

# Schlussbericht

## zum Vorhaben

Thema:

**Verbundvorhaben: Entwicklung einer Feuerungsanlage zur energetischen Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen auf Basis der AirRo®-Brennertechnologie; Teilvorhaben 1: Grundlegende Untersuchungen**

Zuwendungsempfänger:

**Universität Stuttgart - Fakultät 4 Energie-, Verfahrens- und Biotechnik - Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK)**

Förderkennzeichen:

**11NR321 bzw. 22032111**

Laufzeit:

01.08.2012 bis 30.09.2014

Datum der Veröffentlichung:

**Mai 2015**

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

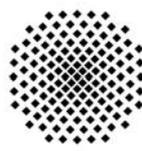
Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.



## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart <b>Schlussbericht</b>
3a. Titel des Berichts <b>Verbundvorhaben: Entwicklung einer Feuerungsanlage zur energetischen Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen auf Basis der AirRo®-Brennertechnologie; Teilvorhaben 1: Grundlegende Untersuchungen</b>	
3b. Titel der Publikation	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Juschka, Winfried Struschka, Michael	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2014
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))	6. Veröffentlichungsdatum Mai 2015
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  <b>Universität Stuttgart - Fakultät 4 Energie-, Verfahrens- und Biotechnik - Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) Pfaffenwaldring 23 70569 Stuttgart</b>	7. Form der Publikation
13. Fördernde Institution (Name, Adresse)  <b>Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) 11055 Berlin</b>	9. Ber.Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen *) <b>22032111 bzw. 11NR321</b>
	11a. Seitenzahl Bericht 70
	11b. Seitenzahl Publikation
	12. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung: max. 2000 Zeichen Die energetische Verwertung von landwirtschaftlichen Reststoffen, wie z.B. Heu, Stroh und Reste der Getreidereinigung, ist aus wirtschaftlichen und energiepolitischen Gesichtspunkten in Betracht zu ziehen. Allerdings ist deren Nutzung gegenüber Holzbrennstoffen aufgrund von ungünstigen Brennstoffeigenschaften feuerungstechnisch anspruchsvoller. Die derzeit auf dem Markt verfügbaren Feuerungen im Bereich von 100 kW für landwirtschaftliche Reststoffe können weder die Betriebssicherheit noch das geforderte Emissionsniveau mit einem vertretbaren Wartungsaufwand garantieren. In einem Verbundprojekt wurde ein neues Verbrennungskonzept entwickelt und intensiv getestet. Die entwickelte Feuerungsanlage wurde mit einer Luftstufung ausgerüstet, deren Prinzip auf der Aufteilung der Verbrennungsphasen Entgasung, Oxidation der Entgasungsrückstände und Verbrennung der Pyrolysegase in räumlich getrennten Reaktionsräumen beruht. Als Vertreter für landwirtschaftliche Reststoffe wurden Heupellets und als Referenzbrennstoff wurden DINPlus Holzpellets verfeuert. Durch den konstruktiven Aufbau der Feuerungsanlage und mit Hilfe der verwendeten Messtechnik konnte eine umfassende Stoffstrombilanz erstellt werden und die Einflussparameter bei der Bildung und Reduktion von Stickstoffoxiden aufgezeigt werden. Neben einer weitgehend vollständigen Verbrennung konnten vor allem die Stickstoffoxidemissionen deutlich reduziert werden. Es ergab sich ein signifikanter Zusammenhang von Stickstoffoxidkonzentrationen im Abgas und den Reduktionsbedingungen in der Ausbrandzone, die mit Hilfe der numerischen Strömungs- und Verbrennungssimulation abgebildet werden konnte. Die neuen Erkenntnisse liefern wertvolle Informationen für die Entwicklung neuer Feuerungsanlagen für landwirtschaftliche Reststoffe und deren optimaler Betriebsführung.	
19. Schlagwörter Biomasse, landwirtschaftliche Reststoffe, Verbrennung, Stickstoffoxide, CFD-Simulation	
20. Verlag	21. Preis





Abteilung  
Reinhaltung der Luft

Verbundvorhaben

**Entwicklung einer Feuerungsanlage zur  
energetischen Nutzung von landwirtschaft-  
lichen Reststoffen auf Basis der AirRo<sup>®</sup>-  
Brennertechnologie**

Teilvorhaben 1: Grundlegende Untersuchungen



Verbundvorhaben: Entwicklung einer Feuerungsanlage zur energetischen Nutzung von  
landwirtschaftlichen Reststoffen auf Basis der AirRo®-Brennertechnologie;  
Teilvorhaben 1: Grundlegende Untersuchungen

**Winfried Juschka**

**Michael Struschka**

Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK)

Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart

Tel.: +49 711 685 6 3487

Fax: +49 711 685 6 3491

[ifk@ifk.uni-stuttgart.de](mailto:ifk@ifk.uni-stuttgart.de)

Mai 2015

# Inhalt

<b>1 Einleitung und Zielsetzung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Kenntnisstand</b> .....	<b>1</b>
2.1 Gesetzliche Ausgangslage .....	1
2.2 Eigenschaften biogener Feststoffe .....	4
2.3 Bildung von relevanten Luftschadstoffe .....	13
2.4 Feuerungstechnik zur Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe.....	18
<b>3 Arbeitsprogramm und Untersuchungsmethoden</b> .....	<b>24</b>
3.1 Arbeitsprogramm .....	24
3.2 Anlagenbeschreibung .....	24
3.3 Mess- und Probenahmetechnik .....	25
3.4 Grundlagen der statistischen Versuchsplanung (DoE) .....	27
<b>4 Brennerentwicklung</b> .....	<b>28</b>
4.1 Energie und Stoffstrombilanzierung .....	30
4.2 Anwendung der DoE-Methodik auf das Brennersystem .....	31
4.3 Ergebnisse erster Prototyp mit Holzpellets .....	33
4.4 Ergebnisse erster Prototyp mit Heupellets.....	37
4.5 Redesign .....	39
4.6 Ergebnisse zweiter Prototyp mit Holzpellets .....	44
4.7 Ergebnisse zweiter Prototyp mit Heupellets .....	49
4.8 Simulation der Ausbrandzone.....	54
4.9 Gewonnene Erkenntnisse mit den beiden Prototypen.....	57
<b>5 Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>60</b>
<b>6 Literatur</b> .....	<b>63</b>



## 1 Einleitung und Zielsetzung

Die starke Nachfrage nach Holzbrennstoffen und die steigenden Preise der Energieträger führen zur Suche nach alternativen biogenen Brennstoffen, wie z.B. Heu, Miscanthus, Stroh oder Reste der Getreidereinigung. Die energetische Verwertung dieser landwirtschaftlichen Reststoffe ist aus wirtschaftlichen und energiepolitischen Gesichtspunkten in Betracht zu ziehen. Allerdings ist deren Nutzung gegenüber Holzbrennstoffen aufgrund von ungünstigen Brennstoffeigenschaften technisch anspruchsvoller, um vergleichbare Betriebssicherheiten, Emissionsniveaus und Wartungsaufwand zu erreichen. Die derzeit auf dem Markt verfügbaren Feuerungen im Bereich von 100 kW für landwirtschaftliche Reststoffe können die Betriebssicherheiten, Emissionsniveaus und Wartungsaufwand nicht garantieren. Daher soll im Verbundprojekt mit der Fa. Wörle UmweltTechnik GmbH eine Feuerungstechnik, basierend auf der AirRo®-Brennertechnologie der Fa. Wörle, entwickelt und grundsätzliche Vorgänge und Optimierungsmöglichkeiten bei der thermischen Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen untersucht werden.

## 2 Kenntnisstand

### 2.1 Gesetzliche Ausgangslage

Die Emissionsgrenzwerte von Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe werden vom Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) durch die Bundesimmissionsschutzverordnungen (BImSchV) festgelegt. Anlagen mit einer installierten Feuerungswärmeleistung von weniger als 1.000 kW sind dabei nicht genehmigungsbedürftig und unterliegen den Grenzwerten der 1. BImSchV [BMU, 2010] für kleine und mittlere Feuerungsanlagen. Anlagen zur Verbrennung halmgutartiger Brennstoffe haben hier jedoch einen Sonderstatus, diese sind bereits ab einer installierten Feuerungswärmeleistung von mehr als 100 kW genehmigungsbedürftig. Mit der Novellierung der 1. BImSchV vom März 2010 wurde eine deutliche Verschärfung der bisher gültigen Grenzwerte für Kleinformungsanlagen in zwei Stufen beschlossen. Die Leistungsgrenze für die verpflichtende Einhaltung von Emissionsgrenzwerten wurde gleichzeitig auf 4 kW gesenkt. Zudem wurden im neuen Entwurf neben Stroh auch andere landwirtschaftliche Reststoffe als Regelbrennstoffe zugelassen. Sie werden in §3, Abs. 1 der 1. BImSchV unter den Nummern 8 und 13 aufgeführt. Die aktuell gültigen Grenzwerte der 1. BImSchV für diese Brennstoffe können der Tabelle 1 entnommen werden. Landwirtschaftliche Reststoffe dürfen, im Gegensatz zu anderen Brennstoffen, nur in automatisch beschickten Feuerungsanlagen eingesetzt werden. Ebenso ist ihr Einsatz z.T. auf bestimmte Verbrauchergruppen beschränkt (z.B. Betriebe der Land- und Forstwirtschaft, Getreidemühlen, Agrarhandel). Des Weiteren gelten für diese Brennstoffe besondere Anforderungen, die bei der Typprüfung einzuhalten sind.

**Tabelle 1 Emissionsgrenzwerte der 1. BImSchV**

Brennstoff nach § 3 Absatz 1	FWL [kW]	Staub	Staub	CO	CO
		[g/m <sup>3</sup> ] 1. Stufe	[g/m <sup>3</sup> ] 2. Stufe	[g/m <sup>3</sup> ] 1. Stufe	[g/m <sup>3</sup> ] 2. Stufe
<b>Holz (Nr. 4 bis 5)</b>	<b>4 – 500</b>	<b>0,1</b>	<b>0,02</b>	<b>1,0</b>	<b>0,4</b>
	<b>&gt; 500</b>	<b>0,1</b>	<b>0,02</b>	<b>0,5</b>	<b>0,4</b>
<b>landwirtschaftliche Reststoffe (Nr. 8 und 13)*</b>	<b>4 – &lt;100</b>	<b>0,1</b>	<b>0,02</b>	<b>1,0</b>	<b>0,4</b>
		PCDD/F [ng/m <sup>3</sup> ]	Stickstoffoxide [g/m <sup>3</sup> ] 1. Stufe	Stickstoffoxide [g/m <sup>3</sup> ] 2. Stufe	CO [g/m <sup>3</sup> ] 1. + 2. Stufe
<b>Typprüfung: landwirtschaftliche Reststoffe (Nr. 8 und 13)*</b>	<b>4 – &lt;100</b>	<b>0,1</b>	<b>0,6</b>	<b>0,5</b>	<b>0,25</b>

\* Landwirtschaftliche Reststoffe nach § 3, Absatz 1, Nr. 8 und Nr. 13: Stroh und ähnliche pflanzliche Stoffe, nicht als Lebensmittel bestimmtes Getreide wie Getreidekörner und Getreidebruchkörner, Getreideganzpflanzen, Getreideausputz, Getreidespelzen und Getreidehalmreste sowie Pellets aus vorgenannten Brennstoffen und sonstige nachwachsende Rohstoffe entsprechend den Anforderungen von Absatz 5, § 3

Sauerstoffbezug 13 % für Staub und CO

1. Stufe: bei Errichtung nach dem 22.03.2010

2. Stufe: bei Errichtung nach dem 31.12.2014

FWL: installierte Feuerungswärmeleistung

Staub: angegeben als Gesamtstaub nach VDI 2066 Blatt 1

PCDD/F: Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane (PCDD/F angegeben in I TEQ)

Stickstoffoxide: NO und NO<sub>2</sub> zusammengefasst als NO<sub>x</sub> bezeichnet und als Masse von NO<sub>2</sub> angegeben

Biomassefeuerungen für die Brennstoffe Nummern 8 und 13 der 1. BImSchV mit einer installierten Feuerungsleistung über 100 kW sind nach der 4. BImSchV genehmigungspflichtig. Es ist ein Genehmigungsverfahren nach § 19 BImSchG erforderlich, dabei muss die Einhaltung der Grenzwerte nach TA-Luft nachgewiesen werden. In Kapitel 5.4.1.3 der TA-Luft [BMU, 2002] sind für Anlagen der Nummer 1.3 bei Einsatz von Stroh oder ähnlichen pflanzlichen Stoffen (z.B. Getreidepflanzen, Gräser, Miscanthus) mit einer Feuerungswärmeleistung von weniger als 50 MW bzw. 1 MW auch Emissionsgrenzwerte festgelegt (siehe Tabelle 2).

**Tabelle 2 Emissionsgrenzwerte der TA-Luft**

**Grenzwerte TA-Luft für Anlagen Nummer 1.3  
mit Feuerungswärmeleistung <1 MW**

Bezugssauerstoffgehalt	[%]	11
Gesamtstaub	[mg/m <sup>3</sup> ]	50
Kohlenmonoxid (CO bei Nennlast)	[g/m <sup>3</sup> ]	0,25
Stickoxide (NO <sub>x</sub> angegeben als NO <sub>2</sub> )	[g/m <sup>3</sup> ]	0,50
organische Stoffe (TOC)	[mg/m <sup>3</sup> ]	50
Schwefeloxide (SO <sub>x</sub> angegeben als SO <sub>2</sub> )	[g/m <sup>3</sup> ]	0,35
gasförmige anorganische Chlorverbindungen (angegeben in HCl)	[mg/m <sup>3</sup> ]	30
Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane (PCDD/F angegeben in I-TEQ)	[ng/m <sup>3</sup> ]	0,1

## 2.2 Eigenschaften biogener Feststoffe

Die qualitätsbestimmenden Eigenschaften von Festbrennstoffen lassen sich im Wesentlichen in die drei Merkmalgruppen Elementarzusammensetzung, brennstofftechnische und physikalische Eigenschaften einordnen. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Qualitätsmerkmale und ihre Wirkungen sind in Tabelle 3 aufgelistet.

**Tabelle 3 Qualitätsmerkmal von Festbrennstoffen**  
[Kaltschmitt et al., 2009]

Qualitätsmerkmal	wichtigste Auswirkung
<b><i>Elementzusammensetzung</i></b>	
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 Stickstoffoxide (NO <sub>x</sub> ) und Lachgas (N <sub>2</sub> O)
Schwefel (S)	Bildung von SO <sub>x</sub> , Hochtemperaturkorrosion
Kalium (K)	Hochtemperaturkorrosion, Ascheerweichungsverhalten, Partikelemission
Schwermetalle	Ascheverwertung, Emissionen, katalytische Wirkung bei der PCDD/F-Bildung
<b><i>Brennstofftechnische Eigenschaften</i></b>	
Wassergehalt	Heizwert, Lagerfähigkeit, Brennstoffgewicht, Verbrennungstemperatur
Heizwert	Energiegehalt des Brennstoffes, Anlagenauslegung
Aschegehalt	Partikelemissionen, Rückstandsbiidung
Ascheerweichungspunkt	Anlagenbetrieb, Verbrennungsbedingungen, Schlackebildung, Wartungsbedarf
<b><i>Physikalische Eigenschaften</i></b>	
Lagerungsdichte	Transport- und Lageraufwendung, Logistikplanung
Teilchendichte	Verbrennungseigenschaften
Größenverteilung	Rieselfähigkeit, Trocknungseigenschaft, Staubbildung
Feinanteil	Lagerdichte, Lagerfähigkeit, Staubbildung
Abriebfestigkeit	Entmischung, Verluste

## Elementarzusammensetzung

Pflanzliche Biomasse setzt sich aus einer Vielzahl chemischer Elemente zusammen. Von den auf der Erde natürlich vorkommenden Elementen gelten 26 für die Pflanzen als biologisch notwendig, hierbei kann zwischen Haupt- und Spurenelementen unterschieden werden. Zu den Hauptelementen zählen außer den Elementen Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O) und Wasserstoff (H), auch die verbrennungsrelevanten Komponenten Stickstoff (N), Schwefel (S) und Chlor (Cl). Tabelle 4 zeigt die Hauptelemente der eingesetzten Brennstoffe und deren Entgasungsrückstände. Die Entgasungsrückstände wurden durch den in diesem Forschungsvorhaben entwickelten Prototyp einer Feuerungsanlage erzeugt. Das im Prototyp verwendete Verbrennungskonzept wird im weiteren Verlauf detailliert beschrieben.

**Tabelle 4** Hauptelemente und Heizwert der eingesetzten Brennstoffe und deren Entgasungsrückstand (Entg. Rück.)

		Holzpellet Charge 1	Entg. Rück. Holzpellet Charge 1	Heupellet Charge 2	Entg. Rück. Heupellet Charge 2
flüchtige Stoffe -roh-	%	79,1	10,8	67,5	10,2
Fixed C -roh-	%	15,6	86,5	15,7	54,9
Wasser (H <sub>2</sub> O) -roh-	%	4,9	0,0	7,2	0,0
Kohlenstoff (C) -roh-	%	47,8	91,6	41,2	59,2
organ. Wasserstoff (H) -roh-	%	5,33	1,60	5,15	0,89
Sauerstoff (O) -roh-	%	41,4	3,8	35,2	2,9
Stickstoff (N) -roh-	%	0,10 <sup>1</sup>	0,27	1,62	1,28
Schwefel (S) -roh-	%	n.b. <0,1	n.b. <0,1	n.b. <0,1	0,17
Chlor (Cl) -roh-	%	n.b. <0,01	-	-	0,67
Asche (A) -roh-	%	0,42	2,70	9,55	34,88
Heizwert (Hi) -roh-	MJ/kg	17,68	32,92	15,11	20,39
Heizwert (Hi) –waf-	MJ/kg	19,69	34,14	19,80	31,57

roh: Brennstoff wie verfeuert (feucht) waf: wasser- und aschefrei

<sup>1</sup> Der Gehalt an Stickstoff lag unter dem Bestimmungswert von 0,3, daher wurde ein Literaturwert aus [Hartmann et.al, 2007] genutzt

n.b. – nicht bestimmbar, unterhalb der Nachweisgrenze

Bei den Hauptelementen unterscheiden sich die Holzbrennstoffe, bis auf den Stickstoff- und Ascheanteil, nur geringfügig. Die Unterschiede des Heizwertes beruhen hauptsächlich durch den unterschiedlichen Wasser- und Aschegehalt der Brennstoffe.

