

Studie zur Entwicklung einer Prüfme- thode zur Beschreibung der Verschla- ckungsneigung von biogenen Brenn- stoffen



**Studie zur Entwicklung einer Prüfmethode zur Beschreibung
der Verschlackungsneigung von biogenen Brennstoffen**

Dr.-Ing. Michael Struschka
M.Sc. Winfried Juschka
cand. B.Sc. mach. Josua Kimmig

Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK)
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart
Tel.: +49 711 685 6 8275
ifk@ifk.uni-stuttgart.de
<http://www.ifk.uni-stuttgart.de>

Studie im Auftrag der
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)
Griesbachstr. 1, 76185 Karlsruhe

März 2016

Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Kenntnisstand	2
2.1	Aschegehalt und dessen Auswirkungen.....	3
2.2	Ascheschmelzverhalten.....	3
3	Laboruntersuchungen im Muffelofen.....	8
3.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung.....	8
3.2	Ergebnisse beim Muffelofen	9
4	Entwicklung eines neuen Laborofens.....	12
4.1	Anforderungen an den Laborofen.....	12
4.2	Funktionsanalyse.....	12
4.3	Konstruktion - Laborofen 1	14
4.3.1	Aufbau Laborofen 1	15
4.3.2	Messstellen.....	17
4.3.3	Inbetriebnahme Laborofen 1	18
4.4	Konstruktion - Laborofen 2	18
4.4.1	Aufbau Laborofen 2.....	20
4.4.2	Inbetriebnahme Laborofen 2	22
4.5	Messgrößen zur Bewertung von Verschlackungen	23
4.5.1	Zusatzmodule zur Messung von Widerstandskräften	23
5	Versuche mit Laborofen 2	25
5.1	Versuchsreihe 1 - Reproduzierbarkeit der Entgasungsraten.....	25
5.2	Versuchsreihe 2 - Einfluss Verbrennungsluft und Temperatur	27
5.3	Versuchsreihe 3 - Vergleich von Entgasungsraten.....	31
5.4	Versuchsreihe 4 - Messung der Höhenabnahme	31
5.5	Versuchsreihe 5 - Messung der Scherkräfte	33
5.6	Versuchsreihe 6 - Einfluss des Sauerstoffgehalts	35
5.7	Schlussfolgerungen und Brennstoffvergleich	41
6	Zusammenfassung und Ausblick	45
7	Quellenverzeichnis	46
8	Anhang.....	47

1 Einleitung

Bei der thermischen Nutzung von Heu, Stroh und z.B. Resten aus der Getreidereinigung treten bei den meisten bisher am Markt vorhandenen Feuerungsanlagen massive Verschlackungen im Brennraum auf, die dann zu einer Leistungsminderung und zu Betriebsstörungen führen, verbunden mit einem hohen Wartungsaufwand und einem Anstieg der Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung. Dadurch sind diese Brennstoffe für die thermische Nutzung für die Betreiber unattraktiv und finden kaum Verwendung. Dies zeigte sich auch in Untersuchungen zum kürzlich abgeschlossenen Projekt „Emissionsmessungen bei der Verbrennung von Heupellets in einem Heizkessel mittlerer Leistung mit Gewebefilter“, welches im Auftrag der LUBW durchgeführt wurde.

Um das vorhandene energetische Potential diese Brennstoffe zu erschließen, sind neue Feuerungstechniken notwendig. Für die Entwicklung der Feuerungstechnik müssen allerdings mehr Informationen über die Brennstoffeigenschaften in Bezug auf das Entgasungsverhalten und die Verschlackungsneigung vorliegen. Derzeit gibt es kein Prüfverfahren, um die Agglomeration beim Entgasungsvorgang und die Verschlackungsneigung von Biomassebrennstoffe während der Verbrennung richtig vorherzusagen.

Im Rahmen dieser Studie, die inhaltlich an die Verbrennungsversuche mit Heupellets anknüpft und zur genaueren Beschreibung der in diesem Projekt ermittelten Vorgänge dient, soll dieser Sachverhalt näher untersucht und Lösungsansätze zur Charakterisierung dieses Brennstoffverhaltens entwickelt werden. Die Studie soll drei Schwerpunkte beinhalten:

- Übersicht zum Kenntnisstand zur Bildung von Agglomeraten beim Entgasungsprozess und von Verschlackungen bei Biomassen.
- Grundlegende Untersuchungen der Randbedingungen beim Auftreten von Agglomeration während des Entgasungsprozesses und von Verschlackungen während des weiteren Verbrennungsverlaufs. Durchführung von Entgasungsversuchen bei verschiedenen Temperaturen, Aufheizraten und Aufbereitungsarten mit Holz-, Heupellets sowie Weizenkörnern.
- Aufbauend auf den ersten beiden Schwerpunkten soll ein erstes Konzept einer Prüfverordnung erarbeitet werden, die eine Messgröße zur Beschreibung der Verschlackungsneigung von Biobrennstoffen während des Entgasungs- und Verbrennungsvorganges beinhaltet. Im Grundsatz sollen hierbei die Pellets in einer Verbrennungsvorrichtung als lose Schüttung eingebracht werden können. Diese Schüttung könnte z.B. mit einem heißen Luftstrom beaufschlagt werden, um den Verbrennungsablauf einzuleiten. Das Verkleben (Agglomeration) der Pellets und die einhergehende Verschlackung soll dann erfasst werden.

Um die Agglomeration beim Entgasungsvorgang und die Verschlackungsneigung von Biomassen besser bewerten zu können, sollte dieses Verhalten durch eine Messgröße beschrieben werden, die unter praxisähnlicheren Bedingungen als das Ascheschmelzverhalten ermittelt wird. Längerfristiges Ziel sollte hier sein, eine Prüfnorm zu entwickeln und zu beschreiben, die das Verhalten der Brennstoffe in diesen Punkten so gut beschreibt, dass verlässliche Informationen für die Entwicklung von Feuerungstechniken zur Verfügung stehen.

2 Kennnisstand

Nach DIN EN 14961-1 [2010] werden biogene Festbrennstoffe in folgende Hauptgruppen eingeteilt:

- a) holzartige Biomasse
- b) halmgutartige Biomasse
- c) Biomasse von Früchten
- d) definierte und undefinierte Mischungen.

Des Weiteren werden die halmgutartigen Biomassen, welche in dieser Arbeit näher untersucht werden, definiert als nichtholzartige Stängel von Pflanzen, die am Ende der Wachstumssaison absterben. Dazu gehören z.B. Getreidepflanzen und deren Körner.

Die wesentlichen, qualitätsbestimmenden Eigenschaften dieses biogenen Festbrennstoffs lassen sich in drei Gruppen einteilen. Hierzu gehören die Elementzusammensetzung, die brennstofftechnischen und die physikalischen Eigenschaften. Die wichtigsten Qualitätsmerkmale und ihre Einflüsse sind Tabelle 2.1 [Kaltschmitt et al., 2009] zusammengefasst.

Tabelle 2.1 Qualitätsmerkmal von Festbrennstoffen [Kaltschmitt et al., 2009]

Qualitätsmerkmal	wichtigste Auswirkung
Elementzusammensetzung	
Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O)	Heizwert, Brennwert, Luftbedarf Bildung von CO und TOC
Chlor (Cl)	Bildung von z.B. HCl und PCDD/F, Hochtemperaturkorrosion
Stickstoff (N)	Bildung von Stickstoffoxiden (NO _x) und Lachgas (N ₂ O)
Schwefel (S)	Bildung von SO _x , Hochtemperaturkorrosion
Kalium (K)	Hochtemperaturkorrosion, Ascheerweichungsverhalten, Partikelemission
Schwermetalle	Ascheverwertung, Emissionen, katalytische Wirkung bei der PCDD/F-Bildung
Brennstofftechnische Eigenschaften	
Wassergehalt	Heizwert, Lagerfähigkeit, Brennstoffgewicht, Verbrennungstemperatur
Heizwert	Energiegehalt des Brennstoffes, Anlagenauslegung
Aschegehalt	Partikelemissionen, Rückstandsbildung
Ascheerweichungsverhalten	Anlagenbetrieb, Verbrennungsbedingungen, Schlackenbildung, Wartungsbedarf
Physikalische Eigenschaften	
Lagerungsdichte	Transport- und Lageraufwendung, Logistikplanung
Teilchendichte	Verbrennungseigenschaften
Größenverteilung	Rieselfähigkeit, Trocknungseigenschaft, Staubbildung
Feinanteil	Lagerdichte, Lagerfähigkeit, Staubbildung
Abriebfestigkeit	Veränderung der Größenverteilung, Entmischung, Verluste

2.1 Aschegehalt und dessen Auswirkungen

Während der Verbrennung bleiben die nichtbrennbaren Stoffe als anorganischer Rückstand zurück und bilden die Asche. Der Aschegehalt eines Brennstoffs ist definiert als der prozentuale Massenanteil der Trockensubstanz im Brennstoff der nach vollständiger Verbrennung unter festgelegten Bedingungen verbleibt [DIN EN 14775, 2009].

Der Aschegehalt ist ein wichtiges brennstofftechnisches Merkmal mit hoher Bedeutung für die Verbrennung. Dieser hat Auswirkung auf die Schadstoffemissionen und beeinflusst dadurch das Betriebsverhalten der Feuerungsanlage. Zusätzlich steigt mit erhöhtem Aschegehalt in der Regel die Staubfracht im Abgas, weshalb zusätzliche Maßnahmen notwendig werden, um die Emissionsgrenzwerte einzuhalten [Kaltschmitt et al., 2009]. Neben den Schadstoffemissionen kann ein hoher Ascheanfall, speziell bei größeren Feuerungsanlagen, zu steigenden Kosten bei der Entsorgung oder bei der Verwendung der Asche führen [Struschka et al., 2014]. Des Weiteren kann es während der Verbrennung aufgrund der Ascheeigenschaften ebenso zu Problemen im Brennraum kommen. Grund hierfür ist das Überschreiten der charakteristischen Ascheschmelztemperatur, wodurch es im Betrieb von z.B. Pelletheizungen zu Funktionsstörungen kommen kann [Aeckersberg et al., 2011].

2.2 Ascheschmelzverhalten

Vor allem bei der Verbrennung von halmgutartigen Pellets, Getreide und Getreideresten treten bei vielen Feuerungsanlagen aufgrund von Versinterungserscheinungen bzw. Erweichungen der Asche auch Betriebsstörungen auf. Dieser Effekt wird hervorgerufen durch die niedrige Erweichungstemperatur der Aschen [Kaltschmitt et al., 2009]. Dabei verkleben einzelne Aschepartikel im Bereich der Glutzone zu einem Aschekonglomerat, welches stetig wächst. Dies hat zu Folge, dass der Brennraum mit Aschekonglomeraten zuwächst, der Brennstofftransport im Feuerraum und die Luftverteilung in der primären Reaktionszone gestört wird. Dies führt zu lokalen Luftmangelsituationen mit der Folge, dass die Brennstoffentgasung und damit die Wärmeleistung der Feuerungsanlage abnehmen. Hierdurch und durch eine massive Störung der Entaschung kann es sogar zum Stillstand der Anlage kommen [Aeckersberg et al., 2011 und Juschka et al., 2015].

Das Schmelzverhalten von Asche ist ein komplexer Vorgang, denn es kann neben Versinterungen auch zu Schrumpfungen oder Quellungen kommen [DIN CEN/TS 15370-1, 2006 und Boström et al., 2012].

Diese Komplexität wird durch die Temperatureinwirkung und die Temperaturverteilung im Feuerraum, welche eine chemische Zersetzung der ursprünglichen Mineralienverbindungen hervorrufen kann, beeinflusst. Die neuen Verbindungen können wieder neue charakteristische Eigenschaften bezüglich des Ascheschmelzverhaltens aufweisen [Aeckersberg et al., 2011].

Zur Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens fester Biobrennstoffe wird üblicherweise das Verfahren nach DIN CEN/TS 15370-1 [2006] und zur Bestimmung des Aschegehaltes das Verfahren nach DIN EN 14775 [2009] angewendet. Der Aschegehalt des Brennstoffes wird durch Berechnung aus der Einwaage und der rückständigen Masse, welche unter oxidierender Atmosphäre bei 550°C und unter geregelten Bedingungen entsteht, bestimmt. Für die

Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens wird die Asche zu einem Probenkörper gepresst, in einem Ofen erhitzt und auf charakteristische Formänderungen untersucht. Die verschiedenen Phasen während der Schrumpfung des Probenkörpers bei steigender Temperatur sind in Abbildung 2.1 [DIN CEN/TS 15370-1, 2006] dargestellt.

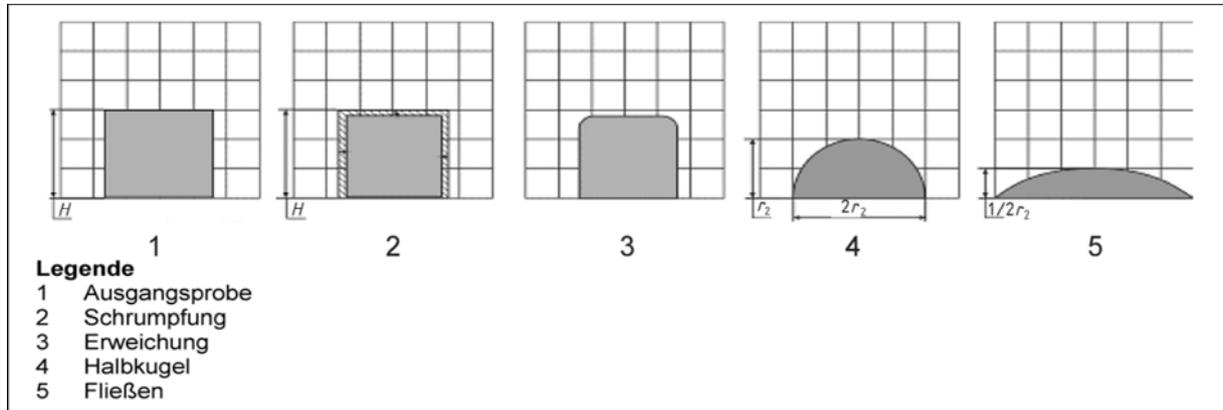


Abbildung 2.1 Phasen während des Schmelzvorgangs der Asche
[DIN CEN/TS 15370-1, 2006]

Sobald eine der vorgegebenen charakteristischen Phasen von dem Probenkörper erreicht wird, muss die dazugehörige Temperatur ermittelt werden. Die Temperaturen sind wie folgt definiert:

Temperatur am Beginn der Schrumpfung (ST)

Temperatur, bei der das Schrumpfen des Probekörpers beginnt

Erweichungstemperatur (ET)

Temperatur, bei der erste Anzeichen einer Abrundung von Kanten des Probekörpers infolge Schmelzens auftreten

Halbkugeltemperatur (HKT)

Temperatur, bei der die Form des Probekörpers annähernd halbkugelförmig wird, d.h. wenn die Höhe gleich der Hälfte des Durchmessers der Grundfläche ist

Fließtemperatur (FT)

Temperatur, bei der die Asche auf der sie tragenden Platte in einer Schicht ausgebreitet ist, deren Höhe die Hälfte der Höhe des Probekörpers bei der Halbkugeltemperatur beträgt.

Da die ermittelten charakteristischen Temperaturen entscheidende Hinweise für das Brennverhalten von Biomassen ergeben, wurden bereits die Einflüsse verschiedener Elemente auf die charakteristischen Temperaturen untersucht. Die Hauptaschekomponenten der verschiedenen Biomassen sind im Wesentlichen Kalium (K), Natrium (Na), Magnesium (Mg), Phosphor (P), Schwefel (S), Eisen (Fe), Aluminium (Al), Calcium (Ca), Silizium (Si), Mangan (Mn) und Chlor (Cl), welche z.B. in Form von Oxiden vorliegen [Tumuluru et al.,

2012]. Da diese Elemente z.T. große Auswirkungen auf die Ascheschmelztemperaturen und somit auch die Verschlackungsvorgänge haben, wurden Ansätze entwickelt, um die charakteristischen Punkte beim Schmelzvorgang der Asche anhand der Aschezusammensetzung zu beschreiben [Boström et al., 2012]. Dazu wurden in Obernberger [2014] (siehe Gleichung 2.1, ermittelt mit unterschiedlichen Biomassen) und Aeckersberg et al. [2011] (siehe Gleichungen 2.2 und 2.3, ermittelt mit Holzpellets) anhand von Brennstoffanalysen (Elemente jeweils als Massenanteile) und statischer Methoden (multiple Regression) Zusammenhänge ermittelt.

$$ST = 102,71 * \frac{Si + P + K}{Ca + Mg} + 1392,2 \quad (2.1)$$

$$ET = 1392,381 + 1,664 * Na - 3,201 * K - 34,663 * Mg + 7,774 * Ca + 2,079 * Fe - 17,943 * Si \quad (2.2)$$

$$FT = 1682,810 + 23,081 * Na - 1,383 * K - 36,725 * Mg + 9,112 * Ca + 5,523 * Fe - 37,180 * Si \quad (2.3)$$

In Gleichung 2.1 ist ein empirischer Zusammenhang der Temperatur am Beginn der Schrumpfung (Sinterbeginn - ST) und der Elemente Silizium, Phosphor, Kalium, Kalzium und Magnesium dargestellt. In Gleichung 2.2 und 2.3 hingegen spielt Phosphor keine Rolle, jedoch wurde ein Einfluss der Elemente Natrium und Eisen auf die Erweichungstemperatur (ET) bzw. die Fließtemperatur (FT) ermittelt. Auffallend ist, dass Kalzium den größten Einfluss zur Erhöhung der Temperatur, und Magnesium und Silizium den größten Einfluss zur Senkung der Temperaturen haben.

In Juschka et al. [2015] wurde für Holz- und Heupellets untersucht, ob die nach Aeckersberg et al. [2011] und Obernberger [2014] errechneten Temperaturen vergleichbar zu den Ergebnisse des Ascheschmelzverfahren nach DIN CEN/TS 15370-1 [2006] sind, siehe Tabelle 2.2.

Tabelle 2.2 Vergleich des Ascheschmelzverhalten von Holz- und Heupellets anhand von Analysen und Berechnungen [Juschka et al., 2015]

	Holzpellets		Heupellets	
	Analyse ³	berechnet.	Analyse ³	berechnet.
Sinterbeginn (ST) °C	1.290	1.300 ²	730	1.032 ²
Erweichungstemperatur (ET) °C	1.370	1.250 ¹	980	952 ¹
Fließtemperatur (FT) °C	1.500	1.693 ¹	1.150	933 ¹

¹ Berechnung für Holzpellet nach [Aeckersberg et al, 2011]

² Berechnung nach Obernberger [2014]

³ nach DIN CEN/TS 15370-1 [2006]

Bei Holzpellets ergab sich eine vergleichsweise gute Übereinstimmung zwischen den analysierten und den berechneten charakteristischen Temperaturen des Ascheschmelzverhaltens. Dies gilt, mit Ausnahme der Temperatur für den Sinterbeginn, auch für die untersuchten Heupellets.

Zur Abschätzung der Auswirkungen der verschiedenen Ascheinhaltsstoffe liegt eine Untersuchung von Ottmann [2006] vor, in der verschiedene Phasendiagramme analysiert wurden, z.B. einige der kritischen Stoffgemische der Asche aus Strohpellets, wie z.B. K_2O - MgO - SiO_2 , siehe Abbildung 2.2. In dem Phasendiagramm ist eine theoretische Schmelztemperatur von ca. 820 °C zu erkennen, wobei der Punkt des am niedrigsten schmelzenden Eutektikums bei 685 °C liegt. Die Temperatur für den Sinterbeginn nach DIN CEN/TS 15370-1 [2006] liegt bei 750 °C und damit im o.g. theoretisch ermittelte.

Mit Hilfe der Phasendiagramme ist es also möglich, eine Abschätzung der Ascheschmelztemperaturen zu treffen. Jedoch können diese Phasendiagramme bei komplexeren Stoffgemischen sehr schnell kompliziert und unübersichtlich werden. Deshalb sind eine richtige Wahl des Phasendiagramms, sowie eine korrekte Interpretation der vernachlässigten Stoffe notwendig [Ottmann, 2006].

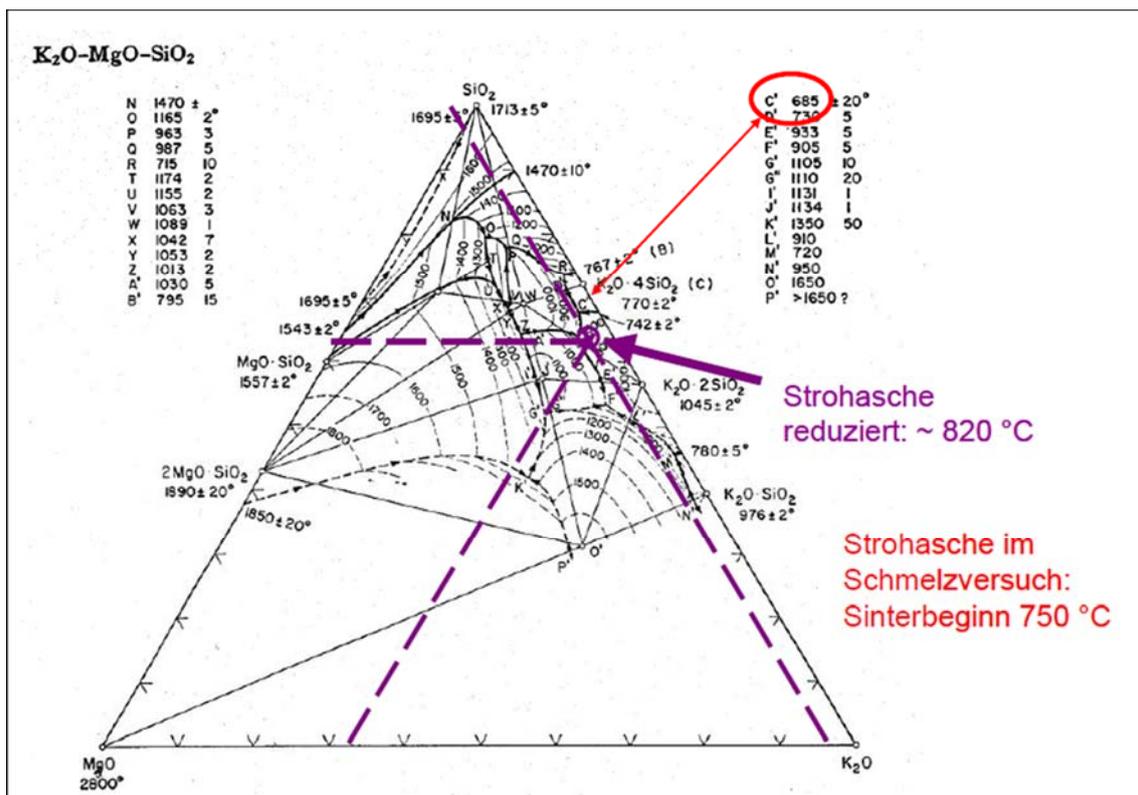


Abbildung 2.2 Phasendiagramm des Stoffgemisches K_2O - MgO - SiO_2 von Asche aus Strohpellets [Ottmann, 2006]

Eine Bewertung der Verschlackungsneigung von Brennstoffen lediglich Anhand des ermittelten Ascheschmelzverhaltens nach DIN CEN/TS 15370-1 [2006] kann unvollständig sein und zu falschen Schlussfolgerungen führen. Dies zeigen die Ergebnisse für Heupellets [Juschka et al., 2015], bei deren Verbrennung eine Verschlackungsneigung vermutet werden muss,

allerdings nicht so stark ausgeprägt, dass sie technisch nicht beherrschbar wäre, siehe Abbildung 2.3. Im Rahmen von Versuchen traten dann doch massive Verschlackungen während des Verbrennungsprozesses auf [Struschka et.al, 2014].

