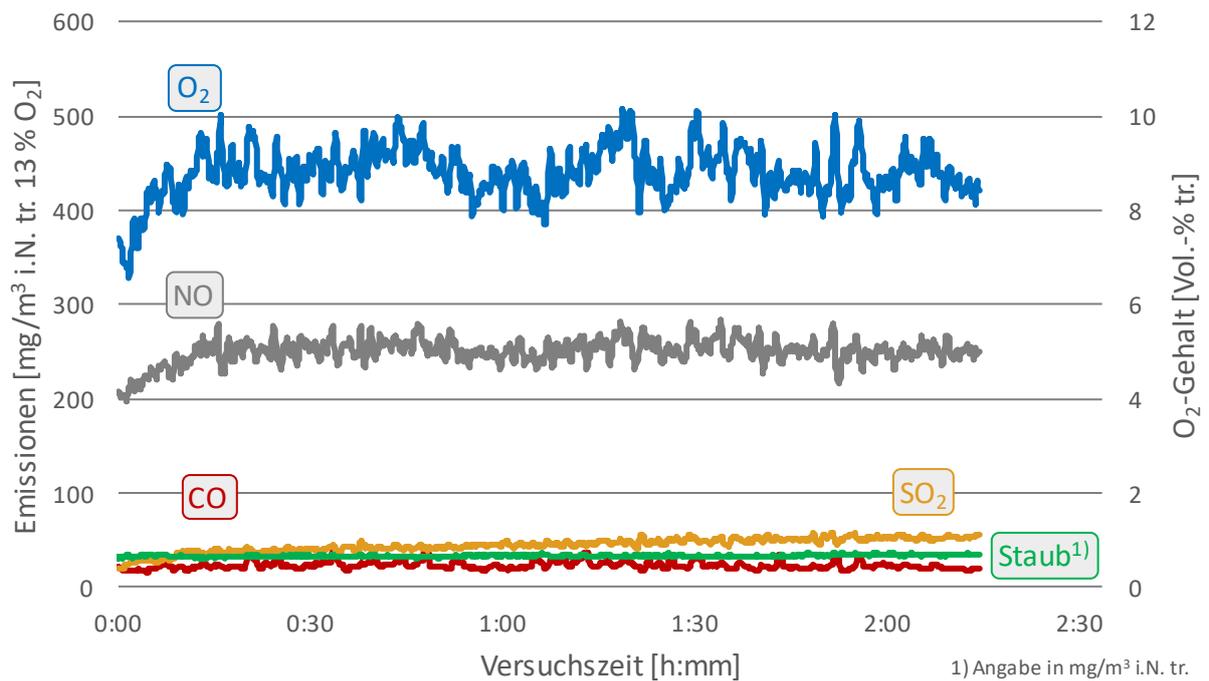


Abbildung 4.48: Abgaskonzentrationen des Versuchs mit einlagiger Kugelschicht bei einer Drehzahl von 0,84 min⁻¹ (VP3).

1) Angabe in mg/m³ i.N. tr.

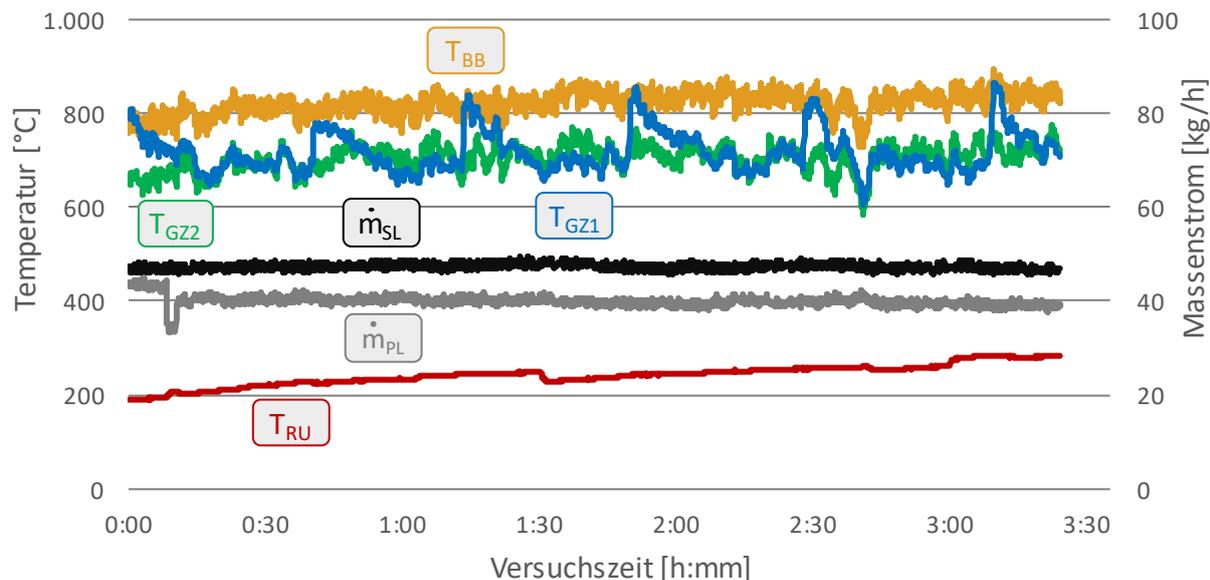


Abbildung 4.49: Temperaturen und Luftmassenströme des Versuchs mit einlagiger Kugelschicht bei einer Drehzahl von 4,82 min⁻¹ (VP4).

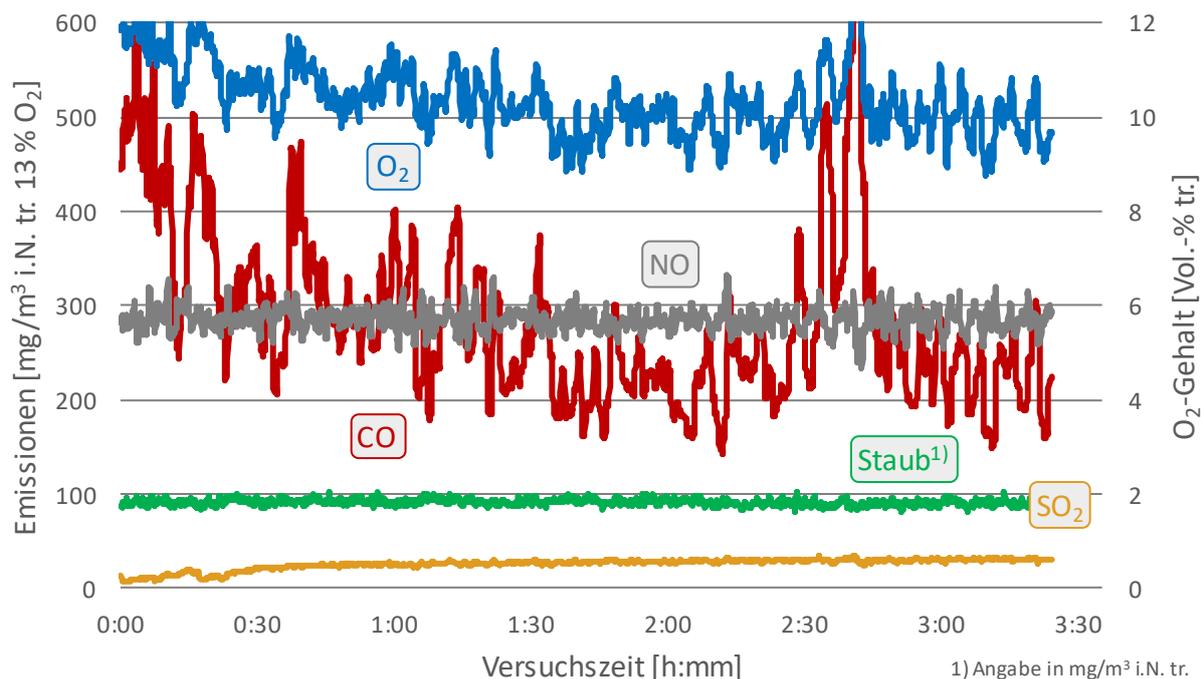


Abbildung 4.50 Abgaskonzentrationen des Versuchs mit einlagiger Kugelschicht bei einer Drehzahl von 4,82 min⁻¹ (VP4).

Bei Versuch VP3 wurden Ascheanbackungen an den Kugeln von insgesamt 4,6 g festgestellt (vgl. Abbildung 4.51), welche mit leichter mechanischer Einwirkung von den Kugeln gelöst werden konnten. Ansonsten beinhaltete der Brennertopf keine Aschemasse. Auf der Brennerplatte wurden 0,21 kg und unter dem Rost im Ascheustrag 1,16 kg gemessen. Der

Glühverlust der beiden Aschechargen betrug durchschnittlich 4,2 % mit einer Abweichung von ca. 8 %.

Im Vergleich zu VP3 konnte bei VP4 an den Kugeln keine Ascheanbackung an den Kugeln festgestellt werden. Die Aschemasse auf der Brennerplatte betrug 0,91 kg und im Ascheaustrag 1,91 kg. Mit durchschnittlich 18,8 % war der Glühverlust deutlich größer als bei VP3, was auf einen zu schnellen Abtransport der Asche hindeutet.



Abbildung 4.51: Brennertopf vor den Kugelschichtversuchen (l.) und nach den Kugelschichtversuchen bei einer Drehzahl von 0,84 min⁻¹ (VP3) (m.) und 4,82 min⁻¹ (VP4) (r.).

Versuchsergebnisse: Versuche mit Schüttungen aus Kugeln d=13 mm (VP5 und 6)

Die zuvor beschriebenen Versuche ohne hohe Kugelschüttung zeigen, dass die Wärmebelastung wegen der unmittelbaren Nähe des Brennbetts zum bewegten Rührer problematisch ist. Zur Abschirmung der bewegten Rostkomponenten vom Brennbett wurden Kugelschüttungen eingesetzt. Es wurde mit den rostsystembedingt kleinstmöglichen Kugeln mit einem Durchmesser von 13 mm aus korrosionsbeständigem aber nicht explizit wärmebeständigem C10-Stahl (1.0301) begonnen. Die Schüttungshöhe der 645 Kugeln betrug 57 mm. Die beiden vorgestellten Versuche wurden bei einer Drehzahl von 4,82 min⁻¹ (VP5) und 1,34 min⁻¹ (VP6) durchgeführt. Während VP5 ohne besondere Vorkommnisse verlief, musste VP6 wegen einer Rostblockierung durch eine wärmeinduzierte Wellenverformung vorzeitig beendet werden.

Die in Abbildung 4.52 dargestellten Temperaturverläufe zeigen u. a. eine auffällig hohe Rostunterseitentemperatur von durchschnittlich 337 °C. Dies deutet auf einen schnellen Transport des Brennbetts in tiefere Kugelschichten bzw. einen Abtransport durch die Rostschlitze in den Ascheaustrag hin. Die hohen CO- und Staub-Emissionen deuten ebenfalls auf ein zu intensiv bewegtes Brennbett hin (vgl. Abbildung 4.53). Die CO-Abgaskonzentrationen betragen

durchschnittlich $364 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr., 13 \% O}_2}$ mit großen Schwankungen von 189 bis $1.617 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr., 13 \% O}_2}$. Die Staubemissionen waren mit durchschnittlich $112 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr.}}$ ebenfalls hoch. Wegen einer falschen Lüftereinstellung des Primärluftgebläses betrug der Primärluftmassenstrom nur durchschnittlich 17 kg/h . Die hohe Temperatur der Rostunterseite lässt sich neben dem schnellen Ascheabtransport daher auch mit mangelnder Primärluftkühlung begründen.

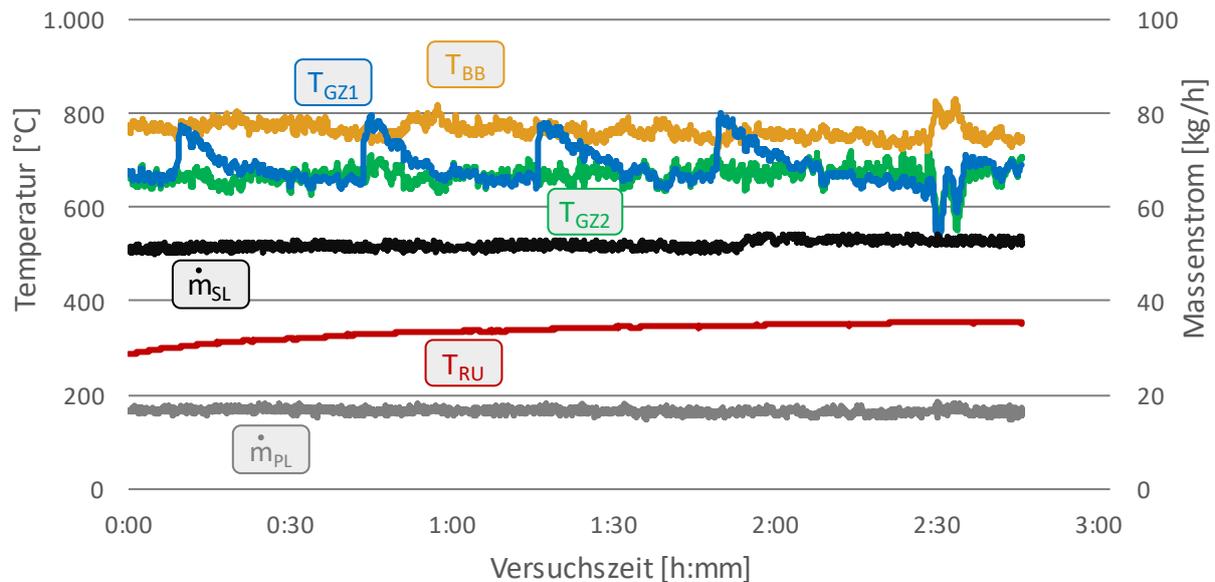


Abbildung 4.52: Temperaturen und Luftmassenströme des Versuchs mit 13-mm-Kugeln bei einer Drehzahl von $4,82 \text{ min}^{-1}$ (VP5).

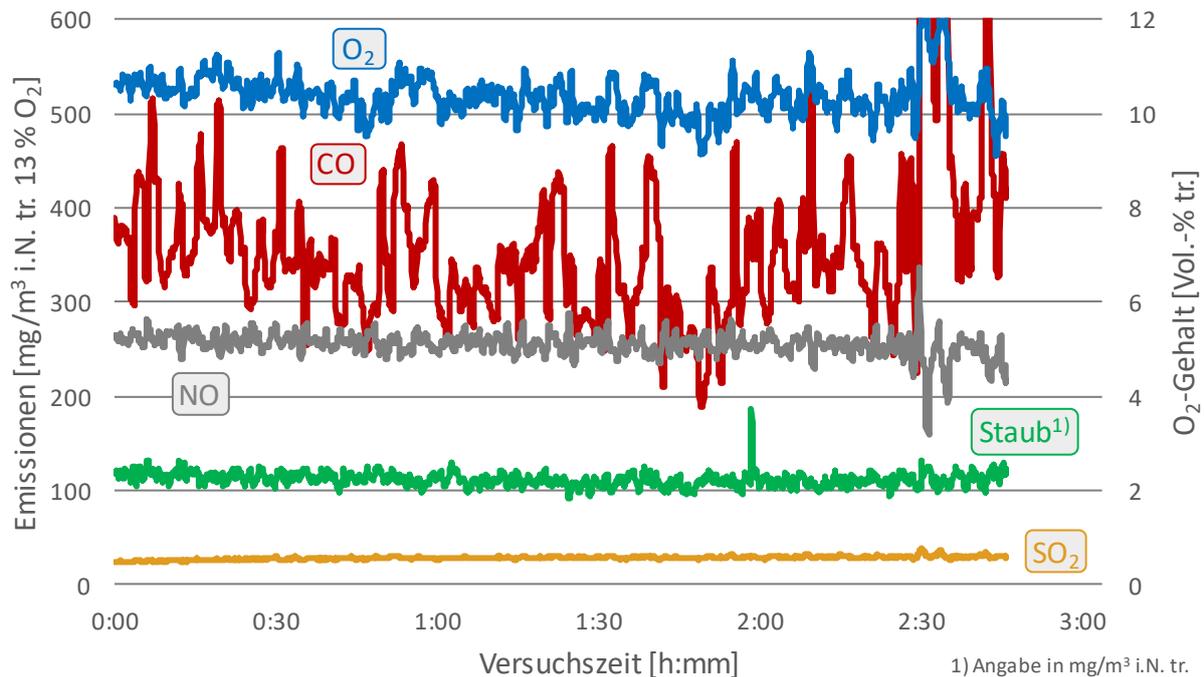


Abbildung 4.53: Abgaskonzentrationen des Versuchs mit 13-mm-Kugeln bei einer Drehzahl von 4,82 min⁻¹ (VP5).

Bei VP6 mit geringerer Drehzahl kam es ab einer geschätzten Versuchszeit von 2:30 zu einem teilweisen Aufschmelzen der Stahlkugeln in der oberen Kugelschicht. Die geschmolzenen Kugeln bildeten mit dem Brennbett bzw. der Asche eine unbewegliche Schicht, wodurch die Pelletasche zum größten Teil nicht mehr abtransportiert werden konnte und sich im Brennertopf anhäufte (vgl. Abbildung 4.56). Die Temperaturverläufe sind bis zur Versuchszeit von ca. 2:40 unauffällig (vgl. Abbildung 4.55). Ab Versuchszeit 2:40 fiel die Rostunterseitentemperatur innerhalb von 20 Minuten um ca. 90 °C ab. Gleichzeitig erhöhten sich die Gastemperaturen (Gaszone 1 und 2) um etwa 100 °C und die CO- sowie Staub-Emissionen stiegen ebenfalls ab 2:40 an. CO schwankte bei einer zuvor gemessenen Konzentration von 36 auf bis zu 100 mg/m³_{i.N., tr., 13% O₂}. Der Staubgehalt erhöhte sich von durchschnittlich 54 auf 101 mg/m³_{i.N., tr.}.

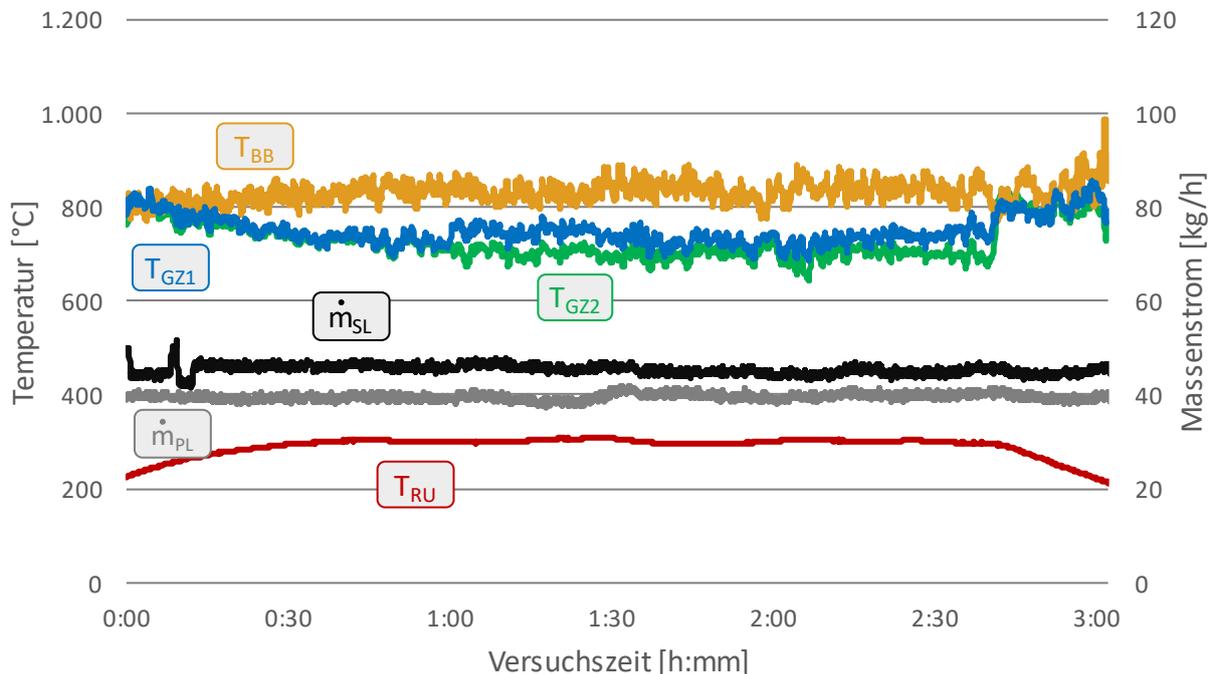


Abbildung 4.54: Temperaturen und Luftmassenströme des Versuchs mit 13-mm-Kugeln bei einer Drehzahl von 1,34 min⁻¹ (VP6).

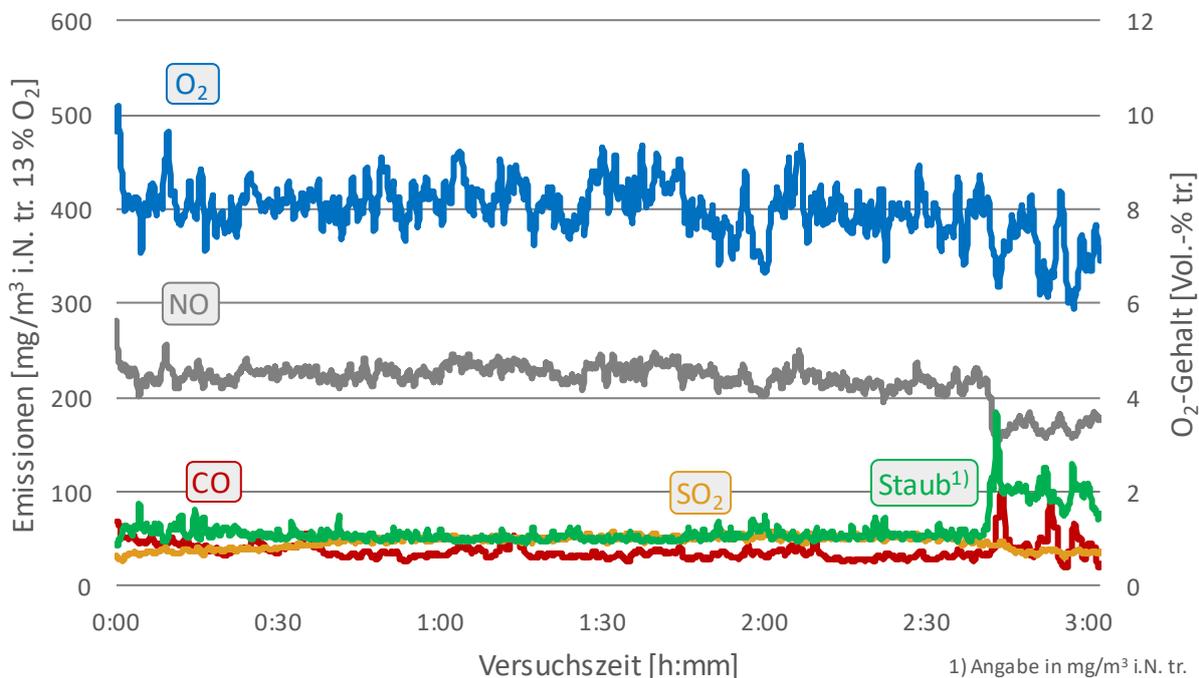


Abbildung 4.55: Abgaskonzentrationen des Versuchs mit 13-mm-Kugeln bei einer Drehzahl von 1,34 min⁻¹ (VP6).