Des Weiteren weisen die Brennstoffe Unterschiede im Kohlenstoff zu Wasserstoffverhältnisse ( $C/H$ ) auf (für Holzpellets liegt dieses bei 9,0 und für Heupellets bei 6,3). Bei den Entgasungsrückständen sind noch Wasserstoffgehalte von über einem Prozent feststellbar und damit sind die Entgasungsrückstände noch nicht vollständig entgast. Die Unterschiede des Heizwertes der Entgasungsrückstände der Holz- bzw. Heupellets beruhen auf den hohen Aschegehalte der Heurückstände und dem Unterschied im Kohlenstoff zu Wasserstoffverhältnis ( $C/H$ ) (Holzrückstände 57,4 und Heurückstände 66,2).

Neben den Hauptelementen enthält Biomasse zusätzlich eine ganze Reihe unterschiedlicher Spurenelemente, welche Tabelle 5 und Tabelle 6 zeigt. Einige der Spurenelemente sind für das Ascheschmelzverhalten verantwortlich. Durch die hohen Aschegehalte der Heupellets sind auch die Massenanteile der Spurenelemente, bezogen auf den Gesamtbrennstoff, gegenüber Holzpellets deutlich höher.

**Tabelle 5**      **Elementaranalyse der Asche von Holzpellets der Charge 1 bis 3**

	Holzpellet Charge 1		Holzpellet Charge 2		Holzpellet Charge 3	
	% <sub>A</sub>	% <sub>B</sub>	% <sub>A</sub>	% <sub>B</sub>	% <sub>A</sub>	% <sub>B</sub>
Aluminium (Al)	0,64	0,03	0,75	0,02	0,39	0,02
Barium (Ba)			0,28	0,01	0,29	0,01
<b>Eisen (Fe)</b>	<b>0,98</b>	<b>0,04</b>	<b>0,90</b>	<b>0,03</b>	<b>0,80</b>	<b>0,03</b>
<b>Kalium (K)</b>	<b>10,7</b>	<b>0,45</b>	<b>13,0</b>	<b>0,42</b>	<b>12,0</b>	<b>0,52</b>
<b>Kalzium (Ca)</b>	<b>24,1</b>	<b>1,02</b>	<b>25,7</b>	<b>0,84</b>	<b>26,1</b>	<b>1,13</b>
<b>Magnesium (Mg)</b>	<b>3,56</b>	<b>0,15</b>	<b>3,07</b>	<b>0,10</b>	<b>2,92</b>	<b>0,13</b>
Mangan (Mn)	4,57	0,19	2,83	0,09	4,58	0,0
<b>Natrium (Na)</b>	<b>0,62</b>	<b>0,03</b>	<b>0,43</b>	<b>0,01</b>	<b>0,46</b>	<b>0,02</b>
<b>Phosphor (P)</b>	<b>1,66</b>	<b>0,07</b>	<b>1,71</b>	<b>0,06</b>	<b>2,49</b>	<b>0,11</b>
Schwefel (SO)	0,69	0,03	0,80	0,03	0,96	0,04
<b>Silizium (Si)</b>	<b>2,24</b>	<b>0,10</b>	<b>10,9</b>	<b>0,36</b>	<b>10,19</b>	<b>0,44</b>
Strontium (Sr)			0,08	0,00	0,09	0,00
Titan (Ti)			0,04	0,00	0,03	0,00

%<sub>A</sub> : Prozentualer Massenanteil der Asche [ $mg/mg_A \cdot 100$ ]

%<sub>B</sub> : Massenanteil bezogen auf den rohen Brennstoff [ $mg/mg_B \cdot 100$ ]

**Tabelle 6** Elementaranalyse der Asche von Heupellets der Charge 1 und 3

	Heupellet Charge 1		Heupellet Charge 3	
	% <sub>A</sub>	% <sub>B</sub>	% <sub>A</sub>	% <sub>B</sub>
Aluminium (Al)	1,64	1,56	1,44	1,26
Barium (Ba)	0,03	0,03	0,03	0,03
<b>Eisen (Fe)</b>	<b>1,06</b>	<b>1,01</b>	<b>1,04</b>	<b>0,91</b>
<b>Kalium (K)</b>	<b>17,6</b>	<b>16,8</b>	<b>16,8</b>	<b>14,7</b>
<b>Kalzium (Ca)</b>	<b>7,36</b>	<b>7,04</b>	<b>7,93</b>	<b>6,96</b>
<b>Magnesium (Mg)</b>	<b>3,67</b>	<b>3,51</b>	<b>3,06</b>	<b>2,68</b>
Mangan (Mn)	0,09	0,09	0,06	0,05
<b>Natrium (Na)</b>	<b>0,22</b>	<b>0,21</b>	<b>0,18</b>	<b>0,16</b>
<b>Phosphor (P)</b>	<b>2,81</b>	<b>2,69</b>	<b>2,57</b>	<b>2,26</b>
Schwefel (SO)	1,03	0,98	1,08	0,95
<b>Silizium (Si)</b>	<b>18,0</b>	<b>17,2</b>	<b>19,2</b>	<b>16,8</b>
Strontium (Sr)	0,02	0,02	0,02	0,02
Titan (Ti)	0,1	0,09	0,08	0,07

%<sub>A</sub> : Prozentualer Massenanteil der Asche [ $\text{mg}/\text{mg}_A \cdot 100$ ]

%<sub>B</sub> : Massenanteil bezogen auf den rohen Brennstoff [ $\text{mg}/\text{mg}_B \cdot 100$ ]

Für Heupellets aus der Charge 2 wurde keine Analyse der Spurenelemente erstellt.

## Aschegehalt

Der Aschegehalt des Brennstoffes ist ein wichtiges brennstofftechnisches Merkmal. Mit zunehmendem Aschegehalt nimmt meist auch die Staubkonzentration im Abgas zu, wodurch sich die Notwendigkeit einer Entstaubung des Abgases ergibt, um die geltenden Grenzwerte einzuhalten. Das gilt insbesondere für Anlagen, bei denen das Glutbett vermehrt mechanischen Einflüssen ausgesetzt ist bzw. direkt von Verbrennungsluft durchströmt wird. Hierdurch können feinere oder auch gröbere Partikel vom Verbrennungsluftstrom mitgerissen werden. Zusätzlich ist mit einer Erhöhung der Temperatur im Glutbett zurechnen, wodurch verstärkt leichtflüchtige anorganische Verbindungen austragen werden.

Für größere Feuerungsanlagen mit entsprechend hohem Ascheanfall (Rost- und Filterasche) stellt sich die Frage nach einer kostengünstigen Entsorgung bzw. Verwendung der Aschen. Bei Holzbrennstoffen ist die Rückstandsmenge aufgrund der niedrigen Aschegehalte meist deutlich geringer als bei Halmgütern und somit ist die Aschehandhabung und Entsorgung mit niedrigeren Kosten verbunden. Bei Halmgütern kann

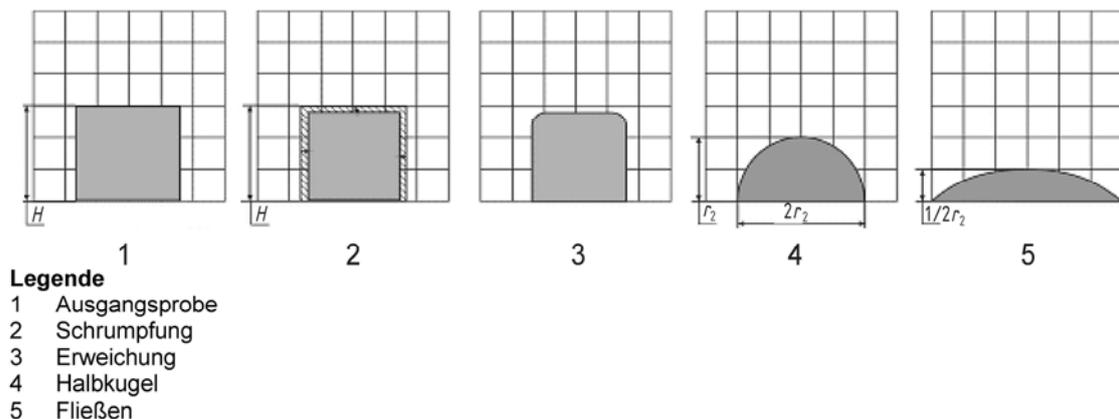
der Gehalt an toxischen Stoffen in der Filterasche, wie z.B. Schwermetalle, Chlor, polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane (PCDD/F) und polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH), eine wichtige Rolle bei der Entsorgung spielen.

### Ascheschmelzverhalten

Bei Brennstoffen mit niedrigen Ascheschmelzpunkten besteht ein hohes Risiko, dass das Überschreiten einer kritischen Temperatur über längere Zeit zu Verschlackungen im Brennstoffbett und zu Verschmutzungen im Feuerraum- und im Wärmetauscherbereich führen kann. Diese Verschlackungen und Verschmutzungen können Störungen, Betriebsunterbrechungen und Veränderungen bei der Verbrennungsluftzufuhr hervorrufen.

Das Ascheschmelzverhalten wird durch eine Vielzahl von Vorgängen beeinflusst. So kann durch die Temperatureinwirkung im Feuerraum eine chemische Zersetzung der ursprünglichen Mineralienverbindungen stattfinden und neue Verbindungen mit neuen Charakteristiken in Bezug auf das Ascheschmelzverhalten gebildet werden. Bei einigen Zersetzungsprodukten kommt es zu einer Verflüchtigung in die Gasphase. Dabei nimmt im besonderen Natrium und Kalium eine kritische Stellung ein. Diese Alkalimetalle liegen im Verbrennungsprozess nicht als Reinstoff vor, sondern vornehmlich als Carbonate, Sulfate und Chloride. Kalium/Natriumsulfat, Kalium/Natriumchlorid und Kalium/Natriumcarbonat und deren Gemische weisen eine niedrige Solidustemperatur auf und können schon bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen im schmelzflüssigen Zustand vorliegen.

Zur Bestimmung des Ascheschmelzpunktes wird das Verfahren nach DIN CEN/TS 15370-1 [2006] verwendet. Hierbei wird der Brennstoff unter einer oxidierenden Atmosphäre bei 550°C verascht und zu einem Probenkörper gepresst. Dieser Probenkörper wird in einem Ofen erhitzt und dessen charakteristische Formänderung untersucht. Die einzelnen Phasen während des Schmelzvorganges der Asche sind in Abbildung 1 dargestellt.



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

Erreicht der Probenkörper die jeweilige charakteristische Phase, wird hierzu die betreffende Temperatur ermittelt. Die Temperaturen sind wie folgt definiert:

- **Sinterbeginn (ST):** Temperatur, bei der das Schrumpfen des Probekörpers beginnt.
- **Erweichungstemperatur (ET):** Temperatur, bei der erste Anzeichen einer Abrundung von Kanten des Probekörpers infolge von Schmelzens auftreten.
- **Halbkugeltemperatur (HT):** Temperatur, bei der die Form des Probekörpers annähernd halbkugelförmig wird.
- **Fließtemperatur (FT):** Temperatur, bei der die Asche auf der sie tragenden Platte in einer Schicht ausgebreitet ist.

In [Oberberger, 2014] konnte ein Zusammenhang der Elemente Kalium, Kalzium, Magnesium, Phosphor und Silizium für den Sinterbeginn (ST) hergestellt werden, vgl. Gleichung (1).

$$ST = 102,71 \cdot \frac{(Si + P + K)}{Ca + Mg} + 1392,2 \quad (1)$$

Die Elemente Eisen, Kalium, Kalzium, Magnesium, Natrium und Silizium sind nach [Aeckersberg, 2011] für das Ascheschmelzverhalten von Holzpellets von Relevanz, vgl. Gleichung (2) und (3). Für eine Erhöhung der charakteristischen Temperaturen des Ascheschmelzverhaltens (ET) wurden die Elemente Eisen, Kalzium, Natrium identifiziert, wobei Kalzium eine starke Erhöhung der Temperaturen bewirkt. Natrium und Eisen bewirken nur einen geringen positiven Effekt. Die Elemente Kalium, Magnesium, Silizium bewirken eine Verringerung der Temperaturen (FT), wobei der negative Einfluss von Kalium gering ist. Magnesium und vor allem Silizium beeinflusst die Temperaturen von allen Elementen am stärksten.

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

$$FT = 1682,810 + 23,081 \cdot Na - 1,383 \cdot K - 36,725 \cdot Mg + 9,112 \cdot Ca + 5,523 \cdot Fe - 37,180 \cdot Si \quad (3)$$

Tabelle 7 zeigt charakteristischen Temperaturen des Ascheschmelzverhaltens von Holzpellets nach [DIN CEN/TS 15370-1, 2006]. Ebenfalls sind die nach [Aeckersberg, 2011] und [Oberberger, 2014] mit Hilfe der Aschezusammensetzung berechnete Temperaturen aufgetragen.

Bei den Holzpellets der Chargen 1 bis 3 liegen alle Temperaturen weit über den in Feuerräumen herrschenden Bedingungen und es ist mit keiner Verschlackung zu

rechnen. Einzig auffällig ist die Holzpelletprobe der Charge 3. Bei dieser Probe unterscheiden sich die charakteristischen Temperaturen nur um wenige Grade. Abbildung 2 zeigt den Verlauf der relativen Höhe über die Temperatur der Holzpellets der Charge 1 bis 3.

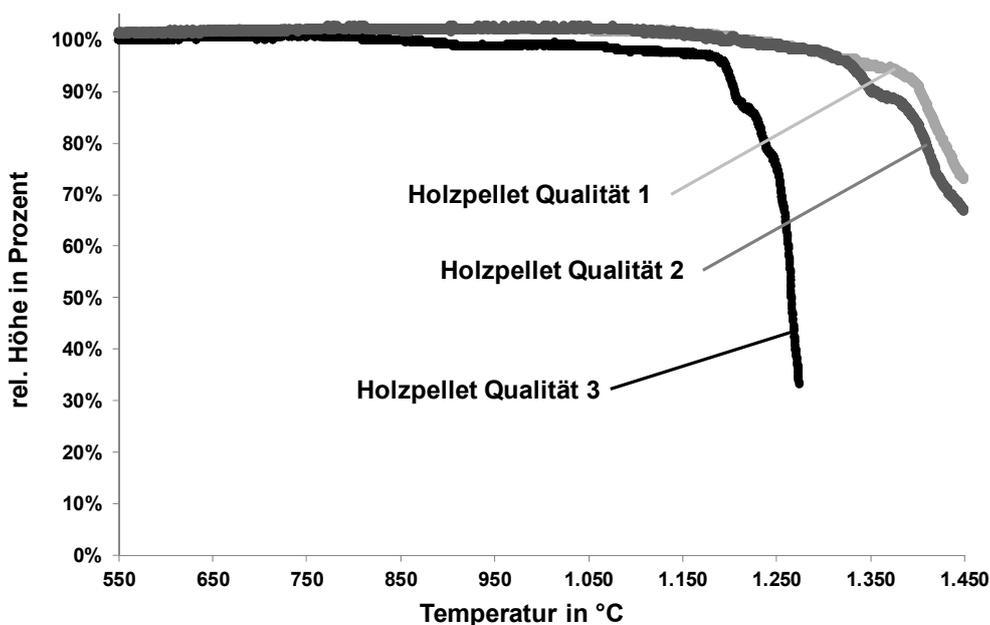
**Tabelle 7 Charakteristische Temperaturen des Ascheschmelzverhalten von Holzpellets**

	Holzpellet Charge 1		Holzpellet Charge 2		Holzpellet Charge 3	
	Analyse	berech.	Analyse	berech.	Analyse	berech.
Sinterbeginn °C	-	1.336 <sup>2</sup>	1.290	1.300 <sup>2</sup>	1.230	1.305 <sup>2</sup>
Erweichungstemp. (ET) °C	-	1.385 <sup>1</sup>	1.370	1.250 <sup>1</sup>	1.360	1.275 <sup>1</sup>
Sphärischetemp. (ST) °C	1.500		n. b.		n. b.	
Halbkugeltemp. (HKT) °C	1.500		n. b.		n. b.	
Erweichungsbereich °C	n. b.		1.290 – 1.370		1.230 – 1.360	
Fließtemp. (FT) °C	1.500	1.693 <sup>1</sup>	n. b.	1.394 <sup>1</sup>	n. b.	1.433 <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Berechnung für Holzpellet nach [Aeckersberg, 2011]

<sup>2</sup> Berechnung nach [Oberberger, 2014]

n.b. = nicht bestimmbar



**Abbildung 2 Ascheschmelzverhalten von Holzpellets nach [DIN CEN/TS 15370-1, 2006]**

Hier ist der steile Abfall der relativen Höhe der Holzpelletprobe Charge 3 ab einer Temperatur von 1.200 °C gut zu erkennen. Ob diese Holzpellets mit der Charge 3 Probleme bei der Verbrennung verursachen, konnte leider nicht untersucht werden, da diese nicht in ausreichender Menge für Versuche zur Verfügung stand.

Die Berechnung der Erweichungs- und Fließtemperatur nach [Aeckersberg, 2011] und die Berechnung des Sinterbeginns nach [Oberberger, 2014] anhand der Aschezusammensetzung ergibt für Holzpellets vergleichbare Werte und stellt eine gute Alternative zur [DIN CEN/TS 15370-1, 2006] dar.

In Tabelle 8 sind charakteristische Temperaturen des Ascheschmelzverhaltes von Heupellets und deren Entgasungsrückstand nach [DIN CEN/TS 15370-1, 2006] aufgetragen. Mit angegeben sind die nach [Aeckersberg, 2011] und [Oberberger, 2014] mit Hilfe der Aschezusammensetzung berechneten Temperaturen.

Bei Heupellets liegen der Sinterbeginn im Bereich von 800 °C und der Anfang des Erweichungsbereichs im Bereich von 1.000 °C. Die Berechnung der Erweichungs- und Fließtemperatur nach [Aeckersberg, 2011] anhand der Aschezusammensetzung ergibt für Heupellets vergleichbare Werte und stellt eine gute Alternative zur [DIN CEN/TS 15370-1, 2006] dar, obwohl die Berechnung für Holzpellets entwickelt wurde. Bei der Berechnung des Sinterbeginns nach [Oberberger, 2014] anhand der Aschezusammensetzung ergeben sich zu hohe Abweichungen gegenüber der Analyse nach [DIN CEN/TS 15370-1, 2006].