Die Gründe für die starke Verschlackung- und Verschmutzungsneigung von Heupellets wurden erst gegen Ende dieses Vorhaben erkannt. Es wurde beobachtet, dass die eingesetzten Heupellets bereits während des Entgasungsvorganges aneinander haften und große Agglomerate bilden. Dieses Verhalten setzt unmittelbar nach dem Anzünden der Heupellets mit Beginn der Entgasungsreaktionen ein. Im Laufe der Brennstoffentgasung bilden sich immer größere, dichtere und festere Agglomerate, die sich dann auch negativ auf das Abbrandverhalten auswirken.

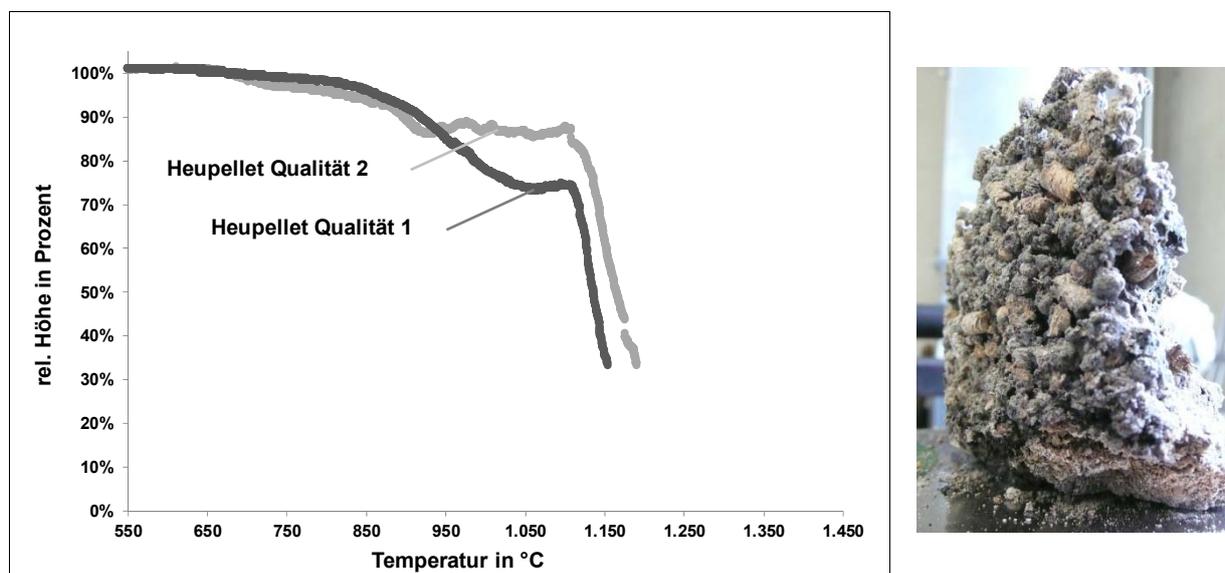


Abbildung 2.3 Ascheschmelzverhalten von Heupellets nach DIN CEN/TS 15370-1 [2006] (links) und Verschlackungen in Feuerungsanlage beim Verbrennen dieser Heupellets (rechts)

Zum einen nimmt die Entgasungsrate in den Agglomeraten ab, was zu einer abnehmenden Feuerungswärmeleistung der Anlage führt und zum anderen verfestigen sich die Agglomerate gegen Ende der Entgasungsphase bzw. mit abnehmender Temperatur.

Genauere Zusammenhänge, Ursachen und Abhängigkeiten dieses speziellen Verhaltens der Heupellets während der Brennstoffentgasung sind bisher nicht bekannt. Die Bildung großvolumiger Agglomerate beim Entgasungsvorgang unterscheidet sich allerdings grundsätzlich von den Vorgängen während der Analysen zum Ascheschmelzverhalten der Brennstoffasche.

Im Rahmen dieser Studie, die inhaltlich an die Verbrennungsversuche mit Heupellets anknüpft und zur genaueren Beschreibung der in diesem Projekt ermittelten Vorgänge dient, soll dieser Sachverhalt näher untersucht und Lösungsansätze zur Charakterisierung dieses Brennstoffverhaltens entwickelt werden.

3 Laboruntersuchungen im Muffelofen

Um die Verschlackungsneigung von fester Biomasse klassifizieren zu können, wurden im ersten Schritt der Untersuchungen einige Versuche in einem Labormuffelofen mit Luft durchgeführt. Als Versuchsbrennstoff wurden Heupellets mit einem Wassergehalt von 7,4 % verwendet. Im Folgenden soll auf den Ablauf, die Randbedingungen sowie die Ergebnisse der Versuche eingegangen werden.

3.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Als Versuchsapparatur diente ein Muffelofen im Brennstofflabor des Instituts. Dieser arbeitet mit einer gemessenen Aufheizrate von durchschnittlich 14,3 °C/min (siehe Abbildung 3.1).

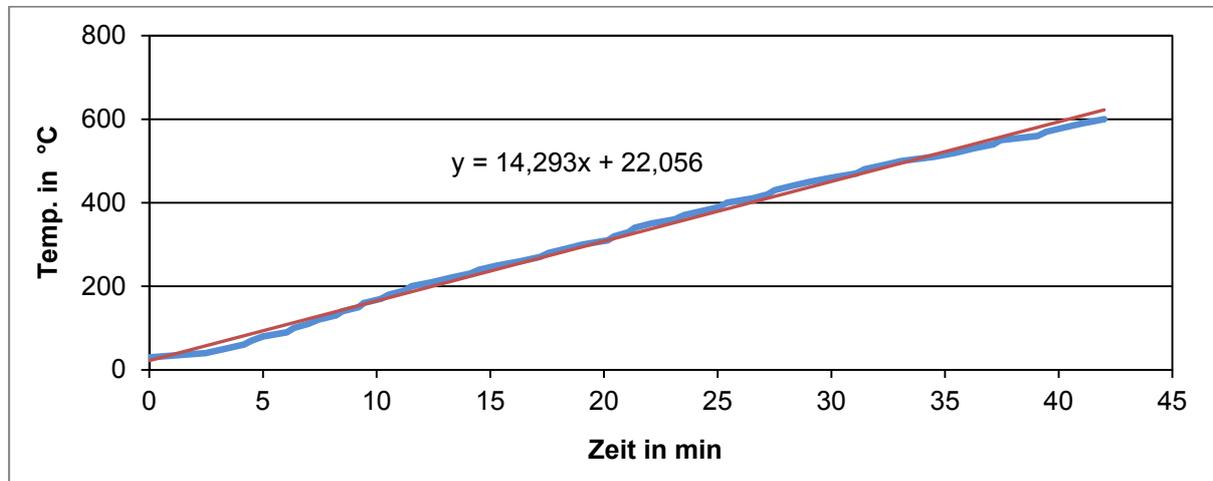


Abbildung 3.1 Aufheizrate des eingesetzten Muffelofens

Bei den Versuchen zur Entgasung / Verbrennung der Heupellets im Muffelofen wurde in folgenden Schritten vorgegangen:

1. Heupellets in Keramikschalen abfüllen
2. Gewicht der Heupellets ermitteln
3. Schale bei festgelegten Versuchsbedingungen in den Muffelofen stellen
4. Schale mit Heupellets nach bestimmter Zeit aus dem Ofen entnehmen
5. Pellets auf Verkleben/ Verschlacken überprüfen
6. Masse der restlichen Pellets ermitteln.

Anhand der Gewichtsabnahme des Brennstoffes während der Aufenthaltszeit im Muffelofen und der Aufenthaltsdauer wird die mittlere Entgasungsrate berechnet.

Bei den Versuchen wurden die Einstelltemperaturen der Brennstoffschälchen in den Muffelofen und die Entnahmetemperatur bzw. die Standzeit variiert. Im Folgenden werden die Ergebnisse der durchgeführten Messreihen beschrieben.

3.2 Ergebnisse beim Muffelofen

Versuch 1

Die Proben wurden bei Raumtemperatur (25 °C) in den aufheizenden Ofen gestellt und bei definierten Temperaturen (300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C) entnommen. Dabei ergab sich eine mittlere Entgasungsrate von $\bar{W} = 1,3 \frac{\text{g}}{\text{min}}$. In Tabelle 3.1 sind die Ergebnisse dieses Versuchs dargestellt.

Tabelle 3.1 Ergebnisse der Versuchsreihe 1 - Entgasung von Heupellets im Muffelofen, Start bei Raumtemperatur, Ofen heizt kontinuierlich auf

Probe	Entnahmezeit in min	Entnahmetemp. in °C	Anfangsgewicht in g	Endgewicht in g	Foto
1	19	300	40,1	33,8	
2	25	400	40,6	14,9	
3	33	500	40,4	10,7	
4	42	600	40,2	9,9	

Versuch 2

Die Proben wurden bei 350 °C in den aufheizenden Ofen gestellt und bei definierten Temperaturen (400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C) entnommen. Dabei ergab sich eine mittlere Entgasungsrate von $\bar{W} = 0,9 \frac{\text{g}}{\text{min}}$. In Tabelle 3.2 sind die Ergebnisse dieses Versuchs dargestellt.

Tabelle 3.2 Ergebnisse der Versuchsreihe 2 - Entgasung von Heupelletts im Muffelofen, Start bei 350 °C, Ofen heizt kontinuierlich weiter auf

Probe	Entnahmezeit in min	Entnahmetemp. in °C	Anfangsgewicht in g	Endgewicht in g	Foto
1	4	400	40,3	35,9	
2	8	500	40,1	10,8	
3	16	600	40,2	10,1	
4	24	700	40,1	9,2	
5	41	800	40,5	7,5	

Versuch 3

Die Proben wurden bei einer Ofentemperatur zwischen 800 °C und 850 °C in den Ofen gestellt und nach definierten Zeiten (3 min, 6 min, 10 min, 15 min) entnommen. Eine mittlere Entgasungsrate konnte nicht ermittelt werden, da die Schalen bei der Entnahme zerbrachen.

Tabelle 3.3 Ergebnisse der Versuchsreihe 3 - Entgasung von Heupellets im Muffelofen bei ca. 800 - 850 °C und variabler Entnahmezeit

Probe	Entnahmezeit in min	Entnahmetemp. in °C	Anfangsgewicht in g	Endgewicht in g	Foto
1	3	800-850	40,3	9,2	
2	6	800-850	40,5	8,6	
3	10	800-850	40,2	-	
4	15	800-850	40,2	-	

Bei den durchgeführten Versuchen im Labormuffelofen konnten keine Anzeichen von Verschlackungen oder Verklebungen zwischen den einzelnen Pellets festgestellt werden. Ähnliche Versuche wurden von Quicker et al. [2014] durchgeführt. Hier kamen Strohpellets mit Additiven zum Einsatz, welche allerdings höheren Temperaturen ausgesetzt waren. In beiden Fällen und unabhängig vom Brennstoff bzw. Additivzusatz konnten unter Laborbedingungen keine Verschlackungsneigungen nachgewiesen werden, obwohl bei hohen Temperaturen mit einem Aufschmelzen der Asche zu rechnen ist.

Auf Grund dieser Versuchsergebnisse kam man schließen, dass Untersuchungen im Laborofen zur Bewertung der Verschlackungsneigung von Biomassen nicht aussagekräftig sind. Die Ursache dafür wird in den nicht realitätsnahen Luftverhältnissen im Brennstoffbereich und der sich daraus ergebenden Entgasungsrate vermutet. Die Umströmung der Pellets mit Verbrennungsluft im Feuerraum scheint einen entscheidenden Einfluss auf die Verschlackung der Pellets zu haben.

4 Entwicklung eines neuen Laborofens

Aufgrund der Ergebnisse im Muffelofen wurde im zweiten Projektschritt ein neuer Laborofen mit dem Ziel konstruiert und entwickelt, die Agglomerationsbildung beim Entgasungsvorgang und die Verschlackungsneigung von Biomassen unter praxisnäheren Bedingungen bewerten zu können. Dafür musste ein Laborsystem entwickelt werden, welches die Verbrennungsbedingungen einer Rostfeuerung möglichst gut abbildet. Entscheidend hierfür sind die Parameter Temperatur- und Luftverteilung im Brennstoffbett.

4.1 Anforderungen an den Laborofen

An die Konstruktion wurden folgende wesentliche Anforderungen gestellt:

- einfaches Laborgerät zur Untersuchung der Verschlackungsneigung von Biomassebrennstoffen
- flexible Einstellung der Temperatur im Bereich von 300 °C bis 600 °C
- Möglichkeit zur Temperaturüberwachung
- flexibel einstellbare Verbrennungsluft im Bereich von 2 m³/h bis 8 m³/h
- Möglichkeit zur Bestimmung der Entgasungsrate, z.B. durch Messen der zeitlichen Gewichtsabnahme des Brennstoffes
- Aufgabe von kleinen Brennstoffmengen im Bereich von 0,3 kg bis 1 kg
- Möglichkeit zur Analyse der verbrannten Pellets sollte gegeben sein (definierte Entnahmemöglichkeit des Verbrennungsreste), Charakterisierung der Verschlackung sollte möglich sein
- Zugänglichkeit für Analyse der Verbrennungsgase
- leichte Montier und Demontierbarkeit des Laborofens.

4.2 Funktionsanalyse

Als erster Schritt der Funktionsanalyse wird die Gesamtfunktion des neuen Laborofens als Black Box dargestellt (siehe Abbildung 4.1). Die zur Funktionserfüllung notwendigen Eingangs- und Ausgangsgrößen werden darin aufgezeigt. Dabei vernachlässigt das Schema als Black Box die innere Struktur und befasst sich in diesem Entwicklungsschritt nur mit den abstrakten Eingangs- und Ausgangsgrößen.

Da das Verbrennungsluftverhältnis die Bildung von Verschlackungen und Agglomerate während des Entgasungsvorgangs stark beeinflusst, wurde eine Abschätzung der sich einstellenden Luftüberschusszahl im Brennstoffbett durchgeführt. Da die Luftüberschusszahl einen gemittelten Wert beschreibt, werden im Folgenden zwei Methoden aufgezeigt, die die Luftüberschusszahl in Abhängigkeit der Brennstoffhöhe beschreiben.

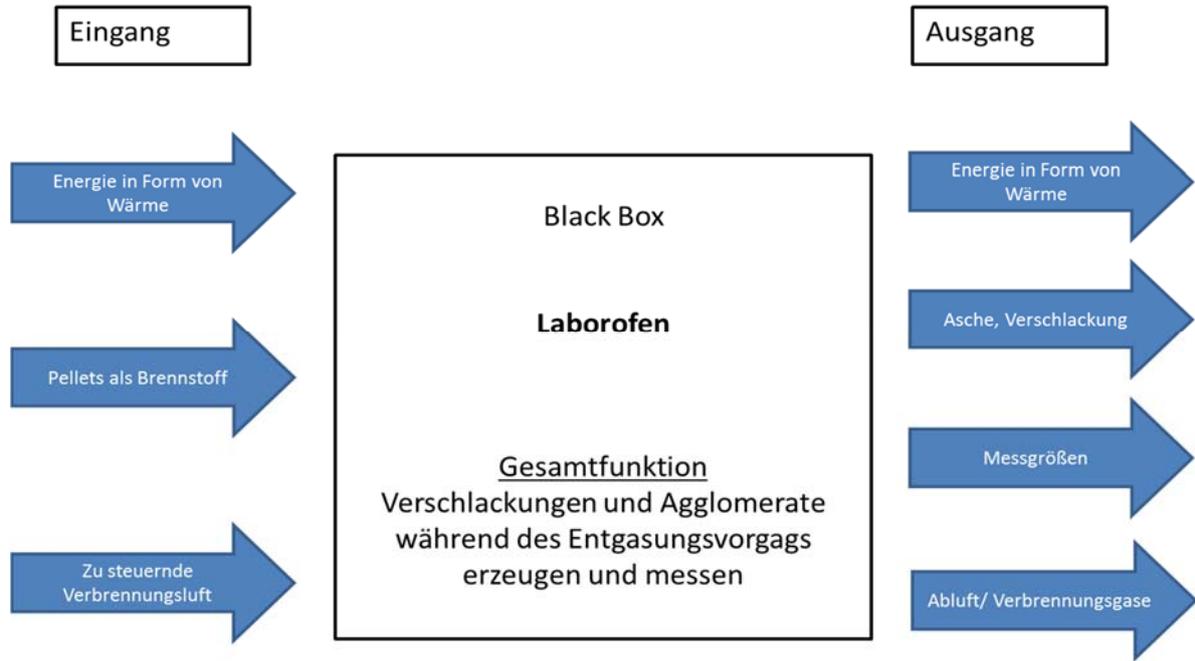


Abbildung 4.1 Schema des Laborofens als Black Box - Darstellung

Abbildung 4.2 zeigt den Verlauf der Luftüberschusszahl λ über der Brennstoffhöhe bei einer lokalen sowie bei einer globalen Betrachtungsweise. Die hierzu benötigten Kennwerte und Berechnungen sind im Anhang aufgelistet.

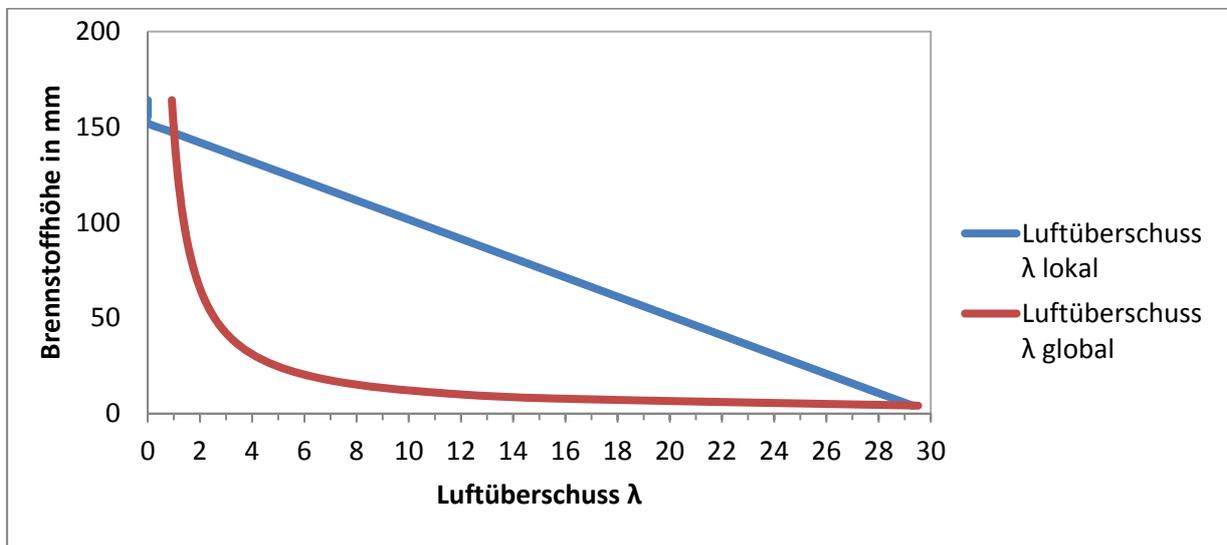


Abbildung 4.2 Berechnung des Luftüberschusses von Heupellets über der Brennstoffhöhe

Lokale Betrachtung:

Bei der lokalen Betrachtung der Luftüberschusszahl wird eine Brennstoffhöhe definiert und diese für die Berechnung und eine Anzahl Schichten unterteilt. Der Brennstoff befindet sich auf einem Rost, Verbrennungsluft wird von unten durch den Rost zugeführt. Es wird davon ausgegangen, dass in der ersten Brennstoffschicht der komplette Luftsauerstoff der Verbrennung zur Verfügung steht. Dies führt zu einer großen Luftüberschusszahl kurz über dem

Rost. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass alle möglichen Oxidationsstufen (C zu CO₂ und H zu H₂O) in der jeweiligen Schicht erreicht werden, solange genügend Sauerstoff vorhanden ist. Dies führt zur linearen Luftsauerstoffabnahme über der Höhe, bis aller Sauerstoff aus der Verbrennungsluft mit dem Brennstoff reagiert hat, vgl. Gleichung (4.1) und (4.2). Dadurch wird der O_{2,Bedarf,i} zu Null und es steht nur noch der Sauerstoff aus dem Brennstoff zur Verfügung.

$$O_{2,Gesamt} = O_{2,Luft} + O_{2,Brennstoff,i} - O_{2,Bedarf,i} \quad (4.1)$$

$$\lambda = \frac{O_{2,Gesamt}}{O_{2,Bedarf,i=1}} \quad (4.2)$$

mit:

- O_{2,Gesamt}: der in der jeweiligen Schicht zur Verfügung stehende Sauerstoff
- O_{2,Bedarf}: vom Brennstoff benötigter Sauerstoff, konstant in jeder Schicht
- i: Anzahl der Brennstoffschichte

Globale Betrachtung:

Bei der globalen Betrachtung wird angenommen, dass der zur Verfügung stehende Luftsauerstoff gleichmäßig auf die Brennstoffhöhe verteilt wird, vgl. Gleichung (4.3).

$$\lambda = \frac{O_{2,Luft} + O_{2,Brennstoff,i}}{O_{2,Bedarf,i}} \quad (4.3)$$

mit:

- O_{2,Luft}: Luftsauerstoff der Verbrennungsluft
- O_{2,Bedarf} und O_{2,Brennstoff}: nehmen mit der Brennstoffhöhe zu
- i: Anzahl der Brennstoffschichten

4.3 Konstruktion - Laborofen 1

Da der zu entwickelnde Laborofen ausschließlich zur Untersuchung der Verschlackungsneigung und Agglomerationsbildung von Biomassen eingesetzt werden soll, wurde eine manuelle Beschickung des Laborofens gewählt. Für die Reaktorgröße wurde ein maximales Schüttvolumen von ca. 2 l festgelegt. Dieses maximale Schüttvolumen wurde als ausreichend bewertet, da die entscheidenden Parameter wie Luftüberschuss und Temperatur dadurch nicht direkt beeinflusst werden. Der Laborofen soll extern beheizt werden, um definierte Entgasungs- und Reaktionstemperaturen einstellen zu können.

Zur Abschätzung der benötigten externen Heizleistung wurde eine Wärmebilanzrechnung durchgeführt. In Gleichung (4.4) sind alle Verlustwärmeströme angegeben, wobei für die Abschätzung der Heizleistung einige Vereinfachungen getroffen wurden.

$$\dot{Q}_{zu} = \dot{Q}_{abluft} + \dot{Q}_{konv} + \dot{Q}_{strahl} + \dot{Q}_{sp} \quad (4.4)$$

Der Laborofen soll mit einer Isolierung versehen werden. Aufgrund der geringen Temperaturen, zwischen 30 °C bis 100 °C an der Außenwand der Isolierung, sollen die Verluste durch Wärmestrahlung vernachlässigt werden. Des Weiteren soll die Wärmespeicherung, welche hauptsächlich die Aufheizrate beeinflusst, für den letztlich betrachteten eingeschwungenen Verbrennungszustand vernachlässigt werden. In Gleichung (4.5) sind die für die Wärmebilanz relevanten Wärmeströme angegeben.

$$\dot{Q}_{zu} = \dot{Q}_{abluft} + \dot{Q}_{konv} = \dot{m} * c_{pLuft} * T_{ab} + \alpha * A_1 * \Delta T + \alpha * A_2 * \Delta T \quad (4.5)$$

Da es an den Schnittstellen der Isolierung zu kleinen Luftspalten kommt, wurde die Annahme getroffen, dass 5 % des Laborofens keine Wärmedämmung aufweisen.