In Abbildung 4.56 ist der Brennertopf nach den Versuchen VP5 und VP6 dargestellt. Zudem sind der Rührer und die Kugeln nach einem Vorversuch mit einer Drehzahl von $0,84 \text{ min}^{-1}$ gezeigt, bei welchem die ganze Röhreinheit zerstört wurde. Die Rührerarme verformten sich, brachen an den Schweißnähten und schließlich brach sogar die Rührerwelle. Bei diesem Vorversuch schmolzen die Kugeln ebenfalls zu einem Teil.

Nach der Verbrennung von insgesamt 33 kg Strohpellets während Versuch VP5 konnten keine Ascheanbackungen an den Kugeln oder Materialschmelzen nachgewiesen werden. Die Kugeln verfärbten sich zwar rötlich, waren jedoch äußerlich kaum angegriffen. Das Rostsystem wurde ebenfalls nicht beeinträchtigt. Die abtransportierte Asche glühte noch ca. 24 Stunden nach Versuchsende, was auf einen zu schnellen Abtransport aufgrund der hohen Rührerdrehzahl hindeutet. Die Aschen auf der Brennerplatte (0,39 kg) und im Ascheaustrag unter dem Rost (1,68 kg) wiesen einen hohen Glühverlust von 18,7 bzw. 38,0 % auf.

Die verbrannte Strohpelletmasse betrug bei VP6 ebenfalls 33 kg. Weil die oberste Kugelschicht sehr intensiv mit der Pelletasche verschmolzen war, wurde die Asche im Brennertopf nicht bestimmt. Die Aschemassen auf der Brennerplatte und im Ascheaustrag unter dem Rost betragen 0,66 bzw. 1,84 kg mit Glühverlusten von 1,25 bzw. 10,9 %.

Durch diese Versuche konnte gezeigt werden, dass der Ascheabtransport ohne Beschädigung des Rostsystems grundsätzlich zwar möglich ist, aber Beschädigungen nicht auszuschließen sind. Aufgrund seiner geringen Temperaturbeständigkeit scheint der Werkstoff C10 (1.0301) nicht geeignet zu sein. Eine Rührerdrehzahl von $4,82 \text{ min}^{-1}$ ist aufgrund des zu schnellen Ascheabtransports und des damit verbundenen mangelhaften Ausbrands ebenfalls ungeeignet.



Abbildung 4.56: Brennertopf nach dem Versuch mit einer Drehzahl von $4,82 \text{ min}^{-1}$ (VP5) (l.) und mit einer Drehzahl von $1,34 \text{ min}^{-1}$ (VP6) (m.) sowie geschmolzene Kugeln und zerstörter Rührer nach einem Vorversuch mit einer Drehzahl von $0,84 \text{ min}^{-1}$ (r.).

Versuchsergebnisse: Versuche mit Kugelschüttung aus Kugeln d=15 mm (VP7 bis 10)

im nächsten Schritt wurden weitere Kugelwerkstoffe als Kugelschüttung untersucht. Da für einen Durchmesser von 13 mm kaum Kugeln zu angemessenen Preisen zu erwerben waren, wurden die Untersuchungen mit einem Kugeldurchmesser von 15 mm fortgesetzt. Mit 59 mm (398 Kugeln) wurde die Schüttungshöhe annähernd beibehalten. Neben den preisgünstigen Werkstoffen 1.0616 (Stahl) und Keramik erfolgten Untersuchungen mit hochwertigen V2A-Edelstahlkugeln (1.4305). Alle Versuche konnten planmäßig durchgeführt werden.

Die in Abbildung 4.57 und Abbildung 4.58 dargestellten Temperaturverläufe, Massenströme und Abgaskonzentrationen des Versuchs VP7, der bei einer Rührerdrehzahl von $0,84 \text{ min}^{-1}$ mit Edelstahlkugeln durchgeführt wurde, sind unauffällig und vergleichbar mit den bisher diskutierten Versuchen. Die CO-Emissionen betragen durchschnittlich 55 mg/m^3 mit vereinzelt Spitzen bis 100 und $150 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr., 13 \% O}_2}$. Der durchschnittliche Staubgehalt lag bei $51 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr.}}$.

Durch die Minderung der Drehzahl auf $0,59 \text{ min}^{-1}$ in Versuch VP8 mit Edelstahlkugeln sollten mögliche positive Auswirkungen dieser Maßnahme auf die Abgasemissionen untersucht werden. Die Temperaturen sind denen aus Versuch VP7 ähnlich (vgl. Abbildung 4.59). Die Schwankungen der Brennbetttemperaturen fielen etwas geringer aus. Die CO-Konzentrationen waren mit durchschnittlich $43 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr., 13 \% O}_2}$ etwas geringer als bei Versuch VP7 (vgl. Abbildung 4.60). Der Staubgehalt wies mit durchschnittlich $52 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr.}}$ nahezu den gleichen Wert auf.

Insgesamt unterschieden sich die CO- und Staubkonzentrationen der beiden Versuche bei unterschiedlicher Drehzahl nicht nennenswert, weshalb von keinem essentiell positiven Effekt einer Drehzahlminderung auszugehen ist. Die Temperatur- und Abgaskonzentrationsverläufe der Versuche VP9 (Stahlkugeln) und VP10 (Keramikkugeln) werden nicht diskutiert, da keine signifikanten Unterschiede zu den Versuchen VP7 und VP8 feststellbar sind. Die Diagramme befinden sich im Anhang (vgl. Abbildung Anhang 1 bis Abbildung Anhang 4).

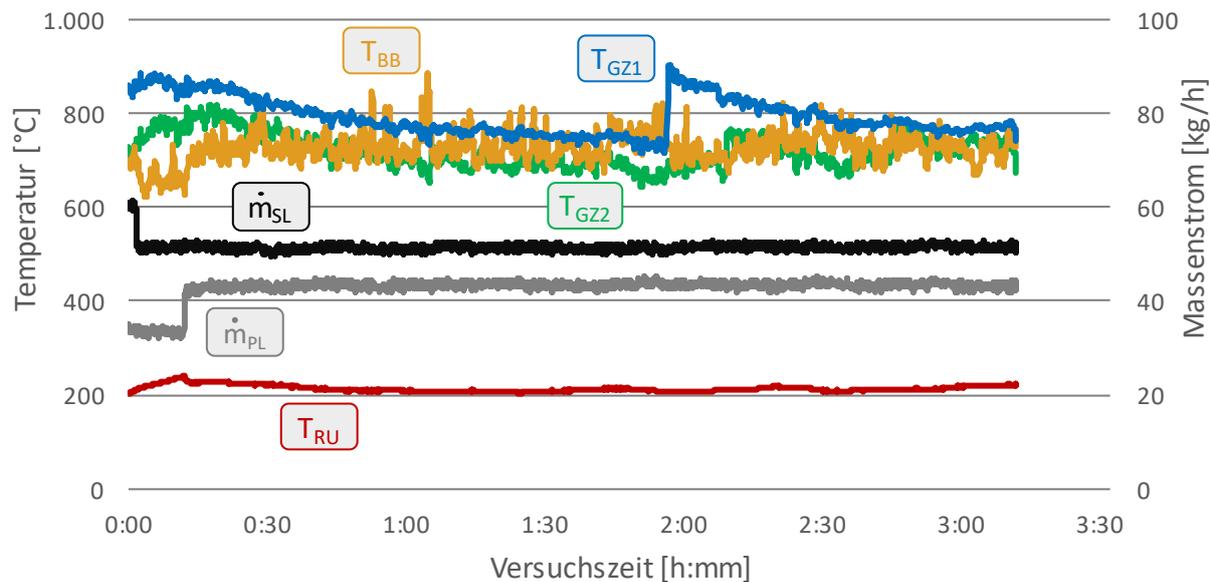


Abbildung 4.57: Temperaturen und Luftmassenströme des Versuchs mit 15-mm-Edelstahlkugeln bei einer Drehzahl von 0,84 min⁻¹ (VP7).

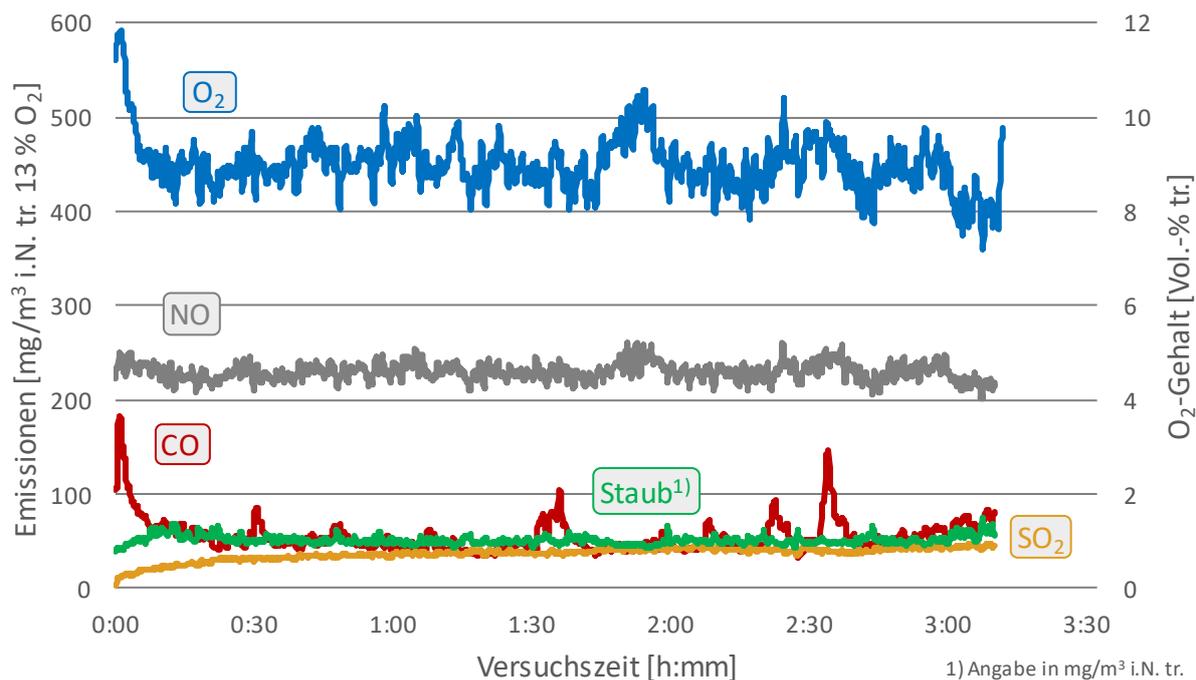


Abbildung 4.58: Abgaskonzentrationen des Versuchs mit 15-mm-Edelstahlkugeln bei einer Drehzahl von 0,84 min⁻¹ (VP7).

1) Angabe in mg/m³ i.N. tr.

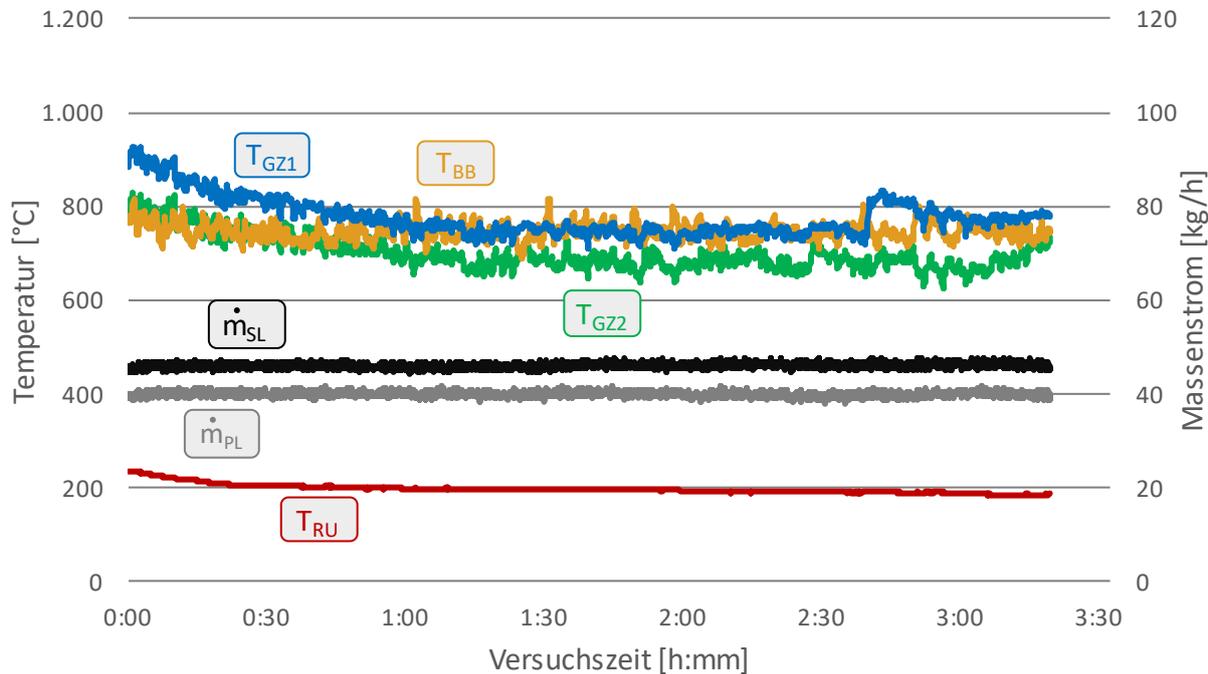


Abbildung 4.59: Temperaturen und Luftmassenströme des Versuchs mit 15-mm-Kugeln bei einer Drehzahl von 0,59 min⁻¹ (VP8).

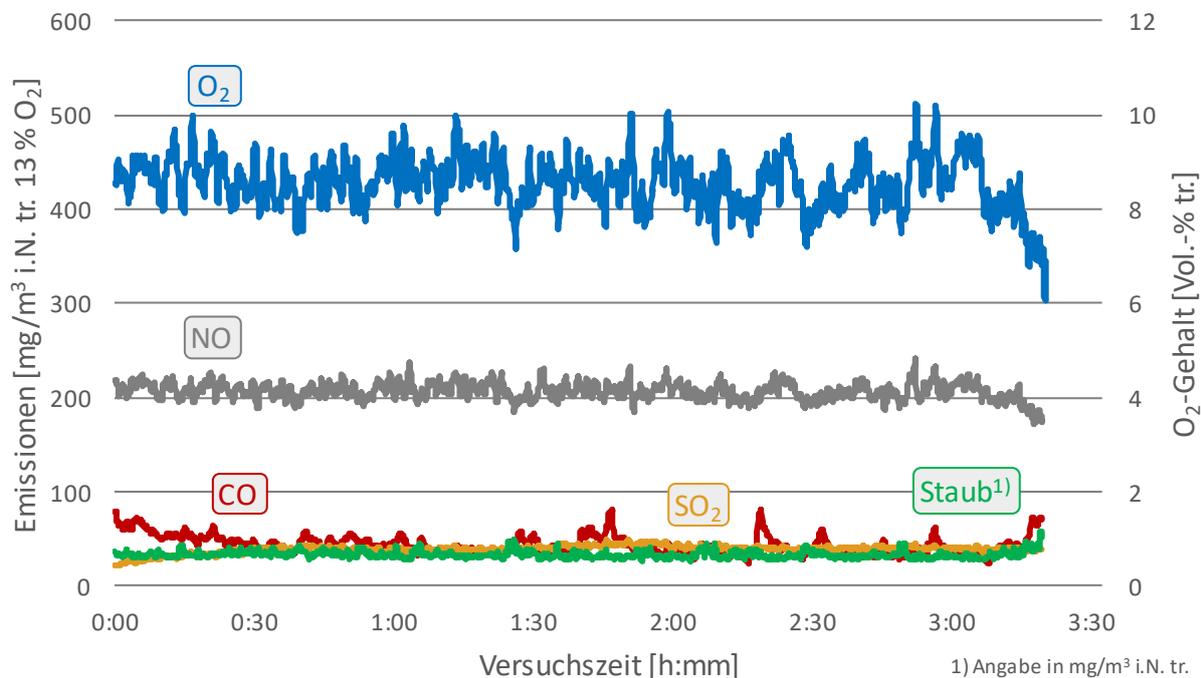


Abbildung 4.60: Abgaskonzentrationen des Versuchs mit 15-mm-Kugeln bei einer Drehzahl von 0,59 min⁻¹ (VP8).



Abbildung 4.61: Aufnahmen des Brenntopfs und der Kugeln nach den Versuchen VP7 bis VP10.

Das Verhalten bzw. die Charakteristik der einzelnen Werkstoffe wurde qualitativ beurteilt (vgl. Abbildung 4.61). Bei VP7 mit Edelstahlkugeln wurden keine Ascheablagerung im Brenntopf oder an den Kugeln festgestellt. Die abgebildete Asche im Brenntopf fiel erst nach dem Versuch vom Brenntopftrand oder von den Thermoelementen auf die Kugelschüttung. Bei geringer Drehzahl (VP8) zeigte sich ein ähnliches Bild. Allerdings bildete sich ein einzelnes ca. 20 mm großes Ascheagglomerat, welches für den Abtransport durch die Rostschlitze zu groß und für eine Zerkleinerung durch die Kugeln mechanisch zu stabil war. Die Kugeln wurden temperaturbedingt schwarz verfärbt und geringfügig in Form von kleinen Furchen und Kratern angegriffen. Eine Veränderung der Kugelgröße ließ sich nicht messen.

Bei den Stahlkugeln (VP9) wurden deutliche Ascheanbackungen an den Kugeln, welche teilweise auch untereinander agglomerierten, festgestellt. Das Kugelmateriale wurde stark beeinträchtigt, indem sich bei dem Großteil der Kugeln 0,5 mm dicke Schichten bildeten und abblätterten. Nach der Überprüfung des Kugeldurchmessers konnte jedoch keine adäquate Durchmessererringerung festgestellt werden. Mutmaßlich haben sich Teile der Asche mit dem Kugelmateriale verbunden oder das Material wurde infolge von metallischer Oxidation signifikant verändert.

An den Keramikugeln (VP10) waren geringfügige Ascheanbackungen erkennbar. Zudem agglomerierten vereinzelte Kugeln mithilfe der Asche. Die Masse der Keramikugeln nahm durch die Ascheanbackungen um 33 g bzw. 1,2 % zu. Die Neigung zu Anbackungen kann insbesondere auf die in Abbildung 4.61 schwer zu erkennende raue Kugeloberfläche und möglicherweise auf das keramische Material (Al_2O_3) selbst zurückgeführt werden. Der Kugeldurchmesser ließ sich nicht mit angemessenem Aufwand überprüfen, da die Keramikugeln keine ideale sphärische Geometrie aufweisen.

Bei den Versuchen VP7 bis VP10 wurden jeweils 33 kg Strohpellets verbrannt. Auf der Brennerplatte sammelten sich 0,39 bis 0,62 kg Asche, mit Glühverlusten von 3,2 bis 13,8 %. Der Großteil der Asche wurde über den Rost in den Ascheaustrag abtransportiert. Die Massen dieser Aschefraktion betragen 1,44 bis 1,68 kg bei Glühverlusten von 6,6 bis 14,5 %. Aufgrund fehlerhafter Methodik bzw. Versuchsdurchführung sind bei den Versuchen VP8 und VP10 Verfälschungen durch unverbrannte Holzpellets aus der Anfahrprozedur zu berücksichtigen. Zu den Versuchen VP7 und VP9 erfolgten ergänzend zur Glühverlustbestimmung Analysen des TOC-Gehalts. Mit Werten von 4,6 % (VP7) und 10,7 % (VP9) weichen die TOC-Werte bis ca. 10 % von den jeweiligen Glühverlusten ab.

4.7.6 DEM/CFD Simulationen des Kugelrostsystems

Parallel zu den Experimenten wurden vollständig instationäre und bidirektional gekoppelte DEM/CFD Simulationen mit Variation der Rotordrehzahl zwischen 0,84 und 1,3 1/min der vielversprechendsten Kugelrostkonfiguration mit folgenden Daten durchgeführt:

- 398 Kugeln
- Werkstoff Edelstahl V2A
- $d_K = 15 \text{ mm}$
- $\dot{m}_{Pr} = 39,8 \text{ kg/h}$
- $\dot{m}_{Sk} = 44,7 \text{ kg/h}$
- $\dot{m}_{Br} = 10,1 \text{ kg/h}$

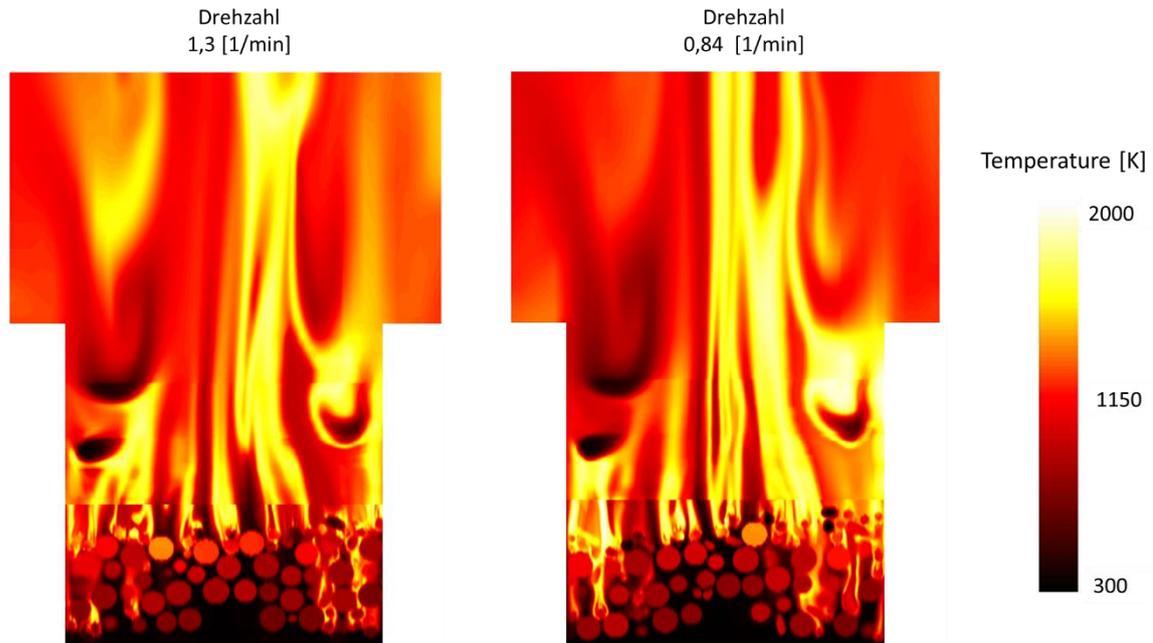


Abbildung 4.62: Temperaturverteilung im Querschnitt des Kugelrostes im stationären Zustand.