Die charakteristischen Temperaturen des Ascheschmelzverhaltes des Entgasungsrückstandes von Heupellets sind vergleichbar mit den Heupellets der Charge 1 und 2. Abbildung 3 zeigt den Verlauf der relativen Höhe über der Temperatur der Heupellets und des Entgasungsrückstandes. Anhand des Ascheschmelzverhaltens der Heupellets ist bei der Verbrennung eine kritische Verschlackungsneigung zu vermuten. So traten in einem vorher durchgeführten Forschungsvorhaben [Struschka et al, 2014] massive Verschlackungen auf, obwohl die Feuerungsanlage mit einer wassergekühlten Brennmulde ausgestattet war und eine Brennstoffbewegung durch einen Ascheschieber erfolgte.

Die Anwendung von Kennzahlen für die Bewertung der Verschlackungs-, und Verschmutzungsneigung von Brennstoffen stellt eine weitere Möglichkeit dar. Eine Übersicht der Kennzahlen und deren Berechnung liefert [Pohl et al., 2001]. Die in der Literatur zu findenden empirisch ermittelten Kennzahlen sind hauptsächlich für die Bewertung von Kohleaschen, aber auch für Biomassebrennstoffe und Ersatzbrennstoffe, entwickelt worden. Werden die Kennzahlen für Heupellets der Charge 1 und 3 berechnet, so ergeben sich die in Tabelle 9 dargestellten Verschlackungs- und Verschmutzungsneigungen. Nach den Kennzahlen würden Heupellets mit einer Verschlackungs- und Verschmutzungsneigung, die zwischen hoch bis sehr hoch und mittel zu bewerten wäre. Die Anwendung der Kennzahlen auf Holzpellets ergeben unrealistische Ergebnisse. Holzpellets wären nach den Kennzahlen durchweg mit einer Verschlackungs- und Verschmutzungsneigung von hoch bis sehr hoch zu bewerten.

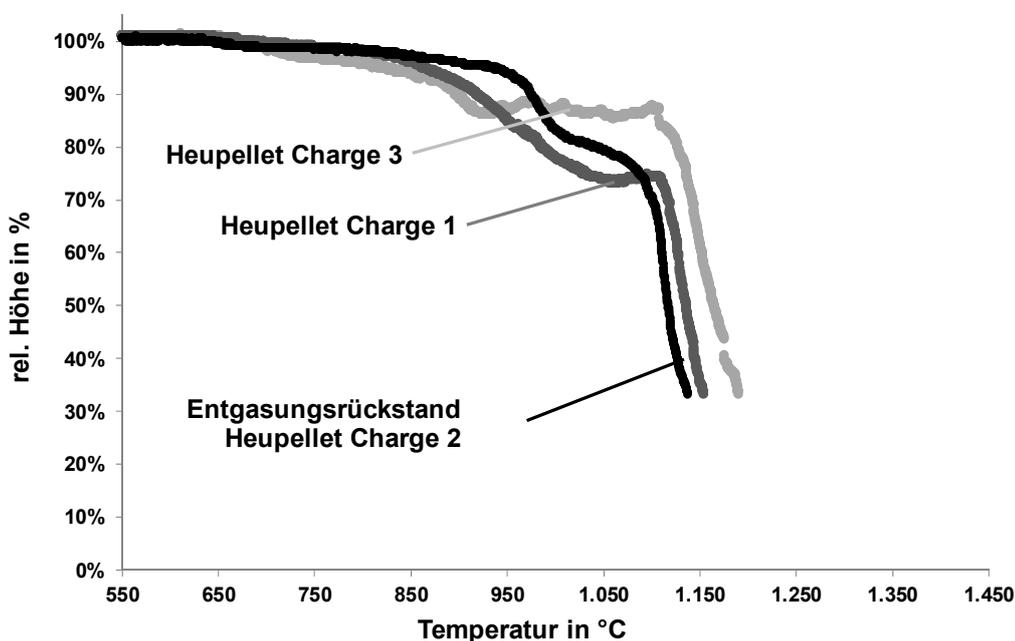
**Tabelle 8** Charakteristische Temperaturen des Ascheschmelzverhaltens der eingesetzte Heupellets und des Entgasungsrückstandes

	Heupellet Charge 1		Heupellet Charge 3		Entg. Rück. Heupellet Charge 2
	Analyse	berech.	Analyse	berech.	Analyse
Sinterbeginn °C	730	1.032 <sup>2</sup>	840	1.029 <sup>2</sup>	890
Erweichungtemp. (ET) °C	980	952 <sup>1</sup>	1.050	946 <sup>1</sup>	1.080
Sphärischetemp. (ST) °C	1.100.		1.090		1.100
Halbkugeltemp. (HKT) °C	1.160		1.130		1.120
Fließtemp. (FT) °C	1.190	915 <sup>1</sup>	1.150	933 <sup>1</sup>	1.140

<sup>1</sup> Berechnung für Holzpellet nach [Aeckersberg, 2011]

<sup>2</sup> Berechnung nach [Oberberger, 2014]

n.b. = nicht bestimmbar



**Abbildung 3** Ascheschmelzverhalten von Heupellets und deren Entgasungsrückstand nach [DIN CEN/TS 15370-1, 2006]

Aufgrund der großen Unsicherheit ist eine Charakterisierung anhand der Aschezusammensetzung des Brennstoffes in Bezug auf der Verschlackungs- und Verschmutzungsneigung mit Hilfe von charakteristischen Temperaturen und Kennzahlen ungeeignet und es bedarf noch weiterer Forschung.

**Tabelle 9 Bewertung der Heupellets mit Hilfe von Kennzahlen auf die Verschlackungs- und Verschmutzungsneigung**

	<b>Heupellet Charge 1</b>	<b>Heupellet Charge 3</b>
Base zu Säure Index	hoch bis sehr hoch	hoch bis sehr hoch
Verschlackungsindex	gering bis keine	gering bis keine
Eisenindex	mittel	mittel
Eisen + Calcium Index	hoch bis sehr hoch	mittel
Eisen / Kalzium Index	gering bis keine	gering bis keine
Silizium / Aluminium Index	hoch bis sehr hoch	hoch bis sehr hoch
SI Index	hoch bis sehr hoch	hoch bis sehr hoch
Silizium Verhältnis (Schlacke Viskosität)	mittel	mittel
Verschmutzungsindex (Fähigkeit der Asche zum Kleben)	mittel	mittel
Alkali Index	gering bis keine	gering bis keine

Die Gründe für die starke Verschlackungs- und Verschmutzungsneigung von Heupellets wurden erst gegen Ende dieses Projektes 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 und dichtere Agglomerate, die sich dann auch negativ auf das Abbrandverhalten auswirken. 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 grundsätzlich von den Vorgängen des Ascheschmelzverhaltens der Brennstoffasche.

### 2.3 Bildung von relevanten Luftschadstoffe

Die Emissionen von Kohlenmonoxid (CO), unverbrannten Kohlenwasserstoffen (total organic carbon - TOC) und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH)

spielen bei modernen Biomassefeuerungen und bei richtiger Betriebsführung eine untergeordnete Rolle. Dazu bedarf es allerdings die Einhaltung einer guten Durchmischung der Verbrennungsgase mit Sauerstoff und eine ausreichende Verweilzeit bei hohen Temperaturen, um einen nahezu vollständigen Ausbrand zu erreichen. Allerdings können bei Betriebsstörungen und ungünstigen Verbrennungsbedingungen wie z.B. bei [Struschka et al, 2014] die CO-Emissionen schnell die Grenzwertschwelle erreichen bzw. auch übersteigen. Dabei sind erhöhte Emissionswerte von unverbrannten Kohlenwasserstoffen und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe zu erwarten. In [Struschka et al, 2014] wurde auch eine Zunahme der PCDD/F Emissionen gemessen.

## Stickstoffoxide

Der Stickstoffgehalt des Brennstoffs wirkt sich direkt auf die Stickstoffoxidemissionen bei Biomassefeuerungen in dem hier betrachteten Leistungsbereich aus [Keller, 1994], [Eder et al., 2006], [Hartmann et al., 2007]. Die Stickstoffoxidkonzentrationen nehmen, bei vergleichbaren Verbrennungsbedingungen, mit steigendem Brennstoffstickstoffgehalt zu. Die Oxidation des im Brennstoff gebundenen Stickstoffs stellt hier der wichtigste  $\text{NO}_x$ -Bildungsmechanismus dar. Die Bildung von thermischen oder prompten NO ist aufgrund der Verbrennungsbedingungen nur von untergeordneter Bedeutung. Dies zeigten Verbrennungsversuche bei [Keller, 1994] mit der Substitution des Luftstickstoffes durch Argon. Zusätzlich konnte in [Good et al., 1996] der Einfluss der Feuerraumbelastung auf die Stickoxidbildung gezeigt werden.

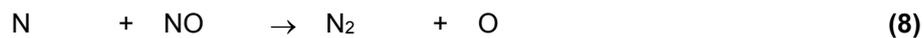
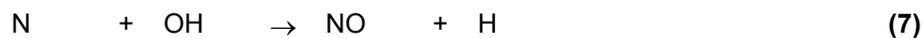
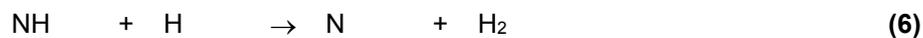
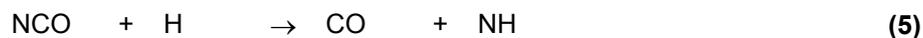
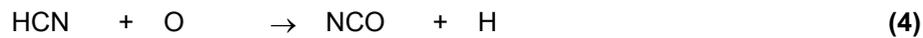
Durch Verminderung der Feuerungsleistung konnte eine Abnahme der Stickoxidemissionen um bis zu 20 bis 50 % beobachtet werden. Der Einfluss der Feuerraumbelastung konnte in [Struschka et al, 2014] nicht bestätigt werden, dort wurden bei Teillast ähnlich hohe  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen gemessen. Weiter konnte [Keller, 1994] und [Houshfar et al., 2012] einen Zusammenhang zwischen Primärluft und Stickstoffoxidemissionen feststellen. Sowohl [Keller, 1994] als auch [Houshfar et al, 2012] konnten durch Luftstufung ein Minimum der Stickstoffoxidkonzentration bei einer Primärluftzahl von 0,9 feststellen.

Die Bildungsmechanismen von Stickstoffverbindungen werden in [Keller, 1994] detailliert beschrieben. Bei der Vergasung von Biomassen wird der Brennstoffstickstoff in die stickoxidbildenden Komponenten (TFN - total fixed nitrogen) als Cyanwasserstoff (HCN), Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) und Stickstoffmonoxid (NO) freigesetzt. Der übrige Brennstoffstickstoff wird als elementarer Stickstoff freigesetzt. Ein gewisser Teil wird nicht freigesetzt und verbleibt in der Asche bzw. in den Entgasungsrückständen. In [Keller, 1994] weisen die Stickstoffverbindungen ein Minimum in Abhängigkeit der Primärluftzahl bei 0,8 auf. Primärluftzahlen größer 0,8 bewirken ausschließlich die Bildung von NO, als stickoxidbildende Komponente.

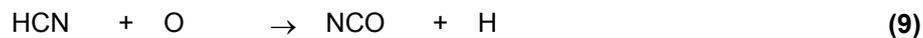
Für den Abbau der Stickstoffverbindungen sind die Haupteinflussparameter die Temperatur, die Sauerstoffkonzentration, der Gehalt von Methan ( $\text{CH}_4$ ), Cyanwasserstoff (HCN) und Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) in der Reduktionszone. Die Konzentrationen von Wasserstoff, Wasserdampf, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid in der Reduktionszone

haben keinen nennenswerten Einfluss auf die Reduktion der Stickstoffverbindungen [Keller, 1994].

Bei der homogenen Reduktion von Cyanwasserstoff und Ammoniak in der Gasphase ist die Stöchiometrie entscheidend, ob deren Weiterreaktion zu NO oder zu molekularem Stickstoff abläuft. Unter sauerstoffarmen Bedingungen wird die NO-Bildung unterdrückt und das Gleichgewicht verschiebt sich in Richtung von molekularem Stickstoff. Der Abbau von Cyanwasserstoff und den  $\text{NH}_i$ -Verbindungen wird nach Gleichung (4) bis (8) durch O- und H-Radikale eingeleitet:



Allerdings werden bei niedrigen Temperaturen signifikante Mengen an Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) aus Cyanwasserstoff gebildet:



Bei hohen Temperaturen wird das NCO-Radikal über die Reaktion (11) und (12) abgebaut:

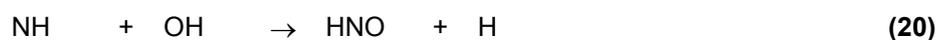


Im Weiteren kann Lachgas durch H- und OH-Radikale abgebaut werden:

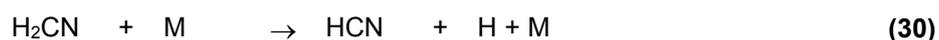
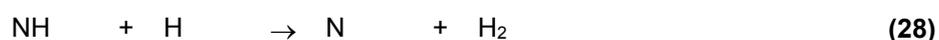
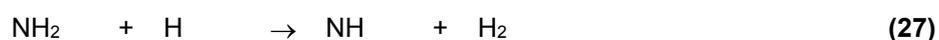
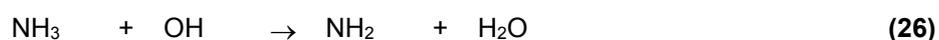


Die Reaktionen von NO und Ammoniak laufen über die wichtigsten Zwischenprodukte  $\text{NH}_2$ ,  $\text{NNH}$ ,  $\text{HNO}$  und  $\text{N}$  ab. Ab einer Temperatur von  $800^\circ\text{C}$  finden Reaktionen zwischen NO und  $\text{NH}_3$  statt. Bei Temperaturen von  $1.100^\circ\text{C}$  und einem Molverhältnis  $\text{NO}/\text{NH}_3$  von 2 können 90 % der Stickstoffbedingungen abgebaut werden. Mit stei-

gendem Molverhältnis bleibt NO übrig. Für den Abbau von Ammoniak wurden folgende Reaktionen als die wichtigsten identifiziert:



Die Bildung von Cyanwasserstoff aus Ammoniak erfolgt in Abwesenheit von Methan nicht. Sind Methankonzentrationen von über 1 % vorhanden, so wird mit steigender Temperatur Cyanwasserstoff gebildet und die Reduktion der Stickstoffverbindungen nimmt massiv ab, da Methan und dessen Zersetzungsprodukte vornehmlich mit den H- und OH-Radikalen reagiert und damit weniger für den Abbau von Ammoniak übrigbleiben. Für die Umwandlung von Ammoniak in Cyanwasserstoff wurden folgende Reaktionen als wichtig identifiziert:



Neben der homogenen NO-Reduktion findet an der Kohlenoberfläche auch eine heterogene Reaktion statt:



Für den vollständigen Abbau von Stickstoffverbindungen in der Gasphase sollten folgende Bedingungen eingehalten werden [Keller, 1994]:

- Temperaturen in der Reduktionszone 1.100 bis 1.200 °C
- unterstöchiometrische Bedingungen
- Abwesenheit von Methan
- Molverhältnis NO/NH<sub>3</sub> von 2
- homogene Konzentrationsverteilung der Reaktionspartner.

## Staubemissionen

Aerosole sind eine Suspension von festen und flüssigen Partikeln in einem Gas. Durch die Partikel-Massenkonzentration, die Partikel-Größenverteilung und die Partikel-Anzahlkonzentration werden Aerosole charakterisiert. Für die Einhaltung der für Holzfeuerungen geltenden Grenzwerte wird die Partikel-Massenkonzentration herangezogen.

Bei der Verbrennung von Holz kommt es zu verschiedenen Partikelbildungsmechanismen, welche in Abhängigkeit von den Verbrennungsbedingungen unterschiedlich stark zu den Gesamtstaubemissionen beitragen. Durch höhere Gasgeschwindigkeiten können sowohl Aschepartikel mitgerissen (Flugasche) als auch Ablagerungen abgelöst und freigesetzt werden. Diese Partikel liegen meist im Größenbereich  $\geq 10 \mu\text{m}$  und sind für die Gesamtstaubemissionen von eher untergeordneter Bedeutung, da sie meist schon durch entsprechende Abgasführung in der Feuerungsanlage abgeschieden werden können.

Unter nahezu *vollständigen Verbrennungsbedingungen* gehören folgende Partikelbildungspfade zu den wichtigsten [Oser et al, 2003]:

- Fest-Dampf-Partikel-Pfad anorganischer Bestandteile: Hierbei verdampfen die Komponenten im Glutbett ( $> 600 \text{ °C}$ ) und bilden, bei der Temperaturabnahme im Abgas, über Nukleation, Koagulation und heterogene Kondensation Partikel. Bei den so entstandenen Partikeln handelt es sich um anorganische Salze im Größenbereich von 100 nm, hauptsächlich um Kaliumverbindungen wie z.B. Kaliumsulfat (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) und Kaliumchlorid (KCl).
- Fest-Partikel-Pfad anorganischer Bestandteile: Diese schwerflüchtigen anorganischen Komponenten des Holzes gelangen als feste Komponenten ins Abgas und können dort durch Kondensation und Koagulation wachsen. Diese Salze, meist Calciumverbindungen wie CaO, haben einen aerodynamischen Durchmesser im Bereich von 1  $\mu\text{m}$ .

Läuft die *Verbrennung unvollständig* ab, werden Kohlenstoff-Partikel mit dem Abgas emittiert, die bei der pyrolytischen Zersetzung freigesetzt wurden und anschließend nicht vollständig oxidiert sind. Dabei kann zwischen kohlenstoffhaltigen festen oder

flüssigen Zersetzungsprodukten sowie C-haltigen Syntheseprodukten unterschieden werden:

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

## **2.4 Feuerungstechnik zur Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe**

Die besonderen Eigenschaften landwirtschaftlicher Reststoffe ziehen einen höheren anlagentechnischen Aufwand für die Feuerungen nach sich. Bisherige Anlagen, die laut Herstellerangaben zur Verbrennung von Stroh und Getreide geeignet sind, haben große Schwierigkeiten bei der Einhaltung der geforderten Emissionsgrenzwerte und der Gewährleistung eines störungsfreien Betriebs. Dies wurde bei Untersuchungen an verschiedenen Anlagen, beispielsweise durch [Vetter et al., 2006], [Hartmann et al., 2007], [Struschka et al., 05.2008], [Struschka et al., 06.2008], [Struschka et al., 2010] und [Struschka et al., 2014], festgestellt.