- $A_1 = 0,05 * A$
- $A_2 = 0,95 * A$

Zusätzlich wurden für die Berechnung der benötigten Heizleistung folgende Annahmen getroffen (Details siehe Anhang):

- $T_{ab} = 500 \text{ °C}$
- $\Delta T = 40 \text{ °C}$
- $\alpha = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Die Berechnungen ergaben eine benötigte Heizleistung von $\dot{Q}_{zu} = 1,5 \text{ kW}$, die mit einem elektrischen Heizgebläse erzeugt werden soll. Laut Herstellerangaben können mit dem ausgewählten Heizgebläse Temperaturen zwischen 60 - 660°C bei einem Luftstrom von 250 - 500 l/min eingestellt werden, was bei voller Leistung ca. 3,25 kW entspricht. Damit möglichst wenig Wärme in der Ofenmasse gespeichert wird, wurde der Ofen so klein wie möglich ausgeführt. Zur Verringerung der Wärmeverluste durch Konvektion und zum Erreichen einer möglichst konstanten Temperaturverteilung sollen Vermiculitplatten als Isoliermaterial verwendet werden.

4.3.1 Aufbau Laborofen 1

Da bei der Versuchsdurchführung mit einem höheren Aschevolumen, starken Verklebungen und Verschmutzungen an den Reaktorwänden sowie auf dem Rost zu rechnen ist, war das Entwicklungsziel, den Aufbau leicht demontierbar zu gestalten. Auf Grund dessen wurde der Ofen in drei Module aufgeteilt (siehe Abbildung 4.3).

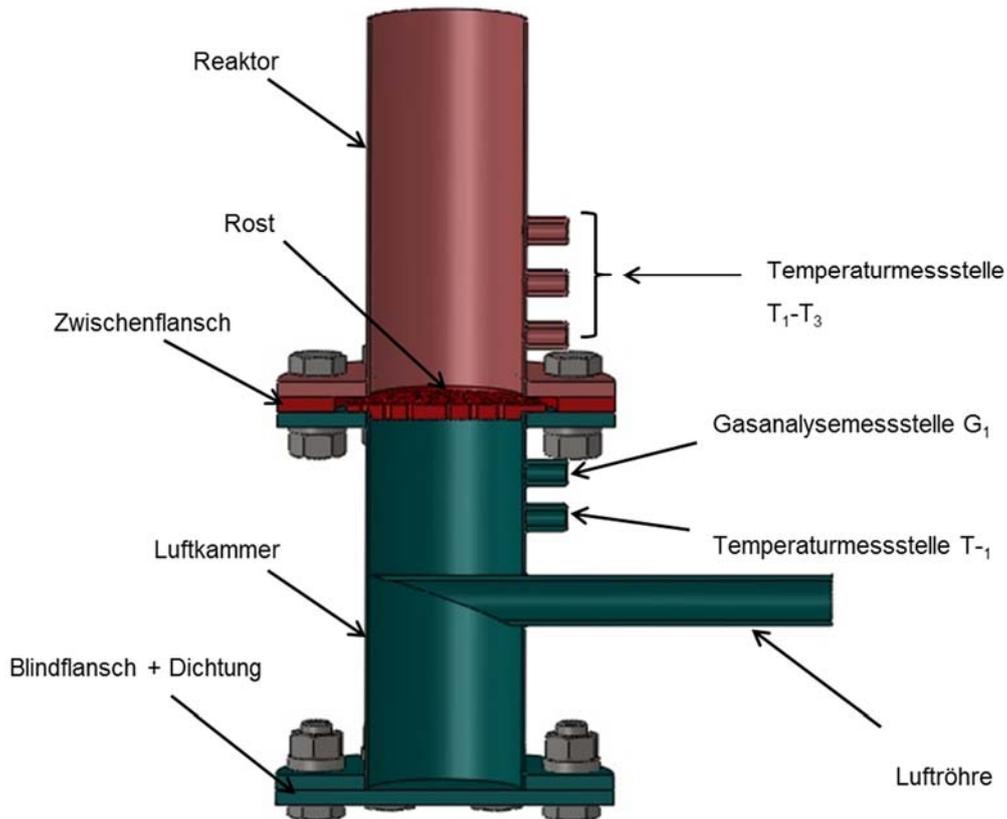


Abbildung 4.3 Aufbau des Laborofen 1

Er setzt sich aus einer Luftkammer mit Luftzufuhr, dem Reaktor und dem Rost zusammen. Um die einfache Montage und Demontage zu garantieren, wurde unten und oben an der Luftkammer jeweils ein Flansch angeschweißt. Das dritte Modul besteht aus dem Rost und einem weiteren Flansch, welcher als Abstandshalter für das Einlegen des Rostes dient.

Diese drei Module werden verschraubt werden, dabei liegt der Rost auf dem Flansch der Luftkammer auf und ist mittels einer Nut gegen das Herausfallen gesichert. Für eine leichte Abfuhr der Asche wird an der Unterseite ein Blindflansch angeschraubt, der zusätzlich auch als Untergestell des Ofens dient. Des Weiteren ist hier eine hochtemperaturfeste Dichtung vorgesehen.

Für den Reaktor des Laborofens wird als Grundmaterial V2A (Edelstahl) verwendet. Dieses Material hat eine hohe Korrosions- und Temperaturbeständigkeit, mit einem Schmelzpunkt von ca. 1.400 °C. Für den Rost, der sehr hohen Temperaturen ausgesetzt ist, wird ein hochwarmfester Stahl gewählt. Um die Wärmeverluste nach außen so gering wie möglich zu halten, wurde eine Isolierung an den Außenwänden des Aufbaus angebracht. Aufgrund der hohen Temperaturen wurde diese Isolierung aus hitzebeständigen und leicht zu bearbeitenden Vermiculitplatten gefertigt. Um den Reaktor wurde eine ca. 80 mm und um die Luftrohre und die Flansche wurde eine ca. 20 mm dicke Dämmschicht gewählt.

4.3.2 Messstellen

Für eine Überwachung und Auswertung der entscheidenden Parameter sind verschiedene Messstellen vorgesehen. Die Luftkammer soll hierzu mit einem Temperatursensor T_{-1} und einem Gassensor G_1 , welche sich knapp unter dem Rost befinden, ausgestattet werden. Dadurch ist es möglich, die Eigenschaften der Verbrennungsluft bezüglich Gaszusammensetzung und Temperatur zu messen.

Um den Temperaturverlauf im Brennstoff während der Verbrennung messen zu können sollen in der Reaktorkammer drei weitere Temperaturmessstellen (T_1 , T_2 , T_3) angebracht werden. Damit ein möglichst exakter Verlauf der Brennstofftemperatur vom Glutbett bis zur oberen Schütthöhe ermittelt werden kann, wurden drei unterschiedliche Höhen für die Messstellen gewählt, siehe Abbildung 4.4. Nach ersten Messungen zeigte sich, dass der Abstand der Thermoelemente zum Rost zu hoch gewählt wurde. Die Thermoelemente wurden dann durch Abkanten auf die folgenden Zielhöhen der Messstellen über dem Rost gebracht: $T_1 = 10 \text{ mm}$ / $T_2 = 45 \text{ mm}$ / $T_3 = 85 \text{ mm}$.

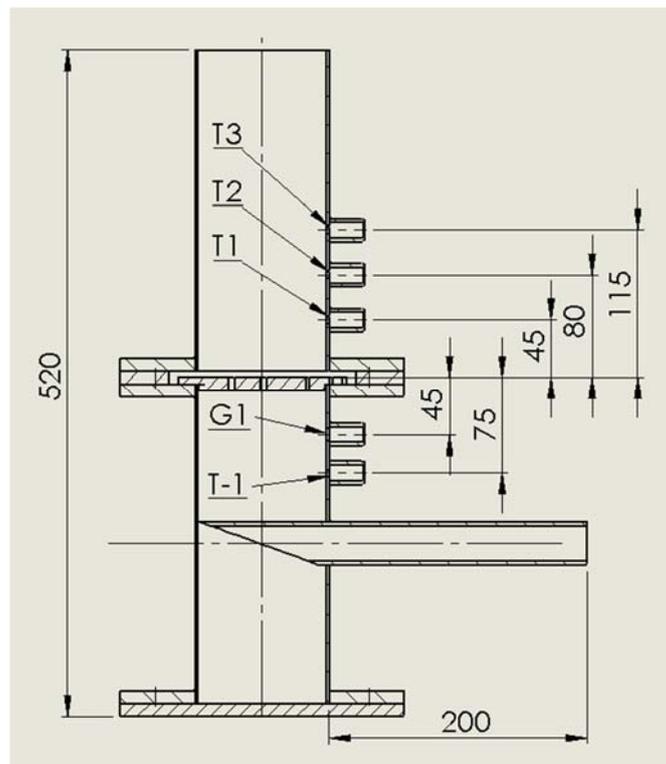


Abbildung 4.4 Anordnung der Messstellen im Laborofen

Für die Temperaturmessung der Verbrennungsluft und des Brennstoffbettes wurden Thermoelemente vom Typ K NiCr-Ni eingesetzt. Der Einsatzbereich dieser Thermoelemente liegt zwischen $-200 \text{ }^\circ\text{C}$ und $1.350 \text{ }^\circ\text{C}$. In dem Messbereich zwischen $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $1.200 \text{ }^\circ\text{C}$ ist die Messgenauigkeit mit $\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ angegeben, bei einer Ansprechzeit von ca. 3 s. Da bei den hier durchgeführten Versuchen im Glutbett hohe Temperaturen entstehen, sind Thermoelemente mit solch hohem Messbereich notwendig. Die angegebene Genauigkeit von $\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ist für den Anwendungszweck ausreichend.

Zur Bestimmung der Entgasungsrate (Gewichtsabnahme über Versuchszeit während des Verbrennungsvorganges) wurde der gesamte Versuchsaufbau auf eine Waage des Typs 3000 Series der Firma Ohaus gestellt. Diese hat einen Messbereich zwischen 0,4 kg und 60 kg, bei einer Messgenauigkeit von 0,02 kg. Da das Schüttvolumen des Versuchsaufbaus auf ca. 2 l begrenzt ist, ist der gegebene Messbereich ausreichend. Allerdings kann mit der Waage der Gewichtsverlust nicht kontinuierlich aufgezeichnet werden, weshalb das Gewicht alle 5 bis 10 Sekunden abgelesen und von Hand dokumentiert wird.

Für die Messung des Volumenstroms der Verbrennungsluft wurde ein Schwebekörperdurchflussmesser aus Kunststoff der Firma ProfiMess eingesetzt. Dieser ist für eine Durchflussmessung bei $p = 1 \text{ bar}$ und $T = 20 \text{ °C}$ im Bereich von 2,5 bis 22 m^3/h ausgelegt.

4.3.3 Inbetriebnahme Laborofen 1

Für die erste Inbetriebnahme des neuen Laborofens kamen nur die Messstellen T_{-1} (unterhalb des Rostes - Verbrennungslufttemperatur) und T_2 (oberhalb des Rostes) zum Einsatz, da dies nur als Funktionstest der Anlage diente und die Parameter Schütthöhe, Gaszusammensetzung und Entgasungsrate nicht berücksichtigt wurden.

Bei voller Heiz- und Gebläseleistung (660 °C und 500 l/min) wurde bei der Inbetriebnahme nach ca. 30 min die maximale Temperatur an Messstelle T_{-1} von ca. 340 °C (siehe Abbildung 4.5) und an Messstelle T_2 von ca. 307 °C erreicht. Diese lagen deutlich unter den geforderten Temperaturen. Aufgrund des deutlich höheren Wärmeverlusts als erwartet, musste die Beheizung des Laborofens überarbeitet werden.

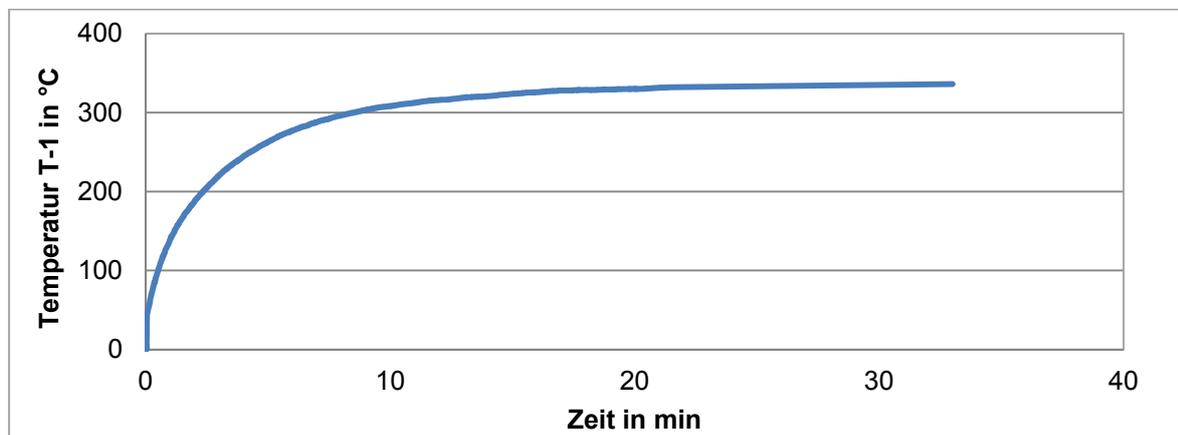


Abbildung 4.5 Aufheizrate Laborofen 1 mit dem Heizgebläse (T_{-1} : Temperatur der Verbrennungsluft)

4.4 Konstruktion - Laborofen 2

Da sich bei der ersten Inbetriebnahme mit Laborofen 1 herausgestellt hatte, dass die Wärmeverluste deutlich größer waren als angenommen, wurde eine erweiterte Version entwickelt. Anhand theoretischer Betrachtungen zur Wärmebilanz des Systems (siehe Anhang) musste eine Heizquelle mit deutlich mehr Wärmeleistung ausgewählt werden.

Zur Neuberechnung der notwendigen externen Wärmeleistung wurden u.a. folgende Randbedingungen für den Betrieb des Laborofens 2 angenommen:

Aschegehalt Heupellets: Aufgrund des im Labor ermittelten Aschegehalts von ca. 10 % bei Heupellets, ist bei den Versuchen mit einer Brennstoffmasse von $m = 850 \text{ g}$ mit einer Restmasse der anorganischen Stoffe nach der Verbrennung von $m_A = 88,8 \text{ g}$ zu rechnen.

Sauerstoffgehalt im Luftstrom: Bei den Versuchen sollen Volumenströme von $3 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, $5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ und $7 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ eingestellt werden. Für einen besseren Vergleich wurde der dazugehörige Sauerstoffstrom in $\frac{\text{mol O}_2}{\text{h}}$ berechnet (siehe auch Anhang).

$$\Rightarrow 3 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \triangleq 28,1 \frac{\text{mol O}_2}{\text{h}}$$

$$\Rightarrow 5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \triangleq 46,8 \frac{\text{mol O}_2}{\text{h}}$$

$$\Rightarrow 7 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \triangleq 65,5 \frac{\text{mol O}_2}{\text{h}}$$

Da eine Heizleistung von ca. 3 kW, wie in der Wärmebilanz zur Auslegung des Laborofens 1 angenommen nicht ausreichend ist für die Einstellung der gewünschten Temperaturen im Reaktor, wurde der Wärmeübergangskoeffizient, aufgrund der ersten Versuchsergebnisse angepasst. Die neu ermittelte Heizleistung ergibt sich aus (Details siehe Anhang):

$$\dot{Q}_{\text{zu}} = \dot{Q}_{\text{abluft}} + \dot{Q}_{\text{konv}} = \dot{m} * c_{p\text{Luft}} * T_{\text{ab}} + \alpha * A_1 * \Delta T + \alpha * A_2 * \Delta T \quad (4.5)$$

$$\dot{Q}_{\text{zu,neu}} = 4,7 \text{ kW} \quad (4.6)$$

Ausgehend von der neu errechneten Leistung wurde als Heizquelle für diesen Aufbau ein 6 kW Propangasbrenner ausgewählt, der sich u.a. besonders wegen seiner Baugröße, den geringen Kosten, der einfachen Anwendung und der hohen Leistungsfähigkeit eignet. Des Weiteren reicht auch der einstellbare Temperaturbereich zwischen 300 und 600 °C aus. Für den Einsatz des Propangasbrenners wurde eine neue Heizkammer entwickelt, mit der die Verbrennungsluft des Laborofens entsprechend vorgewärmt werden kann. Damit die Verbrennungsluft nicht durch die Abgase des Propangasbrenners beeinflusst wird, ist eine von der Verbrennungsluft getrennte Heizkammer notwendig. Der schematische Aufbau des Laborofens 2 ist in Abbildung 4.6 dargestellt.

Für die Steuerung des Verbrennungsluftstroms steht ein Kompressor mit einem nachgeschalteten einstellbaren Drosselventil zur Verfügung. Hierbei dient eine Volumenstromanzeige zur Überwachung des Luftstroms. Bevor die Verbrennungsluft in die Brennkammer gelangt, wird sie im Wärmeübertrager erwärmt. Als Heizquelle dient der Propangasbrenner, dessen Heizleistung an einem Drosselventil eingestellt werden kann.

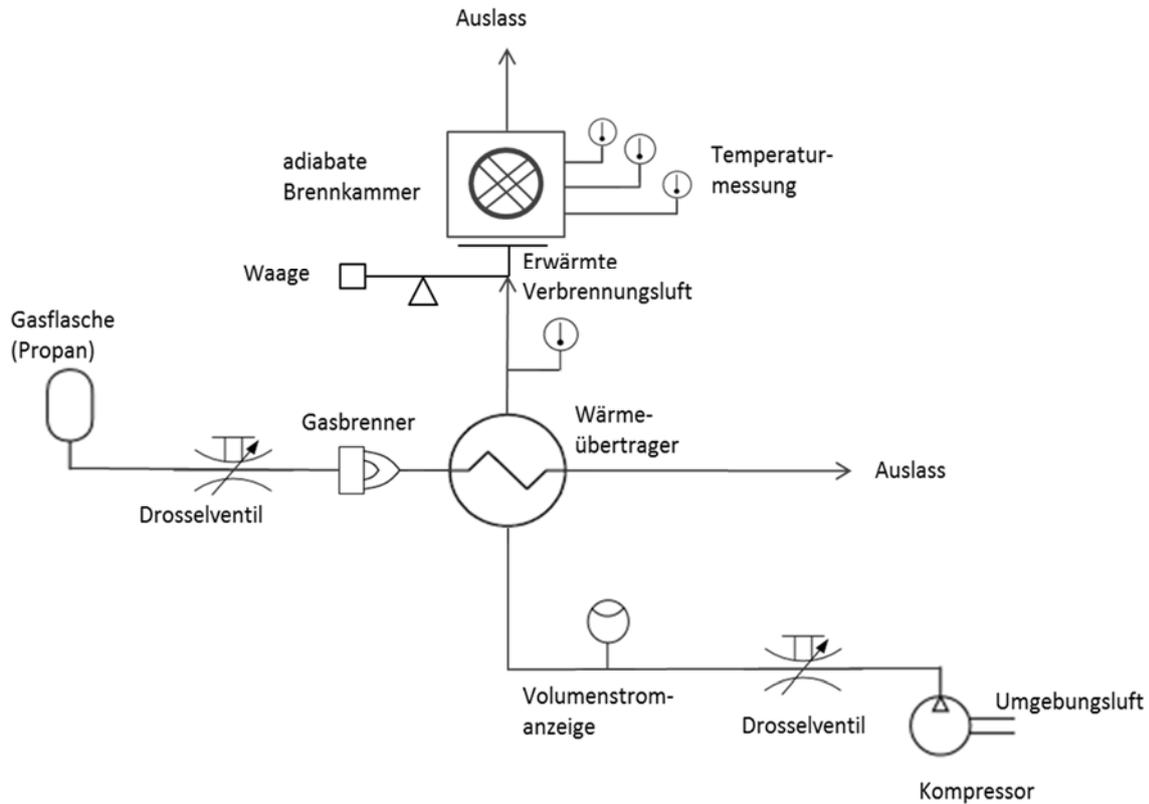


Abbildung 4.6 Schematischer Aufbau des Laborofens 2

4.4.1 Aufbau Laborofen 2

Für eine weiterhin leichte Montage und Demontage der Versuchseinrichtung, wurde eine zusätzliche Verbrennungskammer als geschlitztes Rohr mit einem Ein- und Auslass konstruiert (siehe Abbildung 4.7, oben). Der Vorteil dieser Lösung ist, dass am Laborofen 1 keine weiteren Veränderungen vorgenommen werden müssen.

In Abbildung 4.7 (unten) sind die Gasströmungen für den Propangasbrenner (rote Pfeile) und für die Verbrennungsluft für den Reaktor (blaue Pfeile) eingezeichnet. Der Einlass des Heizgasstroms wurde im unteren Bereich der Luftkammer und der Auslass im oberen Bereich angebracht. Dadurch wird eine gute Umströmung der Wände des Wärmeübertragers gewährleistet und eine gute Erwärmung des Verbrennungsluftstromes für den Reaktor erreicht wird. Die Verbrennungsluft wird weiterhin über die unveränderte Luftröhre dem Wärmeübertrager zugeführt, bevor sie als vorgeheizte Verbrennungsluft für den Reaktor dient.

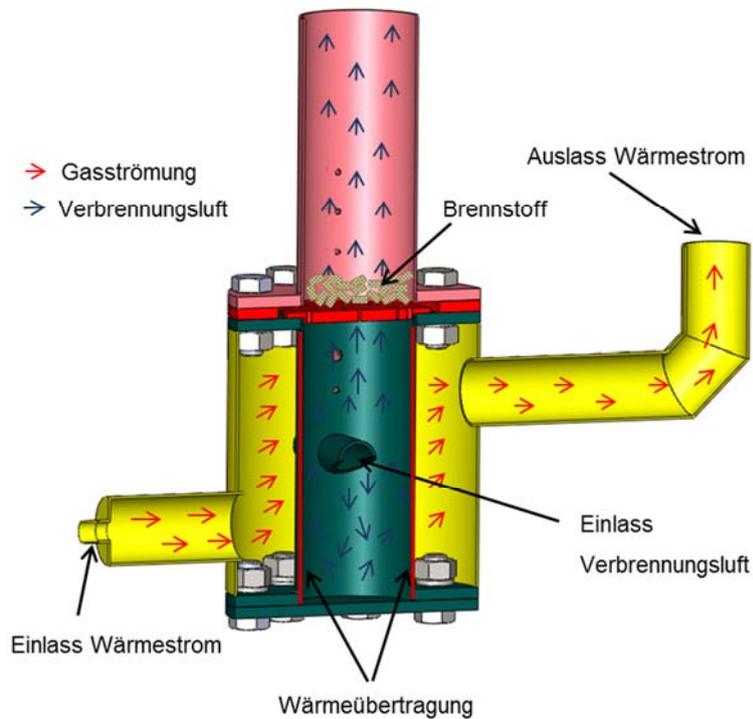
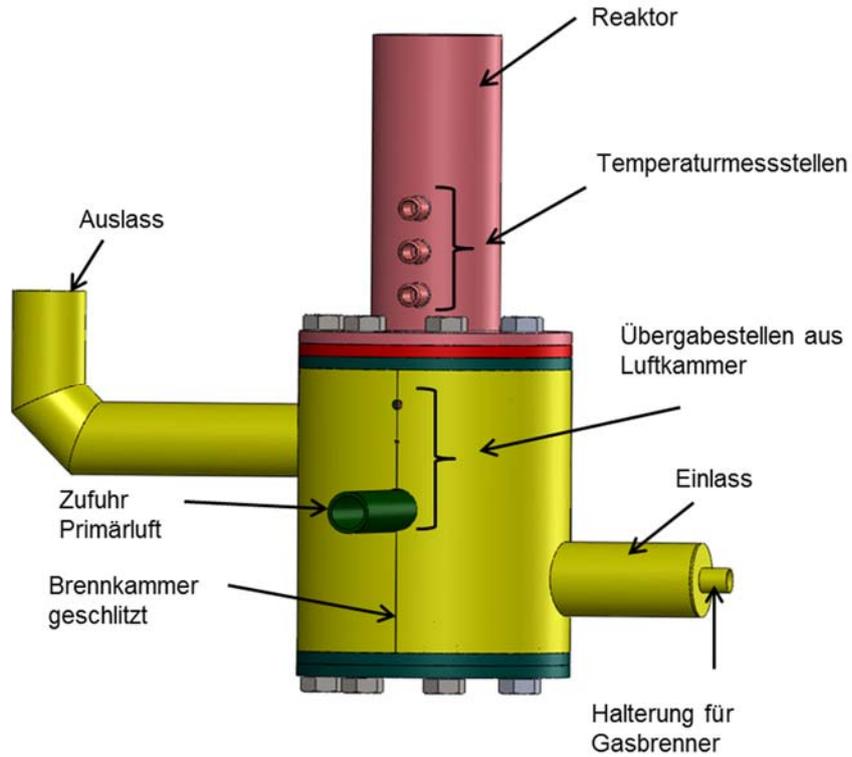


Abbildung 4.7 Aufbau des Laborofen 2 (oben) und Gasströmungen im Laborofen (unten)

4.4.2 Inbetriebnahme Laborofen 2

Abbildung 4.8 zeigt die beim Laborofen 2 gemessene Aufheizrate mit Propangasbrenner im Vergleich zur Aufheizrate mit elektrischem Heizgebläse, welches beim Laborofen 1 eingesetzt wurde. Mit dem Gasbrenner können im Reaktor deutlich höhere Temperaturen erreicht werden als mit dem elektrischen Heizgebläse.