In Abbildung 4.62 ist die Temperaturverteilung der Gasphase und der Feststoffobjekte (Edelstahlkugeln, Strohpellets) in einer Querschnittsansicht des stationären Zustandes mit den oben definierten Parametern für zwei verschiedene Rotordrehzahlen dargestellt. Der gewünschte Effekt durch Wahl eines Kugeldurchmessers von $d_K = 15 \text{ mm}$ wird hier für beide Drehzahlen erreicht. Im Gegensatz zu den Ergebnissen mit 11 mm bzw. 19 mm Kugeln (vgl. Abb. 4.38) findet bei diesen Konfigurationen ein Großteil der Wärmefreisetzung an bzw. oberhalb der obersten Kugelschicht statt. Dennoch werden teilpyrolysierte Pellets in moderatem Umfang nach unten durch die Schüttung transportiert. Im besten Fall sind die Pellets vollständig umgesetzt sobald diese die unterste Kugelschüttung erreichen, damit die dort generierten Aschepartikel und die mechanisch beweglichen Bauteile von der Reaktionswärme abgeschattet sind. Zu weiteren Detailanalyse und Ermittlung der optimalen Drehzahl ist in Abbildung 4.63 die korrespondierende Temperaturverteilung der Gasphase und der Feststoffobjekte in der unteren Schicht der Schüttung dargestellt.

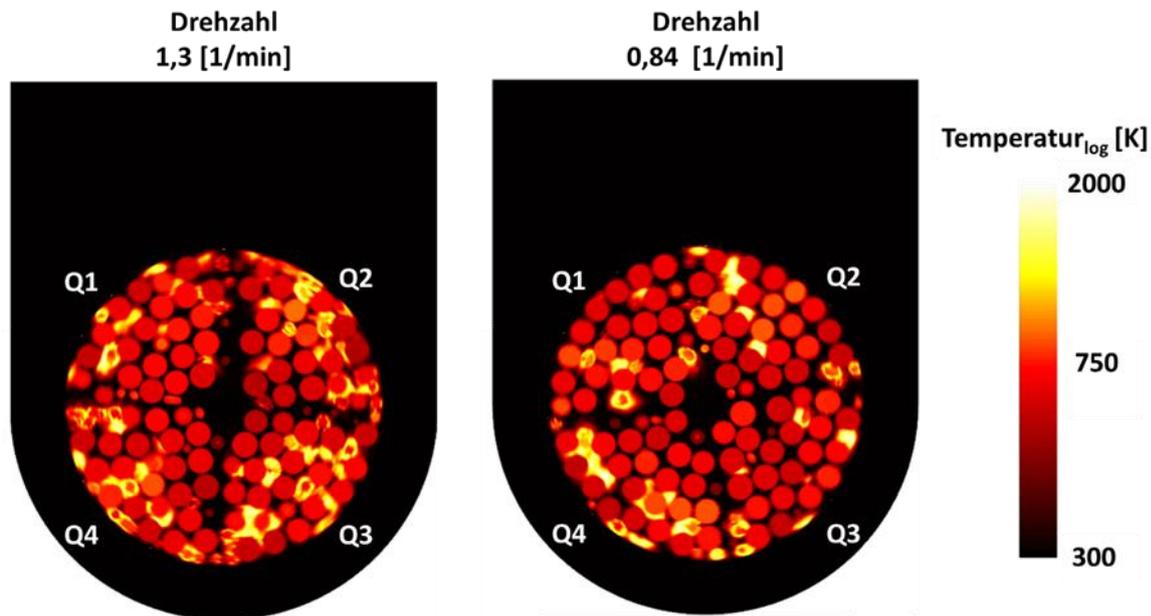


Abbildung 4.63: Temperaturverteilung der untersten Schicht des Kugelrostes im stationären Zustand.

In Abbildung 4.63 sind die zu Abbildung 4.62 korrespondierenden Temperaturverteilungen in einer Draufsicht der untersten Schicht der Schüttung im Kugelrost für die Rotordrehzahlen 0,84 und 1,3 1/min gegenübergestellt. Zu besserer Visualisierung der unterschiedlichen Temperaturniveaus wurde hier eine logarithmische Skala gewählt. Zusätzlich wurde der sichtbare Teil des Bettes entsprechend der aktuellen Stellung der Rotorachsen in die Quadranten Q1 bis Q4 unterteilt. Die Ergebnisse zeigen signifikante Unterschiede der Anzahl und Verteilungen heißer Zonen (>750 K) infolge von freigesetzter Reaktionswärme in den jeweiligen Quadranten. Beim Betrieb mit einer Drehzahl von 1,3 1/min ist eine große Zahl an nebeneinanderliegenden heißen Zonen gleichermaßen in allen Quadranten des Brenntellers zu identifizieren. Im Gegensatz dazu sind im Betrieb mit einer Drehzahl von 0,84 1/min weitestgehend vereinzelte und auch in Summe weniger Bereiche mit freigesetzter Reaktionswärme in den Zwischenräumen der untersten Kugelschicht in den Quadranten Q1-Q3 zu beobachten. Lediglich im Quadrant Q4 ergibt sich ein zum Betrieb mit einer Drehzahl von 1,3 1/min vergleichbares Bild der Temperaturverteilung infolge lokal freigesetzter Reaktionswärme. Die sich bei geringer Drehzahl (0,84 1/min) einstellenden Bedingungen an der unteren Kugelschicht sind vorteilhaft bzgl. einer Vermeidung von Ascheagglomeration, da weniger Wärme im Bereich der Aschegenerierung freigesetzt wird und sich zudem weniger Zonen mit großer Zahl lokal reagierender Pellets ausbilden. Auf Basis dieser Simulationsergebnisse kann bzgl. der Zielvorgabe zur Vermeidung der Agglomeratbildung von Strohpelletaschen eine niedrigere Drehzahl (<1 /min) empfohlen werden.

Aufgrund der engen Wechselwirkungen zwischen der Brennbettbewegung, der lokalen Konversion der Strohpellets und den Gasphasenprozessen ergeben sich durch Wahl der Drehzahl entsprechende Rückkopplungseffekte auf weitere Aspekte des Verbrennungsvorgangs.

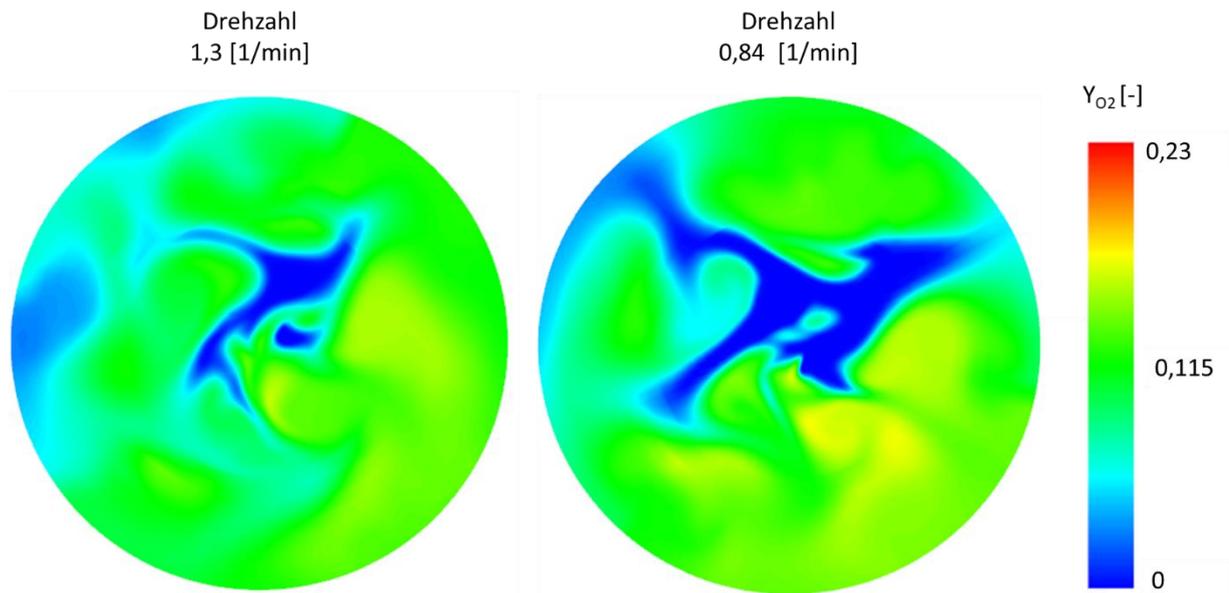


Abbildung 4.64: Sauerstoffverteilung am Auslass des Brenntellers.

Abbildung 4.64 zeigt die Sauerstoffverteilung am Auslass des Brennertopfes oberhalb der Sekundärluftzugabe für die betrachteten Drehzahlen. Dargestellt ist der Massenanteil des Sauerstoffes im feuchten Abgas. Für den betrachteten Zeitpunkt ergibt sich ein massengewichteter Mittelwert des Molanteils von Sauerstoff bezogen auf das trockene Abgas von $X_{O_2, 1,3} = 9,21\%$ bzw. $X_{O_2, 0,89} = 9,61\%$ am Auslass des Brennertopfes. Diese Ergebnisse liegen im Bereich der in den Versuchen bei entsprechender Drehzahl gemessenen Sauerstoffanteile (vgl. Abbildung 4.58). Qualitativ ergibt sich für beide Drehzahlen ein ähnliches Bild der lokalen Sauerstoffverteilung. Im Zentrum ist eine Zone mit einem Sauerstoffgehalt von $Y_{O_2} = 0,0$ zu erkennen. Mit Zunahme des radialen Abstandes zur Rotationsachse ist zunächst ein höherer Sauerstoffgehalt von etwa $Y_{O_2} = 0,115$ zu erkennen. In unmittelbarer Wandnähe ergibt sich ein asymmetrisches Profil der Sauerstoffverteilung. In beiden Fällen ist eine Zone mit vollständigem Sauerstoffverbrauch an der linken Außenwand des Brenntellers zu beobachten. Durch seitliche Zugabe der Sekundärluft wird eine Drallströmung erzeugt die zu einer unvollständigen Mischung der teilreagierten Gase aus der Primärluftzone mit der zugeführten Sekundärluft führt. Aufgrund der Simulationsergebnisse ist hier zusätzliches Optimierungspotential der Sekundärluftzufuhr

hinsichtlich des Düsendurchmessers und des Anstellwinkels der Sekundärluftdüsen zu identifizieren.

Die von der sauerstoffarmen Zone eingenommene Fläche am Auslass des Brenntellers ist im Falle der niedrigeren Drehzahl von 0,84 1/min signifikant größer als bei den Verbrennungssimulationen mit einer Drehzahl von 1,3 1/min und ansonsten gleichen Bedingungen. Dieser Mechanismus liegt in den Wechselwirkungen zwischen der Taktfrequenz der Brennstoffaufgabe, des von der Drehzahl abhängigen Rotationswinkels der Strohpelletschüttung zum Zeitpunkt der Brennstoffaufgabe und den Umsatzraten der Strohpellets begründet.

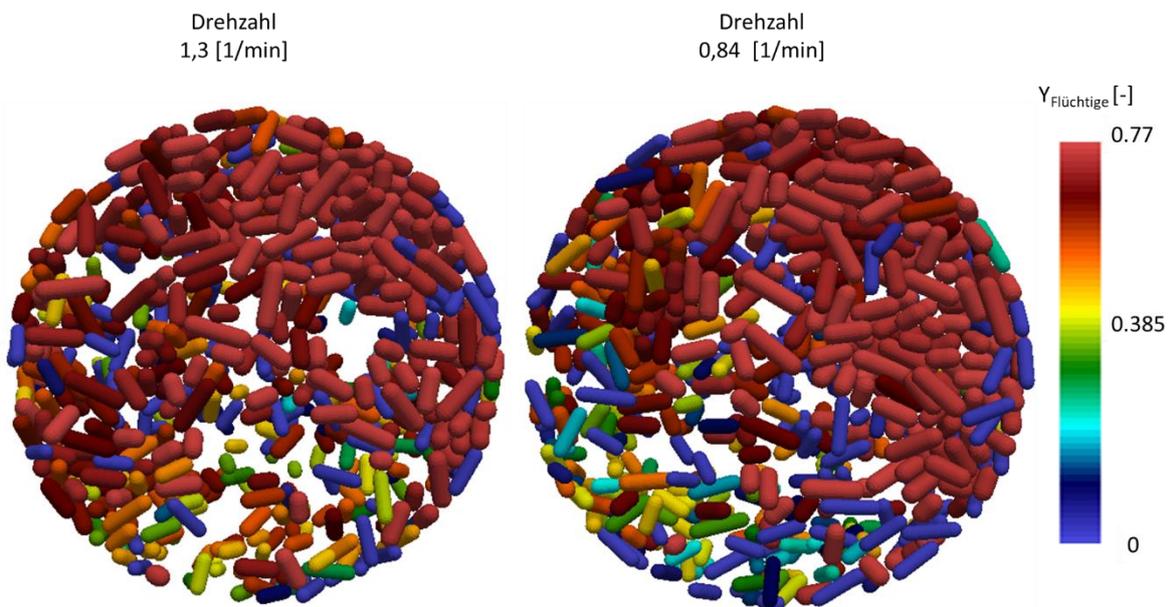


Abbildung 4.65: Verteilung der pyrolysierenden Strohpellets im Brennbett.

Abbildung 4.65 zeigt die Verteilung der pyrolysierenden Pellets in der Schüttung. Für eine einfache Auswertung wurde das Inertmaterial bei der Visualisierung der Schüttung unsichtbar gemacht. Der maximale Fluchtigengehalt von $Y_{\text{Flüchtige}} = 0,77$ repräsentiert ein vollständig getrocknetes Pellet, welches unmittelbar vor Beginn der Pyrolyse steht. Beim Vergleich der Verteilung der pyrolysierenden Pellets in der Schüttung fällt auf, dass eine deutlich stärkere Verlagerung der Pellets mit hohem Fluchtigengehalt in Nord-Ost Richtung bei der niedrigeren Drehzahl von 0,84 1/min auftritt. Im Gegensatz dazu sind die noch nicht pyrolysierenden Pellets deutlich homogener entlang des Brenntopfquerschnittes verteilt, wenn der Rotor mit einer Drehzahl von 1,3 1/min betrieben wird. Sobald die Pellets mit hohem Fluchtigengehalt die kritische Pyrolysetemperatur erreichen werden dort lokal große Massenströme Fluchtige

freigesetzt. Im Falle des mit schlechterer Verteilung betriebenen Ofens (0,84 1/min) führt dies in Folge zu einer lokal hohen Konzentration der Flüchtigen in der Gasphase und zu einer ineffizienten Mischung der brennbaren Gase mit dem Oxidator.

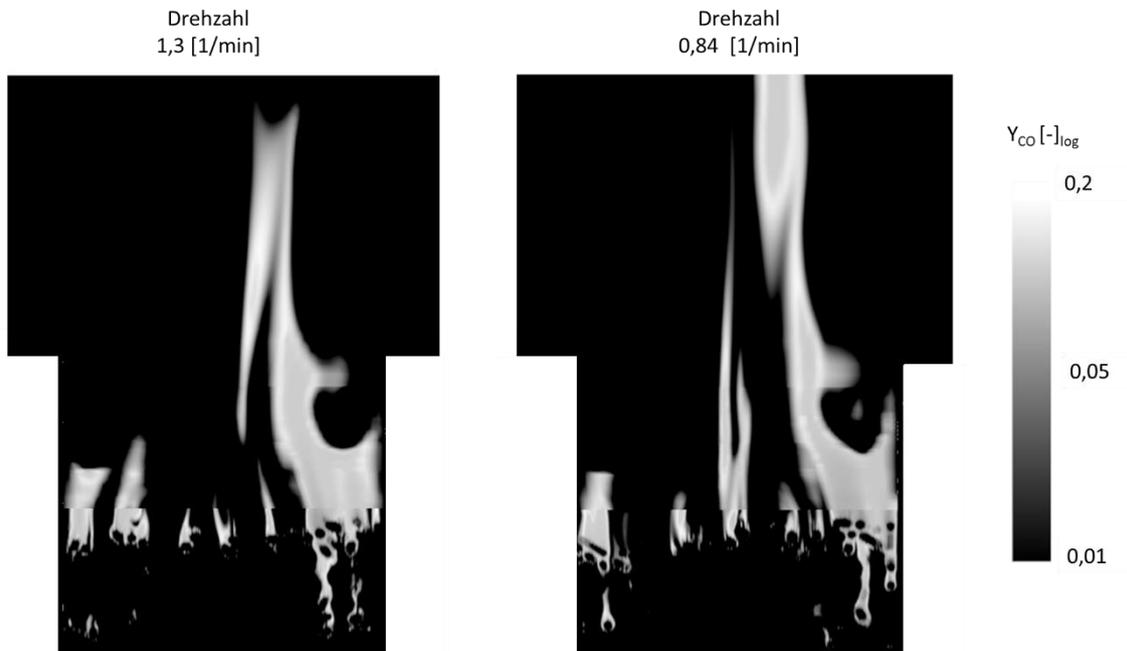


Abbildung 4.66: Verteilung des unvollständig umgewandelten Kohlenmonoxids.

Abbildung 4.66 zeigt die Verteilung des aufgrund von lokalem Oxidatormangel nicht umgesetzten Kohlenmonoxids bei der Oxidation der Flüchtigen. Während im Falle des Betriebs mit einer Rotordrehzahl von 1,3 1/min das Kohlenmonoxid vollständig im Brennraum umgesetzt wurde, sind einzelne Kohlenmonoxidstrahlen bis zum Auslass des Brennertopfes für die Betriebsweise mit 0,84 1/min zu erkennen. Dies ist eine Konsequenz aus der horizontal ungleichmäßigen Zuführung frischer Strohpellets (vgl. Abb 4.63).

Bezüglich des vertikalen Transportes der pyrolysierenden Pellets zeigten die Simulationsergebnisse bei einer Drehzahl von 0,84 1/min vorteilhafte Bedingungen zur Vermeidung von Ascheagglomeration. Bezüglich der Mischung in der Gasphase zeigte diese Betriebsweise im Gegensatz zum Betriebsfall mit 1,3 1/min Schwächen aufgrund der unvorteilhaften horizontalen Verteilung des zugeführten Brennstoffes. Eine Möglichkeit den Betrieb mit 0,84 1/min hinsichtlich der Gasphasenprozesse zu optimieren, ist die Anpassung der Taktfrequenz der Förderschnecke an die Winkelgeschwindigkeit des Brennbettes. Dies ermöglicht die vorteilhaften Bedingungen zur Vermeidung der Bildung von Ascheagglomeraten

mit gleichmäßiger horizontaler Verteilung der pyrolysierenden Pellets zu kombinieren. In einem weiteren Schritt ist dann auch eine Reduzierung des globalen Luftüberschusses aufgrund der verbesserten Mischung zwischen Pyrolysegasen und Oxidator denkbar, was einem verbesserten feuerungstechnischen Wirkungsgrade entspricht.

4.7.7 Verbrennungsversuche in der Vergleichsfeuerung mit Wanderrosttechnik (VK1 und VK2)

Als Benchmark für die Strohpelletverbrennung in der Abwurffeuerung wurden Versuche in einer Wanderrostfeuerung, ebenfalls mit der Strohpelletcharge LSP+ (2) durchgeführt. Dazu erfolgten zwei Verbrennungsversuche mit unterschiedlicher Luftverteilung, ansonsten jedoch bei gleichen Versuchsparametern. Bei den Versuchen VK1 bzw. VK2 wurde ein durchschnittliches Primärluftlambda von 0,66 bzw. 0,98 eingestellt. Insgesamt wurden 27 kg (VK1) bzw. 34 kg (VK2) Strohpellets verbrannt.

Die zeitlichen Verläufe der Temperaturen und Luftmassenströme sind in Abbildung 4.67 (VK1) und Abbildung 4.68 (VK2) dargestellt. Ab einer Versuchszeit von ca. 1:30 begann bei beiden Versuchen der stationäre Betrieb. Die Primärluftmassenströme waren näherungsweise konstant. Aufgrund der Lambdasondenregelung des Sekundärluftgebläse und der Pelletschnecken-taktung (4 Sekunden Förderzeit und 140 Sekunden Pausenzeit) verliefen die Sekundärluftmassenströme periodisch. Beim höheren Primärluftmassenstrom in VK2 traten unregelmäßige Fluktuationen des Sekundärluftmassenstroms auf. Mutmaßlich waren durch die unterschiedliche Luftstufung die Verbrennungstemperaturen bei VK2 deutlich erhöht. Auch unterlag insbesondere die mittlere Gaszonentemperatur bei einem größeren Primärluftmassenstrom (VK2) höheren Schwankungen.