Die Feuerungsverfahren können in zwei Hauptkategorien unterschieden werden. Bei chargenweise beschickten Feuerungsanlagen wird der Brennstoff chargenweise verfeuert, d.h. der Brennraum wird (manuell) mit Brennstoff gefüllt und der Verbrennungsvorgang durchläuft die typischen Phasen vom Anbrand, dem Abbrand flüchtiger Brennstoffbestandteile bis zur Kohlenstoffverbrennung. Erst nach einer vollständigen Brennstoffumsetzung erfolgt eine Wiederfüllung. Das am weitesten verbreitete Prinzip ist die Ganzballenfeuerung.

Bei kontinuierlich beschickten Feuerungsanlagen wird der Brennstoff (quasi-) kontinuierlich und automatisch in den Feuerraum eingebracht. Der Brennstoff kann als loses Material oder in pelletierter bzw. brikettierter Form genutzt werden. Nachfolgend werden derzeit bekannte Feuerungsanlagen für landwirtschaftliche Brennstoffe anhand von Herstellerangaben beschrieben und verfügbare Messwerte in Tabelle 10 aufgezeigt. Die angegebene Leistung der beschriebenen Feuerungsanlagen ist identisch mit der vom Hersteller genannten Nennwärmeleistung.

### Typ: Ökotherm Compact CO

Leistung: 30 - 800 kW

Über eine Eintragungsschnecke wird der Brennstoff in die wassergekühlte Brennmulde gefördert und durch Zugabe von Primär- und Sekundärluft verbrannt. Die Zündung erfolgt automatisch. Ein zusätzlicher Ascheschieber verhindert die Schlackebildung im Glutbett. Die Rauchgase geben ihre Energie durch den liegenden Wärmeübertrager an das Heizungswasser ab. Die Verbrennungsregelung erfolgt durch eine Lambdasonde, mittels Druckgebläse und Saugzuggebläse.

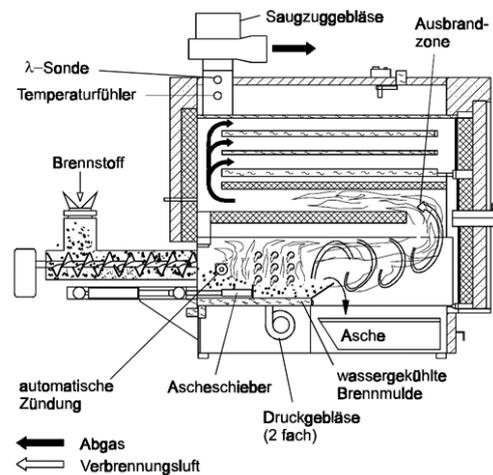


Abbildung 4 Schnittbild Ökotherm Compact

### Typ: Reka HKRST-KS

Leistung: 30 - 250 kW

Der Brennstoff wird über die Förderschnecke in den Brennraum gefördert. Die Zündung erfolgt manuell oder auch automatisch. Die Entaschung erfolgt durch den Treppenrost, der auch eine Schlackebildung verhindert.

Die Rauchgase geben ihre Energie durch den liegenden Wärmeübertrager an das Heizungswasser ab. Die Verbrennungsregelung erfolgt durch eine Lambdasonde und mittels Druckgebläse bzw. Saugzuggebläse. Das Verhältnis zwischen Primär- und Sekundärluft wird manuell durch einen Verteiler eingestellt.

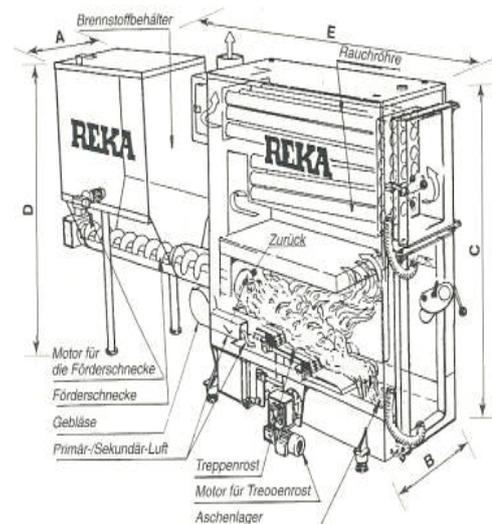


Abbildung 5 Schnittbild Reka HKRST

### Typ: Baxi Multi-Heat

Leistung: 25 und 40 kW

Der Kessel ist laut Hersteller für Getreide und Strohpellets geeignet. Die Zündung erfolgt manuell. Mit der Förderschnecke wird der Brennstoff direkt in den Brennraum geschoben. Über ein Radialgebläse wird Verbrennungsluft durch den Brennstoff gedrückt. Über die Ausbrennzone und den Rohrwärmeübertrager werden die Abgase zum senkrechten Abgasfang geleitet. Die erforderliche Brennstoff- und Verbrennungsluftmenge wird leistungsbezogen über die Kesseltemperatur geregelt.



Abbildung 6 Schnittbild Baxi Multi-Heat

**Typ: Passat C**

Leistung: 8 - 100 kW

Diese Feuerungsanlage besitzt keine Zündung und muss manuell angefeuert werden. Durch einen Schiebeboden wird der Brennstoff in die wassergekühlte Brennermulde gefördert. Die Asche wird durch den nachgeschobenen Brennstoff aus der Brennermulde transportiert. Durch den stehenden bzw. liegenden Wärmeübertrager wird die Wärmeenergie an das Heizungswasser abgegeben. Die Verbrennungsregelung erfolgt durch eine Lambdasonde und mittels Druckgebläse bzw. Saugzuggebläse. Das Verhältnis zwischen Primär- und Sekundärluft wird manuell durch einen Verteiler eingestellt.

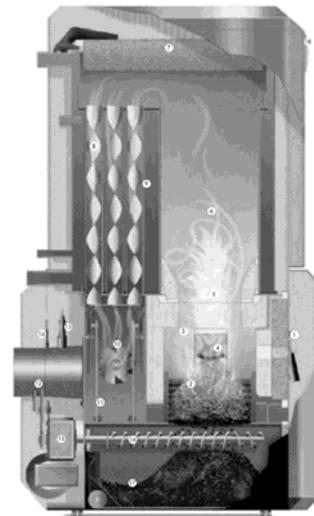


**Abbildung 7 Schnittbild Passat C**

**Typ: Guntamatic Powerkorn**

Leistung: 7 - 25 kW mit Energiekorn

Der Kessel ist laut Hersteller für Getreide und Holzpellets geeignet. Die Zündung erfolgt automatisch und nach Herstellerangaben bewegt sich die Feuerraumtemperatur bei ca. 650°C, die eine Schlackebildung vermeidet. Die Wärmeübertrager sind stehend angeordnet und werden automatisch gereinigt. Über einen Treppenrost wird die Asche abtransportiert. Die Verbrennungsregelung erfolgt durch eine Lambdasonde und mittels Saugzuggebläse. Das Verhältnis zwischen Primär- und Sekundärluft ist fest eingestellt.

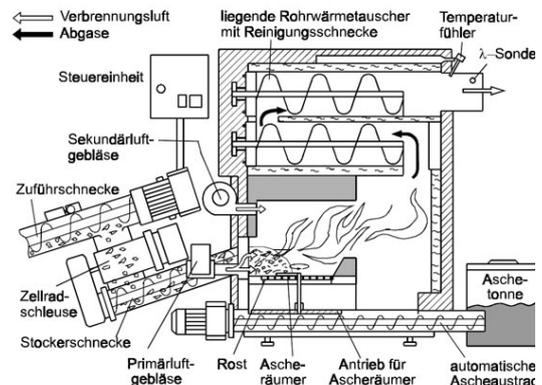


**Abbildung 8 Schnittbild Guntamatic Powerkorn**

**Typ: Heizomat HSK-RA**

Leistung: 33, 50, 60, 75 und 96 kW

Über eine Eintragschnecke wird der Brennstoff in die Brennermulde gefördert und durch Zugabe von Primär- und Sekundärluft verbrannt. Die Zündung erfolgt manuell. Ein zusätzlicher Ascheräumer verhindert die Schlackebildung im Glutbett. Die Rauchgase geben ihre Energie durch den liegenden Wärmeübertrager an das Heizungswasser ab. Die Verbrennungsregelung erfolgt durch eine Lambdasonde und mittels Druckgebläse.



**Abbildung 9 Schnittbild Heizomat HSK-RA**

### Typ: Agroflamm AGRO 40

Leistung: 40 kW

Obwohl die Firma Agroflamm nicht mehr existiert, soll diese Feuerung trotzdem aufgezählt werden, da bei dieser Feuerung ein neues Feuerungskonzept verwirklicht wurde und viele wissenschaftliche Untersuchungen stattfanden.

Diese Feuerungsanlage ist als einzige als Unterschubfeuerung ausgeführt. Die Feuerung wurde für Getreide und (Stroh-) Pellets entwickelt. Der Brennstoff wird mit einer Stokerschnecke in die Brennerschale gefördert. Ein Rührhaken verhindert die Versinterung der Asche. Die Entgasung des Brennstoffs erfolgt bei unter 600°C. Um geringe Glühverluste zu erreichen, wird der Brennstoff in der Nachverbrennungszone vollständig ausgebrannt. Die Feuerungsanlage hat für jede Brennstoffart nur eine Leistungsstufe. Die entsprechende Brennstoffwahl muss in der Steuerung manuell eingegeben werden. Die Rauchgase geben ihre Energie durch den stehenden Wärmeübertrager an das Heizungswasser ab.

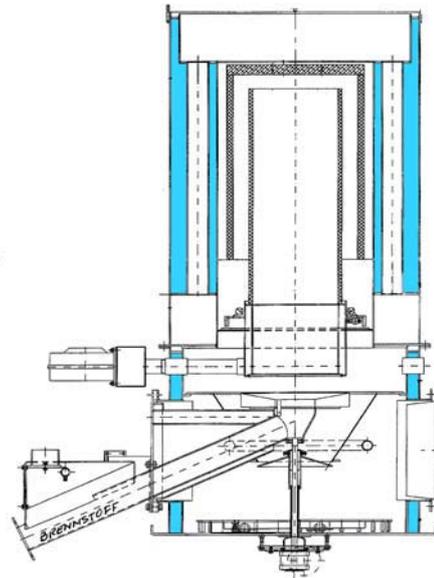


Abbildung 10 Schnittbild Agroflamm AGRO 40

### Typ: Primdal & Haugesen

Leistung: 47 und 96 kW

Bisher sind für diese Baureihe noch keine Betriebserfahrungen in der Literatur zu finden. Der Kessel ist laut Hersteller für Getreide und Strohpellets geeignet. Die Zündung erfolgt automatisch. Der Brennstoff wird mittels einer Schleuse bis zum Brennraum transportiert. Die Verfeuerung verläuft bei Zufuhr von Primär- und Sekundärluft. Die Verbrennungsregelung erfolgt durch eine Lambdasonde.



Abbildung 11 Primdal & Haugesen PH 47-850

### Typ: Gerlinger Biokompakt AWK

Leistung: bis 25 kW

Der Kessel ist laut Hersteller für Getreide und Holzpellets geeignet. Die Zündung erfolgt automatisch. Der Brennstoff wird mittels einer Schnecke in den Brennraum transportiert. Die Verfeuerung verläuft bei Zufuhr von Primär- und Sekundärluft. Die Verbrennungsregelung erfolgt durch eine Lambdasonde und mittels Saugzuggebläse und Druckgebläse. Aufgrund der, bei diesem Feuerungsprinzip auftretenden, hohen Temperaturen in der Brennkammer ist eine Verbrennung von Getreide nur unter Zugabe von Kalk möglich.

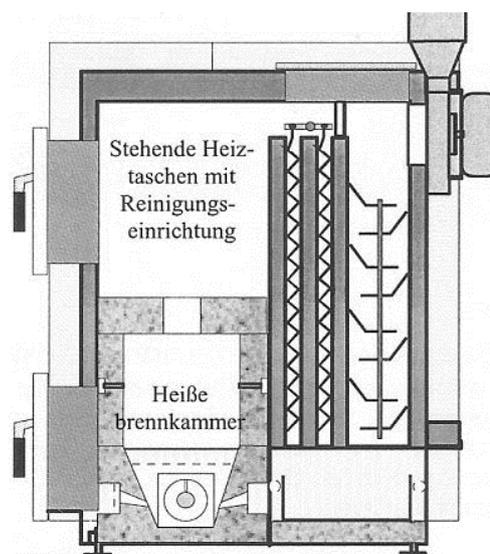


Abbildung 12 Schnittbild Gerlinger Biokompakt AWK 45

### Typ: Termocabi SRL SPL100A

Leistung: 20 bis 80 kW

Der Brenner ist laut Herstellerangaben für halmgutartige Festbrennstoffe geeignet. Brennstoffbeschickung, Zündung, Ascheaustrag und Reinigung mit Druckluft sind vollständig automatisiert. Der Verbrennungsprozess ist so konzipiert, dass der Brennstoff zunächst vergast wird und anschließend eine horizontale Flamme produziert wird. Dadurch können konventionelle Öl- und Gasbrenner ersetzt und vorhandene Wärmetauscher weiterhin genutzt werden. Eine genaue Beschreibung und Darstellung der Funktionsweise der Verbrennungsanlage wird durch den Hersteller nicht bekannt gegeben.



Abbildung 13 Termocabi SRL SPL100A

**Tabelle 10 Zusammenstellung von Emissionsmessungen an  
Feuerungsanlagen für landwirtschaftliche Reststoffe**

Quelle	Hersteller Kesseltyp	NWL kW	Brennstoff	Bezug	Konzentrationen*							
					CO mg/m <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> mg/m <sup>3</sup>	TOC mg/m <sup>3</sup>	Gesamstaub mg/m <sup>3</sup>	HCL mg/m <sup>3</sup>	SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> mg/m <sup>3</sup>	PAH µg/m <sup>3</sup>	PCDD/F ng/m <sup>3</sup>
Struschka et al. 2014.04 Vollast im Reingas	Ökotherm Compact C 1L mit Gewebefilter	120	Heupellets	11 % O <sub>2</sub>	509	375	16	114	43	292	37	0,32
Struschka et al. 2008.05 Prüfstand	Agroflamm Agro 40	34	Gerste Weizen Strohpellet	13 % O <sub>2</sub>	49	727	2	51				
Struschka et al. 2008.05 Feldmessung	Agroflamm Agro 40	35	Gerste Weizen Strohpellet	13 % O <sub>2</sub>	44	782	8	17	50			
Struschka et al. 2008.05 Feldmessung	Passat Compact C8	75	Getreideausputz Reinigungs pellet Weizenpellet Futterweizen	13 % O <sub>2</sub>	283	649	30	336	54			
Struschka et al. 2006	Reka A/S HKRSTV-FSK 30-3	46	Heu lose	13 % O <sub>2</sub>	787	402	36	205	13	152		
Struschka et al. 2008.07	Agroflamm Agro 40		Weizen Strohpellets	13 % O <sub>2</sub>	37	763	7	73				
Struschka et al. 2008.07	Gerlinger Biokompakt AWK 45	30	Weizen Strohpellets	13 % O <sub>2</sub>	125	496	5	157				
Kiesewalter et al. 2002	Ökotherm Compact CO	49	Weizenstroh	13 % O <sub>2</sub>	231	300	8	98	4	51		
Stöcklein, 2003	Heizomat HKS-RA 50	42	Mischungen aus Heckschnitzel Getreide	13 % O <sub>2</sub>	46	192	2	65	4	72	20	0,02
Stöcklein, 2003	Ökotherm Compact CO	40,8	Mischungen aus Holzpellet Getreide	13 % O <sub>2</sub>	237	514	41	133	52			
Launhardt et al. 2000	Ökotherm Compact CO	49	Stroh Heu Triticale Ganzpflanze	13 % O <sub>2</sub>	229	416	4	236	66			
Launhardt et al. 2000	Ökotherm Compact CO	50	Rappspresskuchen	13 % O <sub>2</sub>	468	663	8	225	11			
UMEG, 2003	Ökotherm Compact C 1L mit Gewebefilter	88	Rapskörner	13 % O <sub>2</sub>	490	320	4	130	1	340		
TÜV BAYERN, 2001	Baxi Multi-Heat 4.0	39	Energiekorn	13 % O <sub>2</sub>	104	645	7	159				
TÜV BAYERN SZA, 2003	Primal & Haugesen PH 47-850	42	Energiekorn	13 % O <sub>2</sub>	118	668	7	382				

\* angegeben sind jeweils Mittelwert aller Versuche mit der aufgeführten Feuerungsanlage

## **3 Arbeitsprogramm und Untersuchungsmethoden**

### **3.1 Arbeitsprogramm**

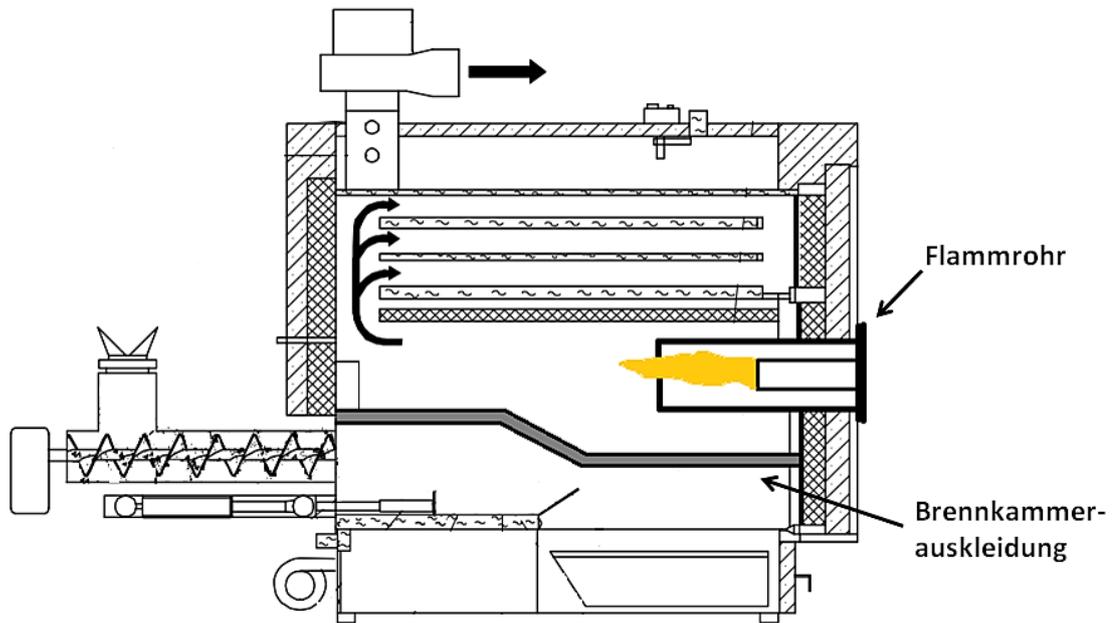
Ziel dieses Vorhabens ist die Gewinnung von Erfahrungen für die Konstruktion und den Betrieb von Feuerungsanlagen für die thermische Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen unter Einhaltung der gesetzlichen Emissionsgrenzwerte. Für eine erfolgreiche Etablierung einer Feuerungstechnik für landwirtschaftliche Reststoffe muss diese einen weitgehenden störungsfreien Betrieb ohne aufwendige Wartungsarbeiten über einen längeren Zeitraum gewährleisten. Da bei landwirtschaftlichen Reststoffen mit einer vermehrten Schlackebildung und starken Verschmutzungen im Kesselbereich zu rechnen ist, stellt dies eine große Herausforderung für die Anlagenentwicklung und den Betrieb dar. Das Arbeitsprogramm soll sowohl die emissionsrelevanten Fragestellungen untersuchen, als auch die Praxistauglichkeit und Langzeitstabilität der neu entwickelten Verbrennungstechnik prüfen.