Neben einer guten Aufheizrate mit und hohen Temperaturen hat sich in den ersten Versuchen mit dem Laborofen 2 auch eine gute Reproduzierbarkeit ergeben, vor allem was die Erzeugung von Verbackungen und Verschlackungen betrifft, siehe Abbildung 4.9. Im linken Bild ist eine Ascheaufschmelzung gezeigt, die sich knapp über dem Rost auf Grund zu hoher Temperaturen gebildet hat. Im rechten Bild sind Agglomerate von Pellets zu sehen, die sich über der aufgeschmolzenen Asche befanden.

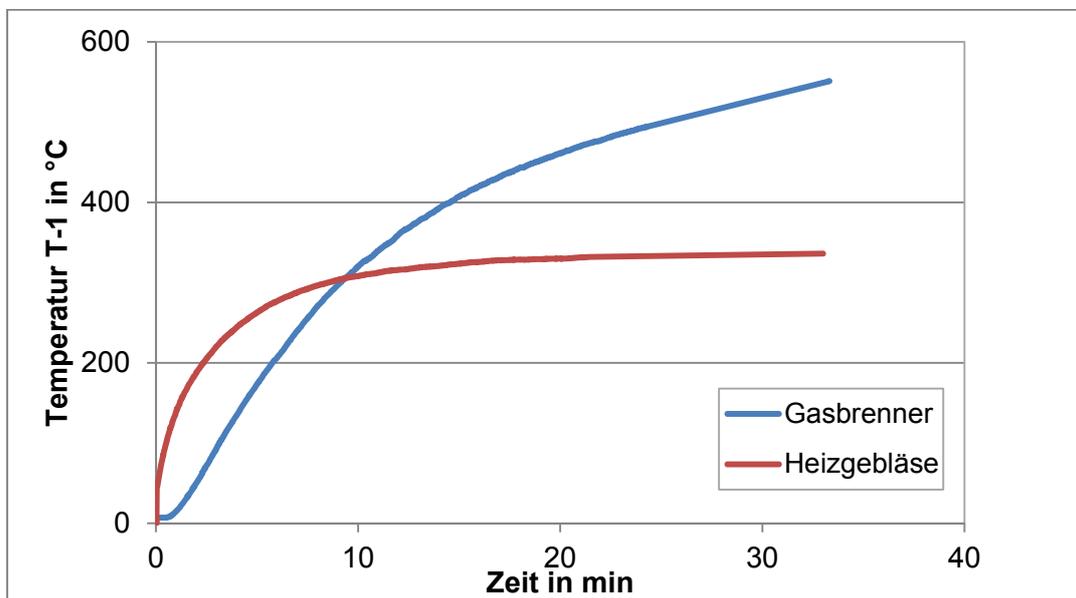


Abbildung 4.8 Aufheizrate Laborofen 2 mit Gasbrenner im Vergleich zum Laborofen 1 mit Heizgebläse (T-1: Temperatur der Verbrennungsluft)



Abbildung 4.9 Inbetriebnahme Laborofen 2 - Ascheschmelze (links) und Agglomerate von Heupellets (rechts)

4.5 Messgrößen zur Bewertung von Verschlackungen

Ein Ziel des Projektes bestand darin zu untersuchen, ob es mit verhältnismäßig einfachen Mitteln möglich ist, die Agglomerationen beim Entgasungsvorgang und die Verschlackungsneigungen von Biomassen während des Verbrennungsvorganges anhand von Messgrößen zu beschreiben.

Hierzu wurde eine Übersicht möglicher Messtechniken erstellt. Im Bereich der Verbrennungstechnik (z.B. bei Rostfeuerungen) konnte keine geeignete Messtechnik ermittelt werden. Deshalb wurde im Gebiet der Flüssigkeitsmessungen recherchiert, um eine mögliche Messtechnik auf die geplante Anwendung bei hohen Temperaturen zu übertragen. Als häufige Anwendungen wurden hierbei folgende Messtechniken ermittelt:

- Dichtemessung durch Bestimmung von Masse und Volumen
- Dichtemessung mittels Ultraschall
- Messung von Widerstandskräften mittels rühren
- Messung von Widerstandskräften aufgrund der Eindringtiefe.

Die Bewertung dieser Messverfahren bzw. der am Markt erhältlichen Messtechniken ergab, dass die Messung von Widerstandskräften aufgrund der Eindringtiefe und an Rührwerken als mögliche Methoden zur Bestimmung der Verschlackungsneigung verwendet werden könnten. Hierzu wurden zwei Ausführungen für den Laborofen 2 entwickelt.

4.5.1 Zusatzmodule zur Messung von Widerstandskräften

Beim ersten Lösungsansatz soll anhand der Eindringtiefe einer Messkugel die Höhenabnahme des Brennstoffes über der Zeit gemessen werden. Anhand eines Weg-Zeit-Diagramms wäre hier zu erwarten, dass der Bildungsbeginn von Verschlackungen oder von größeren Agglomeraten ersichtlich wird, da bei einer ungestörten Vergasung bzw. Verbrennung des Brennstoffes ein kontinuierlicher und stetiger Verlauf dieses Zusammenhanges gegeben sein müsste.

Für die konstruktive Umsetzung wurde, wie in Abbildung 4.10 (oben) zu sehen ist, eine Stahlkugel an einer Gewindestange befestigt, um über eine Haltestange die Brennstoffhöhe nach außen weiterzugegeben. Zur Führung der Gewindestange wurde ein passender Aufsatz entwickelt. Da das komplette Modul sehr hohen Temperaturen ausgesetzt ist (teilweise bis $> 1.000^{\circ}\text{C}$), wurden alle Bauteile aus hochtemperaturfestem Stahl gefertigt.

Beim zweiten Lösungsansatz sollte der Scherwiderstand des Brennstoffs im Glutbett gemessen werden. Beim Auftreten von Verschlackungen oder größeren Agglomeraten wird erwartet, dass dieser deutlich ansteigt. Zur Messung des Scherwiderstandes wurde eine Rührvorrichtung konstruiert, bei welcher das Drehmoment gemessen wird. In einer ersten Ausführung sollte hierbei ein einfaches Modul, ähnlich wie bei der Messung der Höhenabnahme, mit einem speziellen Rühraufsatz verwendet werden, siehe Abbildung 4.10 (unten). Über die Haltestange und einer Kraftmesseinrichtung kann somit manuell der Widerstandsverlauf erfasst werden.

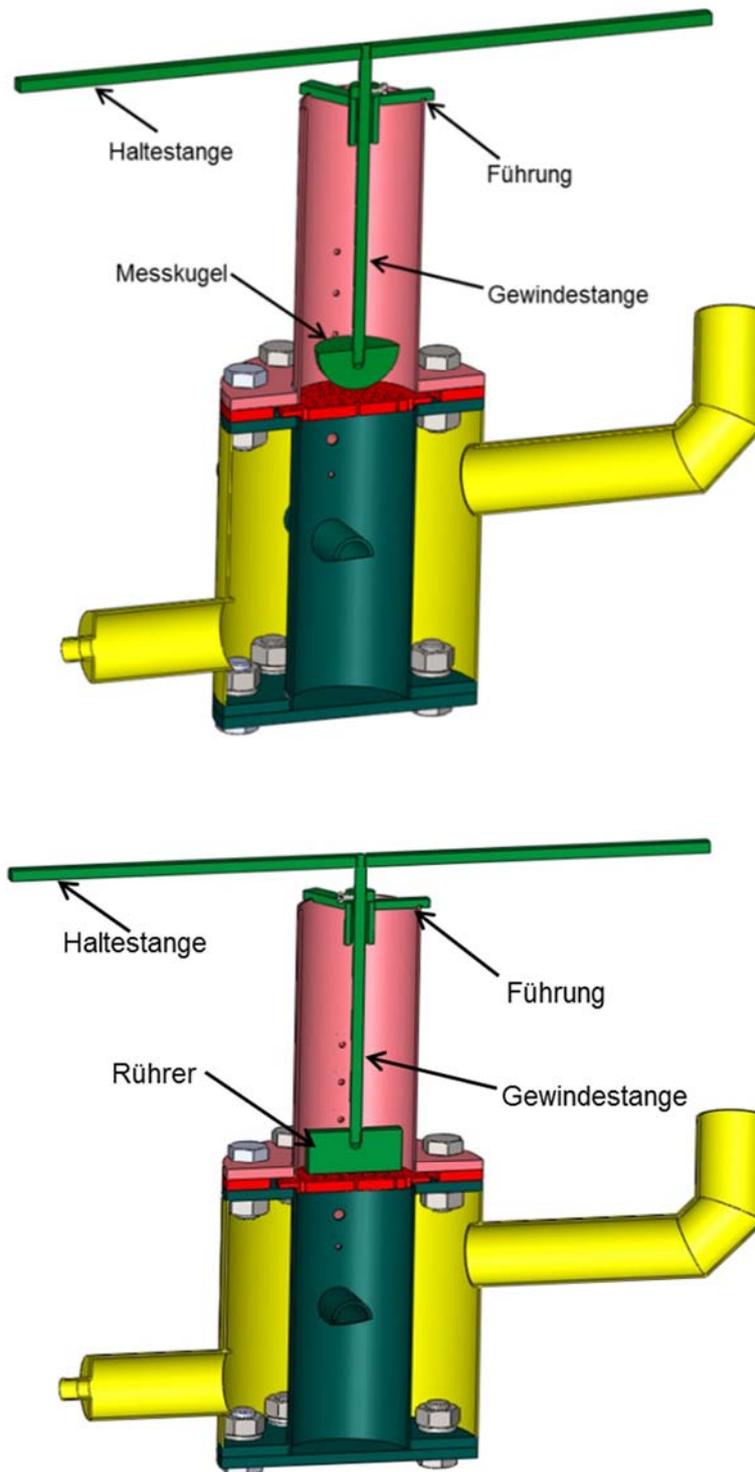


Abbildung 4.10 Laborofen 2 mit Zusatzmodulen zur Bestimmung der Höhenabnahme anhand der Eindringtiefe einer Messkugel (Gewicht Messmodul: $m = 2,3\text{kg}$) (oben) und zur Messung von Scherkräften (unten)

5 Versuche mit Laborofen 2

In mehreren Versuchsreihen wurden die Abhängigkeiten bei der Bildung von Verschlackungen und Agglomerate untersucht. Dazu wurden verschiedene Parameter wie Temperatur, Luftzufuhr und Sauerstoffgehalt verändert und gemessen. Zusätzlich wurden die Einflüsse auf die Entgasungsrate näher betrachtet. Dazu wurde der Laborofen auf 400 °C aufgeheizt, bevor der Volumenstrom und der Gehalt der Verbrennungsluft konstant eingestellt wurden. Anschließend wurden ca. 800 g Pellets eingefüllt und mit dem Messprotokoll begonnen. In Tabelle 5.1 sind die durchgeführten Versuche in der Übersicht aufgelistet.

Tabelle 5.1 Übersicht über die durchgeführten Versuche mit dem Laborofen 2
(T₋₁: Temperatur der Verbrennungsluft)

Kapitel	Untersuchungsziel	Parameter	Beschreibung
5.1	Reproduzierbarkeit der Entgasungsraten	T ₋₁ = 400 °C Ḃ = 5 m³/h i. N.	Ermittlung der Reproduzierbarkeit mit drei Versuchen bei gleichen Bedingungen
5.2	Einflüsse auf die Entgasungsrate	T ₋₁ = 400 bis 550 °C Ḃ = 3 bis 7 m³/h i. N.	Bestimmung der Einflüsse von Temperatur und Volumenstrom der Verbrennungsluft auf die Entgasungsrate
5.3	Vergleich der Entgasungsrate zwischen Holz und Heupellets	T ₋₁ = 400 °C Ḃ = 3 m³/h i. N.	Entgasungsrate der verschiedenen Biomassen bei gleichen Bedingungen bestimmen
5.4	Messung der Höhenabnahme	T ₋₁ = 500 °C Ḃ = 5 m³/h i. N.	Versuch die Verschlackung während der Verbrennung mithilfe der Höhenabnahme zu messen
5.5	Messung der Scherkräfte	T ₋₁ = 400 °C Ḃ = 3 m³/h; 5 m³/h i.N.	Versuch die Verschlackung während der Verbrennung mithilfe des Momentenverlaufs zu messen
5.6	Einfluss des Sauerstoffgehalts	-	Einfluss des Sauerstoffgehalts auf die Entgasungsrate bestimmen

5.1 Versuchsreihe 1 - Reproduzierbarkeit der Entgasungsraten

In der ersten Versuchsreihe war das Ziel, die Reproduzierbarkeit der Entgasungsrate in dem Laborofen 2 zu überprüfen. Hierzu wurden bei gleichen Bedingungen dreimal die Entgasungsraten gemessen und auf Vergleichbarkeit überprüft. Als Grundbedingung für diese Versuchsreihe wurde eine Temperatur der Verbrennungsluft von T₋₁ = 400 °C und eine Luftmenge von $\dot{V} = 5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ bei einer Brennstoffmasse von m = 850 g gewählt.

In Abbildung 5.1 sind drei Versuchsergebnisse dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass zwischen den Messungen nur geringe Abweichungen vorliegen bzw. die Versuchsergebnisse insgesamt gut reproduzierbar sind. Ausgehend von den drei wiederholten Messungen ergibt sich eine maximale Abweichung zum Mittelwert von unter 10 %. Bei allen Versuchen ist der Masseverlust bis zur dritten Minute gering. Dies kann durch die anfängliche Aufheizung und die Trocknung des Brennstoffes erklärt werden. Nach ca. drei Minuten beginnt eine nahezu lineare Gewichtsabnahme, welche ca. neun Minuten anhält und die pyrolytischen Zersetzungen widerspiegelt. Gegen Ende zeigte sich bei allen drei Versuchen ein asymptotischer Gewichtsverlust, der sich dem Gewicht des Aschegehaltes annähert und den Koksabbrand wiedergibt.

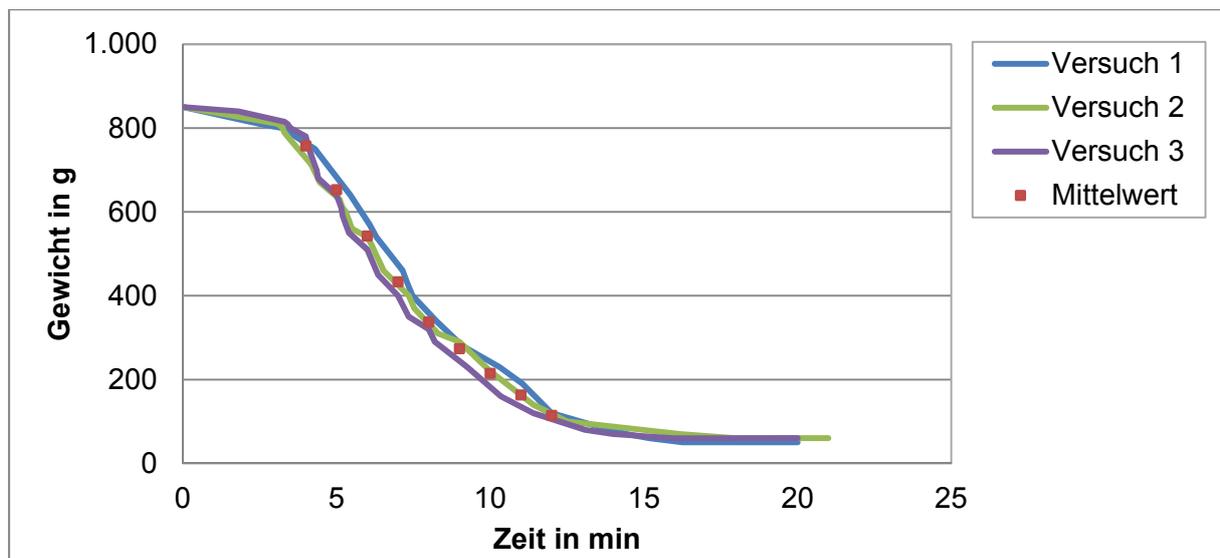


Abbildung 5.1 Versuchsreihe 1 - Vergleich der zeitlichen Massenabnahmen bei $T_{-1} = 400 \text{ °C}$ und $\dot{V} = 5 \text{ m}^3/\text{h}$ von 3 Versuchen mit Heupellets ($m = 850 \text{ g}$) (T_{-1} : Temperatur der Verbrennungsluft)

An den Temperaturverläufen der Messstelle T_{-1} in Abbildung 5.2 ist zu erkennen, dass bei allen Versuchen gleiche Grundbedingungen gewählt wurden. Dabei wurde die Temperatur der Verbrennungsluft auf 400 °C mit einer Genauigkeit von $\pm 40 \text{ °C}$ eingestellt. Die Abweichung im Versuch 1 bei der Messstelle T_1 ist auf eine geänderte Position der Messstelle zurückzuführen (T_1 befand sich 45 mm anstatt 10 mm über dem Rost).

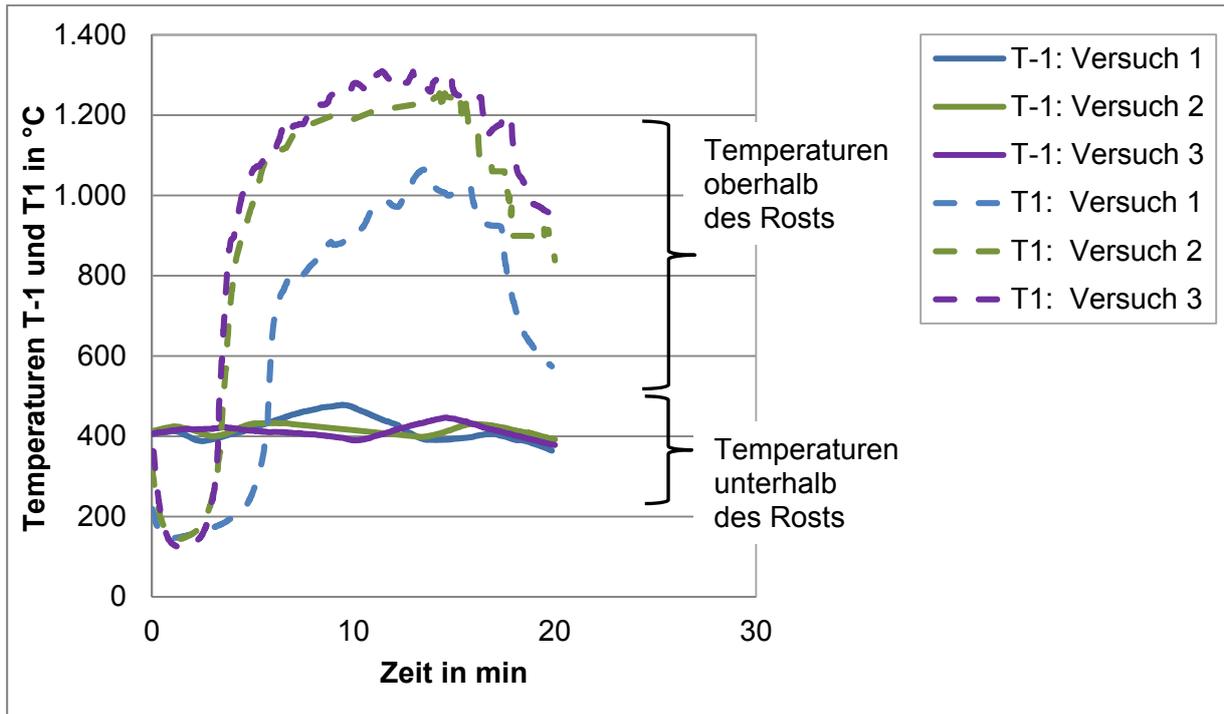


Abbildung 5.2 Versuchsreihe 1 - Temperaturverläufe T_1 bei $T_{-1} = 400^\circ\text{C}$ und $\dot{V} = 5 \text{ m}^3/\text{h}$ bei 3 Versuchen mit Heupellets ($m = 850 \text{ g}$) (T_{-1} : Temperatur der Verbrennungsluft, Temperatur $T_1 = 10 \text{ mm}$ (Versuch 1: $T_1 = 45 \text{ mm}$) über dem Rost)

5.2 Versuchsreihe 2 - Einfluss Verbrennungsluft und Temperatur

Die Verbrennungsluft und der dadurch für die Verbrennung zur Verfügung stehende Sauerstoff nehmen, neben der Temperatur, einen entscheidenden Einfluss auf die Entgasungsrate ein. In dieser Versuchsreihe sind die Auswirkungen von Temperatur und Volumenstrom der Verbrennungsluft auf die Entgasungsrate ersichtlich. Zusätzlich wird der Einfluss der unterschiedlichen Entgasungszustände auf die Verschlackung und die Bildung von Agglomeraten visuell beurteilt.

Einfluss der Verbrennungsluftmenge auf die Entgasungsrate

Abbildung 5.3 zeigt den Masseverlust der Heupellets über der Zeit bei einer Temperatur der Verbrennungsluft von $T_{-1} = 400^\circ\text{C}$, einer Brennstoffmasse von $m = 850 \text{ g}$ und unterschiedlichen Volumenströmen \dot{V} an Verbrennungsluft.

Die gemessenen und dargestellten Massenverluste zeigen, dass sich mit einem größeren Volumenstrom der Verbrennungsluft und dem daraus resultierenden höheren Sauerstoffmassenstrom eine größere Entgasungsrate einstellt. Den oberen Schichten steht mehr Sauerstoff zur Verfügung, sodass hier auch verstärkte Reaktionen stattfinden (siehe Abbildung 5.4, die Temperatur an Messstelle T_2 nähert sich im Abbrandverlauf an die Temperatur der darunterliegenden Messstelle T_1 an). Außerdem wird ein höherer Wärmestrom in der Brennstoffschüttung mit steigendem Volumenstrom erreicht, der eine höhere Temperatur in den oberen Schichten bewirkt, sodass der Brennstoff auch hier schneller entgasen kann.