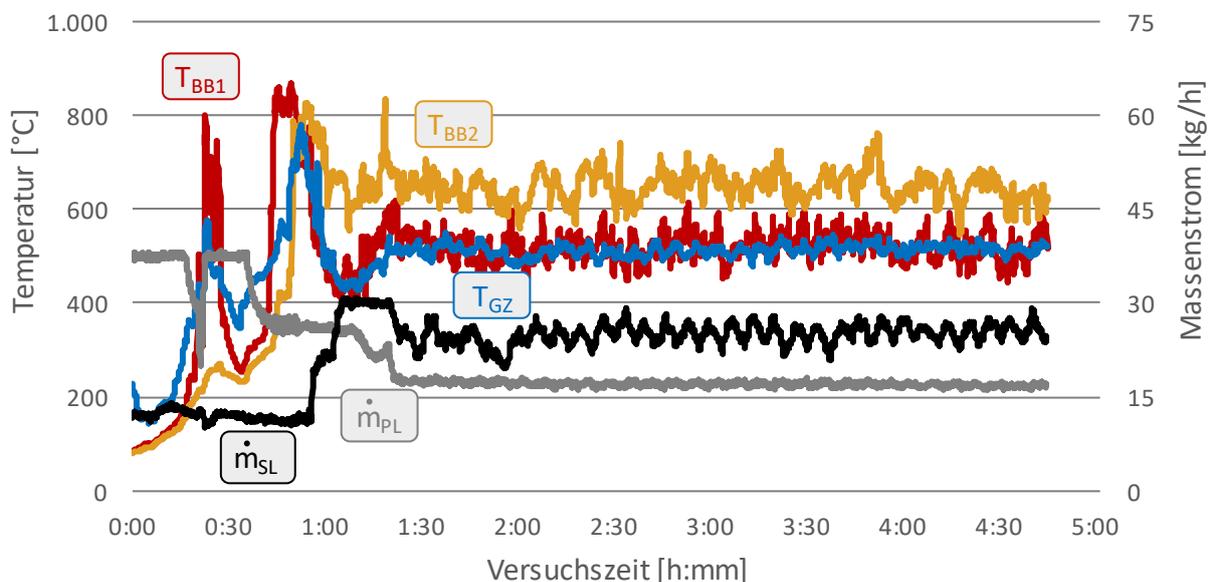


Abbildung 4.67: Temperaturen und Luftmassenströme des Verbrennungsversuchs VK1 bei einem Primärluftlambda von 0,66.

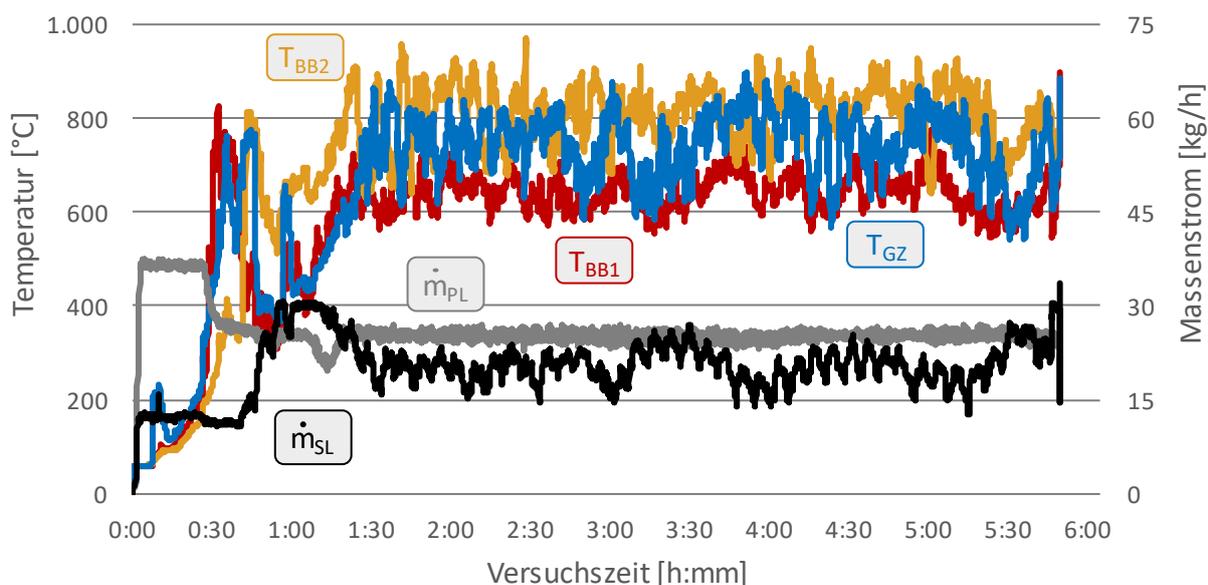


Abbildung 4.68: Temperaturen und Luftmassenströme des Verbrennungsversuchs VK2 bei einem Primärluftlambda von 0,98.

Die Abgaskonzentrationen (vgl. Abbildung 4.69 und Abbildung 4.70) waren für die beiden Versuche grundsätzlich sehr ähnlich. Die Staubemissionen lagen bei beiden Versuchen mit durchschnittlich ca. $29 \text{ mg/m}^3_{i.N., tr.}$ (VK1) und $30 \text{ mg/m}^3_{i.N., tr.}$ auf einem niedrigen Niveau. Die CO-Emissionen waren unter Einfluss eines höheren Primärluftmassenstroms (VK2) mit einem durchschnittlichen Wert von $60 \text{ mg/m}^3_{i.N., tr., 13\% \text{ O}_2}$ gegenüber VK1 mit $49 \text{ mg/m}^3_{i.N., tr., 13\% \text{ O}_2}$ leicht erhöht.

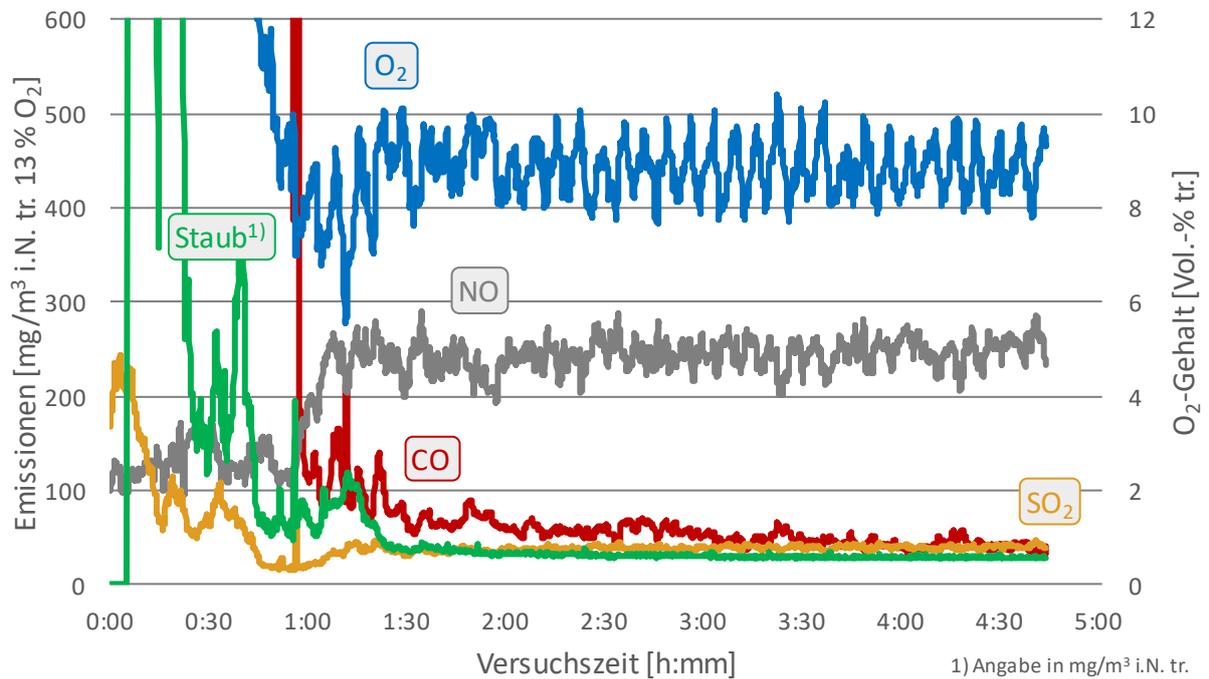


Abbildung 4.69: Abgaskonzentrationen des Verbrennungsversuchs VK1 bei einem Primärluftlambda von 0,66.

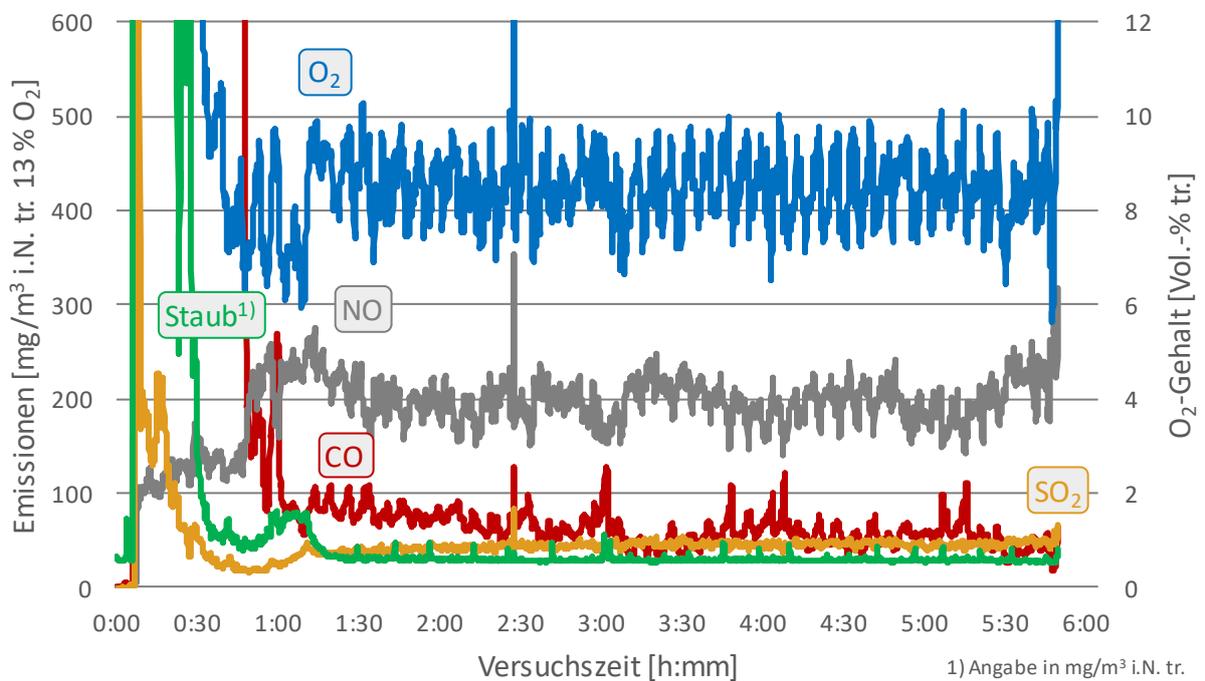


Abbildung 4.70: Abgaskonzentrationen des Verbrennungsversuchs VK2 bei einem Primärluftlambda von 0,98.

Bei den Versuchen wurden 1,85 kg (VK1) bzw. 2,17 kg (VK2) Pelletasche erfasst. Die auf dem Wanderrost verbliebene Asche wies größtenteils die ursprüngliche Pelletgeometrie auf. Die

Asche war jedoch kaum versintert und zerfiel bei geringfügiger Bewegung. In Abbildung 4.71 lassen sich vereinzelt versinterte Strukturen der durch die Ascheschnecke zermahlen Asche erkennen. Die beispielhaft abgebildeten Aschen aus Versuch VK1 unterscheiden sich nicht von Versuch VK2, weshalb auf eine Darstellung der Asche von Versuch VK2 verzichtet wird. Die ermittelten Glühverluste der Aschen aus den beiden Versuchen betragen 3,0 % (VK1) bzw. 3,3 % (VK2).



Abbildung 4.71: Bildaufnahme während der Verbrennung der Pellets (l.), der verbliebenen Pelletasche (m.) auf dem Wanderrost und der durch die Ascheschnecke ausgeförderten Pelletasche (r.) beispielhaft zu Versuch VK1.

Versuchsergebnisse: Verbrennung von unbehandelten Strohpellets (OSP) in der Wanderrostfeuerung (VK3)

Ergänzend wurde in der Wanderrostfeuerung ein Versuch mit der unbehandelten Strohpelletcharge OSP durchgeführt. Die Parameter von VK1 wurden für diesen Versuch näherungsweise übernommen. Die Anlage schaltete sich aufgrund einer zu hohen Temperatur im Aschekanal nach ca. 140 Minuten automatisch ab (Notabschaltung). Insgesamt wurden 21 kg Strohpellets durchgesetzt.

Die Temperaturverläufe und Luftmassenströme sind in Abbildung 4.72 dargestellt. Die Temperaturen lagen auf einem sehr niedrigen Niveau. Aufgrund des Defekts eines Thermoelements wurde die zweite Brennbetttemperatur (T_{BB2}) nicht gemessen. Der Primärluftmassenstrom war sehr ähnlich zu VK1. Der Sekundärluftmassenstrom blieb entgegen der Erwartungen konstant ohne periodische Schwankungen. Die Abgaskonzentrationen (vgl. Abbildung 4.73) waren trotz der automatischen Abschaltung nicht außergewöhnlich hoch, sondern den Werten von VK1 bzw. VK2 sehr ähnlich. Für die durchschnittlichen CO-Emissionen wurde im stationären Betrieb ab einer Versuchszeit von 1:00 $45 \text{ mg/m}^3_{i.N., tr.}$ $13 \% \text{ O}_2$ und für Staub $27 \text{ mg/m}^3_{i.N., tr.}$ ermittelt.

Es wurde 1,1 kg Pelletasche erfasst. Die Beschaffenheit der Asche ist weitestgehend ähnlich zu den Versuchen VK1 und VK2 (vgl. Abbildung 4.74). Die Färbung war jedoch dunkler, was in den Abbildungen nicht deutlich zu erkennen ist. Zudem konnten zum Teil deutliche Versinterungen und Verschlackungen der Asche festgestellt werden. Der Glühverlust war mit 33,4 % hoch, was auch die erhöhte Temperatur im Aschekanal erklärt.

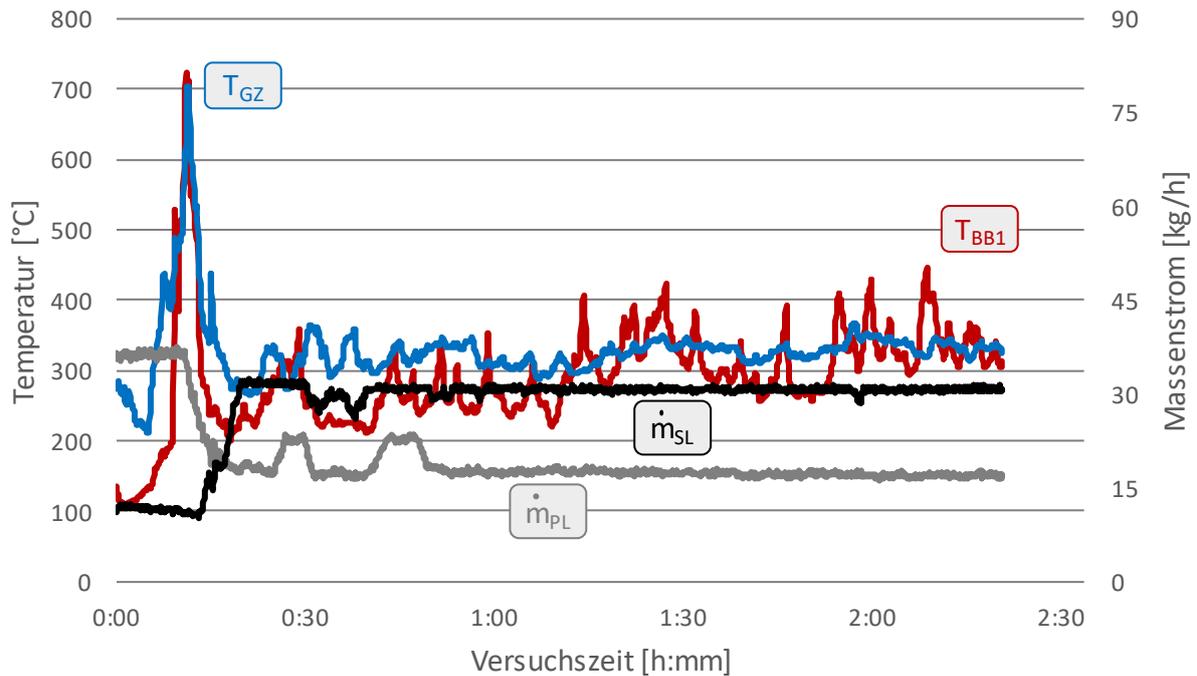


Abbildung 4.72: Temperaturen und Luftmassenströme des Verbrennungsversuchs VK3 mit unbehandelten Strohpellets (OSP).

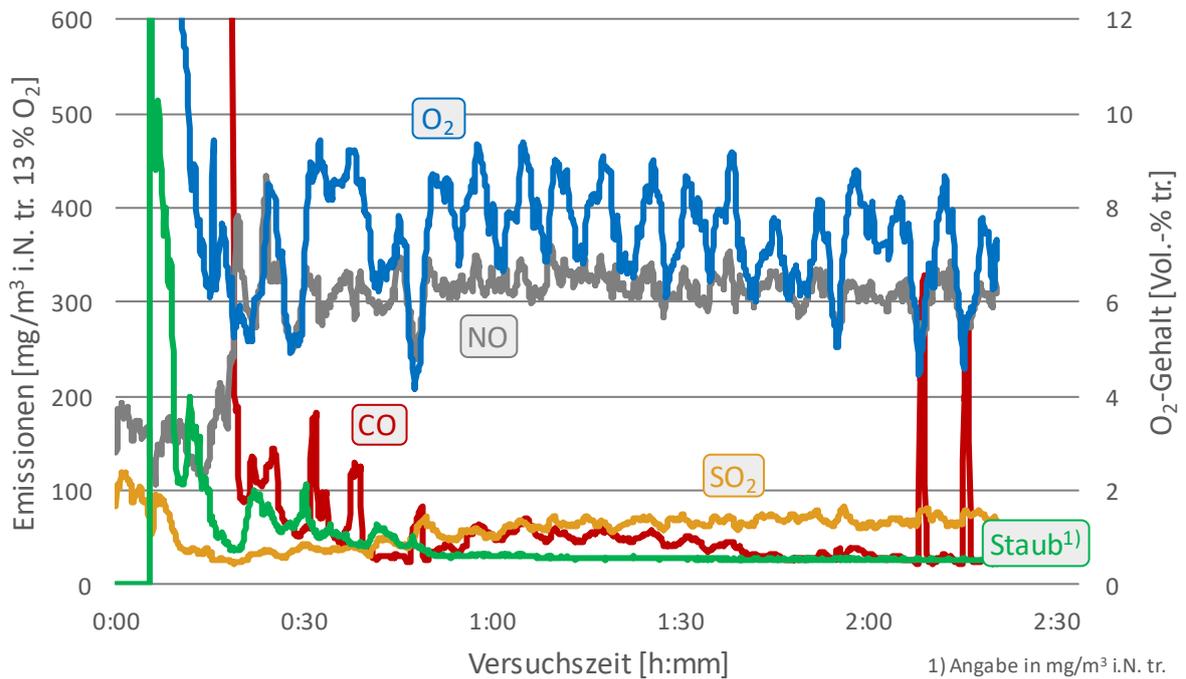


Abbildung 4.73: Abgaskonzentrationen des Verbrennungsversuchs VK3 mit unbehandelten Stropelletts (OSP).



Abbildung 4.74: Bildaufnahme der verbliebenen Pelletasche (l.) auf dem Wanderrost und der durch die Ascheschnecke ausgeförderten Pelletasche (r.) von Versuch VK3.

Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

In Tabelle 4.10 sind die relevantesten Messwerte der im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Versuchskampagnen zusammengefasst. Aus der Versuchsauswertung ergeben sich folgende wichtige Erkenntnisse:

- ohne Rostbewegung ist keine Abführung der Asche möglich
- die Abführung der Asche ist mit und ohne Kugeln durch bewegte Rührer realisierbar

- die wärmeinduzierte Werkstoffbeanspruchung der bewegten Rostkomponenten ist ohne Kugelschüttung signifikant erhöht
- hohe Drehzahlen von $4,82 \text{ min}^{-1}$ führen mit Kugeln zu einem schwankenden Verbrennungsverhalten mit hohen Glühverlusten der Aschen sowie hohen CO- und Staubemissionen
- Drehzahlen unter $0,84 \text{ min}^{-1}$ führen bei Kugelschüttungen ($d=15 \text{ mm}$) nicht zu einer Verringerung der Emissionswerte
- V2A-Edelstahl ist als Kugelmateriale am geeignetsten (temperatur- und verhältnismäßig korrosionsbeständig)
- Strohpellets (gelaugt und additiviert) lassen sich unter kontinuierlichem Ascheabtransport durch den Wanderrost komplikationslos verbrennen (kaum Ascheversinterungen und hoher Ascheausbrand feststellbar)
- es konnten nach den durchgeführten Verbrennungsversuchen keine technischen Probleme an der Wanderrostfeuerung festgestellt werden

Tabelle 4.10: Zusammenfassung der Parameter und der relevantesten Messwerte (Mittelwerte) der Verbrennungsversuche in der Abwurfheizung.