Als Vertreter für landwirtschaftliche Reststoffe wurden Heupellets der Charge 2 eingesetzt. Holzpellets der Charge 1 in DINplus Qualität diente als Referenzbrennstoff.

Die Bewertung des Brennersystems soll durch eine umfassende Bilanzierung der Massen und Energieströme erfolgen. Durch die Stoffstrombilanzierung können Abhängigkeiten und Einflussparameter abgeleitet werden. Dabei soll der Fokus auf den Umwandlungsraten von Brennstoffstickstoff in Stickstoffoxide und deren Reduktion liegen. Die Praxistauglichkeit und die Langzeitstabilität soll durch die auftretenden Verschmutzungen und Verschlackungen bewertet werden.

### **3.2 Anlagenbeschreibung**

Der in [Struschka et al., 2014] beschriebene und untersuchte Biomassekessel vom Typ Ökotherm Compact C1L mit Multizyklon wurde für die im Folgenden beschriebenen Versuche als Wärmeabnehmer eingesetzt. Um die bestehende Anlage für den Einsatz mit dem neu entwickelten Prototyp für landwirtschaftliche Reststoffe vorzubereiten, mussten verschiedene Umbaumaßnahmen am Heizkessel durchgeführt werden. Die nun nicht mehr benötigten Vorrichtungen für Brennstoffzufuhr und Ascheaustragung wurden teilweise demontiert und die jeweiligen Öffnungen verschlossen und abgedichtet. Ebenso wurden die Klappen der Luftgebläse verschlossen, um den Zutritt von Falschluff zu verringern. Für die Montage des Brenners an den Heizkessel wurde eine Öffnung in der ursprünglichen Brennkammertür geschaffen und das Flammrohr des Prototyps mittels einer Flanschverbindung mit der Brennkammertür verbunden. Zudem wurde die Brennkammer mit feuerfesten Vermiculit-Platten umgestaltet und so der neuen Feuerungssituation angepasst. Die entsprechende Einbausituation des Prototyps in den angepassten Heizkessel kann Abbildung 14 entnommen werden.



**Abbildung 14 Einbausituation des Flammrohres vom Prototyp in die Brennkammer des Heizkessels Ökotherm Compact C1L**

Um einen sicheren Betrieb der Versuchsanlage zu gewährleisten, wurden die Wassermangelsicherung und der Sicherheitstemperaturbegrenzer (STB) des Heizkessels neu verschaltet. Wird eine der beiden Sicherungen ausgelöst, so kommt es zu einer Abschaltung der Brennstoffzufuhr und des Zündgebläses des Prototyps. Auch die Ansteuerung des Stellmotors für den Rücklaufbeimischer erfolgt über eine separate Reglereinheit mit einem Sollwert von 60 °C. Der Brennkammerunterdruck konnte in einer ersten Phase des Projektes manuell über die Ansteuerung des Abgasgebläses eingestellt werden. Im weiteren Verlauf des Projektes wurde die Ansteuerung des Abgasgebläses automatisiert und es wurde bei den Verbrennungsversuchen auf einen konstanten Brennkammerunterdruck geregelt.

### 3.3 Mess- und Probenahmetechnik

Für die Messung der Komponenten  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$  und  $NO_x$  wurden Standardmessgeräte eingesetzt, die in Tabelle 11 aufgelistet sind. Vor und nach jedem Messtag wurden die Nullpunkte der Messgeräte mit Stickstoff und die Kalibrierpunkte mit Prüfgas überprüft. Etwaige Gerätedriften wurden bei der Auswertung berücksichtigt. Die Abgasprobe für die Analytoren wurde an der Messstelle nach dem Multizyklon über beheizte Filter entnommen und mittels einer beheizten Pumpe durch ebenfalls beheizte Schläuche dem Messgaskühler zugeführt und dann auf die einzelnen Analytoren verteilt. Die Messstellen können der Abbildung 15 entnommen werden.

**Tabelle 11 Auflistung der verwendeten Messtechnik**

Messgröße	Messprinzip	Gerät	Messbereich	Prüfgas
O <sub>2</sub>	Paramagnetismus	Emerson NGA 2000	0 - 25 Vol%	5,98
CO <sub>2</sub>	nicht dispersive Infra- rotabsorption	Emerson NGA 2000	0 - 20 Vol%	12,1
CO	nicht dispersive Infra- rotabsorption	Emerson NGA 2000	0 - 1.500 ppm	100
CO	nicht dispersive Infra- rotabsorption	Emerson NGA 2000	0 - 3 Vol%	0,703
NO <sub>x</sub>	Chemilumineszenz	Emerson NGA 2000 CLD	0 - 750 ppm	201
Wasser Tem- peratur	Platin- Messwiderstand	PT 100	-50 - 600 °C	
Gas Tempera- tur	Thermoelektrizität	NiCr-Ni Thermo- element	-200 - 1100 °C	
Wasser Volumenstrom	Kármánsche Wirbelstraße	Grundfos Direct Sensor VFI	0,3 - 6 m <sup>3</sup> /h	
Volumenstrom Verb. Luft	thermische Anemo- metrie	Schmidt SS 20.260	0 - 10 m/s	
Differenzdruck	pneumatisch elektrisch	Airflow PTSXR-K	0 - 1.000 Pa	
Gesamtstaub	gravimetrisch	Wöhler SM500	0 - 1.000 mg/m <sup>3</sup>	

Zum Vergleich der verschiedenen Betriebszustände und der Brennstoffe müssen die Messwerte der Emissionen auf einen einheitlichen Bezugssauerstoffgehalt umgerechnet werden. Die Umrechnung erfolgt nach Gleichung (33) [BMU, 2002]. Daher sind alle genannten Ergebnisse auf 13 Vol% O<sub>2</sub> bezogen.

$$E_B = \frac{21 - O_B}{21 - O_M} \times E_M \quad (33)$$

Dabei ist:

- E<sub>M</sub> gemessenen Massenkonzentration
- E<sub>B</sub> Massenkonzentration, bezogen auf Bezugssauerstoffgehalt
- O<sub>M</sub> gemessener Sauerstoffgehalt als Volumenanteil in %
- O<sub>B</sub> Bezugssauerstoffgehalt als Volumenanteil in %

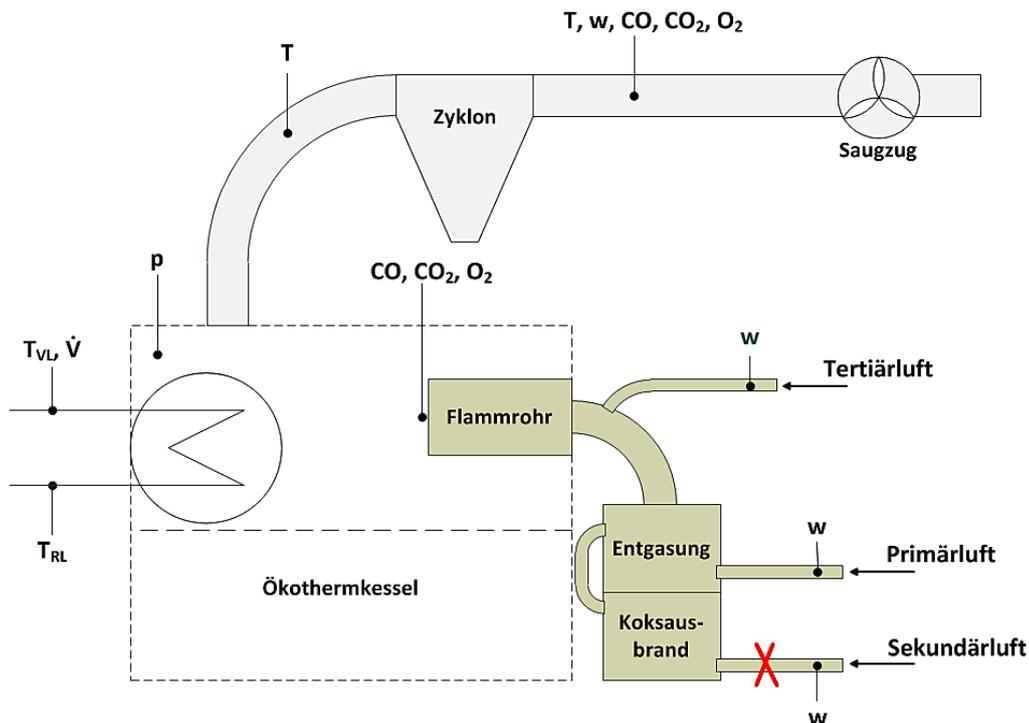


Abbildung 15 Schematischer Messstellenplan mit Messgrößen

### 3.4 Grundlagen der statistischen Versuchsplanung (DoE)

Der neu entwickelt Prototyp für landwirtschaftliche Reststoffe soll auf seine feuerungstechnischen Eigenschaften hin untersucht werden. Dazu werden Versuchsreihen mit dem Ziel durchgeführt, möglichst viele Informationen über das System, bei gleichzeitig geringem zeitlichem Aufwand, zu gewinnen. Die Methodik der statistischen Versuchsplanung oder DoE (Design of Experiments) bietet die entsprechenden Werkzeuge für die Erstellung und Auswertung derartiger Versuchspläne.

Die Durchführung experimenteller Versuche ist bei der Entwicklung von Produkten und Prozessen unumgänglich. In Abhängigkeit von der Komplexität und der Größe des zu untersuchenden Systems kann dies einen enormen zeitlichen Aufwand bedeuten. Die statistische Versuchsplanung greift daher auf statistische Methoden zurück, um die Anzahl der erforderlichen Einzelversuche zu reduzieren. In der Versuchsplanung wird ein zu charakterisierendes System durch seine Eingangsgrößen beschrieben. Sie werden hier Parameter genannt. Da komplexe Systeme sehr viele Eingangsgrößen besitzen, ist für einen vertretbaren Versuchsaufwand meist eine Reduzierung notwendig. Untersucht wird somit oft nur der Einfluss der wichtigsten Größen auf das System. Diese ausgewählten Größen werden als Faktoren bezeichnet.

Die Gesamtheit der Faktoren und die Stufen (Einstellungen des Faktors), auf denen diese Faktoren untersucht werden, bilden den Faktorraum (Versuchsraum). Das Ergebnis eines durchgeführten Versuches stellen die Werte der Zielgrößen dar. Auch die Zielgrößen eines Systems müssen vorab definiert werden. Die statistische Ver-

suchsplanung stellt nun Versuchspläne auf, mit deren Hilfe der Einfluss der unterschiedlichen Faktoren auf die Zielgrößen ermittelt werden kann. Sind die Versuche abgeschlossen, erfolgt eine statistische Auswertung der Ergebnisse anhand eines Regressionsmodells. Je nach Art und Umfang des Versuchsplanes werden dabei Zusammenhänge gewonnen, die in den Grenzen einer statistischen Wahrscheinlichkeit repräsentativ für das System sind.

## 4 Brennerentwicklung

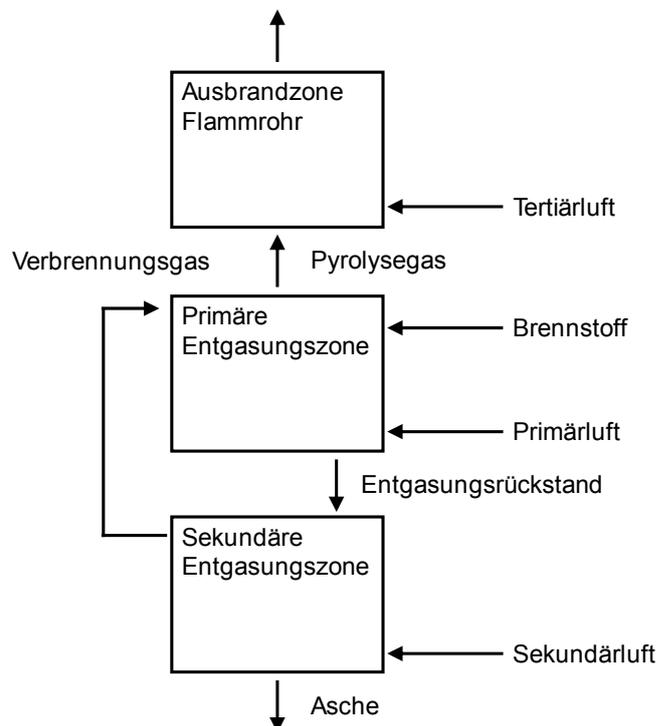
Im Wesentlichen soll eine Feuerungsanlage entwickelt werden, die landwirtschaftliche Reststoffe als Brennstoff nutzen kann. Für diese Feuerungsanlage sind Anforderungen der primärseitigen Schadstoffminimierung wie CO, NO<sub>x</sub>, Staub und die Vermeidung von Verschlackungen gestellt. Diese Anforderung an die Feuerungsanlage wurde vom Projektpartner, der Fa. Wörle UmweltTechnik, in einem Prototyp umgesetzt. Dem IFK wurde der Prototyp für die messtechnischen Untersuchungen zur Verfügung gestellt (vgl. Abbildung 16).



**Abbildung 16** Prototyp der Firma Wörle an einem Heizkessel im IFK-Technikum

Das Verbrennungskonzept des Prototyps beruht auf der Aufteilung der Verbrennungsphasen Entgasung, Oxidation der Entgasungsrückstände und Verbrennung der Pyrolysegase in räumlich getrennten Reaktionsräumen (vgl. Abbildung 17). Durch eine möglichst geringe Luftüberschusszahl soll die Entgasung der Brennstoffe in der primären Entgasungszone bei geringen Temperaturen stattfinden, um die Bildung von Versinterungen und Verschlackungen zu unterbinden. Zusätzlich soll verhindert werden, dass leichtflüchtige Verbindungen ausgetragen werden, um dadurch die Staubemission gering zu halten.

Die entstandenen Pyrolysegas werden mit Tertiärluft vermischt und in der nachfolgenden Ausbrandzone im Flammrohr vollständig oxidiert. Die Entgasungsrückstände werden über ein Schiebersystem diskontinuierlich in die sekundäre Entgasungszone, im unteren Bereich der Feuerung, gefördert. Unter Zuführung von Sekundärluft reagieren die Entgasungsrückstände im Idealfall vollständig. Die zurückbleibende Asche wird über eine Austragschnecke in die Aschetonne gefördert. Die bei der Reaktion der Entgasungsrückstände entstandenen Verbrennungsgase werden über Rohrverbindungen in die primäre Entgasungszone, oberhalb des Brennstoffbettes geführt und gelangen dann mit den Pyrolysegasen zur Ausbrandzone im Flammrohr.



**Abbildung 17 Schematische Darstellung des Verbrennungskonzepts im Prototyp**

Bei Funktionstests und ersten Verbrennungsversuchen der aufgebauten Versuchsanlage am IFK-Technikum mit Holzpellets zeigten sich bereits erste Probleme durch das Schiebersystem für die Ausschleusung der Entgasungsrückstände. Bei dem Ausschleusungsvorgang blieben unverbrannte Holzpellets im Schiebersystem zurück, sodass dieses nicht mehr vollständig geschlossen wurde. Des Weiteren entstanden beim Ausschleusungsvorgang Konzentrationsspitzen von Kohlenmonoxid im Volumenbereich. Erst nach einigen Minuten gingen die CO-Konzentrationen auf das vorherige Niveau zurück.

Daher wurde der Prototyp im ersten Schritt ohne Ausschleusung von Entgasungsrückständen und ohne Nutzung der sekundären Entgasungszone betrieben. Da der Prototyp mit Holzpellets ohne die Verwendung der sekundären Entgasungszone betrieben wird, beschränkt sich die Anzahl der zu untersuchenden Faktoren auf die Primärluftmenge, die Tertiärluftmenge und die zugeführte Brennstoffmenge.

## 4.1 Energie und Stoffstrombilanzierung

Für die Bewertung des Prototyps wurde eine umfassende Stoffstrombilanz erstellt, wodurch die Einflussparameter bei der Bildung und Reduktion von Stickstoffoxiden aufgezeigt werden können. In Abbildung 18 ist das Bilanzierungsschema für das umgesetzte Verbrennungskonzept dargestellt.

Die Bilanzierungs- und Kontrollrechnungen konnten mit den Messwerten zur Deckung gebracht werden. Damit war es möglich, den Umwandlungsgrad von Kohlenstoff in  $\text{CO}_2$  ( $X_C$ ) und den Umwandlungsgrad von Brennstoffstickstoff zu Stickstoffoxiden ( $X_N$ ) zu bestimmen. Der jeweilige Umwandlungsgrad ist das prozentuale molare Verhältnis aus der freigesetzten, im Abgas gemessenen Verbindung ( $\text{CO}_2$  und  $\text{NO}_x$  als  $\text{NO}_2$ ) und die durch den Brennstoff eingebrachte Menge des Stoffes (C und N), abzüglich der verbliebenen Menge des Stoffes (C und N) in den Entgasungsrückständen.

Für die Bilanzierung wurde auf eine weitere Oxidation der Entgasungsrückstände verzichtet. Diese wurden nach dem Ausschleusen aus der primären Entgasungszone mit Hilfe der Ascheschnecke aus der Feuerung ausgetragen.