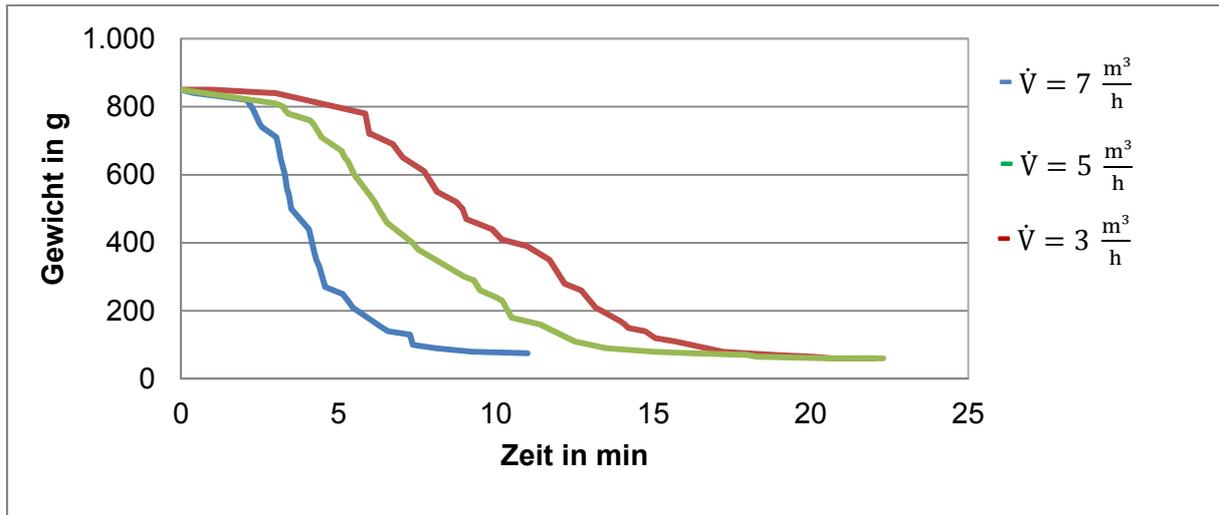
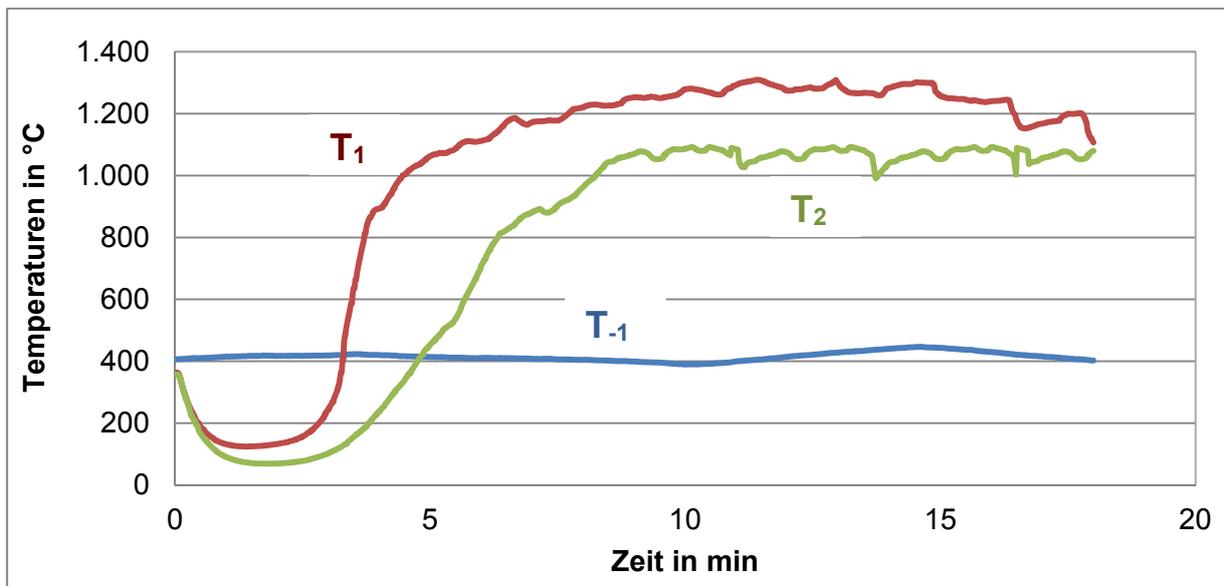


Abbildung 5.3 Versuchsreihe 2 - zeitliche Massenabnahmen bei unterschiedlichen Verbrennungsluftströmen \dot{V} bei $T_{-1} = 400^\circ\text{C}$ mit Heupellets ($m = 850\text{ g}$) (T_{-1} : Temperatur der Verbrennungsluft)



Position Temperaturmessstellen: T_{-1} : Temperatur der Verbrennungsluft unterhalb des Rostes
Temperaturen über dem Rost im Abstand $T_1 = 10\text{ mm}$ und $T_2 = 45\text{ mm}$ (siehe Abbildung 4.4)

Abbildung 5.4 Versuchsreihe 2 - Temperaturverläufe an den Messstellen T_1 und T_2 bei $T_{-1} = 400\text{ °C}$ und $\dot{V} = 5\text{ m}^3/\text{h}$ für Heupellets

Einfluss der Primärlufttemperatur auf die Entgasungsrate

Die folgende Abbildung 5.5 stellt den zeitlichen Masseverlust bei unterschiedlichen Verbrennungslufttemperaturen und einem Volumenstrom der Verbrennungsluft von $\dot{V} = 5\text{ m}^3/\text{h}$ sowie einer in den Reaktor aufgegebenen Brennstoffmasse von $m = 850\text{ g}$ dar. Die gemessenen Massenverluste zeigen, dass eine höhere Temperatur der Verbrennungsluft zu einer schnelleren Entgasungsrate führt.

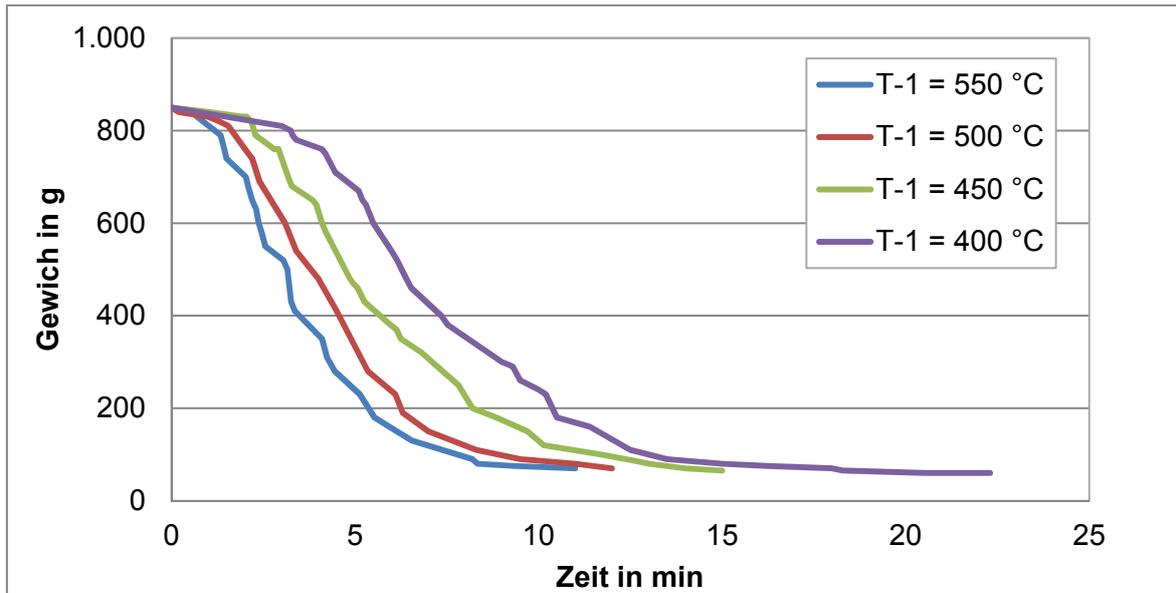


Abbildung 5.5 Versuchsreihe 2 - zeitliche Massenabnahmen bei unterschiedlichen Verbrennungslufttemperaturen und $\dot{V} = 5 \text{ m}^3/\text{h}$ bei Heupellets (T-1: Temperatur der Verbrennungsluft)

Visuelle Bewertung der Verschlackungsneigung:

Während allen Versuchen wurde beobachtet, dass es über dem Rost, auf Grund von Temperaturen von über 1.200°C , zur Aufschmelzung der Asche gekommen ist. Zu sehen ist dies in Tabelle 5.2 (letzte Zeile). Über der aufgeschmolzenen Asche bildeten sich große Agglomerate. Die entgasten und glühenden Pellets zerfielen hierbei nicht in feine Asche, sondern wurden gegen Ende des Entgasungsvorgangs sehr zäh und klebten mit längerer Verweilzeit immer stärker aneinander und bildeten somit immer größere Agglomerate.

Zusätzlich wurde beobachtet, dass sich bei einer schnelleren Entgasungsrate und dem damit verbundenen höherem Sauerstoffgehalt, stärkere Verklebungen gebildet haben. Dies ist in Tabelle 5.2 aufgelistet.

Eine mögliche Erklärung für die hier beobachteten Vorgänge könnten sein, dass es zu Beginn des Masseverlusts zuerst zur Aufspaltung der langkettigen Molekülen kommt, sodass leichtflüchtige und flüchtige Stoffe aus dem Pellet ausdiffundieren können. Erst wenn der Vorgang der pyrolytischen Zersetzung abgeschlossen ist, diffundieren die Sauerstoffatome in die Pellets wodurch es zur Reaktion mit den Kohlenstoffatomen kommt. Da die Reaktion zwischen Sauerstoff- und Kohlenstoffatomen exotherm abläuft wird dabei Energie freigesetzt, wodurch es zu einem Temperaturanstieg und einem möglichen Ascheschmelzen kommt, was sich im Temperaturverlauf in Abbildung 5.4 widerspiegelt.

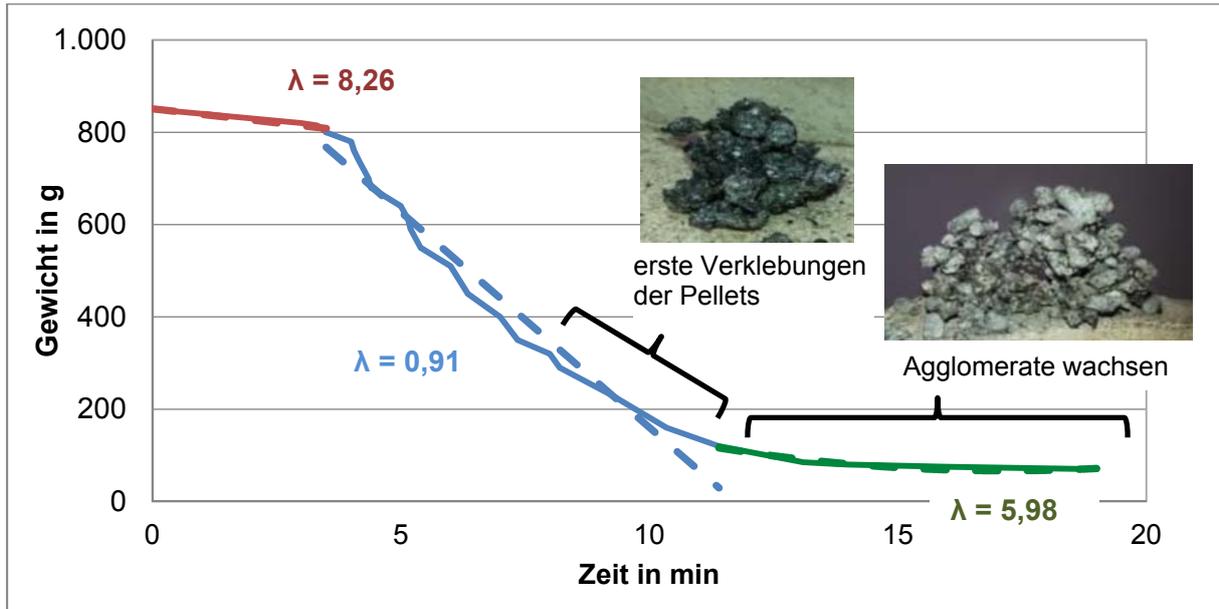


Abbildung 5.6 Versuchsreihe 2 - zeitliche Massenabnahme bei Heupellets für $T_{-1} = 400 \text{ °C}$ und $\dot{V} = 5 \text{ m}^3/\text{h}$ (Berechnung λ siehe Anhang, T_{-1} : Temperatur der Verbrennungsluft)

Tabelle 5.2 Versuchsreihe 2 - resultierende Ascheagglomerate bei unterschiedlichen Verbrennungsluftströmen für Heupellets ($m = 850 \text{ g}$)

Versuch	1	2	3
Verbrennungslufttemperatur T_{-1}	400 °C	400 °C	400 °C
Verbrennungsluftstrom	3 m ³ /h	5 m ³ /h	7 m ³ /h
Agglomerate am Versuchsende im oberen Bereich der Brennstoffschüttung			
aufgeschmolzene Asche unmittelbar über dem Rost			

5.3 Versuchsreihe 3 - Vergleich von Entgasungsraten

In der dritten Versuchsreihe wurden Heu- mit Holzpellets zu vergleichen. Holzpellets sind heute die am häufigsten eingesetzten Pellets. In den meisten Anwendungsfällen gibt es keine Probleme mit massiven Verschlackungen oder der Bildung von größeren Agglomeraten.

Es wurden jeweils mehrere Versuche durchgeführt, die Mittelwerte der Verläufe der Massenverluste der Versuchsreihen ist jeweils in Abbildung 5.7 gezeigt. Holzpellets weisen eine deutlich schnellere Gewichtsabnahme auf als Heupellets. Bei den Versuchen mit Holzpellets traten keinerlei Verschlackungen oder Agglomerate auf. Die Holzpellets zerfielen während dem fortschreitenden Verbrennungsvorgang zu Asche und die Rückstände fielen durch den Rost, sodass nach der Verbrennung kaum Brennstoffreste auf dem Rost zurückblieben. Bei den Heupellets hingegen kam es direkt über dem Rost zur Aufschmelzung der Asche. Darüber bildeten sich starke Verklebungen von einzelnen Pellets, wie in der Versuchsreihe 2 bereits aufgezeigt wurde.

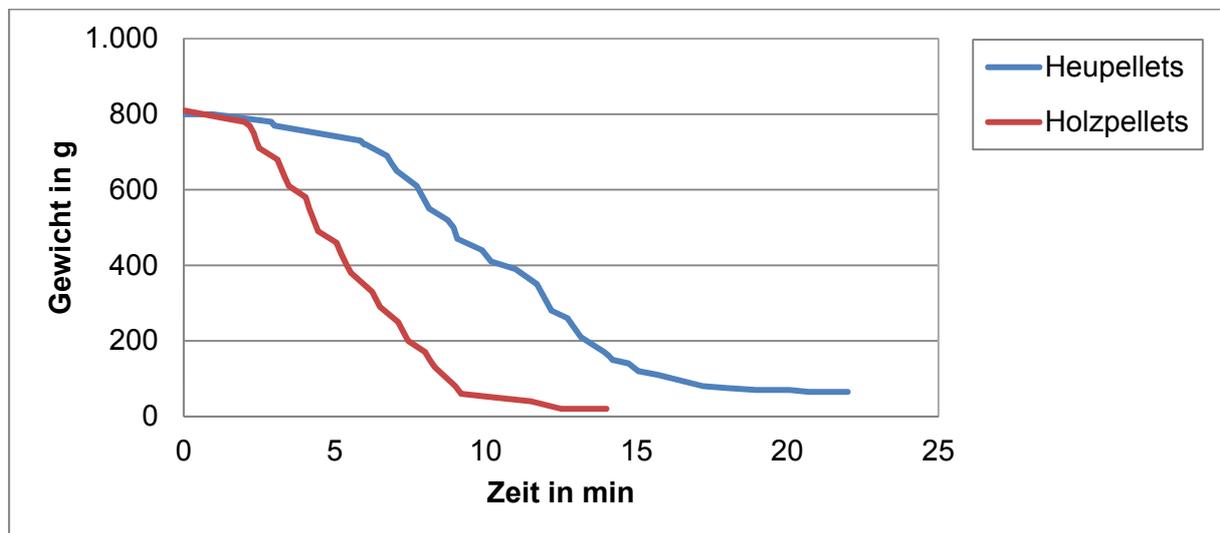


Abbildung 5.7 Versuchsreihe 3 - Vergleich der zeitlichen Massenverluste von Heu- und Holzpellets bei Verbrennungslufttemperatur $T_{-1} = 400 \text{ °C}$ und Verbrennungsluftstrom von $\dot{V} = 3 \text{ m}^3/\text{h}$ (T_{-1} : Temperatur der Verbrennungsluft)

5.4 Versuchsreihe 4 - Messung der Höhenabnahme

In der vierten Versuchsreihe kam das entwickelte Zusatzmodul zur Messung der Höhenabnahme des Brennstoffes während des Verbrennungsvorganges zum Einsatz. Hiermit sollte ein Zusammenhang von Höhenabnahme der Brennstoffschicht und Entgasungsrate hergestellt werden. Erwartet wurde, dass eine messbare Höhenabnahmeänderung beim Einsetzen der Verschlackungen auftritt. Auch erhoffte man unterschiedliche Messverläufe zwischen Heu- und Holzpellets zu finden.

Um falsche Interpretationen bei den Ergebnissen der gemessenen Höhenabnahme zu vermeiden, wurde im ersten Schritt der Einfluss der Zusatzmesstechnik, welche mit einem zusätzlichen Gewicht von 2,3 kg auf den Brennstoff einwirkt, auf die Gewichtsabnahme über

der Zeit ermittelt. In Abbildung 5.8 sind die Ergebnisse für die Verläufe der Massenverluste bei den unterschiedlichen Bedingungen mit und ohne Messkugel dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die Gewichtsabnahme mit eingesetztem Zusatzmodul höher ist. Dies bedeutet, dass die Messung der Höhe mit der gewählten Messtechnik den Verbrennungsvorgang beeinflusst und dies deshalb bei der Übertragung der Messergebnisse zu beachten ist.

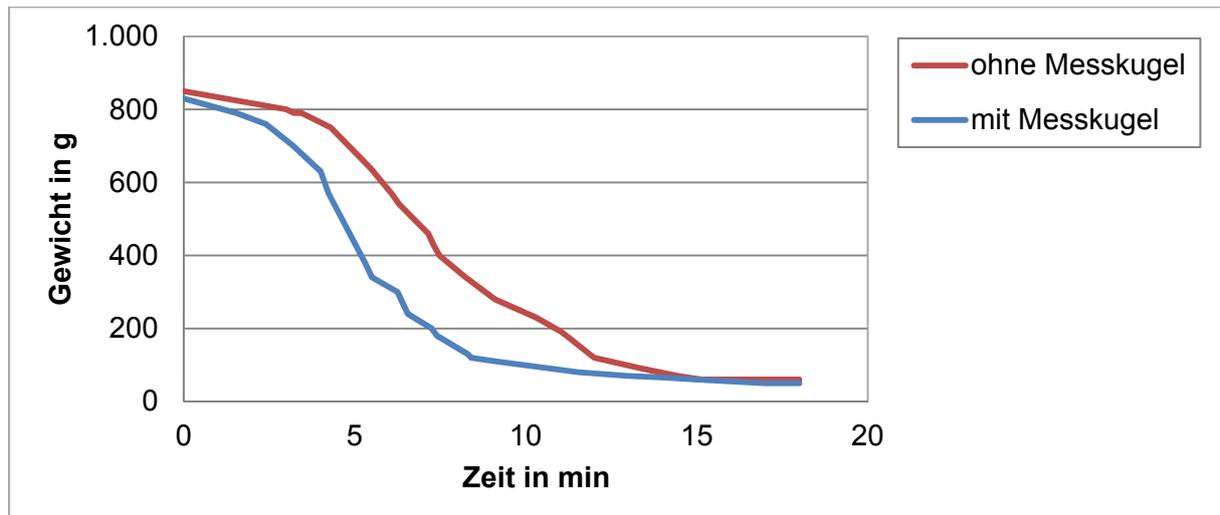


Abbildung 5.8 Versuchsreihe 4 - Zusatzmodul zur Messung der Höhenabnahme, Einfluss der Messkugel auf die zeitlichen Massenverluste bei Heupellets ($T_{-1} = 400\text{ °C}$, $\dot{V} = 5\text{ m}^3/\text{h}$, T_{-1} : Temperatur der Verbrennungsluft)

Vergleich der Höhenabnahme zwischen Holz und Heupellets

Als Versuchsbedingungen zur Messung der Höhenabnahme wurden für Holz und Heupellets dieselben Randbedingungen gewählt, Verbrennungslufttemperatur $T_{-1} = 500\text{ °C}$ und Verbrennungsluftstrom $\dot{V} = 5\text{ m}^3/\text{h}$. Aufgrund der unterschiedlichen Schüttdichten von Heu und Holzpellets wurden die Höhenabnahmen prozentual aufgetragen, um eine bessere Vergleichbarkeit zu ermöglichen.

Bewertet man die Ergebnisse aus Abbildung 5.9 und Abbildung 5.10, so sowohl bei Heu- als auch bei Holzpellets ein direkter Zusammenhang zwischen Massenverlust und Höhenabnahme erkennbar.

Die Höhenabnahme setzt verzögert zur Entgasungsrate ein. Es wurden jedoch keine besonderen Auffälligkeiten zwischen Verlauf der Höhenabnahme und Einsetzen der Verschlackung festgestellt. Grund hierfür könnte die zu geringe Empfindlichkeit des Verfahrens sein. Da sich keine verwertbaren Erkenntnisse des Messverfahrens in Bezug auf das Verschlackungsverhalten der Heupellets ergaben, wurde dieser Ansatz nicht weiter verfolgt.