Kürzel	d_k [mm]	h_s [mm]	Wkst. [-]	n_R [min^{-1}]	λ_{PL} [-]	λ [-]	x_{GV} [m.-%]	T_{BB} [°C]	CO ²⁾ [mg/m ³]	Staub ¹⁾ [mg/m ³]
VP1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VP2	-	-	-	4,82	0,84	1,73	6,7	902	47	45
VP3	15	15	1.4305	0,84	0,76	1,73	4,2	951	23	33
VP4	15	15	1.4305	4,82	0,92	2,00	18,8	823	285	83
VP5	13	57	1.0301	4,82	0,48	2,00	30,9	764	364	112
VP6	13	57	1.0301	1,34	0,75	1,62	8,0	833	37	59
VP7	15	59	1.4305	0,84	0,80	1,76	5,0	726	55	51
VP8	15	59	1.4305	0,59	0,79	1,70	11,8 ³⁾	746	43	52
VP9	15	59	1.0616	0,84	0,59	1,73	6,1	714	67	44
VP10	15	59	Al ₂ O ₃	0,84	0,76	1,66	10,6 ³⁾	863	54	47
VK1	-	-	-	-	0,66	1,74	3,0	585	49	29
VK2	-	-	-	-	0,98	1,69	3,3	726	60	30
VK3 ⁴⁾	-	-	-	-	0,69	1,55	33,4	314	45	27

1) bezogen auf das trockene Normvolumen

2) bezogen auf das trockene Normvolumen und 13 % Bezugssauerstoff

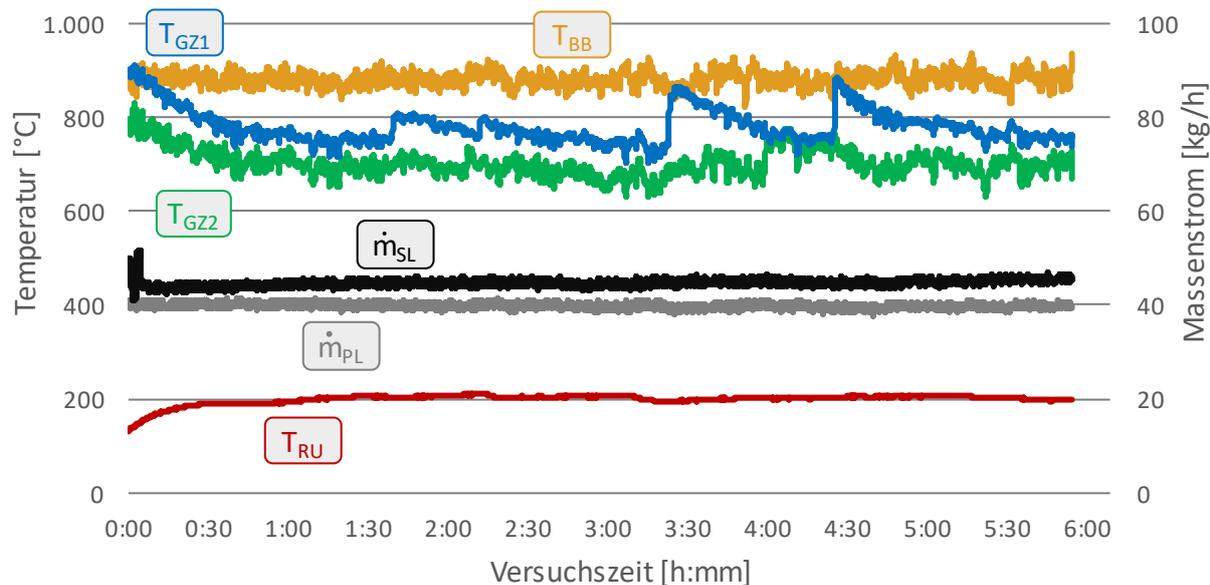
3) überschätzte Werte aufgrund einer fehlerhaften Methodik bzw. Durchführung

4) Versuch mit unbehandelten Strohpelletcharge (OSP) durchgeführt

4.8 Luftstufung, Langzeitversuche sowie PCDD/F-Messungen

Auf Basis der Versuche mit Schüttungen aus Edelstahlkugeln ($d=15$ mm) erfolgte ein Langzeitversuch (VP11). Die Versuchsparameter der Kugelschüttungshöhe von 59 mm (398 Kugeln), des Primärluftmassenstroms mit ca. 40 kg/h und der Rührerdrehzahl von $0,84 \text{ min}^{-1}$ aus Versuch VP7 wurden beibehalten. Es wurde die höhere Drehzahl der beiden Versuche mit Edelstahlkugeln (VP7 und VP8) ausgewählt, da mit geringeren Drehzahlen keine Verbesserung der Emissionen zu erwarten war und die Bildung von Ascheagglomeration eher begünstigt worden wäre. Der Langzeitversuch wurde in fünf separate Teilschritte (VP11.1 bis VP11.5) mit identischen Versuchsparametern aufgeteilt. Dabei wurden immer dieselben Edelstahlkugeln verwendet. Die Versuchsdauer der Einzelversuche betrug ca. sechs Stunden. 60 kg Strohpellets wurden je Versuch verbrannt. Die Versuche verliefen ohne Komplikationen. Beim Einzelversuch VP11.2 erfolgte neben den üblichen Abgasanalysen zusätzliche eine Messung der Abgaskonzentration von polychlorierten Dibenzodioxinen und Dibenzofuranen (PCDD/F) (Dienstleistung).

Beispielhaft für die fünf Einzelversuche sind in Abbildung 4.75 und Abbildung 4.76 die Temperaturen, Luftmassenströme und Abgaskonzentrationen des vierten Versuchs VP11.4 wiedergegeben. Tabellarisch sind zusätzlich die Mittelwerte mit den Standardabweichungen dargestellt. Die Diagramme der übrigen Einzelversuche befinden sich im Anhang (vgl. Abbildungen im Anhang 5 bis 12).

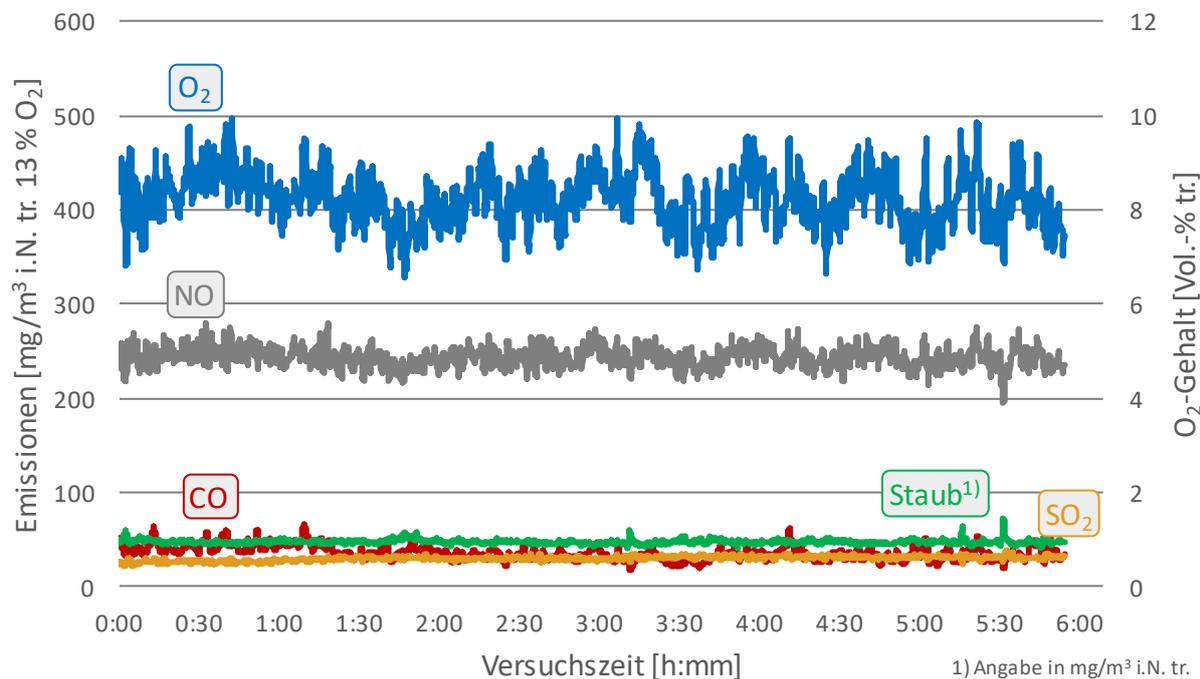


Parameter	Einheit	VP11.1	VP11.2	VP11.3	VP11.4	VP11.5	Ø VP11
T _{GZ2}	[°C]	663	648	695	704	732	688 ± 30
T _{GZ1}	[°C]	763	750	797	782	834	785 ± 29
T _{BB}	[°C]	865	819	890	883	838	859 ± 27
T _{RU}	[°C]	262	275	182	199	196	223 ± 38

Abbildung 4.75: Exemplarisch dargestellte Temperaturen und Luftmassenströme des Einzelversuchs VP11.4 als Teil des Langzeitversuchs und tabellarisch dargestellte Temperatur-Mittelwerte der Einzelversuche.

Die Temperaturen, Luftmassenströme und Abgaskonzentrationen entsprachen den Erfahrungen der vorangegangenen Versuche und wichen unter den Einzelversuchen nur unwesentlich voneinander ab. Die CO-Emissionen betragen durchschnittlich $35,7 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr.,13 \% O}_2}$ und die Staubemissionen $44,3 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr.}}$. Für NO wurde ein Mittelwert von $245 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr.,13 \% O}_2}$ gemessen. Versuch VP11.2 wurde von zwei dreistündigen Messungen der PCDD/F begleitet. Die Messungen ergaben einen Mittelwert von $0,016 \text{ ng/m}^3_{\text{i.N., tr.,13 \% O}_2}$ und einen Maximalwert von $0,025 \text{ ng/m}^3_{\text{i.N., tr.,13 \% O}_2}$, inklusive eingerechneter Messungenauigkeiten.

Die vorgeschriebenen Grenzwerte der 1. BImSchV für CO von $400 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr.,13 \% O}_2}$ könnten eingehalten werden. Der Staubgrenzwert von $20 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr.}}$ würde deutlich überschritten werden. Die Grenzwerte der Typprüfung für CO, NO und PCDD/F von $250 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr.,13 \% O}_2}$, $500 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N., tr.,13 \% O}_2}$ bzw. $0,1 \text{ ng/m}^3_{\text{i.N., tr.,13 \% O}_2}$ könnten ebenfalls eingehalten werden, wodurch eine Zulassung einer Kugelrostfeuerung für Strohpellets grundsätzlich möglich ist.



Parameter	Einheit	VP11.1	VP11.2	VP11.3	VP11.4	VP11.5	Ø VP11
O ₂	[Vol.-% tr.]	8,1	9,6	7,8	8,2	7,7	8,3 ± 0,7
CO	[mg/m ³] ²⁾	35,5	58,6	29,6	35,5	19,4	35,7 ± 12,9
NO	[mg/m ³] ²⁾	228,9	264,6	237,6	243,5	250,3	245,0 ± 12,1
SO ₂	[mg/m ³] ²⁾	34,6	39,9	37,1	29,8	48,0	37,9 ± 6,0
Staub	[mg/m ³] ¹⁾	44,1	45,1	43,1	47,5	41,9	44,3 ± 1,9
PCDD/F	[ng/m ³] ²⁾	-	0,016	-	-	-	0,016 ± 0,009

1) bezogen auf das trockene Normvolumen

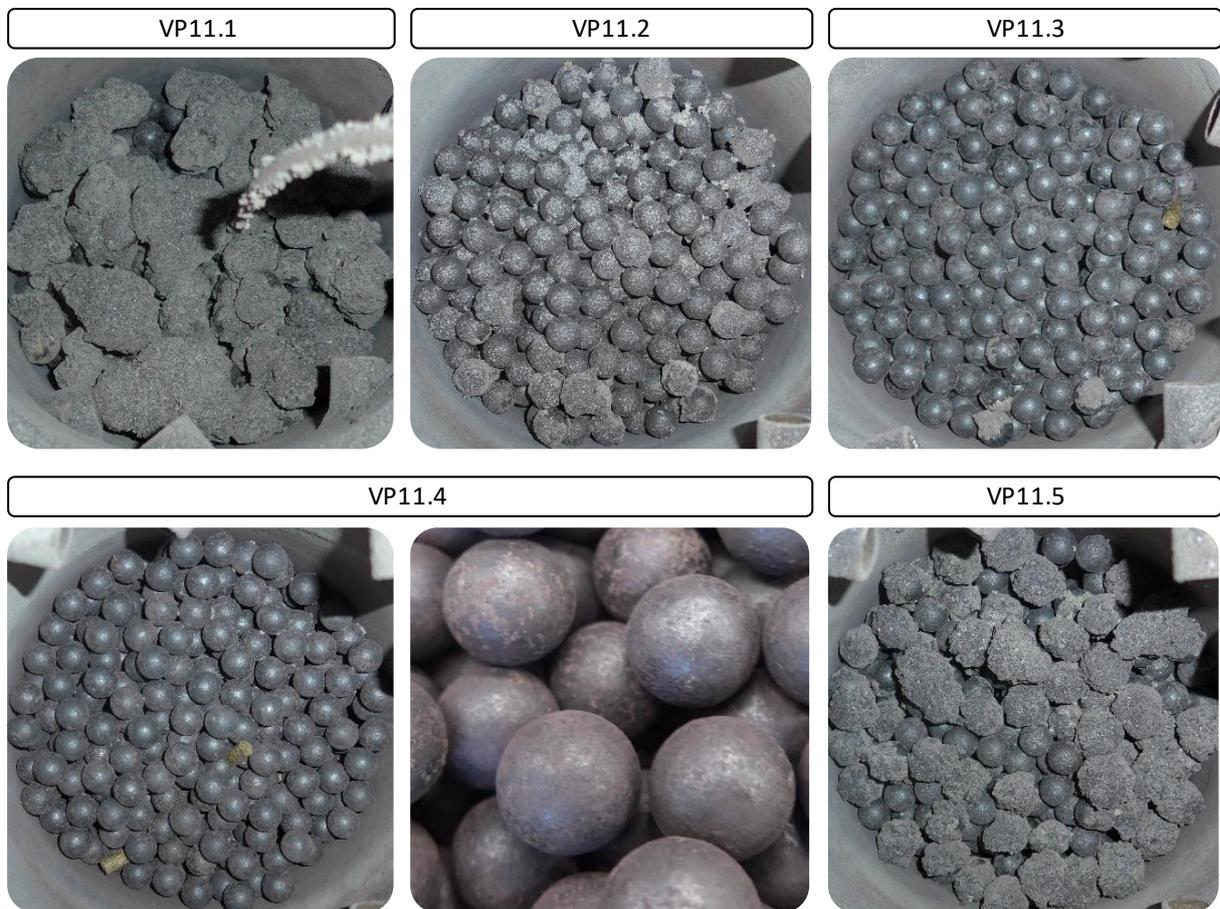
2) bezogen auf das trockene Normvolumen und 13 % Bezugssauerstoff

Abbildung 4.76: Exemplarisch dargestellter Verlauf der Abgaskonzentrationen des Einzelversuchs VP11.4 als Teil des Langzeitversuchs und tabellarisch dargestellte Mittelwerte der Abgaskonzentrationen der Einzelversuche.

Das Innere des Brennertopfes nach den fünf Einzelversuchen und die Massen der Aschefraktionen sind in Abbildung 4.77 dargestellt. Es zeigten sich wider Erwarten unterschiedliche Ergebnisse bzgl. des Verbleibs der Pelletasche im Brennertopf. Bei Versuch VP11.1 bildeten sich einige Ascheagglomerate, welche manche Kugeln umschlossen. Insgesamt verblieben bei diesem Versuch 0,4 kg im Brennertopf, was einem Anteil an der gesamten erfassten Asche von 12 % (3,36 kg) entspricht. Die Ascheagglomerate konnten mit einem Hammer aufgebrochen werden, wodurch sich die Edelstahlkugeln leicht aus dem Verbund lösen ließen. Nach Versuch VP11.2 war nur eine minimale Aschemenge im Brennertopf bzw. an den Kugeln erkennbar. Nach den Versuchen VP11.3 und VP11.4 war nahezu keine Asche im Brennertopf oder an den Kugeln verblieben. Ähnlich zu Versuch VP11.1 bildeten sich bei Versuch

VP11.5 Ascheagglomerate mit eingeschlossenen Kugeln. 0,13 kg der der gesamten Asche (3,92 kg) befanden sich nach dem Versuch im Brennertopf, was ca. 3,3 % entspricht. Die durchschnittlichen Glühverluste der Gesamtasche (Brennertopf-, Brennerplatten- und Austragsasch) betragen 3,1 %. Dabei wurde ein Maximalwert von 4,8 % und ein Minimalwert von 1,2 % ermittelt.

Die Edelstahlkugeln wurden augenscheinlich durch den Langzeitversuch nicht beschädigt wesentlich. Von 30 Kugeln wurde der Kugeldurchmesser ermittelt. Dieser reduzierte sich nach dem Langzeitversuch von 14,9 auf 14,65 mm, was einer linearen Minderung des Kugeldurchmessers von 8,4 µm/h Versuchsdauer entspricht.



Aschecharge	Einheit	VP11.1	VP11.2	VP11.3	VP11.4	VP11.5	Ø VP11
Brennertopfasche	[kg]	0,40	≈ 0	≈ 0	≈ 0	0,13	0,27 ± 14
Brennerplattenasche	[kg]	0,51	1,18	0,98	1,07	0,89	0,93 ± 0,23
Austragsasche	[kg]	2,44	2,56	2,78	2,91	2,90	2,72 ± 0,19
Gesamtasche	[kg]	3,36	3,74	3,76	3,98	3,92	3,75 ± 0,22

Abbildung 4.77: Aufnahmen des Brennertopfs und der Kugeln (VP11.4) nach den jeweiligen Einzelversuchen des Langzeitversuchs und tabellarisch dargestellte Werte der Aschemassen.

In Tabelle 4.11 sind Versuchsdauer, Massenströme, Glühverluste und Luftzahlen zusammengefasst. Die Brennstoffmassenströme (\dot{m}_B) und Aschenmassenströme (\dot{m}_A) wurden über die gemessene verbrannte Pelletmasse und die zurückgewonnene Pelletasche, bezogen auf die Versuchszeit (t_{Versuch}) berechnet. Der Abgasmassenstrom wurde über die Massenbilanz ermittelt. Der Luftgesamtmassenstrom (\dot{m}_L) wurde mit einer Verbrennungsrechnung, basierend auf den Brennstoffanalysen und Abgasanalysen des Restsauerstoffwertes (Berechnung Luftzahl λ), überprüft. Es wurde ein Mittelwert von 86,8 kg/h mit einer Standardabweichung von $\pm 5,7$ kg/h ermittelt. Die Analysenwerte, der analysierte Restsauerstoffgehalt im Abgas sowie die Messung der Gesamtluftmassenströme aus den Primär- und Sekundärluftmassenströmen scheinen somit valide zu sein.

Tabelle 4.11: Übersicht von Prozessdaten des Langzeitversuchs

Parameter	Einheit	VP11.1	VP11.2	VP11.3	VP11.4	VP11.5	Ø VP11
t_{Versuch}	[min]	353	375	357	355	353	359 ± 8
\dot{m}_B	[kg/h]	10,4	10,8	10,7	10,1	11,1	$10,6 \pm 0,3$
\dot{m}_A	[kg/h]	0,57	0,60	0,63	0,67	0,67	$0,63 \pm 0,04$
$x_{\text{GV}}^{1)}$	[m.-%]	2,6	1,2	3,3	3,6	4,8	$3,1 \pm 1,2$
$x_{\text{FV}}^{2)}$	[m.-%]	0,10	0,05	0,18	0,21	0,27	$0,16 \pm 0,08$
\dot{m}_{PL}	[kg/h]	39,8	40,7	39,0	39,8	38,9	$39,6 \pm 0,7$
\dot{m}_{SL}	[kg/h]	44,4	50,2	46,5	44,7	48,8	$46,9 \pm 2,3$
\dot{m}_L	[kg/h]	84,2	90,8	85,4	84,4	87,6	$86,5 \pm 2,5$
λ_{PL}	[-]	0,78	0,77	0,74	0,80	0,71	$0,76 \pm 0,03$
λ	[-]	1,64	1,85	1,59	1,65	1,58	$1,66 \pm 0,1$
$\dot{m}_G^{3)}$	[kg/h]	94,0	101,0	95,5	93,9	98,0	$96,5 \pm 2,7$

1) GV = Glühverlust

2) FV = Feuerungsverlust

3) ausschließlich berechnete Werte

Schlussfolgerungen

Beim vorgestellten Langzeitversuch (fünf Einzelversuchen) musste eine hohe Varianz der im Brennraum verbliebenen Aschemenge bzw. von Ascheanbackungen an den Kugeln festgestellt werden. Durch den Vergleich der gemessenen Temperaturen, Abgaskonzentrationen und Glühverluste lässt sich kein korrelativer Zusammenhang zur Ascheagglomeratbildung erkennen. Die Messdaten der Einzelversuch sind sich sehr ähnlich. Weil bereits Bildung eines einzigen Ascheagglomerats zum Wachsen weiterer Agglomerate führen kann, ist dieses System

wahrscheinlich empfindlich gegenüber auch nur geringfügig variierender Brennstoffzusammensetzung, Temperaturspitzen, Kugelbewegungen und Luftströmungen (chaotisch-dynamisches System).

Möglicherweise lassen sich die Einflüsse der genannten Parameter minimieren. Die ausgewählte Rührerdrehzahl beruhte auf den Erkenntnissen aus den vorangegangenen Versuchen. Bei diesen Versuchen bildeten sich bei geringen Abgasemissionen und Glühverlusten keine Ascheagglomerate, weshalb sich keine Notwendigkeit für höhere Drehzahlen ergab. Eine Erhöhung der Drehzahl zur Eliminierung empfindlicher Einflüsse wäre ggf. bereits ausreichend.

Weitere Einflüsse über die Drehzahl hinaus wurden nur teilweise untersucht. Das Kugelmaterial und die Oberflächenbeschaffenheit können die Bildung von Ascheagglomeraten und Ascheanbackungen an den Kugeln begünstigen, wie dies bei Keramikugeln festgestellt werden konnte. Mögliche Schwankungen der Brennstoffzusammensetzung der Pellets wurden als Einflussfaktor nicht analysiert, da eine kontinuierliche Probenahme von Strohpellets während eines Versuchs mit darauffolgenden Analysen sehr aufwendig gewesen wäre. Zudem könnte der Abstand der Sekundärluftdüsen zum Brennbett relevant sein. Dieser Abstand ergibt sich aus der Höhe der Kugelschüttung und ist möglicherweise ursächlich für Temperaturspitzen in Brennbettnähe.

4.9 Kriterienkatalog für die Auslegung von Kleinf Feuerungen für Strohpellets

Zur Bewertung des entwickelten Rostsystems wurden vier zu vergleichende Varianten definiert (vgl. Tabelle 4.12). Die vier Rostsystemvarianten umfassen als Referenz die ursprüngliche Abwurff euerung mit Brennertopf ohne Umbauten (RS0), den eingebauten Rührer ohne Kugeln (RS1), mit einlagiger Kugelschicht (RS2) und mit Kugelschüttung (RS3). Die Varianten wurden nach den Kriterien, wie Temperaturen, Ausbrand, Robustheit etc. mit einem Stern (ungenügend), zwei Sternen (mäßig) und drei Sternen (gut) bewertet. Weil die tatsächliche vorliegende Luftstufung aufgrund der technischen Randbedingungen in den Versuchen nicht hinreichend untersucht werden konnte, wird diese nicht bewertet, sondern als Rahmenparameter aufgeführt.