Der Falschlufteintrag durch Öffnungen und Undichtigkeiten im Heizkessel und in der Abgasstrecke liegt im Bilanzierungsraum und muss Folge dessen bestimmt werden. Da dieser Falschlufteintrag nicht messbar ist, musste dieser abgeschätzt werden. Die Abschätzung erfolgte anhand eines Versuches, bei dem die Wärmeleistung, der Primärluftstrom und der Brennraumunterdruck über einen Zeitraum von über zwei Stunden konstant gehalten wurden. In diesem Versuch wurden drei verschiedene Restsauerstoffgehalte im Abgas eingestellt. Dabei wurde die Bilanzgleichung nach Abbildung 18 gelöst, in dem der Kohlenstoffumsatz bei allen drei Messreihen so gewählt wurde, dass die Energiebilanzen über die zweistündige Versuchszeit die geringsten Abweichungen aufwiesen. Danach wurde die Falschlufft für alle drei Messreihen so festgelegt, dass sich wieder bei allen drei Messreihen gleiche Werte für die gerechnete und die gemessene Sauerstoffkonzentration im Abgas ergaben. Der so ermittelte Falschlufteintrag wurde dann für alle Versuche angesetzt und als konstant, bei konstantem Brennraumunterdruck, angenommen.

Für die Bilanzierungsräume primäre und sekundäre Entgasungszone sowie die Ausbrandzone wurden jeweils Luftüberschusszahlen berechnet. Die Luftüberschusszahl für den Bilanzierungsraum primäre und sekundäre Entgasungszone wird als Primärluftzahl und die Luftüberschusszahl für den Bilanzierungsraum der Ausbrandzone wird als Gesamtluftzahl bezeichnet.

Die Primär- und die Gesamtluftzahl beziehen sich immer auf den gesamten Brennstoff, das heißt es wird der Quotient aus der tatsächlichen Verbrennungsluft zur minimal benötigten Verbrennungsluft für eine vollständige Verbrennung des Brennstoffes gebildet. Die Luftzahlen sind somit unabhängig vom Umwandlungsgrad des Kohlenstoffes. Da die Bedingungen im Brennstoffbett in der primären Entgasungszone nicht genau erfasst werden konnten, ist der berechnete Umwandlungsgrad für den Kohlenstoff und den Stickstoff noch mit einer gewissen Unsicherheit behaftet.

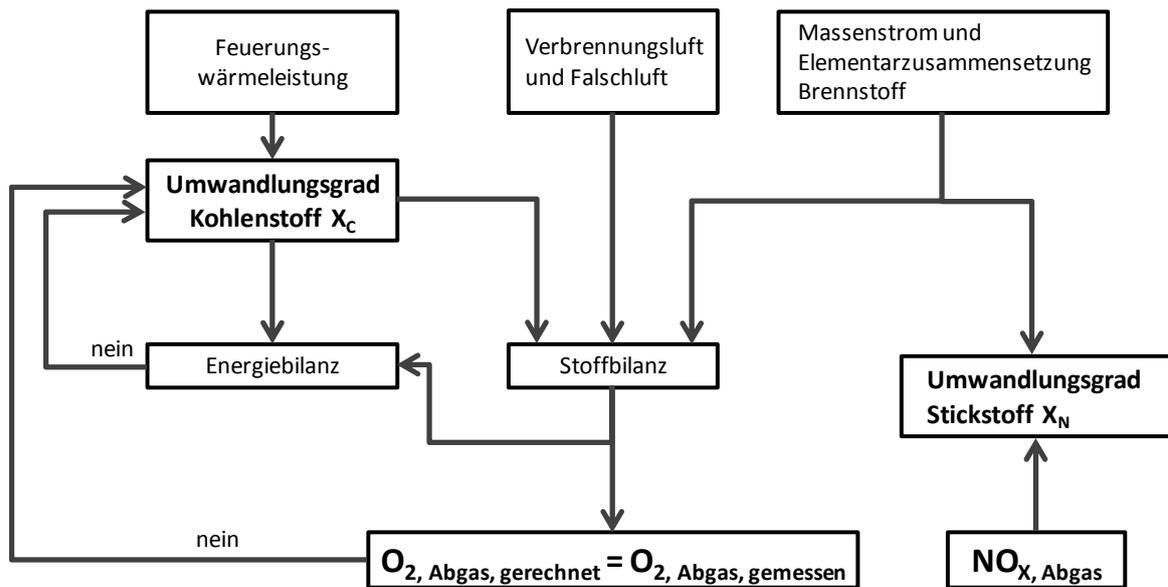


Abbildung 18 Schema zur Bilanzierung des Brennersystems

Diese Einflussfaktoren sind zum Beispiel die örtlichen Temperaturen im Brennstoffbett, die Brennstoffbetthöhe, das Verhältnis von frischem Brennstoff zu Entgasungsrückständen, die Intensität der Brennstoffbewegung und der lokale Sauerstoffüberschuss im Brennstoffbett.

## 4.2 Anwendung der DoE-Methodik auf das Brennersystem

Zu Beginn der Untersuchung eines Prototyps ist meist nur sehr wenig über dessen Betriebsverhalten bekannt. Aus diesem Grund ist es erforderlich, in einer ersten Versuchsreihe den zuvor festgelegten Betriebsbereich zu validieren. Dabei soll festgestellt werden, ob die gewählten Betriebsparameter zu einem stabilen Betrieb der Feuerung führen. Werden dabei Betriebspunkte ermittelt, die nicht zu einem stabilen Betrieb führen, so wird der Betriebsbereich für die weiteren Untersuchungen angepasst.

Für die Validierung des Betriebsbereichs bietet sich ein Versuchsplan zur Ermittlung linearer Abhängigkeiten zwischen Faktoren und Zielgrößen an. Durch diese Vorgehensweise werden jeweils nur die Ränder des Faktorraums und somit die Betriebsgrenzen untersucht.

Der große Vorteil dabei ist, dass die Anzahl der durchzuführenden Versuche sehr gering ist. Abhängigkeiten, welche keinen linearen Verlauf darstellen, können mit dieser Vorgehensweise nicht vom Regressionsmodell erfasst werden. Für die Untersuchung des Betriebsbereichs werden im Folgenden sogenannte D-optimale Versuchspläne verwendet. Der Vorteil D-optimaler Versuchspläne ist es, dass der Anwender die Möglichkeit hat, den Versuchsraum einzuschränken. Dadurch kann die Variation bestimmter Faktoren in Abhängigkeit anderer Faktoren begrenzt werden. Beispielsweise ist es notwendig, die Variation der Luftmenge in Abhängigkeit der Brennstoffmenge einzuschränken. Andernfalls wäre theoretisch eine Faktorkombination aus minimaler

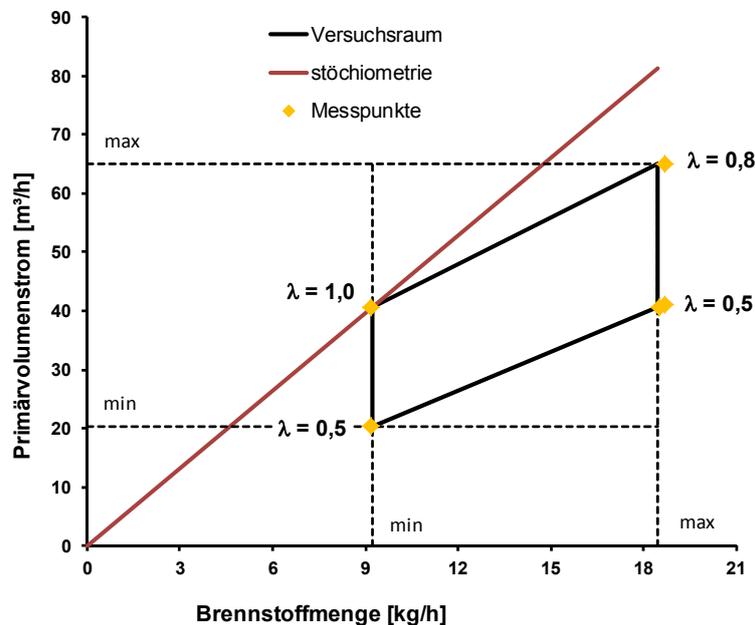
Luftmenge, bei gleichzeitig maximaler Brennstoffmenge möglich. Ein Betrieb der Feuerung wäre mit diesen Einstellungen physikalisch schwer realisierbar.

Die erste grundlegende Untersuchung des Prototyps erfolgte mit Holzpellets der Charge 1 als Referenzbrennstoff, unter Verwendung eines linearen Versuchsplans. Der dabei validierte Betriebsbereich und die ermittelten Abhängigkeiten können für die weiteren Versuche mit landwirtschaftlichen Reststoffen als Anhaltswerte verwendet werden. Eine unmittelbare Übertragung der Ergebnisse auf andere Brennstoffe ist nicht möglich.

Die Grenzen des betrachteten Betriebsbereichs ist beispielhaft für die Brennstoffmenge und die Primärluft als graphische Darstellung des daraus resultierenden zweidimensionalen Faktorraums in Abbildung 19 für Holzpellets dargestellt. Die durchgezogenen schwarzen Linien stellen den definierten Versuchsraum dar.

Für Holzpellets wird bei minimaler Brennstoffmenge ein Bereich, entsprechend einem Primärluftüberschuss von  $\lambda_{\text{primär}} = 0,5$  bis 1 untersucht. Bei Volllast ein Bereich von  $\lambda_{\text{primär}} = 0,5$  bis 0,8. Die im Diagramm gelb gekennzeichneten Punkte sind die Faktorkombinationen des linearen Versuchsplans an den Rändern des Versuchsraumes. Diese wurden von der DoE-Software ausgegeben.

Für Heupellets wurde ein anderer Versuchsraum, wie in Abbildung 20 zu sehen, definiert. In Kombination mit den hier nicht dargestellten Faktoren ergibt sich ein vollständiger dreidimensionaler Faktorraum.



**Abbildung 19 Versuchsraum für die Faktoren Brennstoffmenge und Primärluft für Holzpellets**

Als Zielgrößen zur Beurteilung des Systems werden in erster Linie die CO-Konzentration, der feuerungstechnische Wirkungsgrad, der Umwandlungsgrad  $X_c$  des

Kohlenstoffs in der Primärzone sowie der Abgasverlust herangezogen. Weitere Zielgrößen wie die Oberflächenverluste des Brenners, die Wärmeleistung des Kessels, der Falschlufanteil im Kessel sowie weitere Abgasbestandteile wurden ebenfalls definiert und ermittelt.

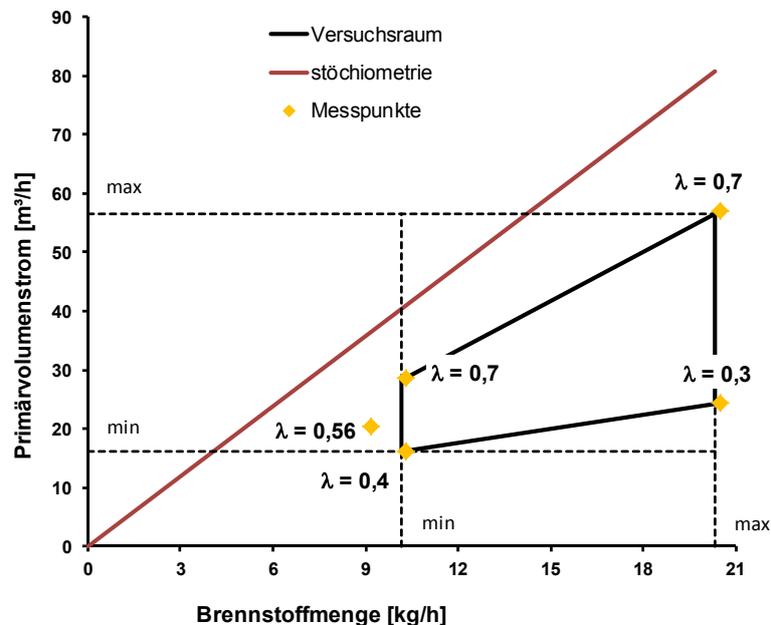


Abbildung 20 Versuchsraum für die Faktoren Brennstoffmenge und Primärluft für Heupellets

### 4.3 Ergebnisse erster Prototyp mit Holzpellets

Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgt mit Hilfe der Software Cornerstone anhand einer multiplen, linearen Regressionsanalyse. Die ermittelten Zusammenhänge zwischen den untersuchten Faktoren und den wichtigsten Zielgrößen sind in Abbildung 21 in Matrixform aufgeführt.

Für jeden Zusammenhang zwischen Faktor und Zielgröße findet sich in der Abbildung ein eigenes Diagramm. Die Abhängigkeit der jeweiligen Zielgröße vom betrachteten Faktor wird dabei durch den Verlauf einer Geraden (blau) wiedergegeben. Die Effekte der beiden anderen Faktoren auf diese Zielgröße werden für die Darstellung herausgerechnet. Jedes Diagramm kann somit unabhängig von den beiden anderen Faktoren interpretiert werden. Dabei ist zu erwähnen, dass die rot gekennzeichneten Punkte keine Messwerte darstellen. Es handelt sich vielmehr um Stützpunkte der Ausgleichsgeraden, die aus den Messwerten berechnet und dabei um den Einfluss der anderen Faktoren korrigiert werden.

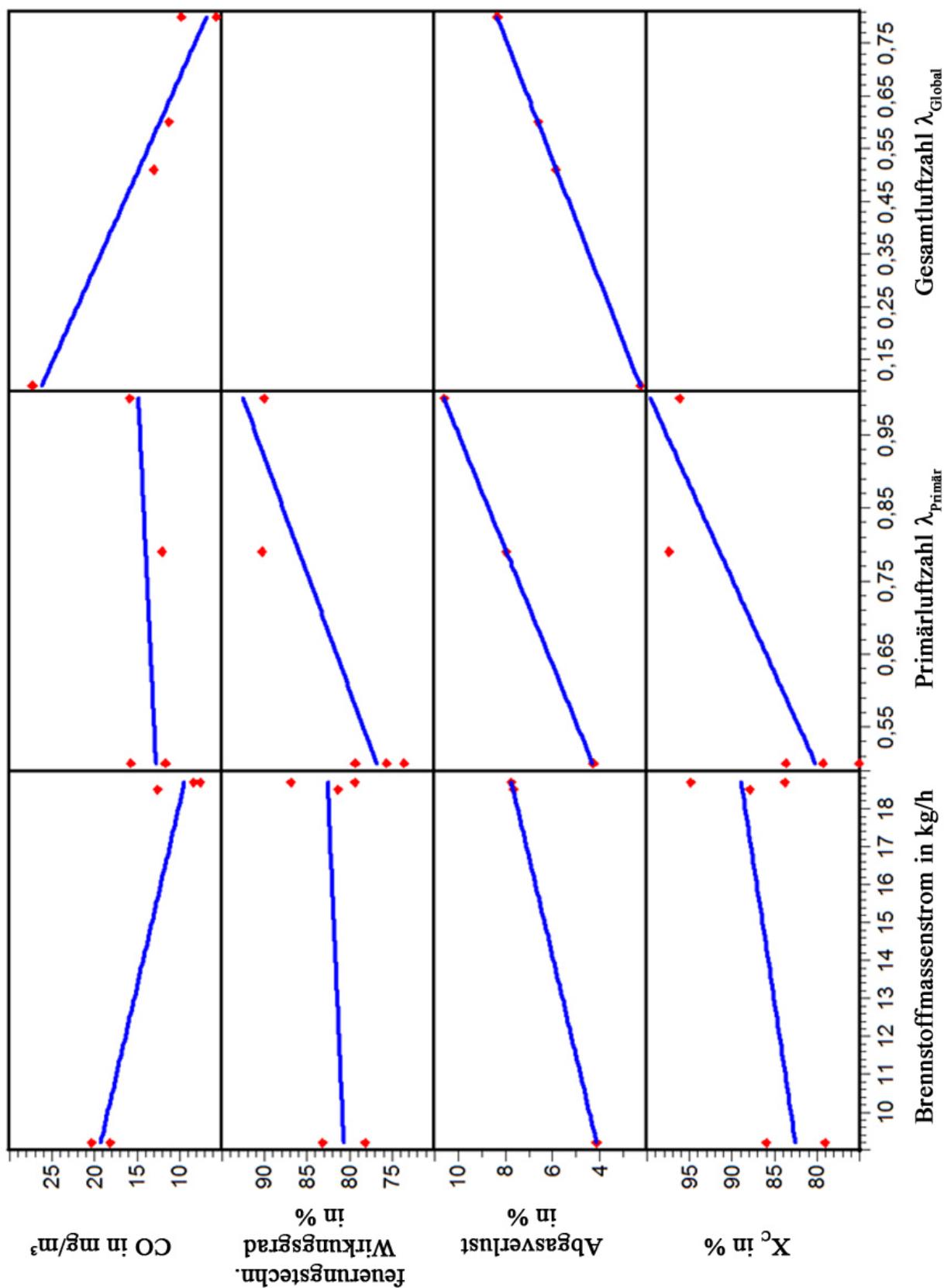


Abbildung 21 Ergebnisse der Verbrennungsversuche mit Holzpellets. Zusammenhänge zwischen den untersuchten Faktoren und den Zielgrößen für Holzpellets

Als untersuchte Faktoren sind auf der Abszisse die Brennstoffmenge, der Primärluft- und der Tertiärluftüberschuss aufgeführt. Die Werte der vier wichtigsten Zielgrößen des Regressionsmodells können jeweils auf der Ordinate abgelesen werden.

Die dargestellte Zielgröße Umwandlungsgrad  $X_C$  des Kohlenstoffs gibt die prozentuale Umsetzung des im Brennstoff enthaltenen Kohlenstoffs an und ist ein Indikator für die Feststoffumsetzung in der primären Entgasungszone. Werden die eingebrachten Pellets vollständig zersetzt und es verbleibt als Rückstand lediglich die Asche in der primären Entgasungszone, so ergibt sich daraus eine Umsetzungsrate  $X_C$  von 100%. Dabei wird angenommen, dass im Abgas so gut wie keine unverbrannten Kohlenwasserstoffverbindungen enthalten sind. Aufgrund der relativ geringen CO-Konzentrationen ist diese Annahme plausibel.

Der feuerungstechnische Wirkungsgrad beinhaltet neben den Abgasverlusten auch die Verluste infolge unvollständiger Umsetzung des zugeführten Brennstoffkohlenstoffs. Die hier dargestellten Umsetzungsraten des Kohlenstoffes, die Abgasverluste und der feuerungstechnische Wirkungsgrad wurden nach der in Kapitel 4.1 beschriebenen Systematik bilanziert. Die CO-Konzentrationen wurden an der Messposition nach dem Zyklon gemessen und sind auf einen Sauerstoffgehalt von 13 Vol% bezogen.