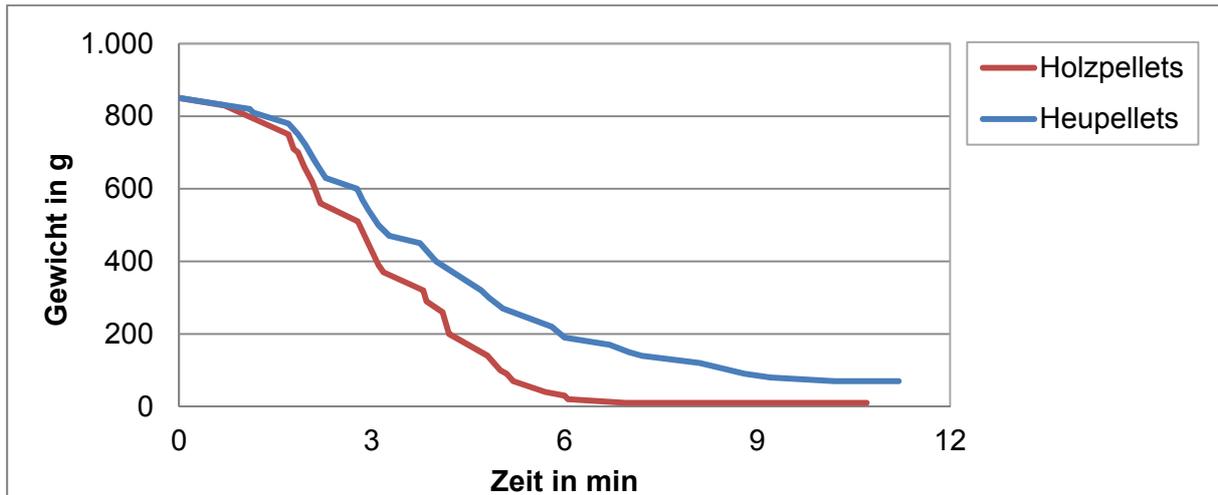


Abbildung 5.9 Versuchsreihe 4 - Vergleich der zeitlichen Massenabnahmen von Holz- und Heupellets mit Messkugel bei $T_{-1} = 500^{\circ}\text{C}$ und $\dot{V} = 5\text{m}^3/\text{h}$ (T_{-1} : Temperatur der Verbrennungsluft)

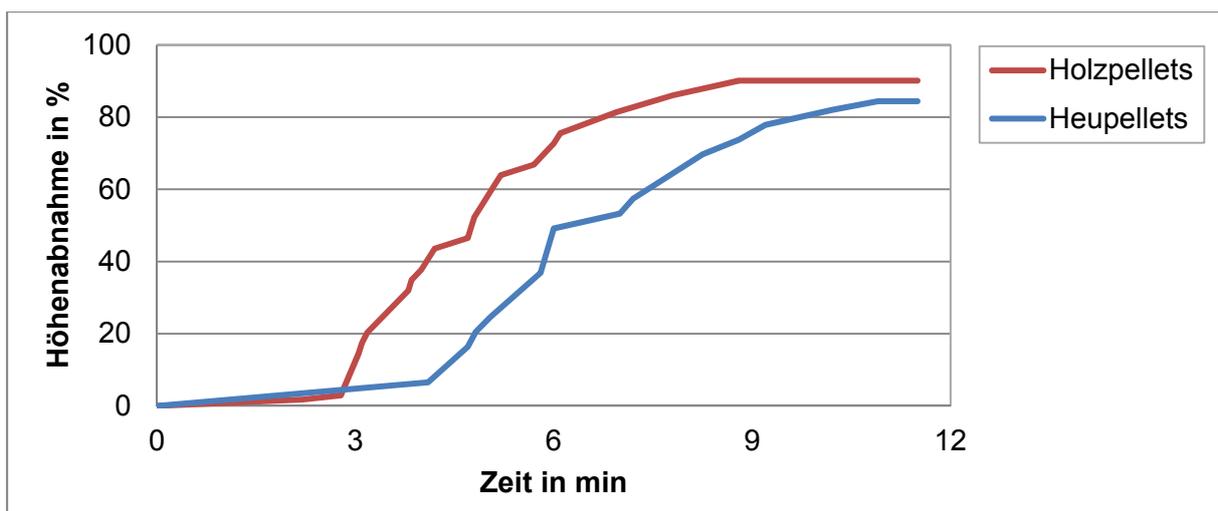


Abbildung 5.10 Versuchsreihe 4 - Vergleich der prozentualen Höhenabnahme von Holz- und Heupellets mit Messkugel bei $T_{-1} = 500^{\circ}\text{C}$ und $\dot{V} = 5\text{m}^3/\text{h}$ (T_{-1} : Temperatur der Verbrennungsluft)

5.5 Versuchsreihe 5 - Messung der Scherkräfte

In Versuchsreihe 5 wurden mit Hilfe des entwickelten Rührermoduls die Scherkräfte in der Pelletschüttung gemessen. Es wurde erwartet, dass ab dem Zeitpunkt wo Verklebungen auftreten, ein höherer Drehwiderstand gemessen wird. Auch hier wurden zuerst Vorversuche durchgeführt, um den Einfluss des Rührers auf die Entgasungsrate zu ermitteln.

Die Abbildung 5.11 zeigt einen erheblichen Einfluss des Rührvorgangs auf die Entgasungsrate. Vergleicht man die Kurven miteinander, so ist eine deutliche Steigerung der Massenabnahme aufgrund des Rührens zu erkennen. Zusätzlich wurde bei den Versuchen mit Rührer ein hoher Aschedurchfall durch den Rost beobachtet, siehe Abbildung 5.12. Dies ist eine

mögliche Erklärung für das erhöhte Restgewicht nach Versuchsende, da der Rostdurchfall weniger vollständig verbrannt ist. Bei den Rührversuchen wurden keine Ascheverschlackungen oder Agglomerationen von Pellets beobachtet.

Für die Temperatur T_1 ergibt sich in Abbildung 5.13 ein maximaler Wert von $\approx 650\text{ °C}$ im Brennstoffbett. Dieser Wert liegt deutlich unter den Ergebnissen der Abbrandversuche mit Heupellets ohne Rührer aber ansonsten gleichen Randbedingungen (siehe Abbildung 5.2), wo für T_1 über 1.200 °C gemessen wurden.

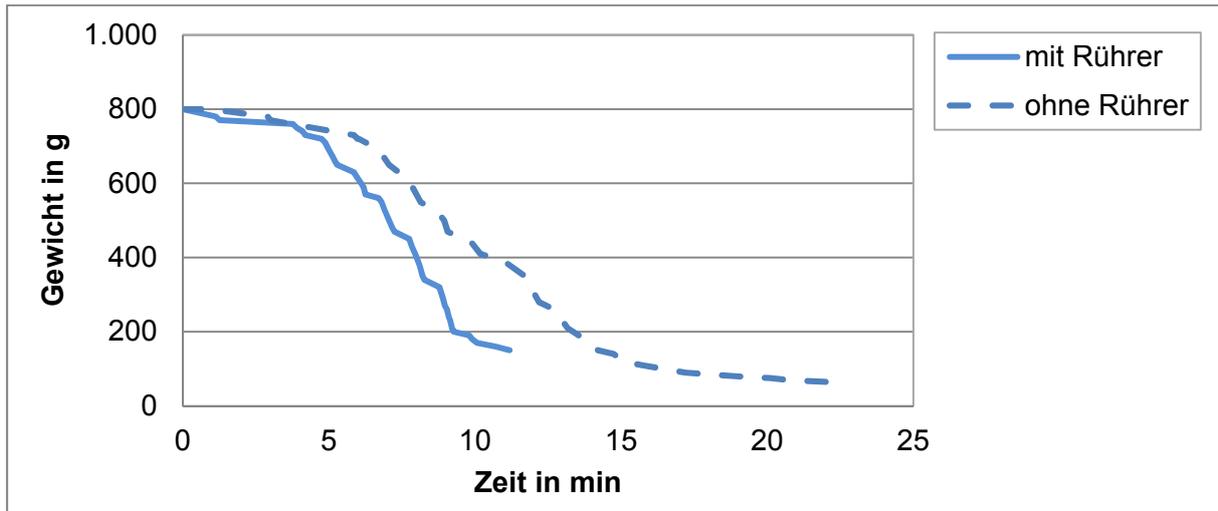
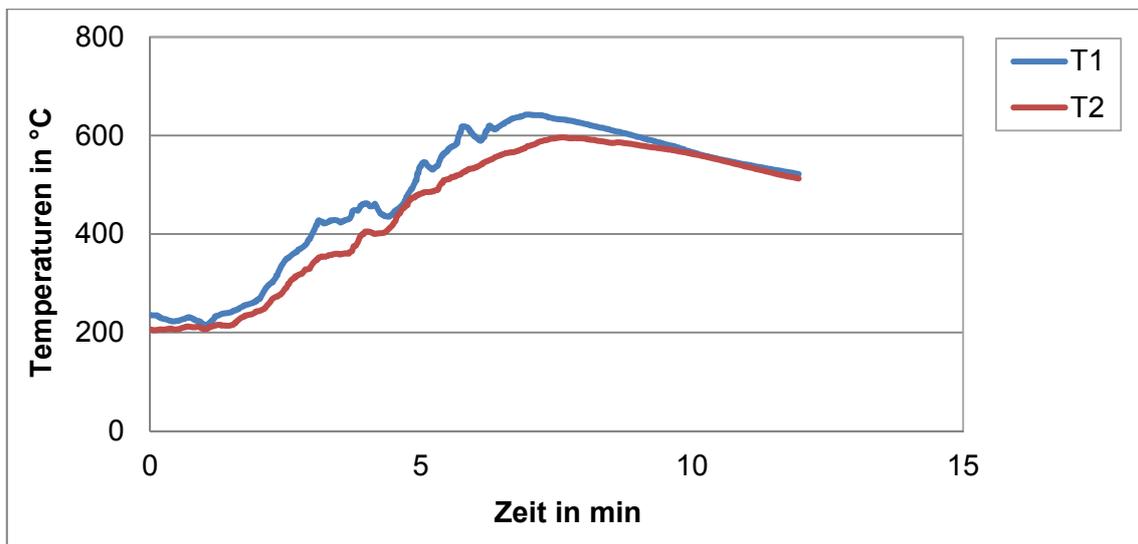


Abbildung 5.11 Versuchsreihe 5 - Zusatzmodul zur Messung der Scherkräfte, Einfluss des Rührelements auf die zeitlichen Massenverluste bei Heupellets ($T_{-1} = 400\text{ °C}$, $\dot{V} = 3\text{ Nm}^3/\text{h}$, T_{-1} : Temperatur der Verbrennungsluft)



Abbildung 5.12 Versuchsreihe 5 - Zusatzmodul zur Messung der Scherkräfte, Aschedurchfall durch den Rost nach dem Rührversuch

Die geringeren Temperaturen in den Versuchen mit Rührer schließen nach bisherigen Erkenntnissen ein Verschlackung und eine Agglomeration der Heupellets aus. Die Rührversuche zeigen, dass der Einsatz eines Rührers die Verbrennung entscheidend beeinflusst und deshalb in diesem Aufbau nicht geeignet ist, um die Verschlackung zu charakterisieren. Ein Rührer im Brennstoffbett kann jedoch eine Möglichkeit sein, um die Verschlackungen im Brennraum zu vermeiden oder den Entgasungsvorgang zu beschleunigen.



Temperaturen über dem Rost im Abstand $T_1 = 10$ mm und $T_2 = 45$ mm (siehe Abbildung 4.4)

Abbildung 5.13 Versuchsreihe 5 - Zusatzmodul zur Messung der Scherkräfte, Temperaturverlauf an den Messstellen T_1 und T_2 in der Brennstoffschüttung mit Heupellets und bewegtem Rührer ($T_{-1} = 400$ °C, $\dot{V} = 5$ m³/h, T_{-1} : Temperatur der Verbrennungsluft)

5.6 Versuchsreihe 6 - Einfluss des Sauerstoffgehalts

Nachdem die Einflüsse von Volumenstrom und Temperatur der Verbrennungsluft untersucht wurden, war es das Ziel einer weiteren Versuchsreihe, den Einfluss des Sauerstoffgehaltes in der Verbrennungsluft zu bewerten. Hierzu wurde der Umgebungsluft CO₂ beigemischt, um den Sauerstoffgehalt in der Verbrennungsluft zu reduzieren. Damit die Sauerstoffkonzentration in der Verbrennungsluft gemessen werden kann, musste eine zusätzliche Mess- und regelstrecke für den Versuch aufgebaut werden, siehe Abbildung 5.14. Hierbei wird zuerst Umgebungsluft mit CO₂ vermischt und anschließend der O₂-Gehalt sowie der Volumenstrom der gemischten Verbrennungsluft gemessen.

Um die Temperatur im Brennstoffbett von z.B. einer Rostfeuerung zu reduzieren, wird Abgas der Verbrennungsluft zugemischt. Hierdurch enthält die Verbrennungsluft eine geringere Sauerstoffkonzentration, wodurch die Intensität der Entgasungs- und Verbrennungsreaktionen im primären Reaktionsbereich vermindert wird.

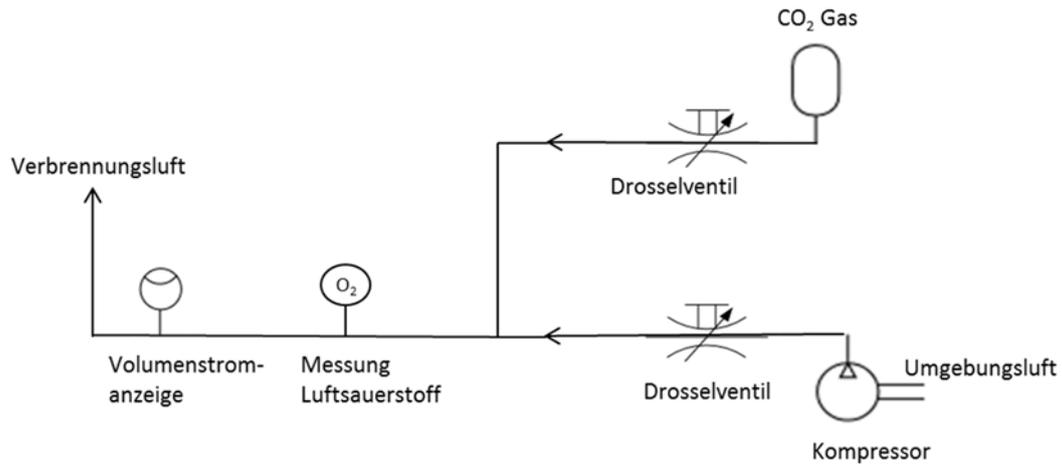


Abbildung 5.14 Versuchsreihe 6 - Einfluss des Sauerstoffgehalts, Messung und Einstellung der Sauerstoffkonzentration in der Verbrennungsluft

Bei den Versuchen am Laborofen 2 wurde statt Abgas nur CO₂-Flaschengas verwendet, wodurch sich eine andere Verbrennungsluftzusammensetzung gegenüber den realen Bedingungen ergibt. Die Unterschiede sollen hier beispielhaft aufgezeigt werden. Eine typische Abgaszusammensetzung für eine Holzfeuerung ist in Tabelle 5.3 aufgelistet.

Tabelle 5.3 Beispielhafte Zusammensetzung von Abgas einer realen Holzfeuerung mit einem Restsauerstoffgehalt von 5 Vol%

Sauerstoff trocken (O ₂)	$y_{O_2 t,\lambda}$	%	5,0
Sauerstoff feucht (O ₂)	$y_{O_2 f,\lambda}$	%	4,3
Stickstoff (N ₂)	$y_{N_2 f,\lambda}$	%	70,1
Kohlendioxid (CO ₂)	$y_{CO_2 f,\lambda}$	%	12,4
Wasser (H ₂ O)	$y_{H_2O f,\lambda}$	%	13,1

Wird der Sauerstoffgehalt in der Verbrennungsluft mit rezirkuliertem Abgas z.B. auf einen Wert von $O_{2\text{feucht}} = 15\%$ reduziert, ergibt sich für die gemischte Verbrennungsluft, bei einem Gesamtvolumenstrom von 5 m³/h, die in Tabelle 5.4 aufgeführte Gaszusammensetzung.

Tabelle 5.4 Zusammensetzung von mit rezirkuliertem Abgas vermischte Verbrennungsluft mit $O_{2\text{feucht}} = 15\%$ und bei 5 m³/h

Sauerstoff trocken (O ₂)	$y_{O_2 t,\lambda}$	%	15,7
Sauerstoff feucht (O ₂)	$y_{O_2 f,\lambda}$	%	15,0
Stickstoff (N ₂)	$y_{N_2 f,\lambda}$	%	76,1
Kohlendioxid (CO ₂)	$y_{CO_2 f,\lambda}$	%	4,3
Wasser (H ₂ O)	$y_{H_2O f,\lambda}$	%	4,5

Durch die Beimischung von CO₂ zur Verbrennungsluft ergibt sich die in Tabelle 5.5 aufgeführte Zusammensetzung der gemischten Verbrennungsluft.

Tabelle 5.5 Zusammensetzung der mit CO₂ gemischten Verbrennungsluft bei einer Sauerstoffkonzentration von 15 % und 5 m³/h

Sauerstoff trocken (O ₂)	y _{O₂ t,λ}	%	15,0
Stickstoff (N ₂)	y _{N₂ f,λ}	%	79,1
Kohlendioxid (CO ₂)	y _{CO₂ f,λ}	%	5,9

Wie in Abbildung 5.15 zu sehen ist, weichen die Entgasungsraten aufgrund des unterschiedlichen Sauerstoffgehalts in der Verbrennungsluft voneinander ab. Dabei entgast der Brennstoff mit weniger Sauerstoff in der Verbrennungsluft langsamer. Jedoch kann der absolute Sauerstoffgehalt nicht die allein entscheidende Größe sein. Denn eine Verbrennung mit einem Verbrennungsluftstrom von 5 $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ und 20,9 % O₂-Gehalt entspricht in etwa 47 $\frac{\text{mol O}_2}{\text{h}}$, ebenso wie eine Verbrennung mit 7 $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ und 14,9 % O₂ Gehalt. Trotz gleichem O₂-Angebot unterscheiden sich die Entgasungsraten.

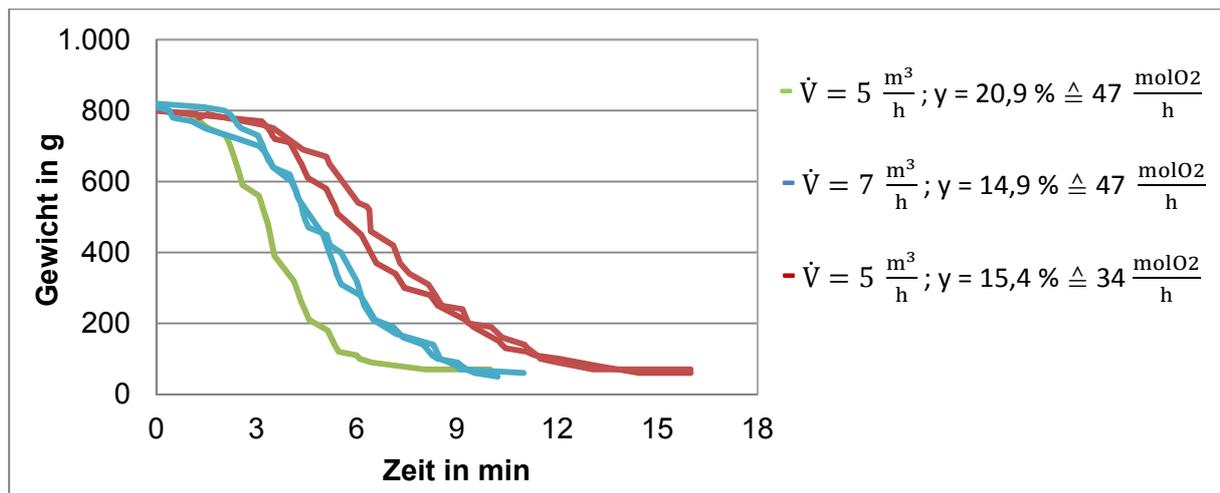


Abbildung 5.15 Versuchsreihe 6 - Vergleich der zeitlichen Massenverluste von Heupellets bei unterschiedlicher Sauerstoffkonzentration bei T₋₁ = 400 °C (T₋₁: Temperatur der Verbrennungsluft)

Auch bei Holzpellets ergibt sich ein Unterschied in der Entgasungsrate aufgrund der Sauerstoffkonzentration in der Verbrennungsluft, siehe Abbildung 5.16.

Auch die Temperaturverläufe zeigen eine deutliche Abhängigkeit vom Sauerstoffangebot der Verbrennungsluft, siehe Abbildung 5.17. So wird eine Temperatur T₁ von 800 °C im Glutbett bei einem Sauerstoffgehalt von 14,9 % und einem Luftstrom von 7 $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ nur knapp überschritten. Bei Umgebungsluft mit einem Sauerstoffgehalt von 20,9 % und einem Verbrennungsluftstrom von 5 $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ erreichen oder überschreiten die Temperaturen T₁ im Glutbett auch 1200 °C, obwohl der Sauerstoffstrom bei beiden Versuchen bei etwa 47 $\frac{\text{mol O}_2}{\text{h}}$ liegt und die Temperaturen der Verbrennungsluft (T₋₁ = 400 °C) ebenfalls nahezu gleich ist.

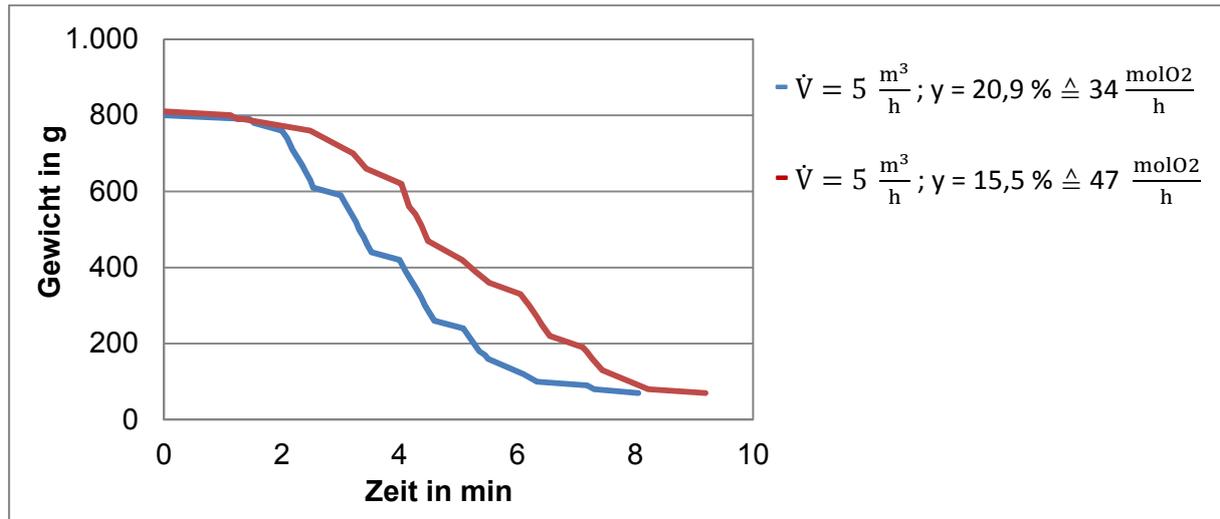


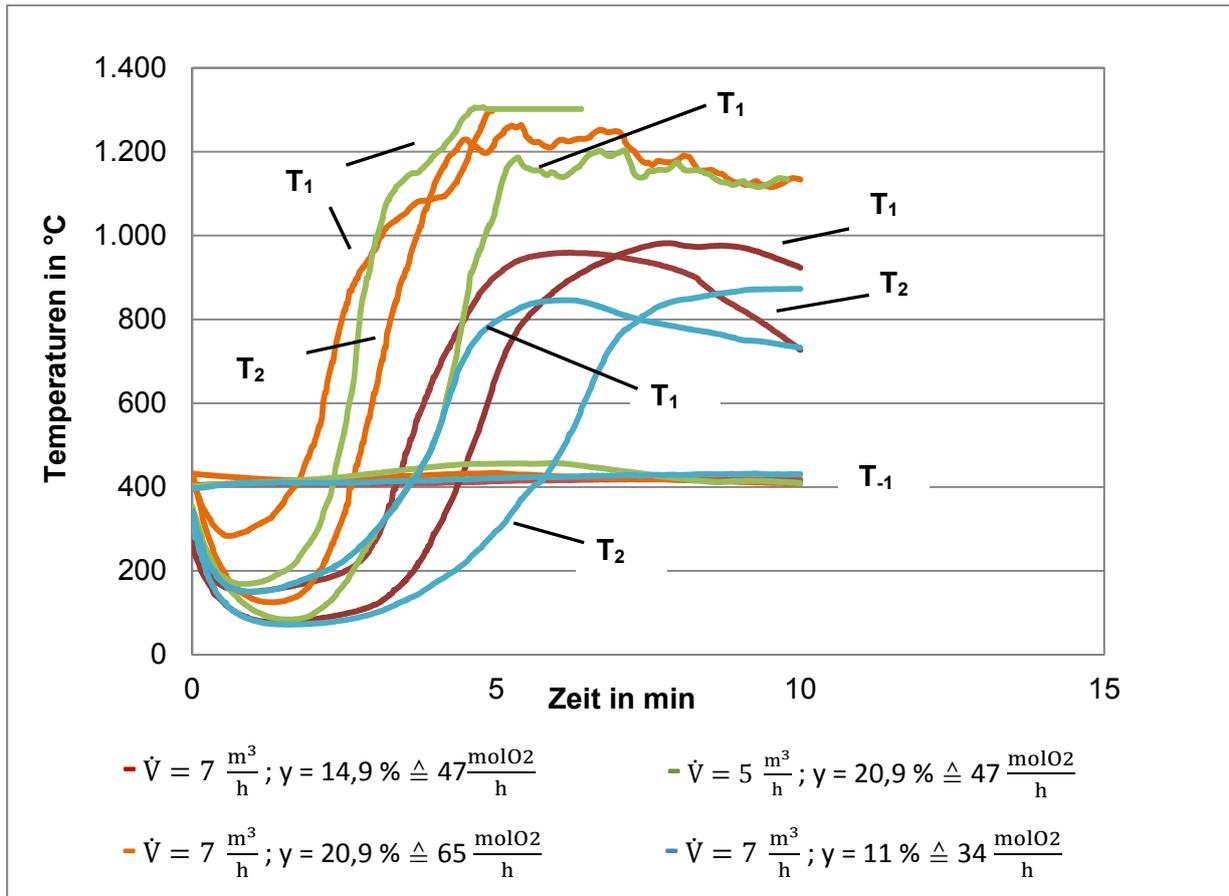
Abbildung 5.16 Vergleich der zeitlichen Massenverlusten von Holzpellets bei unterschiedlicher Sauerstoffkonzentration und $T_{-1} = 400 \text{ °C}$ (T_{-1} : Temperatur der Verbrennungsluft)

Eine weitere Reduzierung des Sauerstoffstroms in der Verbrennungsluft führt auch zu einer weiteren Reduzierung der Temperaturen im Brennstoffbett. Eine mögliche Erklärung für diese Beobachtungen ist eine langsamere Diffusion der Sauerstoffatome zu den Verbrennungs- und Entgasungsprodukten des Brennstoffes aufgrund des geringeren Sauerstoffpartialdrucks bei niedrigeren Sauerstoffkonzentrationen. Dadurch sinkt die Anzahl an endothermen Reaktionen zwischen dem Sauerstoff und den Reaktionspartnern, was wiederum zu geringeren Oberflächentemperaturen der Pellets führt.