Bei Variante RS0 kann ein Ascheabtransport nicht erreicht werden, sodass ein solches System ohne Rostbewegung für Strohpellets (gelaugt und additiviert) nicht geeignet ist. Obwohl bei den Varianten RS1 und RS2 der Ascheabtransport, Versinterungen, Emissionen und Ausbrand zufriedenstellend sind, sind die beiden Systeme aufgrund der thermisch bedingten Schäden am

Rostsystem trotz der bereits wärmebeständigen Werkstoffe in dieser Bauform ebenfalls nicht geeignet. Gegebenenfalls kann dieses Problem durch noch wärmebeständigerer Werkstoffe oder durch eine Minimierung der Verbrennungstemperaturen (rückgeführtes Rauchgas) gelöst werden. Der Preis für das entwickelte System erhöht sich für eine kommerzielle Abwurffeurung auf schätzungsweise 1.000 €. Die Schätzung basiert insbesondere auf den Materialkosten. Im Leistungsbereich bis 20 kW können Abwurffeurungen für ca. 4.000 € bis 10.000 € (Stand 2013) erworben werden [34]. Auf dem Heizungsmarkt lässt sich die als Benchmark herangezogene Wanderrostfeuerung der Fa. KWB (Multifire) für ca. 17.000 € (Stand 2017) erwerben [58]. Bei Variante RS3 konnten keine thermischen Schäden des Rostsystems, aufgrund der Abschirmung durch die Kugelschüttung, festgestellt werden. Wegen des unzuverlässigen Abtransportes der Asche, bedingt durch Versinterungen bzw. Anbackungen der Asche an den Kugeln, ist Variante RS03 in dieser Form jedoch ebenfalls nicht praxistauglich. Die Anforderungen an das Kugelmateriale sind hoch. Einfacher und kostgünstiger Stahl ist nicht geeignet. Edelstahl scheint ein grundsätzlich geeigneter Werkstoff zu sein. Für die 400 nötigen Kugeln (bezogen auf die Schüttung) müssen jedoch ca. 500 € zusätzlich eingerechnet werden. Das Ersetzen möglicher verschlissener Kugeln ist nicht berücksichtigt.

Tabelle 4.12: Kriterienbewertung der Rostsysteme für die Feuerungsauslegung

	RS0	RS1	RS2	RS3
d_k [mm]	-	-	15	15
h_s [mm]	-	-	15	59
Kugelwerkstoff [-]	-	-	1.4305 ¹⁾	1.4305 ¹⁾
n_R [min ⁻¹]	-	4,82	0,84	0,84
λ_{PL} [-]	0,82	0,84	0,76	0,76
Ascheabtransport	★	★★★★	★★★★	★★
Versinterungsneigung	★	★★★★	★	★
Temperaturen	★★	★★	★★	★★
Emissionen	★	★★★★	★★★★	★★★★
Ausbrand	★★★	★★	★★★★	★★★★
Systemrobustheit	-	★	★	★★★★
Kosten	-	★★★★	★★	★★

★ = ungenügend

★★ = mäßig

★★★ = gut

1) V2A-Edelstahl

Mit Hilfe der DEM/CFD Simulationen konnten die Detailvorgänge die zu vorteilhaften Bedingungen zur Verhinderung der Bildung von Ascheagglomeraten führen, am Beispiel der Kugelrostkonfiguration identifiziert werden. Dies ermöglicht die Formulierung allgemeiner Kriterien, die es bei der Auslegung eines bewegten Rostes zur Verbrennung von Strohpellets zu beachten gibt:

- Abschattung der mechanisch beweglichen Bauteile
- Abschattung der im Kugelbett absinkenden Pelletasche
- Vermeidung der Bildung lokaler Haufwerke reagierender Pellets
- Horizontale und vertikale Verteilung der der Konversionszustände der Pellets
- Ausreichend schneller Abtransport reagierter Partikel
- Möglichst Vermeidung von Wärmefreisetzung durch Reaktion in Nähe des Rostbodens

Diese am Beispiel des Kugelrostes abgeleiteten Kriterien bieten allgemeine Informationen hinsichtlich der auftretenden Wechselwirkungen zwischen einer Brennbettbewegung, den Wärme- und Stoffübertragungsvorgängen und der thermochemischen Konversion von Pellets. So können die gewonnenen Erkenntnisse auch bei der Auslegung neuer, vom Kugelrost abweichenden Anlagenkonzepte berücksichtigt werden.

5 Verwendung der Zuwendung

Teilziel laut Antrag / Arbeitspaket 1: *Herstellung der Strohpellets*

- wissenschaftlich-technisches Personal (TEER)

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Lukas Schenke konzipierte und koordinierte die Strohpellettherstellung. Dazu waren auswärtige Tätigkeiten bei der Strohernte, Strohlagung und -pelletierung notwendig. (3 Personenmonate)

Teilziel laut Antrag / Arbeitspaket 2: *Charakterisierung der eingesetzten Strohpellets und Verbrennungsrückstände*

- wissenschaftlich-technisches Personal (TEER)

Der wissenschaftlichen Mitarbeiter Lukas Schenke koordinierte die Analysen der unterschiedlichen Stroh(pellet)chargen. (3 Personenmonate)

- wissenschaftlich-technisches Personal (LEAT)

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Frederic Buß koordinierte die mechanische und thermochemische Charakterisierung der Strohpellets. (2 Personenmonate).

Teilziel laut Antrag / Arbeitspaket 3: *Aufbau zweier Versuchsfeuerungen*

- wissenschaftlich-technisches Personal (TEER)

Der wissenschaftlichen Mitarbeiter Lukas Schenke leitete den Aufbau der beiden Feuerungen. Er war für die Beschaffung der Wanderrostfeuerungen und die Ausstattung der Feuerungen mit der Messtechnik zuständig. Beim Aufbau der Anlagen, insbesondere der Mess- und Regelungstechnik, unterstützte der wissenschaftlichen Mitarbeiter Thomas Horst. (12 Personenmonate).

- Geräte mit einem Beschaffungswert >2.500 € (TEER)

Die Vergleichsfeuerungen (Wanderrostfeuerungen vom Typ Multifire der Fa. KWB GmbH) wurde für das vorgesehene Budget von 3.300 € (inkl. Ust.) beschafft.

Teilziel laut Antrag / Arbeitspaket 4: *Bestimmung einer Makrokinetik für Strohpellets basierend auf experimentellen Einzelpartikeluntersuchungen*

- wissenschaftlich-technisches Personal (LEAT)

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Frederic Buß war für die Koordination des externen Messauftrages zuständig. Zudem war er für die Bestimmung der Makrokinetik anhand der Messdaten verantwortlich (3 Personenmonate).

- Ausgaben für Leistung Dritter

Die Untersuchungen zur Messung der Massenumsatzraten einzelner Strohpellets wurde am LOKI-Reaktor des Fraunhofer Instituts Umsicht durchgeführt. Der Auftrag wurde über das dafür vorgesehene Budget in Höhe von 15.568,50 € finanziert.

Teilziel laut Antrag / Arbeitspaket 5: *Experimentelle Untersuchung des Abbrandverhaltens von Strohpelletschüttungen (Massenabnahmerate)*

- wissenschaftlich-technisches Personal (LEAT)

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Frederic Buß war für die Planung, Durchführung und Auswertung der experimentellen Untersuchungen verantwortlich (8 Personenmonate).

Teilziel laut Antrag / Arbeitspaket 6: *Verifizierung der Simulationen anhand der Versuche aus AP5*

- wissenschaftlich-technisches Personal (LEAT)

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Frederic Buß war für die Durchführung Überprüfung und Anpassung der gekoppelten DEM/CFD Simulationen verantwortlich (11 Personenmonate).

Teilziel laut Antrag / Arbeitspaket 7: *DEM/CFD-Simulation des am TEER entwickelten Rostsystems (in Wechselwirkung mit AP8)*

- wissenschaftlich-technisches Personal (LEAT)

Der wissenschaftliche Mitarbeiter Frederic Buß führte DEM/CFD-Simulationen und die Auswertung durch. (5 Personenmonat).

Teilziel laut Antrag / Arbeitspaket 8: *Entwicklung/Optimierung eines Rostsystems zur Sicherstellung der Ascheabfuhr und Aufbrechen von Versinterungen*

- wissenschaftlich-technisches Personal (TEER)

Der wissenschaftlichen Mitarbeiter Lukas Schenke koordinierte die einzelnen Schritte der Rostentwicklung. Er führte zusammen mit studentischen Hilfskräften die Versuche durch und wertete die Messdaten aus. (10 Personenmonate).

Teilziel laut Antrag / Arbeitspaket 9: *Luftstufung, Langzeitversuche sowie PCDD/F-Messungen*

- wissenschaftlich-technisches Personal (TEER)

Der wissenschaftlichen Mitarbeiter Lukas Schenke koordinierte den Langzeitversuch bzw. die Einzelversuche. Er führte zusammen mit studentischen Hilfskräften die Versuche durch und wertete die Messdaten aus. (1 Personenmonat).

- Leistungen Dritter (TEER)

Die PCDD/F-Messungen wurden im Unterauftrag an die Fa. Müller-BBM GmbH für 2.677,50 € (inkl. Ust.) vergeben.

Teilziel laut Antrag / Arbeitspaket 10: *Kriterienkatalog für die Feuerungsauslegung von Strohpelletkleinfeuerungen*

- wissenschaftlich-technisches Personal (TEER)

Der wissenschaftlichen Mitarbeiter Lukas Schenke erstellte in Kooperation mit LEAT den Kriterienkatalog auf Basis der erfolgten Verbrennungsversuche. (1 Personenmonat).

- wissenschaftlich-technisches Personal (LEAT)

Der wissenschaftlichen Mitarbeiter Frederic Buß unterstützte TEER bei der Erstellung des Kriterienkatalogs unter Berücksichtigung der Simulationsergebnisse. (1 Personenmonat).

5.1 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit entspricht den im Projektantrag definierten Aufgabenstellungen bzw. den Inhalten der einzelnen Arbeitspakete. Der erzielte Erkenntnisgewinn folgt dabei den formulierten Erwartungen.

6 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse für KMU

Durch die Ergebnisse des Vorhabens wird Anlagenherstellern für Kleinfeuerungsanlagen ein neuartiges Rostsystem präsentiert. Durch die im Bericht detailliert beschriebene Funktionsweise und technische Ausführung samt den Erkenntnissen aus den Versuchen kann der Ansatz des Kugelrosts wissenschaftlich-technisch von den KMU selbst oder von Forschungseinrichtungen zur Entwicklung eines kostengünstigen Rostsystems für Strohpellets weiterverfolgt werden.

Zudem erweitern die Simulationsergebnisse das generelle Verständnis um die komplexen Wechselwirkungen zwischen der mechanischen Bewegung und dem Abbrandes einer Brennstoffschüttung. Hersteller von Pelletöfen können die herausgearbeiteten Erkenntnisse auch auf neue Anlagenkonzepte übertragen und etwaige Schwierigkeiten bereits bei der Auslegung oder im späteren Betrieb berücksichtigen. Weiterhin demonstrieren die dargestellten Simulationsergebnisse eine innovative Simulationsmethode zur Gewinnung messtechnisch nicht zugänglicher Daten, mit deren Hilfe entsprechende Betriebsparameter gezielt optimiert werden können. Die dargestellten Simulationskonzepte sind veröffentlicht und somit einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht worden.

Sollte der weitere Entwicklungsschritt zu einem zuverlässigen und preisgünstigen Rostsystem gelingen, profitieren neben den KMU des Anlagenbaus auch die Pelletbranche und die Landwirtschaft. So kann die Landwirtschaft durch eine breitere Strohnutzung einen Vorteil aus steigenden Brennstoffpreisen ziehen. In diesem Zusammenhang könnten auch bisher unrentable Flächen bewirtschaftet werden, wodurch sich zusätzlich ein positiver Effekt hinsichtlich einer Minderung der Bodenerosionen einstellt. Zudem können Erzeuger von Strohpellets, die sich bisher auf die Herstellung von Tier-Einstreu beschränken, von einem weiteren Absatzmarkt profitieren. Für Tier-Einstreu gelten andere Qualitätsanforderungen als für den Brennstoffeinsatz, sodass mit einer kostengünstigeren Produktion von Strohpellets als Brennstoff gerechnet werden kann. Pellethersteller, die sich derzeit auf den Rohstoff Holz beschränken, können auf ein breiteres Rohstoffangebot zurückgreifen und dadurch einen neuen Absatzmarkt erschließen.

Das Schaffen eines stabilen Marktes für Getreidestrohbrennstoff kann zur Erschließung weiterer Potenziale von verbrennungstechnisch problematischen Biomassen wie bspw. Rapsstroh, Mühlenebenprodukten, Heu etc. führen.

7 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Übersicht Ergebnistransfer in die Wirtschaft			
	Zeitraum	Maßnahme	Erfüllungsstatus
Maßnahme während der Laufzeit	Fortlaufend	Betreuung studentischer Arbeiten	2016: 2 Bachelorarbeiten; 2 Studienarbeiten 2017: 1 Bachelorarbeit; 1 Masterarbeit 2018: 1 Studienarbeit; 1 Bachelorarbeit 2019: 2 Bachelorarbeiten, 1 Masterarbeit
	Halbjährlich	Berichterstattung an den Projektbegleitenden Ausschuss	6 PA-Treffen am: 25.10.2016; 22.06.2017; 12.12.2017; 15.5.2018; 05.12.2018; 25.04.2019
		Bereitstellung der Dokumente aus den PA-Sitzungen	Im Anschluss an das Treffen des Projektbegleitenden Ausschuss
	Jährlich	Bereitstellung des Zwischenberichts	Zwischenbericht 2016 eingereicht Zwischenbericht 2017 eingereicht Zwischenbericht 2018 eingereicht
		Vorstellung auf der DVV Jahrestagung	Vorgestellt am : 03.11.2016; 9.11.2017 15.11.2018
	2017	Beitrag auf Konferenzen	VDI Flammentag 06. – 07.09, Darmstadt: Poster 10th Mediteranean Combustion Symposium 17.-21.09, Neapel : Vortrag

	2018	Beitrag auf Konferenzen	Joint Meeting of the German and Italian Sections of the Combustion Institute, 23.-26.05, Sorrent: Vortrag 1. Deutsches Doktorandenkolloquium Bioenergie, 20.-21.09, Leipzig: Vortrag
	2018	Journal Veröffentlichung	Manuskript veröffentlicht in: Experimental Thermal and Fluid Science

Maßnahme nach Abschluss	2019	Beiträge auf Konferenzen	11th Mediterranean Combustion Symposium 17.06 - 20.06, Teneriffa: Vortrag Flammentag .17. - 18.09, Bochum: Vortrag 2ND German Doctoral Colloquium Bioenergy 30.09 - 01.10., Nürnberg: Vortrag
	2019	Abschlussbericht	eingereicht
	2019	Journal Veröffentlichung	Manuskript eingereicht in Combustion Science and Technology Manuskript eingereicht in International Journal of Thermal Sciences Manuskript geplant in Fuel
	2019	Vorstellung auf der DVV Jahressitzung	Vortrag am 14.11, in Stuttgart
	Seit 2018	Übernahme und Darstellung von Ergebnissen in der akademischen Lehre	Darstellung von Ergebnissen in der Vorlesung Energietechnik und Ressourcenmanagement (RUB) sowie Energierohstoffe und –technik (RWTH)
	2019	Dissertation	2 Dissertationen

8 Umsetzung des Transferkonzeptes

Durch Kombination unterschiedlicher Maßnahmen wurde schon während der Projektlaufzeit und bei Projektabschluss der Ergebnistransfer in die Wirtschaft gewährleistet und gefördert. Die einzelnen Maßnahmen sehen wie folgt aus:

- In dem durch KMU's geprägten Projektbegleitenden Ausschuss sind sowohl Mitarbeiter von Anlagenbauern als auch von Anlagenbetreibern integriert. Anregungen und konkrete Problemstellungen aus dem Projektbegleitenden Ausschuss wurden im Vorhaben berücksichtigt, sodass eine gemeinschaftliche Daten- und Erkenntnisbasis gelegt wurde. Dadurch können die Ergebnisse sowohl beim Anlagendesign (Schürkonzepte) wie auch beim Anlagenbetrieb (Drehzahl, Luftstufung) bei den entsprechenden Unternehmen berücksichtigt werden.
- Die im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnisse wurden in Form von frei zugänglichen Zwischen- und Abschlussberichten dokumentiert.
- Weiterhin wurden die Erkenntnisse auf verschiedenen Tagungen und Meetings vorgestellt (Joint Meeting of the German and Italian Sections of the Combustion Institute, 23.-26.05.2019, Sorrent und 2ND German Doctoral Colloquium Bioenergy, 30.09.-01.10.2019, Nürnberg) vorgetragen
- Im Juni 2019 wurden die gewonnenen Erkenntnisse auf dem „11 th Mediteranian Combustion Symposium“ und im September auf dem „Flammentag 2019“ präsentiert und somit einer breiten Öffentlichkeit und einer Vielzahl von Unternehmen zugänglich gemacht.
- Auf dem Gebiet der Ausbildung wurden und werden die Ergebnisse im Rahmen der Lehrtätigkeit an der Ruhr-Universität Bochum vermittelt (seit 2018). Durch Mitarbeit studentischer Hilfskräfte und der Betreuung studentischer Arbeiten zum Projektinhalt wurde und wird die intensive Einarbeitung zukünftiger Absolventen in die Thematik gefördert, über den Personaltransfer werden Erkenntnisse in die Industrie transferiert.

8.1 Aussagen zur voraussichtlichen industriellen Umsetzung der FuE-Ergebnisse nach Projektende

Die Umsetzung des Konzeptes einer thermischen Nutzung von Stroh in Kleinf Feuerungen ist aufgrund der Klimaneutralität des Brennstoffs politisch und gesellschaftlich gewollt und die

Umsetzung – bei erfolgreicher Projektbearbeitung – somit sehr wahrscheinlich. Wesentlicher Faktor wird dabei natürlich die Wirtschaftlichkeit sein. Überschlägige Berechnungen zeigen, dass, unter Berücksichtigung des Aufbaus einer komplett neu erstellten Anlage zur Strohkonfektionierung und –pelletierung, Kosten etwa in der Höhe des aktuellen Preises für Holzpellets, also 180-190 €/MJ zu erwarten sind, wenn als Rohstoffkosten für das Stroh 70 €/t und als Transportkosten 25 €/t angesetzt werden. Interessanter ist die Ergänzung einer bestehenden Pelletierungsanlage um ein Modul zur Strohlauung und Trocknung, bzw. die Lauung und Trocknung des Rohstoffs Stroh an Standorten mit überschüssiger (Niedertemperatur-)Wärme (z.B. häufig ungenutzte Abwärme aus Biosaganalgen in der Landwirtschaft) in Kooperation mit einem Pelletwerk. Hierdurch können bestehende Pelletieranlagen ihr Brennstoffspektrum und ihren Absatzmarkt erweitern und damit strukturelle und wirtschaftliche Vorteile erzielen.

Auch der Landwirtschaft bietet sich eine breitere Nutzung der Erntenebenprodukte. Vor allem jedoch eröffnet sich den Herstellern von Kleinf Feuerungsanlagen eine neue Marktchance durch innovative Produkte mit hohem Exportpotential.

Die verschiedenen Schürkonzepte werden speziell auf geringe Umsetzungskosten und Störungsrobustheit untersucht und optimiert, da dies zentrale Anforderungen im Markt privater Haushaltsheizungen sind. Eine Luftstufung ist auch in konventionellen Pellet-Kleinf Feuerungen schon vorgesehen und nur an die Gegebenheiten der Strohnutzung anzupassen, es resultieren hierdurch keine zusätzlichen Kosten oder Betriebsrisiken.