Eine Zunahme der Brennstoffmenge bzw. der Feuerungsleistung wirkt sich positiv auf die CO-Konzentration aus. Dies lässt sich damit erklären, dass bei zunehmender Feuerungsleistung die Temperaturen im gesamten Brennersystem und somit auch in der Tertiärzone ansteigen. Der Tertiärbereich stellt die Ausbrandzone des Systems dar. Höhere Temperaturen im Flammrohr begünstigen daher den Gasausbrand und die Oxidation von CO zu CO<sub>2</sub>.

Den stärksten Effekt auf die CO-Konzentration hat aber die zugeführte Tertiärluftmenge. Mit zunehmender Tertiärluftmenge sinken die CO-Emissionen auf unter 6 mg/m<sup>3</sup> ab. Die Tertiärluft ist als Ausbrandluft somit hauptverantwortlich für den vollständigen Gasausbrand. Bei der Beurteilung der dargestellten Abhängigkeit zwischen CO-Konzentration und Tertiärluft muss jedoch der Effekt der Falschlufte im Kessel berücksichtigt werden. Vor allem bei geringer Tertiärluftzufuhr kann es zu einer Rückströmung von Kesselfalschlufte in das Flammrohr kommen. Die Oxidation von CO wird durch die eingemischte Falschlufte unterstützt. Dieser Effekt kann messtechnisch nicht erfasst werden und verzerrt somit die Darstellung des Zusammenhangs zwischen CO-Konzentration und Tertiärluft. Damit würde auch der hier als annähernd linear erscheinende Verlauf nicht der Realität entsprechen. Ein signifikanter Effekt der Primärluft auf den Verlauf der CO-Emissionen konnte im Rahmen der durchgeführten Analyse nicht festgestellt werden.

Deutlich ist zu erkennen, dass der Umwandlungsgrad  $X_C$  des Kohlenstoffs mit zunehmender Primärluftmenge ansteigt. Bei geringerer Primärluftzahl reicht die zugeführte Verbrennungsluft nicht aus, um den gesamten Brennstoff umzusetzen. Aufgrund des beobachteten, schüttkegelförmigen Glutbettaufbaus entstehen bei geringer Luftzufuhr im Glutbett vermutlich lokal Zonen mit starkem Luftmangel. In diesen Be-

reichen findet nur noch wenig Reaktion statt, so dass es hier zu einer unvollständigen Brennstoffumsetzung kommt.

Vergleicht man den Verlauf der Regressionsgeraden mit den rot dargestellten Stützpunkten ist auch hier zu erkennen, dass der lineare Regressionsverlauf nicht der Realität entspricht. Anhand der Stützpunkte ist ein asymptotischer Verlauf der Umsetzungsrate über die Primärluftzahl wahrscheinlicher. Ab einem Wert von  $\lambda_{\text{Primär}} = 0,8$  erreicht die Umwandlungsgrad  $X_C$  einen Grenzwert bei etwa 95 - 98%. Zudem ist eine starke Streuung der Stützwerte festzustellen, erkennbar an den drei Punkten bei minimaler Luftmenge. Ursächlich dafür könnte die Überlagerung weiterer Effekte sein, deren Einflüsse nicht erfasst wurden. Beispielsweise beeinflusst der Glutbettzustand zu Messbeginn die Feststoffumsetzung und somit die Umsetzungsrate. Aufgrund mangelnder Kontrollmöglichkeit war es nicht möglich, einen gleichbleibenden Glutbettzustand am Beginn der Messungen zu garantieren.

Neben der Abhängigkeit der Umsetzungsrate von der Primärluft wurde außerdem eine Zunahme der Umsetzungsrate bei steigender Feuerungsleistung ermittelt. Auch hier begünstigen wiederum die höheren Systemtemperaturen, speziell in der Primärzone, eine verbesserte Umsetzung des eingebrachten Brennstoffs.

Der feuerungstechnische Wirkungsgrad beinhaltet neben den Abgasverlusten auch die Verluste infolge unvollständiger Feststoffumsetzung. Die Größenordnung dieser Verluste übersteigt die der Abgasverluste. Aus diesem Grund zeigt der Verlauf des feuerungstechnischen Wirkungsgrades auch Parallelen zum Verlauf des Umwandlungsgrads  $X_C$ . Auch hier ist eine asymptotische Annäherung an einen Grenzwert in Abhängigkeit der Primärluft erkennbar. Ebenso eine Zunahme des Wirkungsgrades mit steigender Feuerungsleistung.

Der Abgasverlust steigt ebenfalls mit zunehmender Feuerungsleistung an. Bei höheren Feuerungsleistungen nimmt auch das entstehende Abgasvolumen zu. Das wiederum bewirkt höhere Rauchgasgeschwindigkeiten in den Wärmeübertragerflächen des Heizkessels. Dadurch verbleibt weniger Zeit für die Wärmeübertragung zwischen Rauchgas und Heizflächen, wodurch das Rauchgas den Kessel mit höheren Temperaturen verlässt. Derselbe Effekt stellt sich bei einer vermehrten Zufuhr von Verbrennungsluft ein. Auch hier steigt das Abgasvolumen und somit der Abgasverlust an. Dies wird deutlich bei der Darstellung des Verlaufs des Abgasverlustes über der Primär- bzw. der Tertiärluft.

Der Effekt der Tertiärluft auf den Umwandlungsgrad  $X_C$  zeigt einen physikalisch nicht erklärbaren Zusammenhang auf. Die Tertiärluft übt im Bereich der primären Entgasungszone keinen Einfluss aus und sollte daher keine Auswirkung auf die Feststoffumsetzung haben. Aus diesem Grund wird dieser Effekt im Regressionsmodell nicht mit berücksichtigt und wird in Abbildung 21 folglich auch nicht dargestellt. Infolge der Beeinflussung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades durch den Umwandlungsgrad  $X_C$  verhält es sich beim Zusammenhang zwischen feuerungstechnischem Wirkungsgrad und Tertiärluft ebenso.

Generell sind die Ergebnisse der durchgeführten Regressionsanalyse kritisch zu betrachten. Für eine gute statistische Absicherung der Ergebnisse ist eine höhere An-

zahl an Versuchen notwendig. Zudem müssten die einzelnen Betriebspunkte mehrmals angefahren und vermessen werden. Unerwünschte Zufallseffekte werden dadurch eliminiert und der Vertrauensbereich der Zielgrößen verschmälert sich.

Bei der Auswertung der Ergebnisse hat sich gezeigt, dass die Vertrauensbereiche der ermittelten Zielgrößen teilweise sehr groß sind. Im weiteren Projektverlauf zeigte sich, dass der Einfluss der Falschluff signifikant ist. Bei den gemessenen Primärluftmengen ist nicht sichergestellt, dass diese mit den tatsächlichen Luftmengen der primären Entgasungszone übereinstimmen. Die eingesetzten Schiebersysteme wiesen, bedingt durch die Konstruktion, große Undichtigkeiten auf, die durch eine Abdichtung nicht vollständig beseitigt werden konnten.

Bei der Durchführung der Messungen hat sich die Einstellung des Prototyps auf einen stationären Betriebszustand als schwierig erwiesen. Die Ursache dafür dürfte in dynamischen Veränderungen im Glutbett der primären Entgasungszone liegen. Je nach zugeführter Primärluftmenge baut sich demnach in der primären Entgasungszone ein Glutbett auf, bzw. ab (vgl. Abbildung 22). Wird eine geringe Primärluftzahl eingestellt, so kommt es ohne die periodische Ausschleusung von entgastem Brennstoff in die sekundäre Entgasungszone zu einem kontinuierlichen Glutbettaufbau. Dadurch ändern sich der Glutbettzustand und das Entgasungsverhalten kontinuierlich.

Wird die Primärluftzahl stark erhöht, so werden die eingebrachten Holzpellets vollständig umgesetzt. Zusätzlich werden die vorher angehäuften Entgasungsrückstände weiter umgesetzt, so dass ein rechnerischer Umwandlungsgrad  $X_C$  des Kohlenstoffes über 100 % erreicht wird. Bei fortschreitendem Abbau des Glutbettes auf ein sehr niedriges Niveau führt das im Extremfall zu einem Leistungseinbruch.

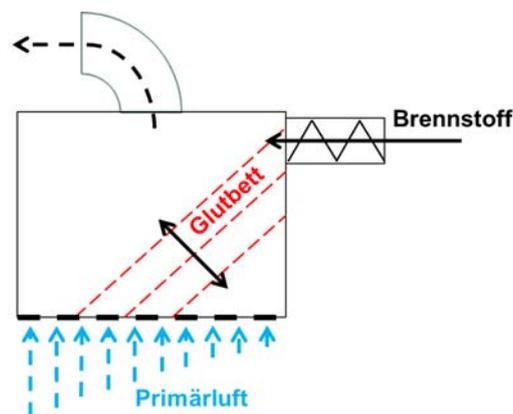


Abbildung 22 Glutbettaufbau in Schüttkegelform in der primären Entgasungszone des Prototyps

#### 4.4 Ergebnisse erster Prototyp mit Heupellets

Nach den insgesamt positiven Ergebnissen mit Holzpellets wurden Versuche mit Heupellets durchgeführt. Auch hier wurde ein Versuchsplan erstellt, der die sekundäre

Entgasungszone außen vor lässt und nur die primäre Entgasungszone betrachtet (vgl. Abbildung 20).

Aus den Vorversuchen mit Holzpellets hat sich ergeben, dass die untere Betriebsgrenze der Luftüberschusszahl in der Primärzone noch nicht erreicht wurde. Um Verschlackungen zu vermeiden, sollten niedrige Brennstoffbetttemperaturen und damit eine niedrige Luftüberschusszahl in der primären Entgasungszone eingestellt werden.

Bei Heupellets wurde deshalb die Primärluftzahl  $\lambda_{\text{Primär}}$  von 0,4 bis 0,7 variiert. Dabei wurden ein Umwandlungsgrad  $X_C$  des Kohlenstoffes in der primären Entgasungszone im Bereich von 84 % bis 94 % ermittelt. Allerdings musste auch bei diesem Brennstoff eine starke Schwankung der Umwandlungsgrad  $X_C$  festgestellt werden. Die Ursache bei den Versuchen mit Heupellets war zum einen ebenfalls das ungleichmäßige Brennstoffbett und außerdem eine z.T. sehr kurze Versuchszeit, die teilweise nur 15 min betrug, da es dann meist zu einem Überfüllen der Brennkammer und zu einem Flammenabriss kam.

Entgegen den Erwartungen zeigte sich bei Heupellets eine ausgeprägte Verschlackungsproblematik. Selbst bei einer Primärluftzahl  $\lambda_{\text{Primär}}$  von 0,4 konnte kein Entgasungsrückstand ausgeschleust werden, da die Schubböden durch die großflächigen Verschlackungen versagten. Abbildung 23 zeigt Verschlackungen bei Verbrennungsversuchen mit Heupellets.



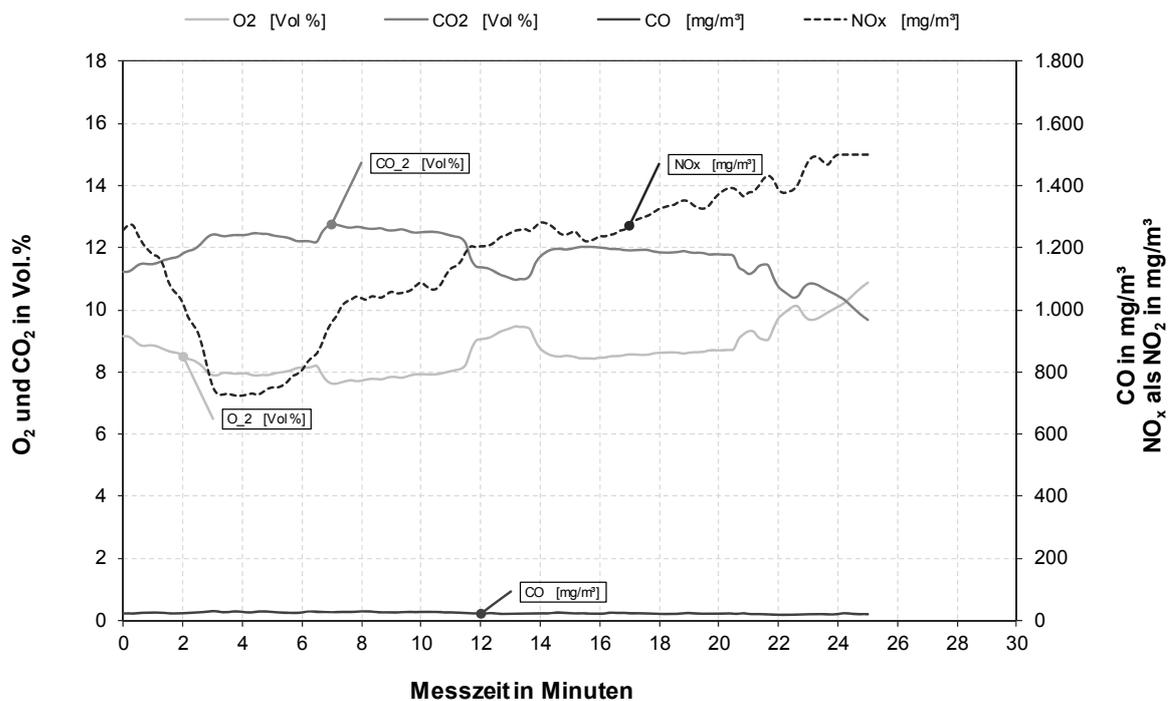
**Abbildung 23 Verschlackungen bei Verbrennungsversuche mit Heupellets**

Ein Einfluss der Luftmenge in der primären Entgasungszone auf die Vollständigkeit des Ausbrandes im Flammrohr konnte auch bei Heupellets nicht erkannt werden. Die CO-Konzentrationen lagen bei allen Versuchen zwischen 15 mg/m<sup>3</sup> und 40 mg/m<sup>3</sup> bei 13 Vol% O<sub>2</sub>. Bei einem Versuch wurden eine Staubkonzentration in Höhe von

320 mg/m<sup>3</sup> gemessen. Die NO<sub>x</sub>-Konzentrationen lagen bei den Versuchen mit Heupellets zwischen 380 mg/m<sup>3</sup> und 840 mg/m<sup>3</sup> bei 13 Vol% O<sub>2</sub>.

Einen direkten Einfluss der Luftüberschusszahl in der Primärzone auf die NO<sub>x</sub>-Konzentrationen im Abgas konnte nicht festgestellt werden. Allerdings konnte ein deutlicher Einfluss der Entgasungsbedingungen in der primären Entgasungszone auf die Stickstoffoxidkonzentration festgestellt werden. So nahm die NO<sub>x</sub>-Konzentration in einem Versuch von über 1.200 mg/m<sup>3</sup> kurzzeitig auf 650 mg/m<sup>3</sup> ab und stieg dann kontinuierlich auf über 1.400 mg/m<sup>3</sup> an, obwohl die Brennstoff- und Luftströme konstant gehalten wurden.

Abbildung 24 zeigt diese Beobachtung bei einer Feuerungswärmeleistung von 90 kW, mit einer Primärluftzahl von  $\lambda_{\text{Primär}} = 0,3$ . Hierbei ergaben sich bei den O<sub>2</sub>- und CO-Konzentrationen geringe bzw. keine Veränderungen. Daher ist zu vermuten, dass dies mit dem Entgasungsverhalten der Heupellets bzw. den lokalen Entgasungsbedingungen (Sauerstoffangebot und Temperaturen) zusammenhängt.



**Abbildung 24** Ausschnitt der Messreihe Heupellets,  
Feuerungswärmeleistung 90 kW,  $\lambda_{\text{Primär}} = 0,3$

#### 4.5 Redesign

Durch die am IFK durchgeführten Versuche mit Holz- und Heupellets ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

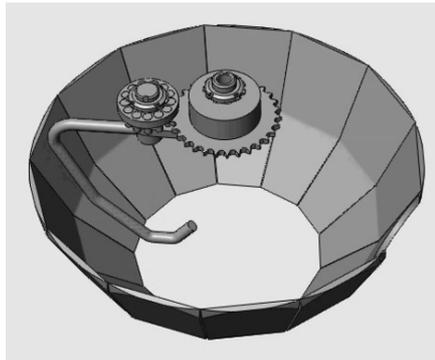
- Die Ausbrandzone erfüllt die Erwartungen in Bezug auf Flammenstabilität und vollständigem Ausbrand bei niedrigem Luftüberschuss ( $\text{CO} < 50 \text{ mg/m}^3$  bei 3 bis 5 Vol%  $\text{O}_2$ ).
- Das bisherige Konzept des Brennstoffaustrages mit Schubböden funktioniert nur teilweise, da aufgrund von Ablagerungen im Dichtungsbereich des ersten Schubbodens dieser nicht mehr vollständig geschlossen werden kann. Bei Holzpellets war die verbleibende Restöffnung gering, so dass ein weiterer Betrieb möglich war. Die Restöffnung war bei Heupellets allerdings meist so groß, dass eine bestimmungsgemäße Primärluftverteilung über den ersten Schubboden nicht mehr gegeben war.
- Bei Heupellets traten großflächige und massive Verschlackungen auf, die einen vernünftigen Brennerbetrieb und eine Abfuhr des entgasten Brennstoffs mit den Schubböden in die Sekundärzone unmöglich machten.

Die Ergebnisse der ersten Versuche machten ein Redesign des Prototyps notwendig, das aus Zeitgründen vom IFK entwickelt und umgesetzt wurde. Wie die Versuche mit Holz- und Heupellets zeigten, ist die Ausbrandzone (Flammrohr mit Tertiärluftzugabe) weitgehend richtig dimensioniert und es sind in allen Betriebsbereichen sehr geringe CO-Konzentrationen bei niedrigem Luftüberschuss zu realisieren. Daher wurde das Redesign ausschließlich auf die Funktion der Schubböden und der Entgasung der Pellets beschränkt.