Somit kann die Maximaltemperatur im Glutbett durch die Sauerstoffkonzentration beeinflusst werden. Allerdings sinkt mit dem Sauerstoffpartialdruck auch die Entgasungsrate der Pellets, was anhand der zeitlichen Massenverluste in Abbildung 5.15 zu sehen ist.

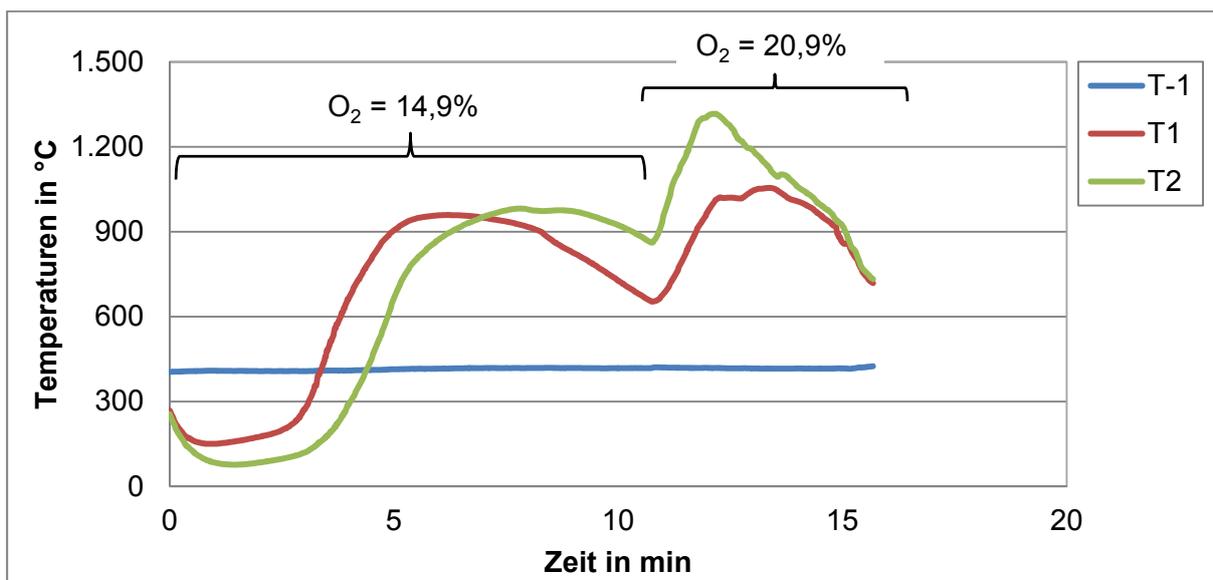
Weitere Versuche bestätigen den großen Einfluss des Sauerstoffgehalts der Verbrennungsluft auf die sich einstellenden Temperaturen im Brennstoffbett. Abbildung 5.18 zeigt einen Versuch mit einer Variation der Sauerstoffkonzentration in der Verbrennungsluft. Im ersten Zeitabschnitt (0 - 11 min) wurde ein Verbrennungsluftstrom von $7 \text{ m}^3/\text{h}$ mit $14,9 \% \text{ O}_2$ bis zum Ende eines erkennbaren Gewichtsverlusts zugeführt. Anschließend wurde der Sauerstoffgehalt auf $20,9 \%$ bei gleichem Verbrennungsluftstrom erhöht. Es zeigte sich ein rascher Temperaturanstieg von $T_2 = 950 \text{ °C}$ auf 1.300 °C . Hierbei konnte beobachtet werden, dass sich erst nach dem Erhöhen des Sauerstoffgehalts und den daraus resultierenden hohen Temperaturen auch Verschlackungen bildeten.

Bei der visuellen Betrachtung der Abbrandversuche in der Versuchsreihe 2 wurde erkannt, dass sich Verschlackungen und Agglomerate erst gegen Ende des Entgasungsvorgangs bilden. Eine Reduzierung des Sauerstoffgehalts in der Verbrennungsluft führt gleichzeitig zu einer Minderung der Entgasungsrate. Deshalb wurde in einem weiteren Abbrandversuch zu Beginn für eine schnellere Entgasung des Brennstoffes die Verbrennungsluft mit $20,9 \%$ Sauerstoff zugeführt und gegen Ende des Vorgangs die Konzentration an O_2 abgesenkt, um Verschlackungen zu vermeiden. Die zeitlichen Massenverluste und die Verläufe der Temperaturen in der Brennstoffschüttung von Heupellets dieses Versuchs sind in Abbildung 5.19 und Abbildung 5.20 gezeigt.



Position Temperaturmessstellen: T₋₁: Temperatur der Verbrennungsluft unterhalb des Rostes
 Temperaturen über dem Rost im Abstand T₁ = 10 mm und T₂ = 45 mm (siehe Abbildung 4.4)

Abbildung 5.17 Versuchsreihe 6 - Temperaturverläufe in der Brennstoffschüttung bei unterschiedlichem Sauerstoffgehalt der Verbrennungsluft (Heupellets, T₋₁ = 400°C)



Position Temperaturmessstellen: T₋₁: Temperatur der Verbrennungsluft unterhalb des Rostes
 Temperaturen über dem Rost im Abstand T₁ = 10 mm und T₂ = 45 mm (siehe Abbildung 4.4)

Abbildung 5.18 Versuchsreihe 6 - Temperaturverlauf im Glutbett von Heupellets bei Variation der Sauerstoffkonzentration in der Verbrennungsluft (T₋₁ = 400 °C, $\dot{V} = 7 \text{ m}^3/\text{h}$)

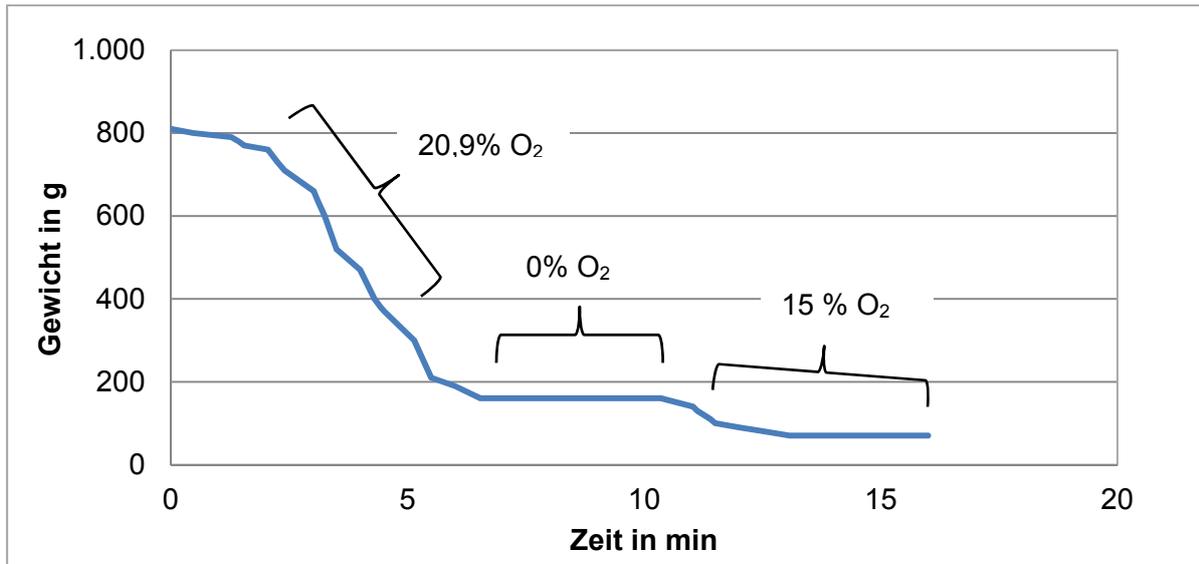
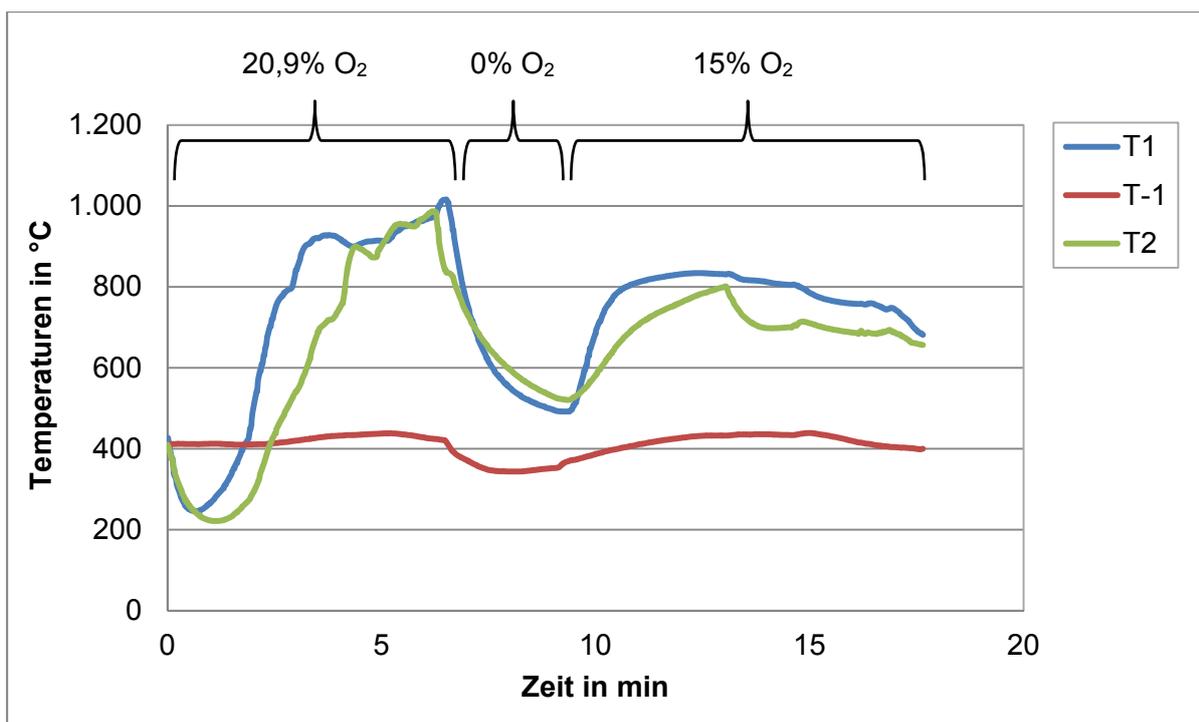


Abbildung 5.19 Versuchsreihe 6 - zeitliche Massenverluste von Heupellets bei Variation der Sauerstoffkonzentration in der Verbrennungsluft während des Abbrandes ($T_{-1} = 400\text{ °C}$, T_{-1} : Temperatur der Verbrennungsluft)



Position Temperaturmessstellen: T_{-1} : Temperatur der Verbrennungsluft unterhalb des Rostes
 Temperaturen über dem Rost im Abstand $T_1 = 10\text{ mm}$ und $T_2 = 45\text{ mm}$ (siehe Abbildung 4.4)

Abbildung 5.20 Versuchsreihe 6 - Temperaturverläufe in der Brennstoffschüttung bei Variation der Sauerstoffkonzentration in der Verbrennungsluft während des Abbrandes (Heupellets, $T_{-1} = 400\text{ °C}$)

Der Verlauf der Masseverluste und Temperaturen während diesem Versuch zeigen, dass die Brennstoffentgasung ohne zugeführten Sauerstoff in der Verbrennungsluft nahezu zum Erliegen kommt und einhergehend die Temperaturen stark abfallen, was im Zeitraum zwischen der 6. und 10. Minute des Versuchs der Fall war.

Erst nach Zugabe von Verbrennungsluft mit ca. 15 % Sauerstoff setzten die Entgasungs- und Verbrennungsreaktionen wieder stärker ein.

Abbildung 5.21 sind die Verbrennungsrückstände des Versuches nach Variation der Sauerstoffkonzentration in der Verbrennungsluft während des Abbrandes zu sehen. Durch eine visuelle Bewertung ist zu erkennen, dass sich keinerlei Verklebungen bei den gegebenen Randbedingungen gebildet haben. Zusammenfassend kann man sagen, dass es erst bei einer Überschreitung der, durch das Ascheschmelzverfahren ermittelte, Erweichungstemperatur zu Verschlackungen kommt.



Abbildung 5.21 Versuchsreihe 6 - Einfluss des Sauerstoffgehalts, Verbrennungsrückstände nach einem Versuch mit Variation der Sauerstoffkonzentration in der Verbrennungsluft während des Abbrandes

5.7 Schlussfolgerungen und Brennstoffvergleich

Zu Beginn des Projektes wurde vermutet, dass die derzeit eingesetzte Methode zur Bewertung der Verschlackungsneigung von Brennstoffen anhand des ermittelten Ascheschmelzverhaltens für eine vollständige Bewertung der Verbrennungseigenschaften nicht geeignet ist, da die Bildung von Schlacken und Agglomeraten bereits während des Entgasungsvorgangs einsetzt.

Anhand der durchgeführten Versuche konnte die sofortige Bildung von Agglomeraten während des Entgasungsvorgangs nicht belegt werden. Stattdessen wurde die Schlackenbildung erst gegen Ende des Entgasungsvorgangs mit steigender Temperatur im Glutbett beobachtet. Der genaue Zeitpunkt ab der eine Verschlackung auftritt konnte nicht ermittelt werden, da ausschließlich eine visuelle Bewertung der Verschlackungsneigung mit der entwickelten Versuchsanlage möglich war. Dass die Temperatur einen bedeutenden Einfluss auf die Schlackenbildung hat, wurde bei den Versuchen mit reduziertem Sauerstoffgehalt in der Verbrennungsluft deutlich.

Wenn im Brennstoffbett der Heupellets eine maximale Temperatur T_1 von 1.000 °C nicht überschritten wurde, traten weder Verschlackungen noch die Bildung von Agglomeraten auf. Das Auftreten von Verschlackungen im Laborofen bei Temperaturen T_1 im Glutbett von > 1.000 °C geht einher mit den Ergebnissen zum Ascheschmelzverhalten nach DIN CEN/TS

15370-1 [2006]. In der Laboranalyse wurden eine Erweichungstemperatur der Heupellets von 980 °C und eine Fließtemperatur von 1.150 °C ermittelt.

Die Versuchsergebnisse am Laborofen zeigen, dass die Verklebungen und Verschlackungen eindeutig von den Temperaturen im Brennstoffbett abhängig sind. Die in Struschka et al. [2015] beobachteten Verklebungen von noch nicht entgasten Pellets sind wahrscheinlich auf an der Oberfläche anhaftender geschmolzener Asche zurückzuführen.

Mit Hilfe der Versuchsergebnisse können die maximalen Temperaturen im Brennstoffbett bei den gegebenen Randbedingungen in Abhängigkeit vom Verbrennungsluft-Volumenstrom mit einer Sauerstoffkonzentration von 20,9 % (Abbildung 5.22) sowie der Sauerstoffkonzentration in der Verbrennungsluft bei unterschiedlichen Verbrennungsluft-Volumenströmen (Abbildung 5.23) angegeben werden.

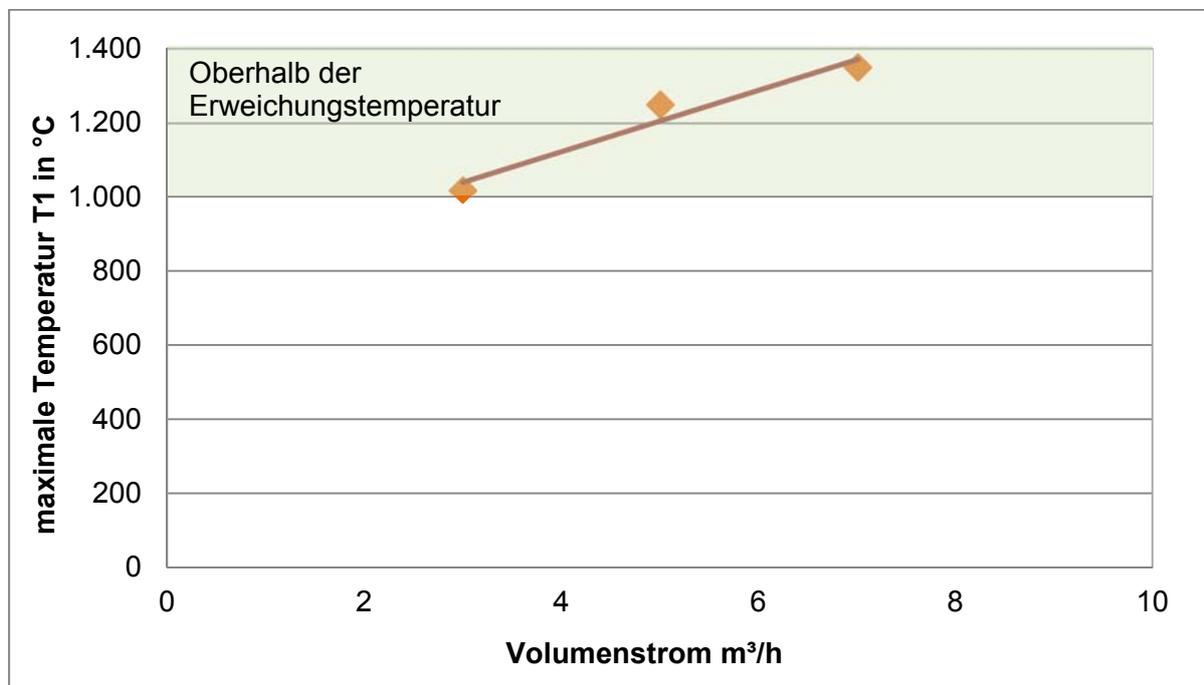


Abbildung 5.22 Einfluss des Verbrennungsluft-Volumenstroms bei einer Sauerstoffkonzentration von 20,9 % auf die maximale Temperatur T_1 im Brennstoffbett von Heupellets bei $T_{-1} = 400$ °C (T_{-1} : Temperatur der Verbrennungsluft, Temperatur $T_1 = 10$ mm über dem Rost)

Der Zusammenhang zwischen Verbrennungsluft-Volumenstrom und maximaler Temperatur T_1 im Brennstoffbett von Heupellets kann als linear angenommen werden. Der Sauerstoffgehalt der Verbrennungsluft beeinflusst die maximale Temperatur T_1 im Brennstoffbett eher exponentiell. Anhand der Versuchsergebnisse wurde eine erste Formel (Gleichung (5.1)) zur Abschätzung der maximalen Temperatur T_1 in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt und Volumenstrom der Verbrennungsluft ermittelt.

$$T_{\max} = 394,86 * e^{0,0515*y} + (82,5 * \dot{V} + 794,17 - 1206,67) * \frac{y}{20,9} \quad (5.1)$$

mit y Sauerstoffkonzentration in $\left[\frac{\text{m}^3_{\text{Stoff}}}{\text{m}^3_{\text{Gem}}}\right]$
 \dot{V} : Volumenstrom in $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right]$
 T_{\max} : maximale Temperatur T_1 in $[\text{°C}]$.