Die Verfügbarkeit eines validierten DEM/CFD-Auslegungswerkzeugs lässt auch eine schnelle Analyse bestehender oder geplanter Pelletfeuerungen (Umrüstung auf Stroh) zu oder unterstützt die Neuauslegung. Insgesamt ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse des Projektes zeitnah (noch während der Projektlaufzeit) von Kleinf Feuerungsherstellern genutzt werden können. Ebenso ist die Finanzierbarkeit einer industriellen Umsetzung als unkritisch zu bewerten, da auf sehr einfache „Ertüchtigungsmaßnahmen“ für die Strohpelletfeuerungen (Schürung, Luftstufung) zurückgegriffen wird.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt (UBA): Erneuerbare Energien in Zahlen. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#wuerme> [Stand: 11.06.2019]
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Energiedaten: Gesamtausgabe, August 2018
- [3] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft: Ernte 2018. Mengen und Preise, 22.08.2018
- [4] Münch, J.: Nachhaltig nutzbares Getreidestroh in Deutschland. Heidelberg, Juli 2008
- [5] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H.: Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2016 - ISBN: 978-3-662-47438-9.
- [6] Kaliro GbR: Wirtschaftlichkeit von Brennpellets. URL: <https://www.kaliro.de/index.php?PHPSESSID=&me=9> [Stand: 11.06.2019]
- [7] Proplanta GmbH & Co. KG: Aktuelle Strohpreise. URL: <https://www.proplanta.de/Markt-und-Preis/News/Aktuelle-Strohpreise> [Stand: 11.06.2019]
- [8] Wang, L.; Hustad, J. E.; Skreiberg, Ø.; Skjevraak, G.; Grønli, M.: A Critical Review on Additives to Reduce Ash Related Operation Problems in Biomass Combustion Applications. In: Energy Procedia. 20. Jg., 2012, S. 20–29
- [9] Steenari, B.-M. und Karlfeldt Fedje, K.: Addition of kaolin as potassium sorbent in the combustion of wood fuel – Effects on fly ash properties. In: Fuel. 89. Jg., 2010, Nr. 8, S. 2026–2032
- [10] Davidsson, K. O.; Steenari, B.-M.; Eskilsson, D.: Kaolin Addition during Biomass Combustion in a 35 MW Circulating Fluidized-Bed Boiler. In: Energy & Fuels. 21. Jg., 2007, Nr. 4, S. 1959–1966
- [11] Wang, L.; Skjevraak, G.; Hustad, J. E.; Fronli, M.; Skreiberg, Ø.: Effects of Additives on Barley Straw and Husk Ashes Sintering Characteristics. In: 20. Jg., 2012, S. 30–39
- [12] Demirbas, M. F.; Balat, M.; Balat, H.: Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. In: Energy Conversion Management. 50. Jg., 2009, Nr. 7, S. 1746–1760
- [13] Bryers, R. W.: Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels. In: Progress in Energy and Combustion Science. 22. Jg., 1996, Nr. 1, S. 29–120
- [14] Arvelakis, S.; Gehrman, H.; Beckmann, M.; Koukios, E. G.: Effect of leaching on the ash behavior of olive residue during fluidized bed gasification. In: Biomass and Bioenergy. 22. Jg., 2002, Nr. 1, S. 55–69

- [15] IFA Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung: GESTIS-Stoffdatenbank. URL: <https://www.dguv.de/ifa/gestis/gestis-stoffdatenbank/index.jsp> [Stand: 16.07.2019]
- [16] Dayton, D. C.; Jenkins, B. M.; Turn, S. Q.; Bakker, R. R.; Williams, R. B.; Belle-Oudry, D.; Hill, L. M.: Release of Inorganic Constituents from Leached Biomass during Thermal Conversion. In: *Energy & Fuels*. 13. Jg., 1999, Nr. 4, S. 860–870
- [17] Davidsson, K. O.; Korsgren, J. G.; Pettersson, J.B.C.; Jäglid, U.: The effects of fuel washing techniques on alkali release from biomass. In: *Fuel*. 81. Jg., 2002, Nr. 2, S. 137–142
- [18] Llorente, M. F. J.; Arocas, P. D.; Nebot, L. G.; García, Carrasco, J. E.: The effect of the addition of chemical materials on the sintering of biomass ash. In: *Fuel*. 87. Jg., 2008, Nr. 12, S. 2651–2658
- [19] Eltrop, L.: Leitfaden feste Biobrennstoffe. Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen im mittleren und großen Leistungsbereich. 4., vollst. überarb. Aufl. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2014 - ISBN: 9783000153891.
- [20] A.P. Bioenergietechnik GmbH: ÖKOTHERM – Compact Biomasse-Heizanlagen. Für Leistungsbereiche von 49 kW – 950 kW. URL: <https://www.oeko-therm.net/de/produkte-service-oeko-therm/compact-biomasse-heizanlagen> [Stand: 09.06.2019]
- [21] KWB - Kraft und Wärme durch Biomasse GmbH: KWB Multifire. Die robuste und wirtschaftliche Heizung. URL: <https://www.kwb.net/loesung/kwb-multifire/>
- [22] KWB - Kraft und Wärme aus Biomasse GmbH. Förderband-Rost und Brenner umfassend einen Förderbandrost. Erfinder: Georg Hofmeister und Christian Stubenschrott. Anmeldung: 2014, Patentschrift EP2765358A2
- [23] Heizomat Gerätebau-Energiesysteme GmbH: RHK-AK Biomasse-Feuerungsanlagen von 30 - 990 kW. URL: https://www.heizomat.de/int/biomasseheizung.php?id=rhk_ak&lang=DEU [Stand: 10.06.2019]
- [24] Pellet-Brenner mit abnehmbaren Rost und Kessel mit ebensolchen Brenner. Erfinder: Zekin Arikan. Anmeldung: 2018. Diverse, Patentschrift EP2893259B1
- [25] HET Heiz- und Energietechnik Entwicklungs GmbH. Brennertopf und Ofen mit Brennertopf. Erfinder: Thomas Bauer und Martin Holzbauer. Anmeldung: 2015. Deutschland, Patentschrift DE102014009082A1
- [26] Rostreinigung-Einrichtung für Öfen o.dgl. für die Verfeuerung von rieselfähigen stückigem Brennstoffgut. Erfinder: calimax Entwicklungs- & Vertriebs-Ges. m.b.H. Anmeldung: 2003, Patentschrift DE20312259U1
- [27] Weindhager Zentralheizung Technik GmbH. Heizkessel für feste Brennstoffe. Erfinder: Josef Goiginger. Anmeldung: 2012. Deutschland, Patentschrift DE102011055015A1
- [28] Ofen mit natürlichem Zug für Brennpellets. Anmeldung: 1998, Patentschrift DE69835550T2

- [29] F. Huemer GmbH. Schwenkbarer Ofenrost mit Reinigungseinrichtung. Erfinder: Andreas Kurzmann; Walter Mayr-Riedler; Roman Ranftl. Anmeldung: 2015. Österreich, Patentschrift EP2848863A2
- [30] Brenner für festes, stückiges Brennmaterial. Erfinder: Joachim Walz. Anmeldung: 2012. Deutschland, Patentschrift DE102009014010B4
- [31] Wodke GmbH. Ofen oder Kleinfeuerungsanlage. Anmeldung: 2003. Deutschland, Patentschrift DE20216653U1
- [32] Feuerungsvorrichtung für Biomasse, insbesondere Holzpellets. Erfinder: Günther List. Anmeldung: 2000. Österreich, Patentschrift AT407082B
- [33] Böhmer, Achim. Koaxial-Feststoffgranulat Heizanlage für automatischen Betrieb und Reinigung von Kessel und Rondellbrenner. Erfinder: Achim Böhmer. Anmeldung: 2005, Patentschrift EP1568948A2
- [34] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR): Pelletheizungen. Marktübersicht. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR). Rostock, Januar 2013
- [35] IHT Innovative Heiztechnik GmVH. Heizkessel für die Verbrennung von festem Brennstoff. Erfinder: Werner Boos. Anmeldung: 2009. Deutschland, Patentschrift DE102007054114A1
- [36] Robert Bosch GmbH. Heizgerät. Erfinder: Adrian Adolf; H. Küber; Steffen Zecher. Anmeldung: 2014. Deutschland, Patentschrift DE 10 2012 020 929 A1
- [37] Anordnung zur Verbrennung kleinstückiger Brennstoffe, vorzugsweise Pellets. Erfinder: Biegel und Peter. Anmeldung: 2007. Deutschland, Patentschrift DE 10 2004 027 192 B4
- [38] Boos, Werner. Heizkessel für die Verbrennung von festem Brennstoff. Erfinder: Werner Boos. Anmeldung: 2003. Deutschland, Patentschrift DE 102 40 549 A1
- [39] ÖKOFEN Forschungs- und Entwicklungsges. mbH. Vorrichtung zur thermischen Umsetzung kleinstückiger Biomasse. Anmeldung: 2012. Deutschland, Patentschrift DE202012004050U1
- [40] Heizkessel für festen Brennstoff, insbesondere Pellets. Erfinder: COMPACT Heiz- und Energiesysteme Ges.m.b.H. Anmeldung: 2002. Deutschland, Patentschrift DE20116362U1
- [41] Brenner für Pelletbrennstoff. Erfinder: Termocabi S.r.l. Anmeldung: 2008. Deutschland, Patentschrift DE20321670U1
- [42] Tischler, Ferdinand. Rost für feste Brennstoffe. Erfinder: Ferdinand Tischler. Anmeldung: 2002, Patentschrift EP1207342A2
- [43] Feuerungsrost für Verbrennungsanlagen insbesondere zur Verbrennung von Pellets auf der Basis von Biomasse. Erfinder: Claus-Peter Faul. Anmeldung: 2014. Deutschland, Patentschrift DE202014101607U1
- [44] Quicker, P. G.; Horst, T.; Weber, K.: Schlussbericht: Stroh-Energie.NRW. Konfektionierte Stroh brennstoffe für innovative Feuerungen Doppelstrategie zur energetischen

- Verwertung von Stroh. ETN Projektträger Energie, Technologie, Nachhaltigkeit. Jülich, 2015
- [45] Schütte, A.: Förderung der Strohnutzung in Deutschland. (Reihe: 2. Int. Fachtagung "Strohenergie". Berlin, 2012
- [46] Carvalho, L.; Wopienka, E.; Pointner, C.; Lundgren, J., Verma, V.K.; Haslinger, W.: Performance of a pellet boiler fired with agricultural fuels. In: Appl. Energy. 104. Jg., 2013, S. 286–296
- [47] Wopienka, E.; Carvalho, L.; Eder, G.; Emhofer, W.; Fiedl, G.; Schwabl, M.: Strohpellets für Kleinfeuerungsanlagen. Berichte Aus Energie- Und Umweltforsch, 2009
- [48] Hiendlmeier, S.: Heizen mit Getreide Stroh und Co - Brennstoffe von der Fläche. C.A.R.M.E.N. - Fachgespräch Biomasse-Messe. Straubing, 2009
- [49] DIN EN ISO 17225-6. Anmeldung: 01.09.2014. Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen
- [50] Biotech Energietechnik GmbH: Pelletsheizkessel PZ65RL/69RL. URL: <http://www.biotechheizung.com/uploads/files/Datenblatt/PZ65-69-80RL.pdf> [Stand: 21.06.2019]
- [51] VDI-RichtlinieVDI 3950 Blatt 1. Anmeldung: 2018. Emissionen aus stationären Quellen - Qualitätssicherung für automatische Messeinrichtungen und Auswerteeinrichtungen - Allgemeine Anforderungen
- [52] VDI-RichtlinieVDI 2066 Blatt 1. Anmeldung: 2019. Messen von Partikeln Staubmessung in strömenden Gasen Gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung
- [53] Behling, J.: Untersuchungen zum thermischen Umsetzungsverhalten von makroskopischen Einzelpartikeln aus Holz. Dissertation, 2017
- [54] Evans, D. und Emmons, H.: Combustion of Wood Charcoal. In: Fire Research. 1. Jg., 1977, S. 57–66
- [55] Müllenders, B.: Technische Zeichnung Kugelrostsystem. Emotec GmbH & Co. KG, 2018
- [56] Fiji contributors: Fiji is Just ImageJ. URL: <https://imagej.net/Fiji/Downloads> [Stand: 25.06.2019]
- [57] Gaderer, M. und Spliethoff, H.: Thermische Nutzung von Biomasse und Reststoffen in Deutschland. Übersichtsbeitrag. In: Chemie Ingenieur Technik. 83. Jg., 2011, Nr. 2, S. 1–16
- [58] KWB - Kraft und Wärme durch Biomasse GmbH. KWB - Kraft und Wärme durch Biomasse GmbH. Angebot KWB Multifire, 2017

Anhang

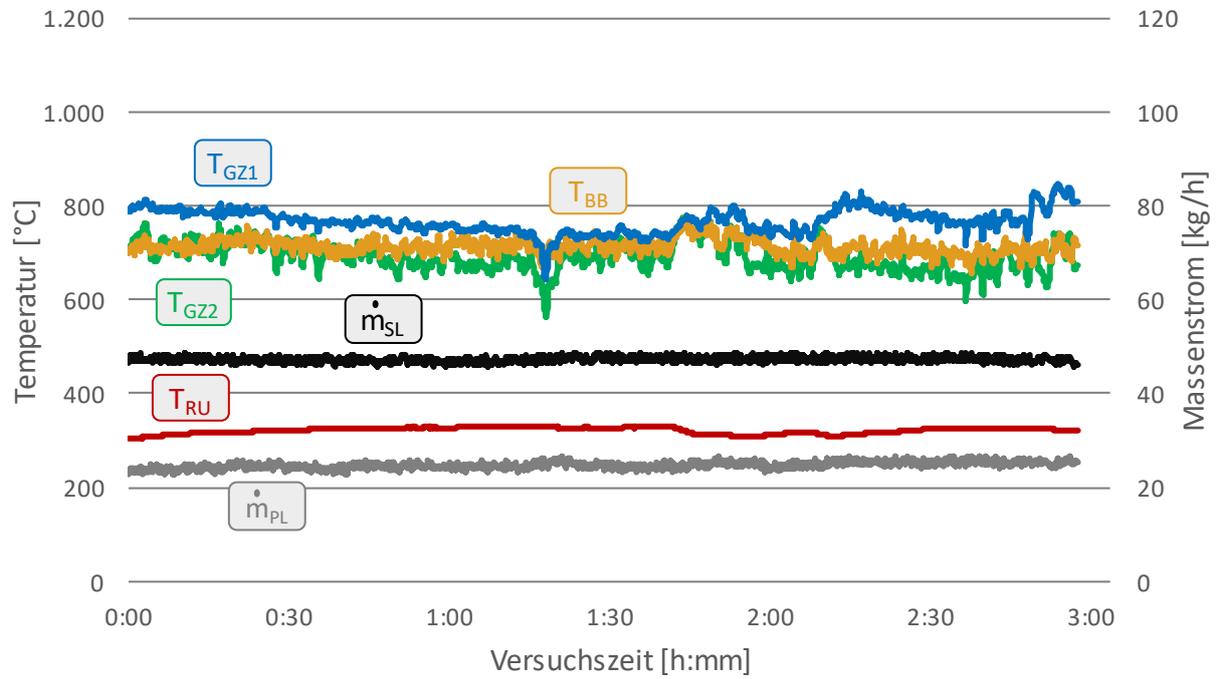


Abbildung Anhang 1: Temperaturen und Luftmassenströme des Versuchs mit 15-mm-Stahlkugeln (1.0616) bei einer Drehzahl von 0,84 min⁻¹ (VP9).

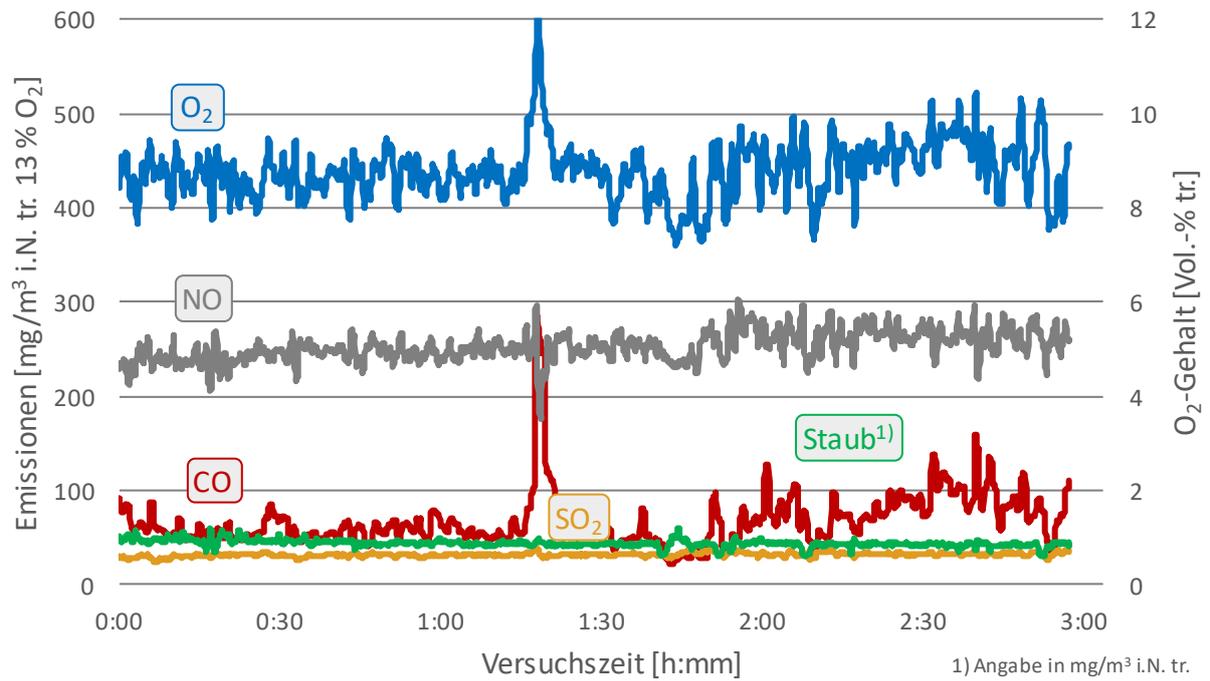


Abbildung Anhang 2: Abgaskonzentrationen des Versuchs mit 15-mm-Stahlkugeln (1.0616) bei einer Drehzahl von 0,84 min⁻¹ (VP9).

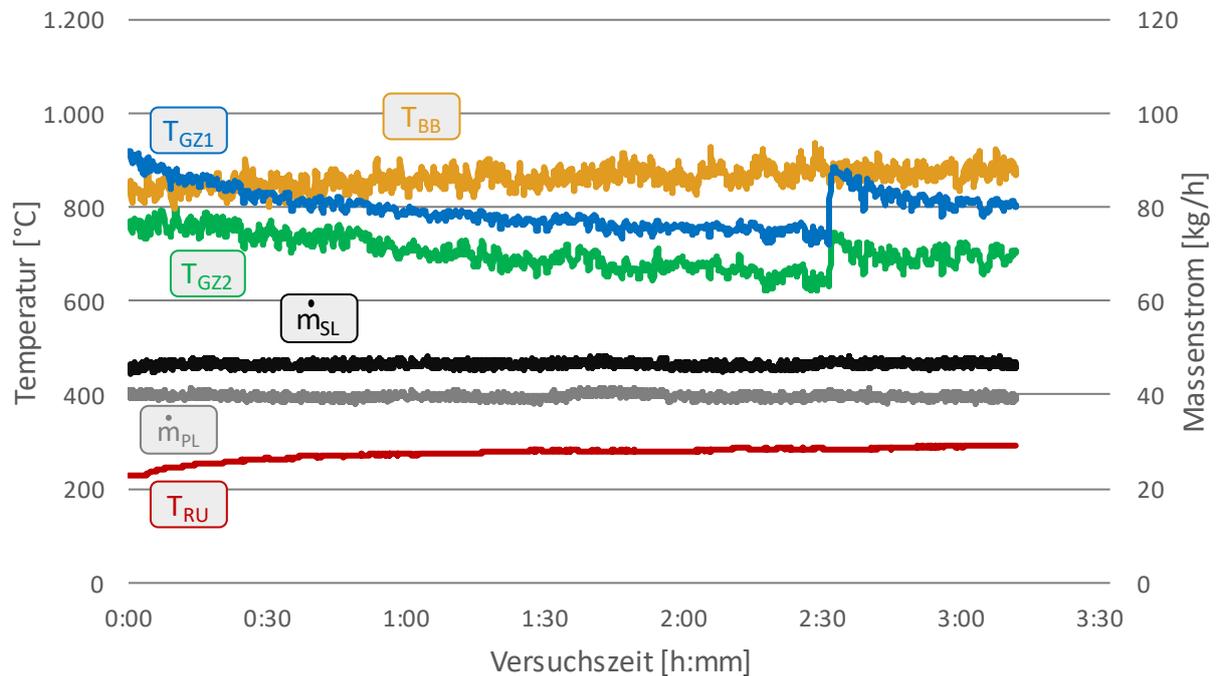


Abbildung Anhang 3: Temperaturen und Luftmassenströme des Versuchs mit 15-mm-Keramikkugeln bei einer Drehzahl von 0,84 min⁻¹ (VP10).

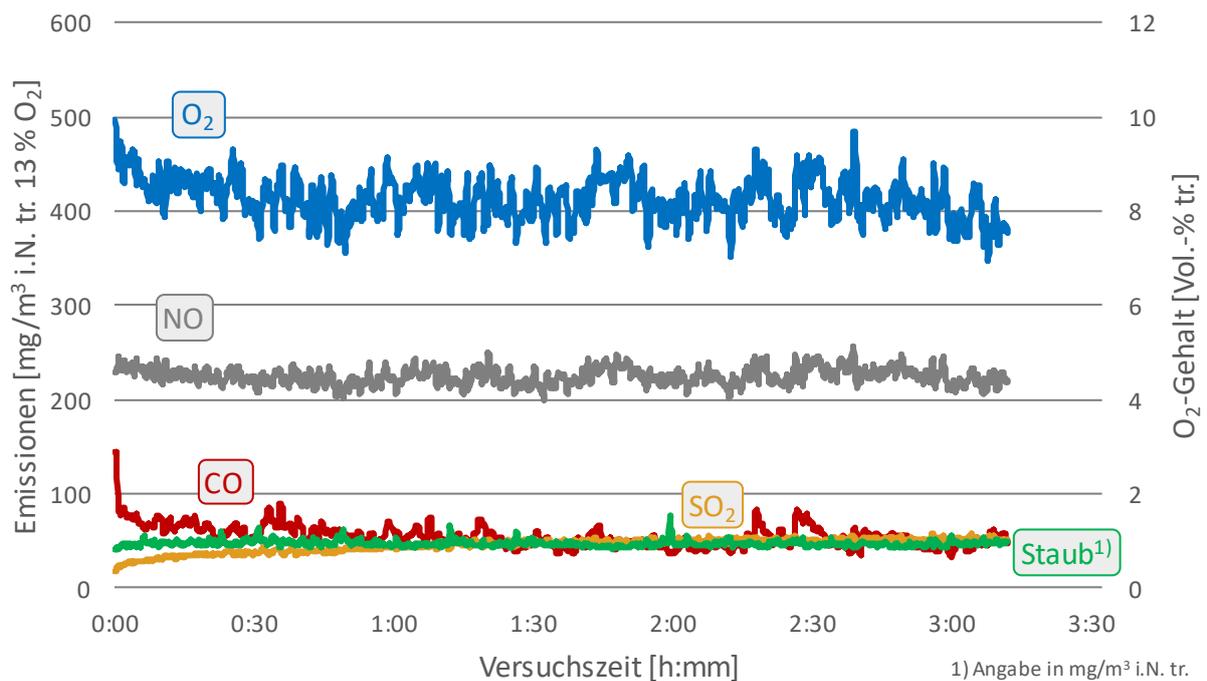


Abbildung Anhang 4: Abgaskonzentrationen des Versuchs mit 15-mm-Keramikkugeln bei einer Drehzahl von 0,84 min⁻¹ (VP10).