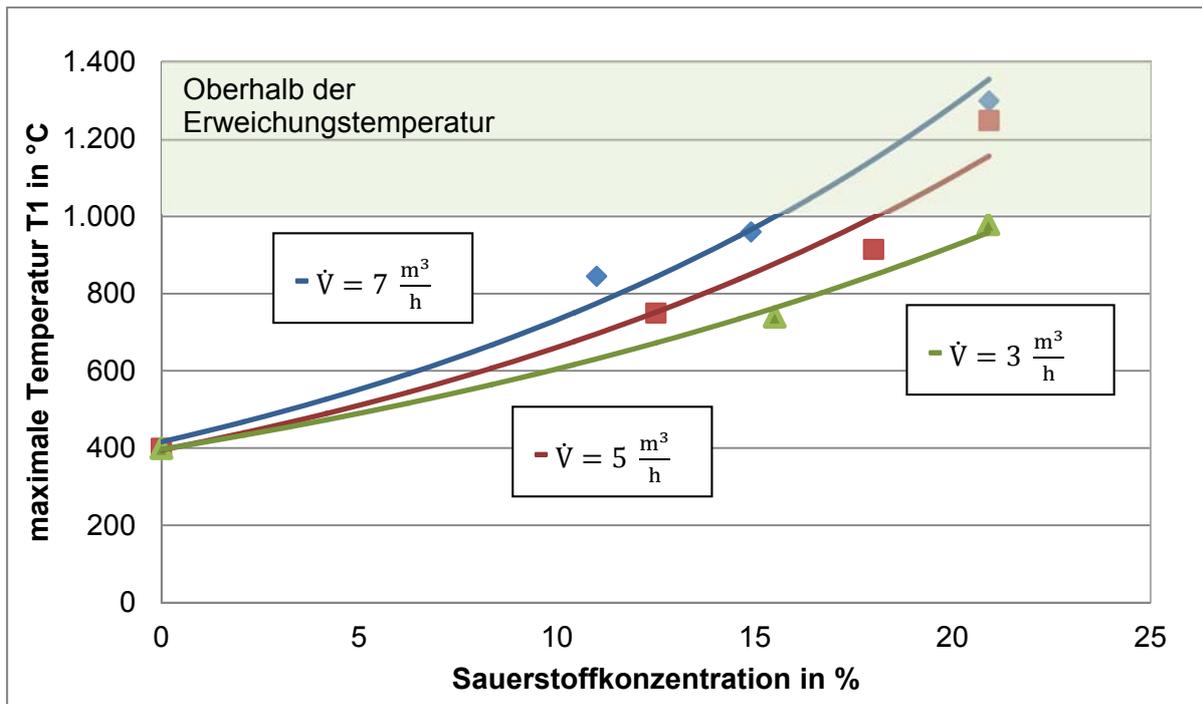
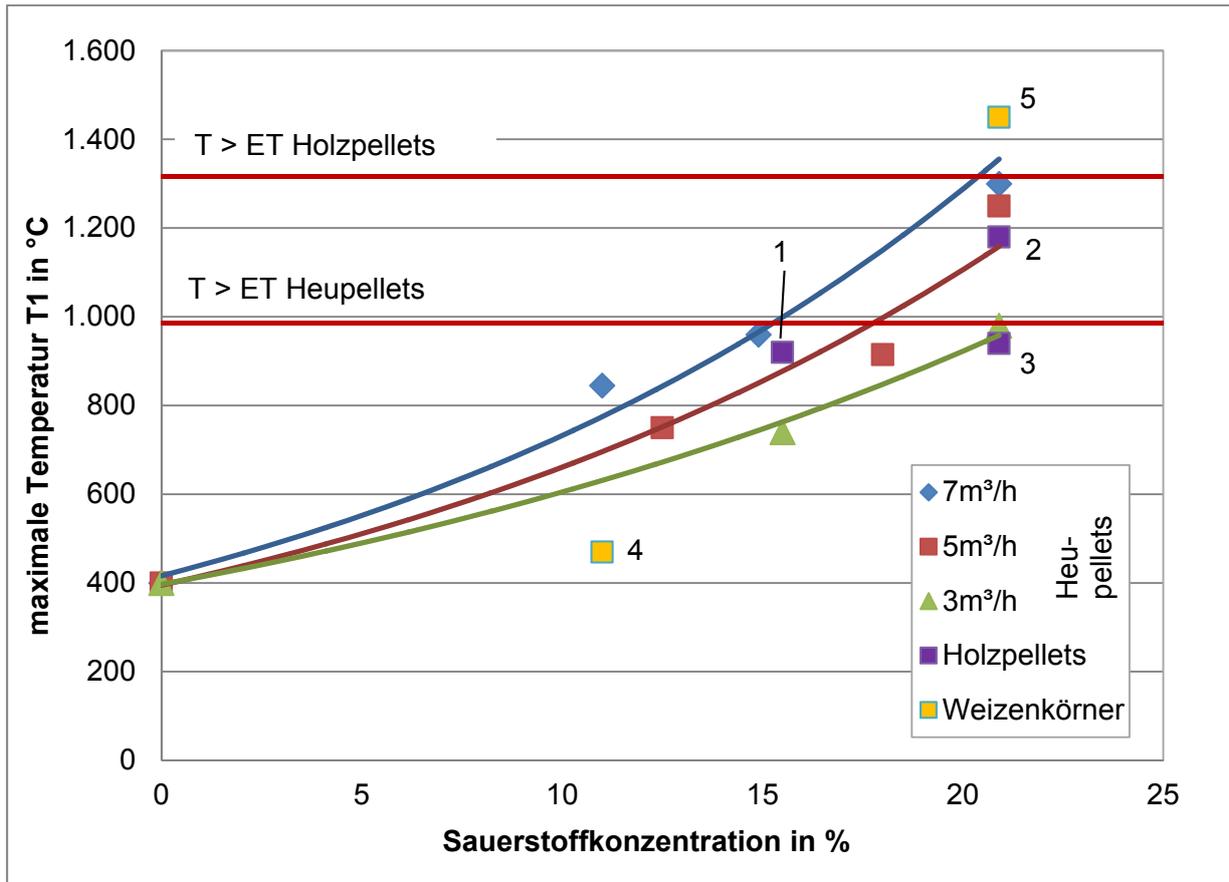


Abbildung 5.23 Zusammenhang zwischen Sauerstoffkonzentration in der Verbrennungsluft und maximaler Temperatur T_1 im Brennstoffbett von Heupellets bei $T_{-1} = 400 \text{ °C}$ (T_{-1} : Temperatur der Verbrennungsluft, Temperatur $T_1 = 10 \text{ mm}$ über dem Rost)

Zur Entwicklung der Formel wurden die Versuchsergebnisse bei $T_{-1} = 400 \text{ °C}$ und $\dot{V} = 5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ herabgezogen. Mit dieser Gleichung ist es nun möglich, die maximale Temperatur während einer Verbrennung anhand der Einstellungen für die Verbrennungsluft-Volumenstrom und der Sauerstoffkonzentration in der Verbrennungsluft so zu begrenzen, dass diese unterhalb der Erweichungstemperatur des Brennstoffes (in diesem Fall Heupellets) liegt.

Zusätzlich wurde überprüft, ob sich die aufgestellte Formel auf andere Biomassen übertragen lässt. Dazu wurden weitere Versuche mit Holzpellets und Weizenkörnern durchgeführt, wobei bei den Versuchen mit Weizen ein feinerer Rost aufgrund der Geometrie des Brennstoffes eingesetzt werden musste.

Bei Holzpellets ergaben sich vergleichbare Temperaturen T_1 im Brennstoffbett mit einer Abweichung von $\pm 60 \text{ °C}$, siehe Abbildung 5.24. Bei Weizenkörnern konnte kein Zusammenhang zwischen Versuchsergebnissen und der aufgestellten Formel gefunden werden. Ursache hierfür könnte u.a. die unterschiedlichen Größen von Pellets und Weizenkörner sein, was bisher nicht in der Formel berücksichtigt wurde.



Randbedingungen bei Versuchen			
Nr.	Brennstoff	\dot{V} in m³/h	O ₂ in %
1	Holzpellets	5	15,5
2	Holzpellets	5	20,9
3	Holzpellets	3	20,9
4	Weizenkörner	5	11,0
5	Weizenkörner	5	20,9 *

ET Erweichungstemperatur
 * Temperatur oberhalb Messbereich

Abbildung 5.24 Zusammenhang zwischen Sauerstoffkonzentration in der Verbrennungsluft und maximaler Temperatur T_1 im Brennstoffbett bei $T_{-1} = 400\text{ °C}$ für Heupellets, Holzpellets und Weizenkörner (T_{-1} : Temperatur der Verbrennungsluft, Temperatur $T_1 = 10\text{ mm}$ über dem Rost)

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Projekt wurden die Verschlackungsneigungen und die Bildung von Agglomeraten bei der Verbrennung von Biomassen in einem Muffelofen und in einem eigens hierfür konstruierten Laborofen untersucht. Ziel war es, das Brennstoffverhalten unter praxisähnlichen Bedingungen zu analysieren und mögliche Einflussgrößen auf die Vorgänge anhand von Messgrößen zu charakterisieren.

Mit dem angefertigten und optimierten Laborofen wurden verschiedene Messreihen bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen durchgeführt. Dabei war es nicht möglich, eine Messgröße für die Verschlackungsneigung der Brennstoffe zu ermitteln, da die Beeinflussung der Verbrennung bei allen untersuchten Varianten zu groß war. Jedoch konnte die Verschlackung visuell gut bewertet werden. Neben der visuellen Bewertung wurden die Abhängigkeiten und Einflüsse von Temperatur, Volumenstrom und Sauerstoffgehalt der Verbrennungsluft auf die Entgasungsrate gemessen.

Anhand von sechs Versuchsreihen wurde festgestellt, dass die Verschlackungen und Verklebungen beim Verbrennungsvorgang bereits dann auftreten, wenn Temperaturen im Brennstoffbett auftreten, die höher sind als die Erweichungstemperatur der Brennstoffasche. Bisher wurde eher davon ausgegangen, dass für das Auftreten von massiveren Verschlackungen und Verklebungen bei der Verbrennung zumindest die Halbkugel- bzw. die Fließtemperatur der Asche erreicht werden muss. Somit können, anders als zu Projektbeginn erwartet, die bei Laboranalysen ermittelten charakteristischen Temperaturen des Ascheschmelzverhaltens zur Beurteilung des Brennstoffs herangezogen werden.

Weiter wurde nachgewiesen, dass der Sauerstoffgehalt und der Volumenstrom der Verbrennungsluft die Temperatur im Brennstoffbett stark beeinflusst. Anhand der gewonnenen Ergebnisse wurde eine Formel entwickelt, mit der die maximale Temperatur im Brennstoffbett in Abhängigkeit dieser Größen abgeschätzt werden kann. Die Untersuchungsergebnisse ermöglichen somit eine genaue Beurteilung des Abbrandverhaltens von Heupellets und können auch auf Holzpellets übertragen werden.

Zukünftig kann nun bei der Anlagenentwicklungen und beim Betrieb der Anlagen anhand der durch eine Laboranalyse ermittelten Erweichungstemperatur des eingesetzten Brennstoffes eine verbesserte Verbrennungsführung integriert werden. Dies kann anhand des Volumenstroms und der Sauerstoffkonzentration der Verbrennungsluft derart erfolgen, dass Brennstoffbetttemperaturen oberhalb der Erweichungstemperatur nicht erreicht werden, wodurch Verschlackungen und die Bildung von Agglomerate während der Verbrennung vermieden oder deutlich reduziert werden. Um dies zu realisieren, muss eine Feuerungsanlage allerdings hinsichtlich der Strömungs- und Temperaturverteilungen im Brennstoffbett optimiert werden, damit gleichmäßigere Verteilungen erreicht werden. Außerdem muss das Regelkonzept jeweils an die Feuerungsanlage und deren Abbrandverhalten angepasst werden. Ohne zusätzlichen Entwicklungs- und Anpassungsaufwand lassen sich die Projekterkenntnisse nicht in der Praxis umsetzen.

An dem Laborofen werden jetzt weitere Untersuchungen durchgeführt, zum einen um noch andere Brennstoffe (z.B. Strohpellets) zu untersuchen und um die aufgestellte Formel iterativ zu verbessern und falls notwendig an andere Brennstoffe anzupassen.

7 Quellenverzeichnis

Aeckersberg, Roland; Pretz, Thomas; Quicker, Peter; Wotruba, Hermann, 2011.

Analyse des Ascheschmelzverhaltens von Holzpellets in Abhängigkeit ausgewählter Aschekomponenten. Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredlung, Band 41, Shaker Verlag, Aachen.

Boström, D.; Skoglund, N.; Grimm, A.; Boman, C.; Öhman, M.; Broström, M.; Backman, R., 2012

Ash Transformation Chemistry during Combustion of Biomass; Energy Fuels 26 (1), 85-93.

DIN EN 14775, 2009

Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes; Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 14961-1, 2010

Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 1; Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.

DIN CEN/TS 15370-1, 2006

Feste Biobrennstoffe - Verfahren zur Bestimmung des Schmelzverhaltens der Asche - Teil 1; Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin.

Juschka, Winfried; Struschka, Michael, 2015

Entwicklung einer Feuerungsanlage zur energetischen Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen auf Basis der AirRo®-Brennertechnologie; Teilvorhaben 1: Grundlegende Untersuchungen; Endbericht zum Verbundvorhaben FKZ 22032111 der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe in Gülzow, Institut für Feuerung und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart; Stuttgart.

Kaltschmitt, Martin; Hartmann, Hans; Hofbauer, Hermann. 2009

Energie aus Biomasse, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin.

Obernberger, Ingwald, 2014

Strategy for the Application of Novel Characterization Methods for Biomass Fuels; Case Study of Straw. Energy & Fuels, 28, pp. 1041-1052.

Ottmann, Michael, 2006

Verbrennung biogener Brennstoffe in stationären Wirbelschichtfeuerungen; Dissertation am Lehrstuhl für ökologische Chemie und Umweltanalytik der Technischen Universität München.

Struschka et al., 2014

Struschka, Michael; Schäfer, Christian; Ertl, Tobias; Münzenmaier, Lena; Brodbeck, Johannes; Axarlis, Alexander: Emissionsmessungen bei der Verbrennung von Heupellets in einem Heizkessel mittlerer Leistung mit Gewebefilter; Messbericht im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) in Karlsruhe. Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart; Stuttgart.

Tumuluru, J. S.; Sokhansanj, S.; Wright, C. T.; Boradman, R. D.; Yancey, N. A., 2012

Review on Biomass Classification and Composition, Co-firing Issues and Pretreatment Methods; ASABE Annual International Meeting, INL/CON-11-22458, Paper no. 1110458, Idaho National Laboratory.

Quicker, Peter; Weber, Kathrin; Neuerburg, Florian., 2014

Konfektionierte Strohbiobrennstoffe für innovative Feuerungen. Doppelstrategie zur energetischen Verwertung von Stroh. Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe, RWTH Aachen; Statusseminar Energieforschung NRW, Düsseldorf, Dezember.

8 Anhang

Berechnung des Luftüberschusses über der Brennstoffhöhe:

Tabelle 8.1 Grundlegende Kennwerte für die Berechnung des Luftüberschusses

Kennwerte Allgemein		
Schüttdichte Heupellets	kg/m ³	792,2
Volumen(Schüttung)	m ³	0,0017
Durchmesser Pellet Schüttung	mm	104
Höhe Pellet Schüttung	mm	200
Luftzufuhr V _{itr}	m ³ /kg	4,3
Delta h	mm	4

Kennwerte Luft		
Sauerstoffanteil der Luft	[m ³ /m ³]	0,2095
Stickstoffanteil der Luft	[m ³ /m ³]	0,7808
Rest	[m ³ /m ³]	0,0097
Nullpunkt T	[K]	273,15
Normdruck	[bar]	1,013
Molares Volumen	[l/mol]	22,41

Kennwerte Brennstoff (Heupellets)		
Brennstoff wie verfeuert -roh-		
Wasser (H ₂ O) -roh-	mol/kg	4,7
Kohlenstoff (C) -roh-	mol/kg	33,7
Wasserstoff (H) -roh-	mol/kg	63,3
Sauerstoff (O) -roh-	mol/kg	20,58
Stickstoff (N) -roh-	mol/kg	1,22
Schwefel (S) -roh-	mol/kg	0,058
Chlor (Cl) -roh-	mol/kg	0,072

Molverhältnisse der Reaktionsgleichung			Molverhältnis [molO ₂ / molB]	
C	[m ³ O ₂ /kgC]	1,866	1	1mol C + 1 mol O₂ → 1 mol CO ₂
H	[m ³ O ₂ /kgH]	5,559	0,5	2mol H + 1/2 mol O₂ → 1 mol H ₂ O
S	[m ³ O ₂ /kgS]	0,699	1	1mol S + 1 mol O₂ → 1 mol SO ₂
O ₂	[m ³ O ₂ /kgO]	-0,700	1	

Lokale Betrachtung:

$O_{2, \text{Gesamt}}$ ist der in der jeweiligen Schicht zur Verfügung stehende Sauerstoff. $O_{2, \text{Bedarf}}$ ist in jeder Schicht konstant. i : Anzahl der Brennstoffschichten.

$$O_{2, \text{Luft}} = \frac{V_{\text{itr}} * \text{Vol}\%}{V_{n, \text{Luft}}} \quad (11.1)$$

$$O_{2, \text{Brennstoff}, i} = \frac{M_{\text{O}} * m_{\Delta h}}{2} * i \quad (11.2)$$

$$O_{2, \text{Bedarf}, i} = (n_{\text{S}, n} + n_{\text{H}, n} * 0,25 + n_{\text{C}, n}) * i \quad (11.3)$$

$$n_{\text{C}} = M_{\text{C}} * m_{\Delta h} \quad (11.4)$$

$$n_{\text{H}} = M_{\text{H}} * m_{\Delta h} \quad (11.5)$$

$$n_{\text{S}} = M_{\text{S}} * m_{\Delta h} \quad (11.6)$$

Globale Betrachtung:

$$\lambda = \frac{O_{2, \text{Luft}} + O_{2, \text{Brennstoff}, i}}{O_{2, \text{Bedarf}, i}} \quad (11.7)$$

$O_{2, \text{Luft}}$ ist der Luftsauerstoff der Verbrennungsluft. $O_{2, \text{Bedarf}}$ und $O_{2, \text{Brennstoff}}$ steigen mit der Brennstoffhöhe.

$$O_{2, \text{Luft}} = \frac{V_{\text{itr}} * \text{Vol}\%}{V_{n, \text{Luft}}} \quad (11.8)$$

$$O_{2, \text{Brennstoff}, i} = \frac{M_{\text{O}} * m_{\Delta h}}{2} * i \quad (11.9)$$

$$O_{2, \text{Bedarf}, i} = (n_{\text{S}, n} + n_{\text{H}, n} * 0,25 + n_{\text{C}, n}) * i \quad (11.10)$$

$$n_{\text{C}} = M_{\text{C}} * m_{\Delta h} \quad (11.11)$$

$$n_{\text{H}} = M_{\text{H}} * m_{\Delta h} \quad (11.12)$$

$$n_{\text{S}} = M_{\text{S}} * m_{\Delta h} \quad (11.13)$$

Wärmebilanzrechnung zur Bestimmung der Heizleistung:

$$\dot{Q}_{zu} = \dot{Q}_{abluf} + \dot{Q}_{konv} + \dot{Q}_{strahl} + \dot{Q}_{sp} \quad (11.14)$$

$$0 = \dot{Q}_{sp} = \dot{Q}_{strahl} \quad (11.15)$$

$$\dot{Q}_{zu} = \dot{Q}_{abluf} + \dot{Q}_{konv} = \dot{M} * c_{pLuft} * T_{ab} + \alpha * A_1 * \Delta T + \alpha * A_2 * \Delta T \quad (11.16)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{zu} = \dot{Q}_{abluf} + \dot{Q}_{konv} = \dot{M} * c_{pLuft} * T_{ab} + \alpha * A_1 * (T_{ab} - T_{um}) \\ + \alpha * A_2 * (T_a - T_{um}) \end{aligned} \quad (11.17)$$

Annahmen:

$$\begin{array}{llll} T_{um} = 10 \text{ °C} & T_a = 50 \text{ °C} & T_{ab} = 500 \text{ °C} & A = 0,30 * 0,30 = 0,09 \text{ m}^2 \\ A_1 = 0,05 * A & A_2 = 0,95 * A & \alpha = 35 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} & \dot{V} = 500 \frac{\text{l}}{\text{min}} = 8,33 * 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \\ T_{ein} = 660 \text{ °C} & c_{pLuft} = 1,1286 \frac{\text{KJ}}{\text{kgK}} & & \varphi_{Luft,660\text{°C}} = 0,374 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{array}$$

$$\dot{M} = \dot{V} * \varphi = 3,115 * 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \quad (11.18)$$

$$\rightarrow \dot{Q}_{zu} = 1544 \text{ W} \quad (11.19)$$

Anpassung des Wärmeübergangskoeffizienten α aufgrund von Messergebnissen:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{zu} = \dot{Q}_{abluf} + \dot{Q}_{konv} = \dot{M} * c_{pLuft} * T_{ab} + \alpha * A_1 * (T_{ab} - T_{um}) \\ + \alpha * A_2 * (T_a - T_{um}) \end{aligned} \quad (11.20)$$

$$\dot{Q}_{zu} = T_{ein} * c_{pLuft} * \dot{M} = 3.28 \text{ KW} \quad (11.21)$$

$$\alpha = \frac{\dot{Q}_{zu} - \dot{m} * c_{pLuft} * T_{ab}}{A_1 * (T_{ab} - T_{um}) + A_2 * (T_a - T_{um})} = 107 \quad (11.22)$$

Berechnung der benötigten Heizleistung mit angepasstem Wärmeübergangskoeffizient α :

$\alpha = 107$

$$\dot{Q}_{zu} = \dot{Q}_{abluft} + \dot{Q}_{konv} = \dot{M} * c_{pLuft} * T_{ab} + \alpha * A_1 * (T_{ab} - T_{um}) + \alpha * A_2 * (T_a - T_{um}) \quad (11.23)$$

$$\dot{Q}_{zu} = 4720 \text{ W} \quad (11.24)$$

Berechnung der Sauerstoffmenge im Luftstrom

mit: $V_{n,O_2} = 0,0224 \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$ $\text{Vol}\% = 20,9\%$ $\dot{V}_{O_2} = \dot{V} * \text{Vol}\%$ $\dot{n}_{O_2} = \frac{\dot{V}_{O_2}}{V_{n,O_2}}$

$$\Rightarrow 3 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \triangleq 28,0527 \frac{\text{mol O}_2}{\text{h}}$$

$$\Rightarrow 5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \triangleq 46,75446 \frac{\text{mol O}_2}{\text{h}}$$

$$\Rightarrow 7 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \triangleq 65,45625 \frac{\text{mol O}_2}{\text{h}}$$

Berechnung der Luftüberschusszahl λ

Tabelle 8.2 Kennwerte zur Berechnung des Luftüberschusses

Kennwerte Pellets / Brennstoff wie verfeuert -roh-		
Wasser (H ₂ O) -roh-	mol/kg	4,70156445
Kohlenstoff (C) -roh-	mol/kg	33,71856428
Wasserstoff (H) -roh-	mol/kg	63,30265
Sauerstoff (O) -roh-	mol/kg	-20,58480899
Stickstoff (N) -roh-	mol/kg	1,220201797
Schwefel (S) -roh-	mol/kg	0,057934346
Chlor (Cl) -roh-	mol/kg	0,071788049
Molares Volumen $V_{n,O}$	l/mol	11,206984

$$V_{L,st} = (M_C + M_O + M_H + M_S) * \Delta m * V_{n,O} \quad (11.25)$$

$$V_{L,tat} = Q * t \quad (11.26)$$

$$\lambda = \frac{V_{L,tat}}{V_{L,st}} \quad (11.27)$$

Ergebnisse Ascheanalysen:**Analysenbefund Nr.** 2015 / 146 / 0827**Analysenauftrag** Untersuchung von 2 Ascheproben auf ihre Zusammensetzung sowie die Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens.**Auftrag / Probeneingang** 03.12.2015

Untersuchungszustand: an = analysenfeucht, wf = wasserfrei
 n. b. nicht bestimmbar, unter der Bestimmungsgrenze
 n. n. nicht nachweisbar, unter Nachweisgrenze

Analysenergebnisse

Labor Nr.	827/15	828/15
Probenkennzeichnung	V 6	V 26
Konsistenz, Aussehen	fest, pulverig	fest, pulverig
Farbe	Betongrau	Betongrau
Besonderheiten	keine	keine

Ascheschmelzverhalten	wf	wf
Sinterbeginn, °C	780	770
Erweichungstemperatur, °C	1110	1100
Halbkugeltemperatur, °C	1150	1170
Fließtemperatur, °C	1190	1200

Labor Nr.	827/15	828/15
Probenkennzeichnung	V 6	V 26

Ascheschmelzverhalten	wf	wf
Erweichungsbereich, °C	1110 - 1150	1100 - 1170
Fließbereich, °C	1150 - 1190	1170 - 1200

Elementaranalyse	wf	wf
Gesamtkohlenstoff (TC), %	14,9	15,0
organ. Kohlenstoff (TOC), %	14,3	14,6
anorgan. Kohlenstoff (TIC), %	0,58	0,43
Kohlendioxid (CO ₂)	2,13	1,58

Fortsetzung Analysenergebnisse

Hauptelemente als Oxide	wf	wf
Aluminiumoxid (Al ₂ O ₃), %	4,24	4,46
Bariumoxid (BaO), %	0,049	0,047
Kalziumoxid (CaO), %	12,6	12,4
Eisenoxid (Fe ₂ O ₃), %	2,19	3,26
Kaliumoxid (K ₂ O), %	13,6	13,9
Magnesiumoxid (MgO), %	4,55	4,73
Manganoxid (MnO ₂), %	0,086	0,107
Natriumoxid (Na ₂ O), %	0,193	0,175
Phosphoroxid (P ₂ O ₅), %	4,44	4,21
Schwefeltrioxid (SO ₃), %	1,77	1,55
Siliziumoxid (SiO ₂), %	39,7	40,1
Strontiumoxid (SrO ₂), %	0,028	0,027
Titanoxid (TiO ₂), %	0,240	0,253
Summe Oxide + TOC + CO ₂	100,2	100,3