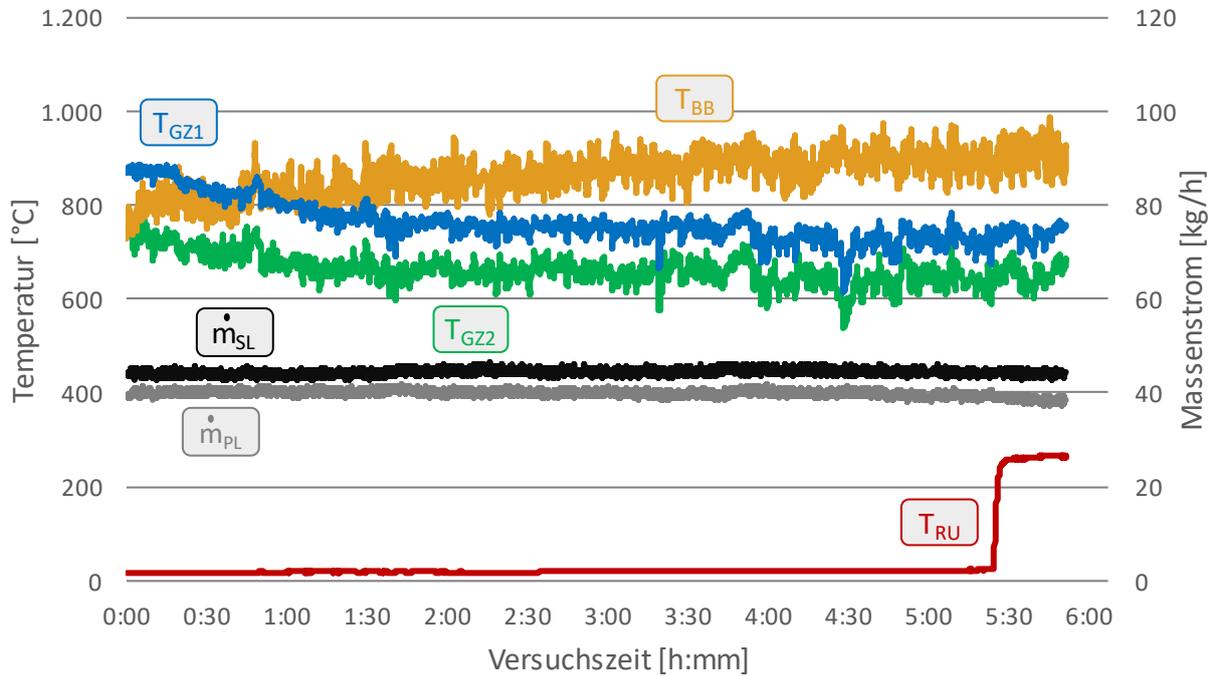
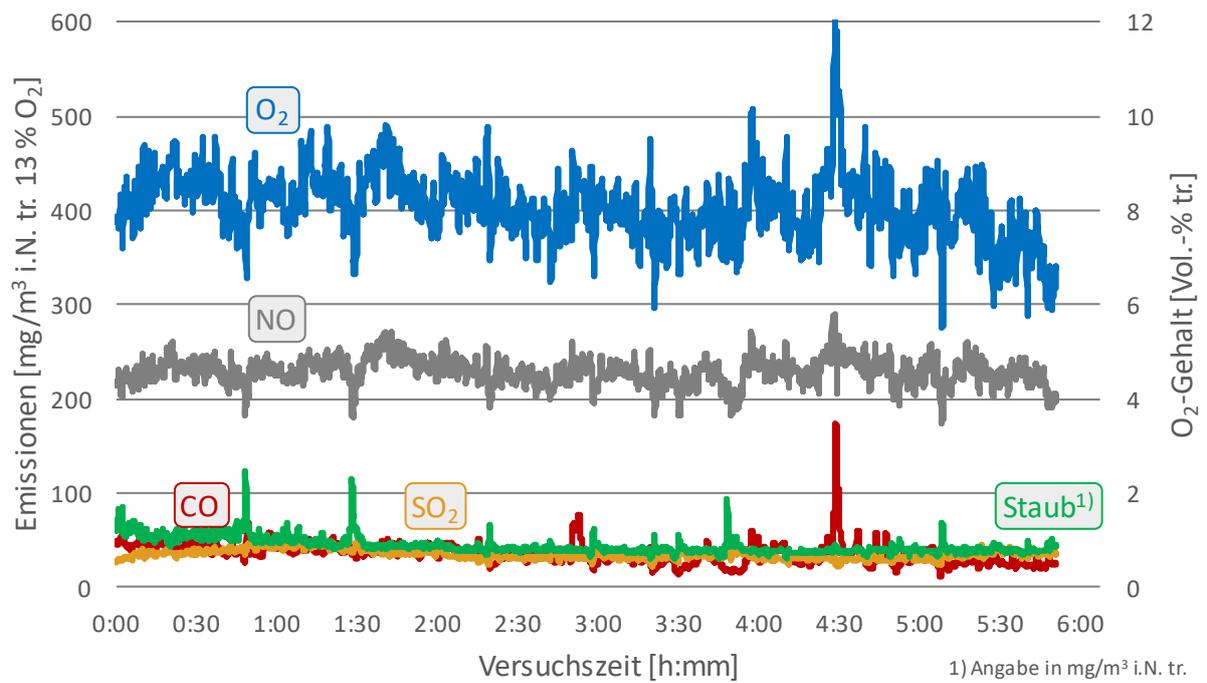


Abbildung Anhang 5: Temperaturen und Luftmassenströme des ersten Einzelversuchs des Langzeitversuchs mit 15-mm-Edelstahlkugeln bei einer Drehzahl von 0,84 min⁻¹ (VP11.1).



1) Angabe in mg/m³ i.N. tr.

Abbildung Anhang 6: Abgaskonzentrationen des ersten Einzelversuchs des Langzeitversuchs mit 15-mm-Edelstahlkugeln bei einer Drehzahl von 0,84 min⁻¹ (VP11.1).

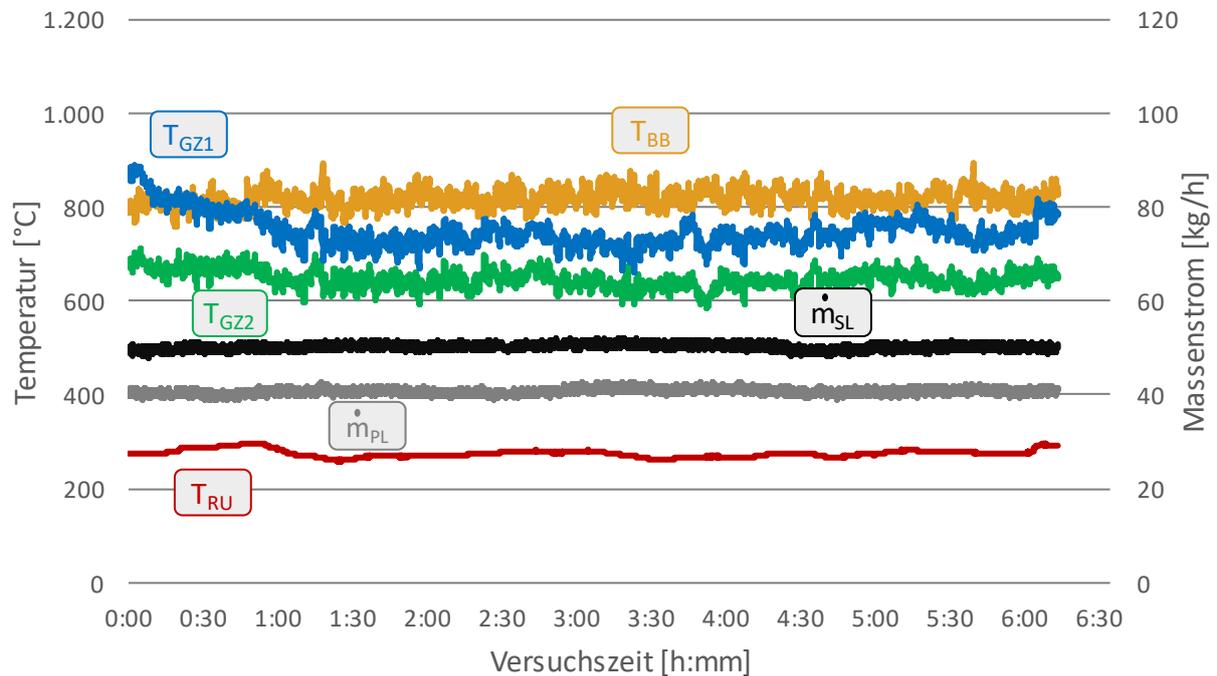


Abbildung Anhang 7: Temperaturen und Luftmassenströme des zweiten Einzelversuchs des Langzeitversuchs mit 15-mm-Edelstahlkugeln bei einer Drehzahl von 0,84 min⁻¹ (VP11.2).

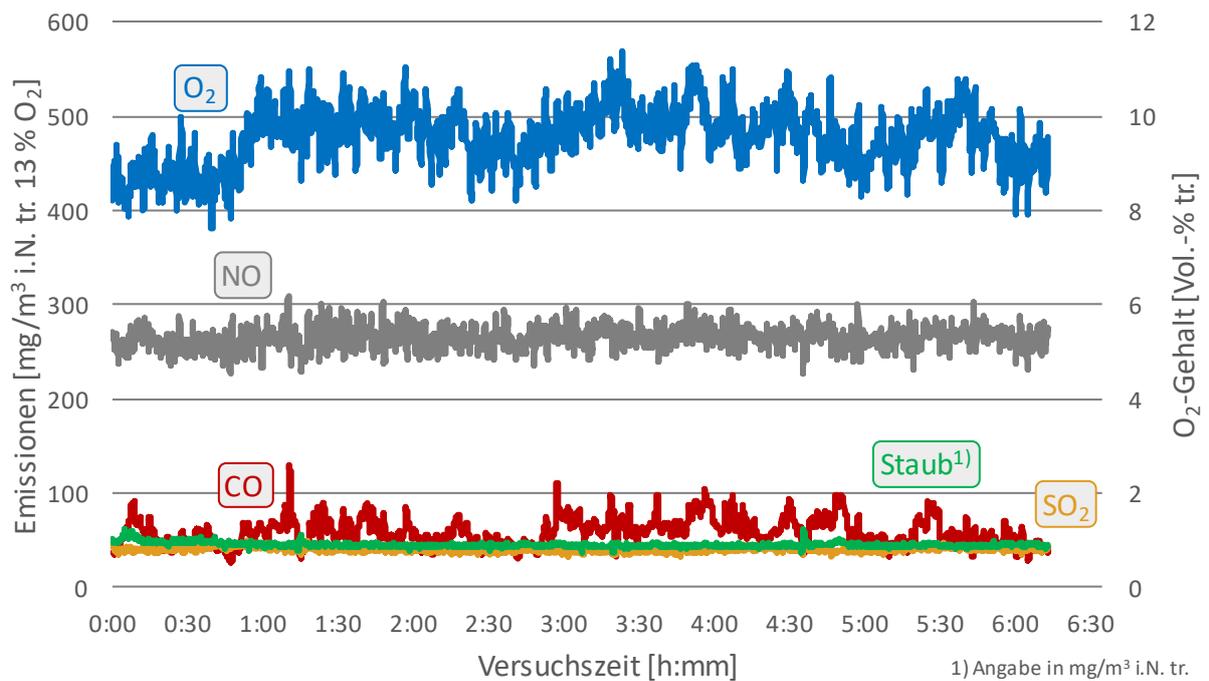


Abbildung Anhang 8: Abgaskonzentrationen des zweiten Einzelversuchs des Langzeitversuchs mit 15-mm-Edelstahlkugeln bei einer Drehzahl von 0,84 min⁻¹ (VP11.2).

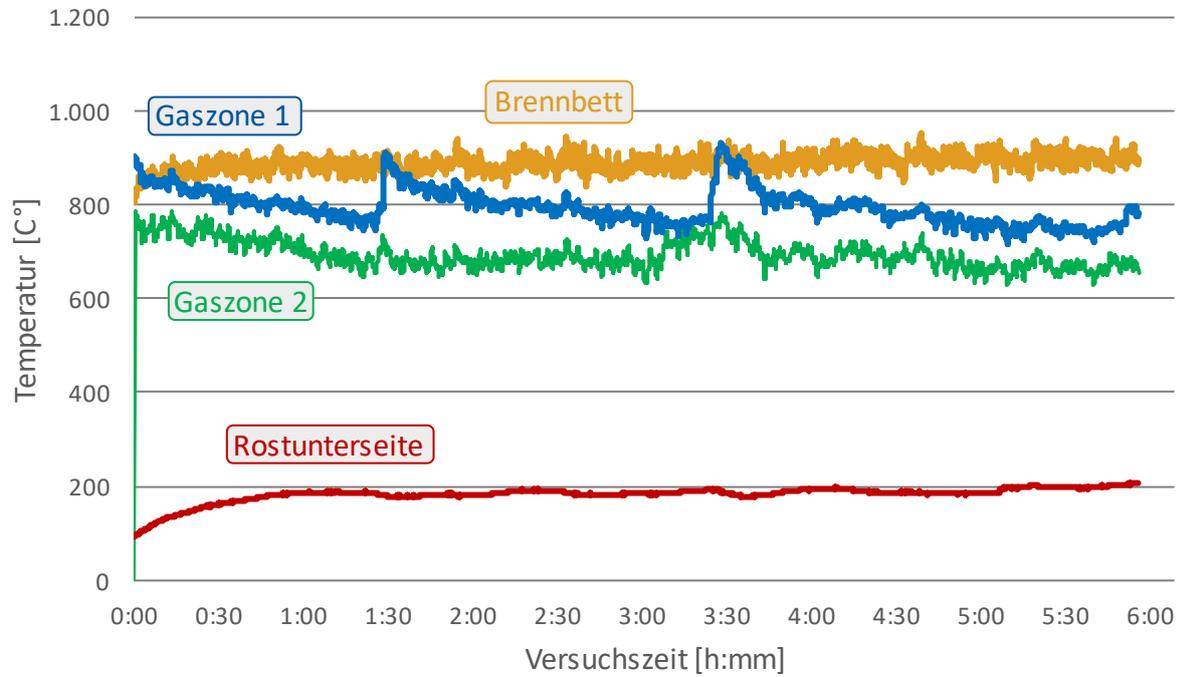


Abbildung Anhang 9: Temperaturen und Luftmassenströme des dritten Einzelversuchs des Langzeitversuchs mit 15-mm-Edelstahlkugeln bei einer Drehzahl von 0,84 min⁻¹ (VP11.3).

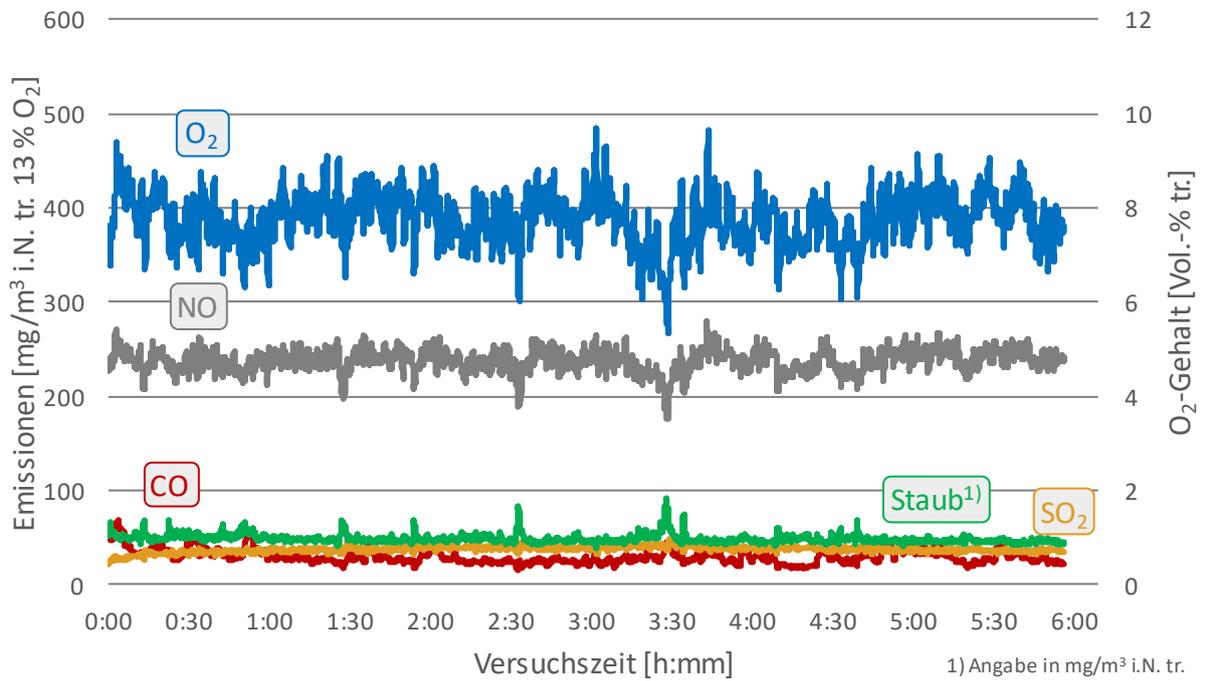


Abbildung Anhang 10: Abgaskonzentrationen des dritten Einzelversuchs des Langzeitversuchs mit 15-mm-Edelstahlkugeln bei einer Drehzahl von 0,84 min⁻¹ (VP11.3).

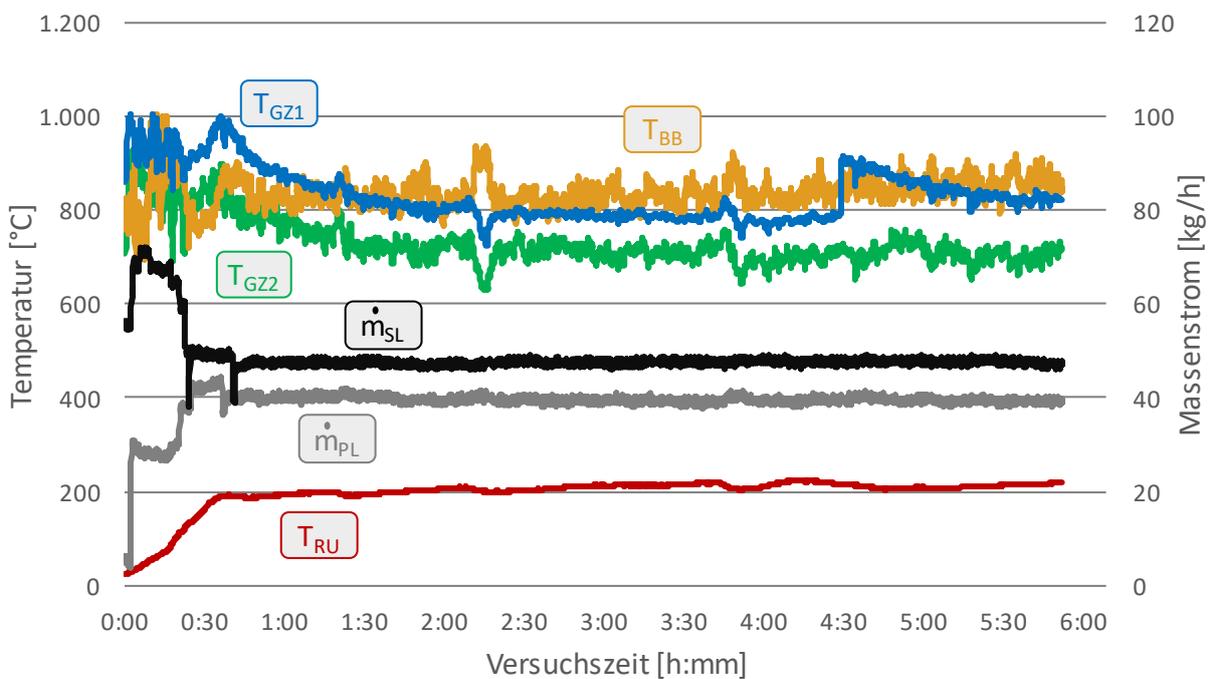


Abbildung Anhang 11: Temperaturen und Luftmassenströme des fünften Einzelversuchs des Langzeitversuchs mit 15-mm-Edelstahlkugeln bei einer Drehzahl von 0,84 min⁻¹ (VP11.5).

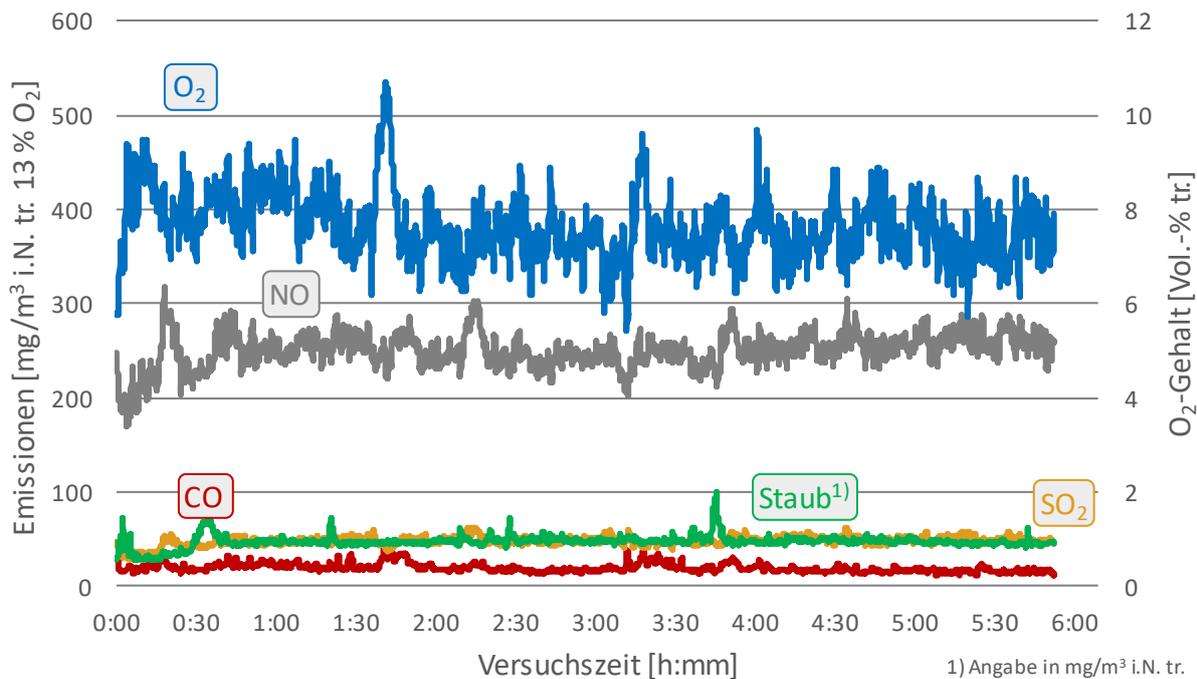


Abbildung Anhang 12: Abgaskonzentrationen des fünften Einzelversuchs des Langzeitversuchs mit 15-mm-Edelstahlkugeln bei einer Drehzahl von 0,84 min⁻¹ (VP11.5).