Mit der derzeitigen Schubbodenkonstruktion wird bei der Ausschleusung der vergasteten Pellets in die stirnseitigen Dichtflächen Brennmaterial gepresst, sodass die Schubböden nicht vollständig schließen. Bei Heupellets kommt es außerdem zum Verklemmen der Schubböden aufgrund von Verschlackungen, da die Schubböden diese nicht abscheren können. Um ein Verklemmen der Schubböden zu verhindern und ein Abscheren des Brennstoffes zu ermöglichen, wird der Brennerkopf der primären Entgasungszone über dem Rost in Form einer kegeligen Schürze eingeschnürt. Dadurch wird eine wesentlich geringere Portionierung erreicht, die ein Weitertransport in die sekundäre Entgasungszone durch das Schiebersystem ermöglicht. Zusätzlich wird eine Schneide gebildet, die den Brennstoff beim Schließen des Schiebersystems abschert.

Um Maßnahmen zur Verhinderung von Verschlackungen zu entwickeln, wurde ein Versuch mit offenem Brennerkopf durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass ein Verkleben der einzelnen Heupellets schon in der Zündphase stattfindet. Diese Verklebungen lassen sich durch Bewegung mit einem Rührstab leicht lösen. Dieses Verkleben des Brennstoffes beginnt bereits bei relativ niedrigen Temperaturen und kann, wie die vorherigen Versuche mit Heupellets gezeigt haben, nicht durch sehr geringe Luftzahlen in der primären Entgasungszone unterbunden werden. Der verklebte Brennstoff dient als Bildner für die Verschlackungen. Werden die Verklebungen durch Rühren gelöst, treten in einer späteren Phase der Brennstoffentgasung keine Verschlackungen oder Verklebungen mehr auf. Die verstärkte Brennstoffbewegung wirkt sich auch auf die Entgasungsrate der Heupellets positiv aus.

Um das Problem der Verschlackung in den Griff zu bekommen und um die Entgasungsrate der Pellets zu steigern, wurde ein Rührhaken in der primären Entgasungszone des Brenners eingebaut, der für eine ständige Bewegung des Brennstoffes sorgt. Abbildung 25 zeigt modellhaft den Rührhaken in Kombination mit einer Schürze. Zusätzlich bewirkt der Rührhaken eine Vergleichmäßigung des Brennstoffbettes und verhindert den Aufbau eines Schüttkegels im Bereich der Brennstoffzuführung.



**Abbildung 25 CAD-Modell des ersten Redesign vom Prototyp mit Schürze und Rührhaken mit Triebstockradantrieb**

Mit dem überarbeiteten Anlagenkonzept wurden erste Versuche durchgeführt. Diese haben die Wirksamkeit der beiden Maßnahmen in Bezug auf Vermeidung von Verschlackungen und eine erfolgreiche Ausschleusung von Entgasungsrückständen voll bestätigt. Allerdings ging, bedingt durch die Einschnürung über dem Rost, die Entgasungsrate und damit der Umsatz der Heupellets trotz Brennstoffbewegung stark zurück und es erfolgte kein Durchzünden der Pyrolysegase mit Tertiärluft im Flammrohr mehr. Erst durch Erhöhung des Primärluftstromes und des Kesselunterdrucks konnte die Entgasungsleistung auf ein Niveau gehoben werden, dass ein Durchzünden nach ca. 2 Stunden nach dem Anzündvorgang erlaubte.

Bedingt durch die Konstruktion des ersten Prototyps musste der Antrieb für den Rührhaken im heißen Bereich der primären Entgasungszone positioniert werden. Durch den langen Anheizvorgang erfuhr der Rührhaken eine zu hohe thermische Belastung, sodass dieser nach wenigen Versuchen vollständig versagte. Ein weiteres Problem zeigte sich durch Totstellen in der Primärzone, welche das Rührorgan nicht erreichte. Direkt über der Rostoberfläche konnte das Rührorgan keinen Einfluss ausüben. Dadurch kam es zu massiven Verschlackungen und Ascheaufschmelzungen unmittelbar über der Rostoberfläche, die ein Durchströmen der Verbrennungsluft verhinderte.

Aus diesen Erkenntnissen heraus wurde ein zweites Rührorgan, als Kreuzbalkenrührer mit Ascheschieber entwickelt. Abbildung 26 zeigt das Rührorgan (links) im Eingebauten Zustand mit geöffneter Brennkammer und die primären Entgasungszone (Mitte) mit eingebauter Schürze. Um die Rostfläche zu erhöhen, wurden in die Schürze zusätzlich noch Öffnungen eingebracht. Durch die zwingend notwendige Führung des Rührorgans, mittels Zapfenlagerung im Rostboden, war kein Ausschleusen von Ent-

gasungsrückständen über das Schleusensystem mehr möglich. Daher wurde ein neues Rostelement mit zusätzlichen Löchern in die Schürze eingelegt und das Schleusensystem vollständig geöffnet. Dadurch konnte eine ausreichende hohe Entgasungsrate der Heupellets gewährleistet werden, so dass ein Durchzünden der Pyrolysegase am Flammrohr stattfand und diese ohne Flammenabriss stabil über die Versuchszeit brannten.



**Abbildung 26** links: Kreuzbalkenrührer mit Ascheschieber  
 Mitte: Primärkammer mit Schürze  
 recht: Brückenbildung an der Ascheaustragung

Der Kreuzbalkenrührer verhinderte zuverlässig die Schlackebildung bei Heupellets. Die Konzentrationen von Kohlenmonoxid erwiesen sich als äußerst niedrig. Die  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen reduzierten sich über die Versuchsdauer von hohen zu niedrigen Werten. Im Flammrohr konnte während der Versuche ein starker Funkenflug beobachtet werden. Trotzdem ergaben die Staubmessungen mit  $160 \text{ mg/m}^3$  niedrigere Werte als bei der Originalkonstruktion mit  $320 \text{ mg/m}^3$ . Als Ausschlusskriterium für dieses Rührerkonzept ergaben sich die ungenügende Entaschung und die zu geringe Entgasungsrate, um eine Wärmeleistung von  $90 \text{ kW}$  zu erreichen.

Auch wurde der Ascheschieber zu schwach ausgelegt, so dass dieser nach relativ kurzer Betriebszeit verschlissen war. Aufgrund der geringen Entgasungsraten und ohne Ausschleusung von Entgasungsrückständen überfüllte die Brennkammer nach wenigen Stunden, sodass die Anlage herunter gefahren werden musste. Nach Abkühlung der Feuerungsanlage offenbarte sich ein weiteres Problem in der sekundären Entgasungszone. Bei dem Versuch die Asche auszutragen rutschte diese nicht nach und der überwiegende Teil der Asche verblieb in der sekundären Entgasungszone (Abbildung 26, rechts).

Aufgrund der Erkenntnis die mit den beiden Rührorganen gewonnen wurden, ergibt sich folgende Anforderung an das dritte Redesign:

- (1) Das Rührorgan muss sich über die gesamte Rostfläche bewegen, so dass kein Totraum entsteht.

- (2) Die Rostfläche und die Anzahl der Löcher für die Verbrennungsluft müssen entsprechend groß dimensioniert sein, damit eine ausreichende Entgasungsrate sichergestellt wird.
- (3) Die Entgasungsrückstände müssen von Zeit zu Zeit ausgeschleust werden, um ein Überfüllen des Brennraumes zu verhindern.
- (4) In der Sekundärzone muss ebenfalls ein Bewegungselement vorhanden sein, damit eine vollständige Entaschung gewährleistet ist.

Auf Grund der Probleme mit dem originalen Schleusensystem wurde für das dritte Redesign eine neue Ausschleusung für die Entgasungsrückstände entwickelt. Das neue Schleusensystem wird direkt im Ascheschieber integriert und ermöglicht ein kontinuierliches ausschleusen von Entgasungsrückständen. Das Schubbodensystem wurde aus dem Brennersystem entfernt. Dadurch konnten die Undichtigkeiten des Brennersystems entschieden verringert werden, sodass nur noch mit einem Falschlufteintrag über den Kessel zu rechnen ist. Die Brennstoffbewegung soll auf Grund der ausreichenden Mischungsgüte ebenfalls durch ein Kreuzbalkenrührer bewerkstelligt werden und mit einem Ascheschieber, der über die gesamte Rostfläche streicht.

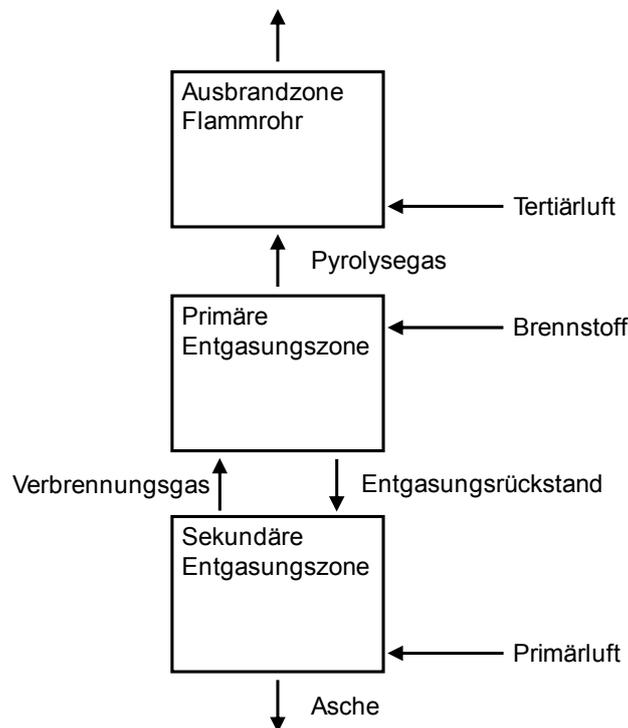
Abbildung 27 links zeigt den Kreuzbalkenrührer (nicht dargestellt die integrierte Austragung der Entgasungsrückstände). Der Rost wurde ebenfalls überarbeitet und weist deutlich mehr Löcher für die Verbrennungsluft auf als der originale Rost. In Abbildung 27 rechts ist die neue Rostfläche nach einem Versuch mit Heupellets gezeigt. Gut zu sehen ist die lose Asche, die sich durch abfegen beseitigen lässt. Auch sind keine Verschlackungen und Versinterungen aufgetreten. Der Austrag der Entgasungsrückstände entsprach den Erwartungen, allerdings war die Brennstoffbetthöhe während des Versuches nicht zu kontrollieren.



**Abbildung 27**    **Drittes Redesign mit**  
**links: Kreuzbalkenrührer**                      **rechts: Rostfläche**

Die ersten Versuche mit dem dritten Redesign erwiesen sich als zukunftsweisend und weitere Versuche mit Emissionsmessungen sollten mit diesem Konzept durchgeführt werden. Nach dem dritten Versuch zeigte sich die Schwäche des Systems. Da der Rost aus Baustahl mit 6 mm Stärke gefertigt wurde und im Prototyp fest verbunden wurde, kam es zum Versagen des Bauteils. Daher musste der Einbau und das Mate-

rial des Rostes neu gewählt werden. Der Rost wurde daraufhin lose mit einer Verdrehsicherung in der primären Entgasungszone eingelegt. Als Werkstoff wurde ein hochwarmfester Edelstahl mit einer Stärke von 10 mm gewählt. Des Weiteren wurde ein Bewegungselement in die Sekundärkammer integriert, um eine Brennstoffbewegung der Entgasungsrückstände zu gewährleisten. Das neue Brennerkonzept ist in Abbildung 28 dargestellt und wurde in einem zweiten Prototyp umgesetzt.



**Abbildung 28 Schematische Darstellung des Verbrennungskonzepts im umgebauten Prototyp (zweiter Prototyp)**

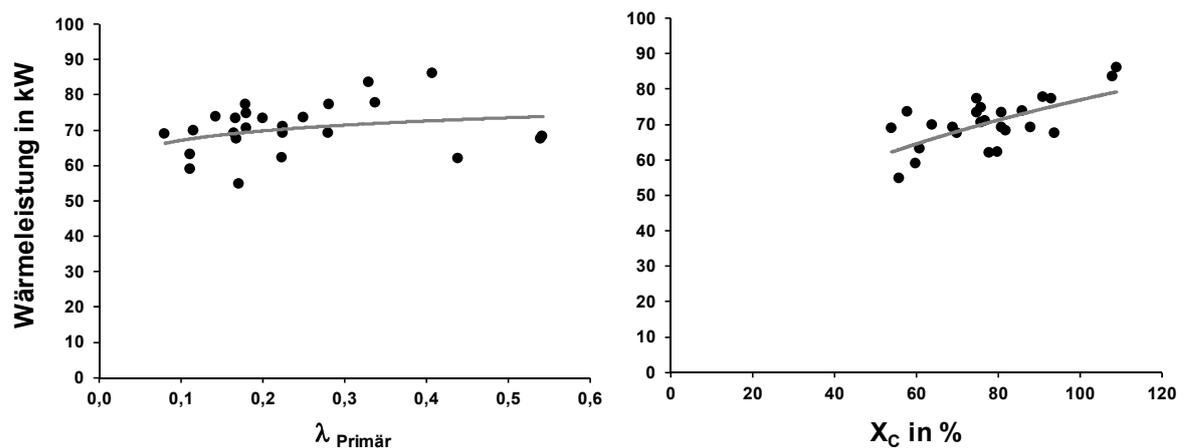
#### 4.6 Ergebnisse zweiter Prototyp mit Holzpellets

Mit dem zweiten Prototyp wurden Versuche mit Holzpellets durchgeführt, allerdings ohne Brennstoffbewegung, da bei Holz keine Gefahr von Versinterung und Verschlackung droht. Um eine hohe Entgasungsrate und geringen Druckverlust durch den Rost zu gewährleisten, wurden die Rostlöcher mit 7 mm bzw. 10 mm Bohrungen versehen. Dadurch fand eine Ausschleusung der Entgasungsrückstände allein durch die Brennstoffbewegung statt.

Durch den geringeren Falschlufteintrag über das Brennersystem war es möglich die Bilanzierungs- und Kontrollrechnungen mit den Messwerten in Deckung zu bringen. Dadurch konnte der Umwandlungsgrad  $X_N$  des Brennstoffstickstoffes in Stickstoffoxidkonzentration bestimmt werden. Allerdings ist der Umwandlungsgrad  $X_N$  des Stickstoffes immer noch etwas fehlerbehaftet, da der Massenstrom der Entgasungs-

rückstände empirisch ermittelt wurde und die Zusammensetzung nicht in jedem Betriebszustand ermittelt werden konnte. Die Entgasungsrückstände wurden bei einem Betriebszustand entnommen und auf die Hauptelemente analysiert. Die Werte sind in Tabelle 4 aufgelistet. Für die Bilanzierung des Systems wurde ein konstantes Verhältnis von Stickstoff zu Kohlenstoff angenommen.

In Abbildung 29, links ist der Zusammenhang zwischen der Primärluftzahl und der Wärmeleistung aufgetragen.

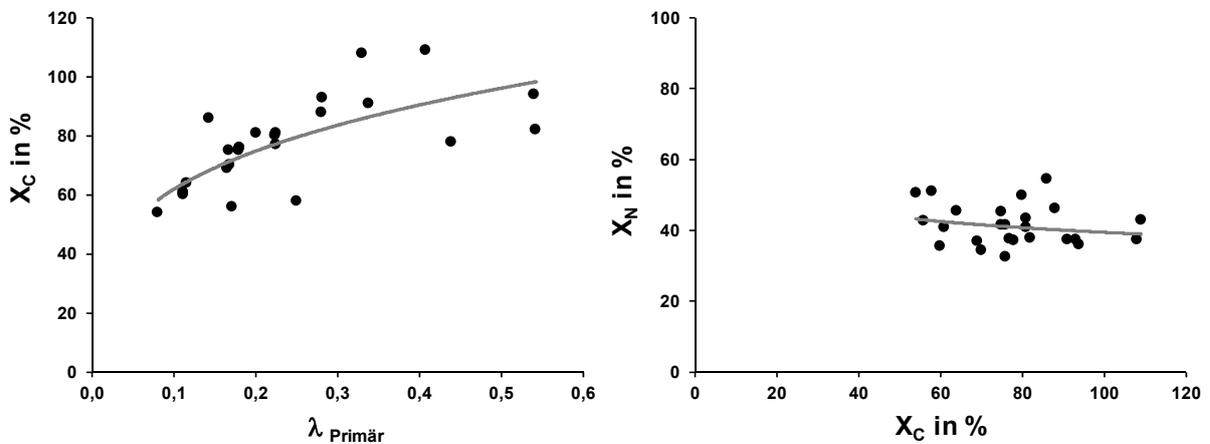


**Abbildung 29 Zusammenhang bei Holzpellet beim zweiten Prototyp:**  
links: Luftüberschuss Primär und Wärmeleistung  
rechts: Umsetzung Kohlenstoff und Wärmeleistung

Einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Primärluftzahl und der Wärmeleistung ist scheinbar nicht erkennbar. Allerdings korreliert der Umsatz des berechneten Kohlenstoffes gut mit der Wärmeleistung (Abbildung 29 rechts). Die hohe Streuung liegt, wie schon bei dem Prototyp 1, an dem ungleichmäßigen Brennstoffbett und dem relativ kurzen Auswertzeitraum. Im Umkehrschluss ist die Primärluftzahl nur indirekt mit der Wärmeleistung verbunden. Entscheidend für die Wärmeleistung ist der Umsatz des Brennstoffes und dieser ist nicht nur von der Primärluftzahl abhängig. Der Brennstoffumsatz hängt zusätzlich von den herrschenden Betttemperaturen, der Brennstoffbetthöhe, dem Verhältnis von frischem Brennstoff zu Entgasungsrückständen, der Brennstoffbewegung und dem lokalen Sauerstoffüberschuss ab.

In Abbildung 30 ist die Umsetzung des Kohlenstoffes über der Primärluftzahl aufgetragen. Dabei ist eine Tendenz zwischen Primärluft und umgesetzter Brennstoff zu erkennen. Allerdings sind auch Punkte vorhanden, bei denen nicht die Primärluft hauptsächlich die Umsetzung des Brennstoffes vorgibt. Hier sind vermutlich erhöhte Brennbetttemperaturen aus einem vorherigen Versuch verantwortlich. Teilweise wurde das Brennstoffbett kurzzeitig durch Rührerbewegung vergleichmäßigt. Dadurch kam es kurzfristig zu einer erhöhten Brennstoffumsetzung bei gleichem Brennstoffmassenstrom. Bei den Primärluftzahlen 0,44 und 0,54 konnte kein vollständiger Brennstoffumsatz erreicht werden, da sich ein Brennstoffbett in Form eines Schüttkegels aufgebaut hatte. Dadurch sind große Gradienten des Luftüberschusses in der Brenn-

stoffschüttung vorhanden und es kam zu einer Anhäufung von unverbrannten Brennstoff in der primären Entgasungszone.

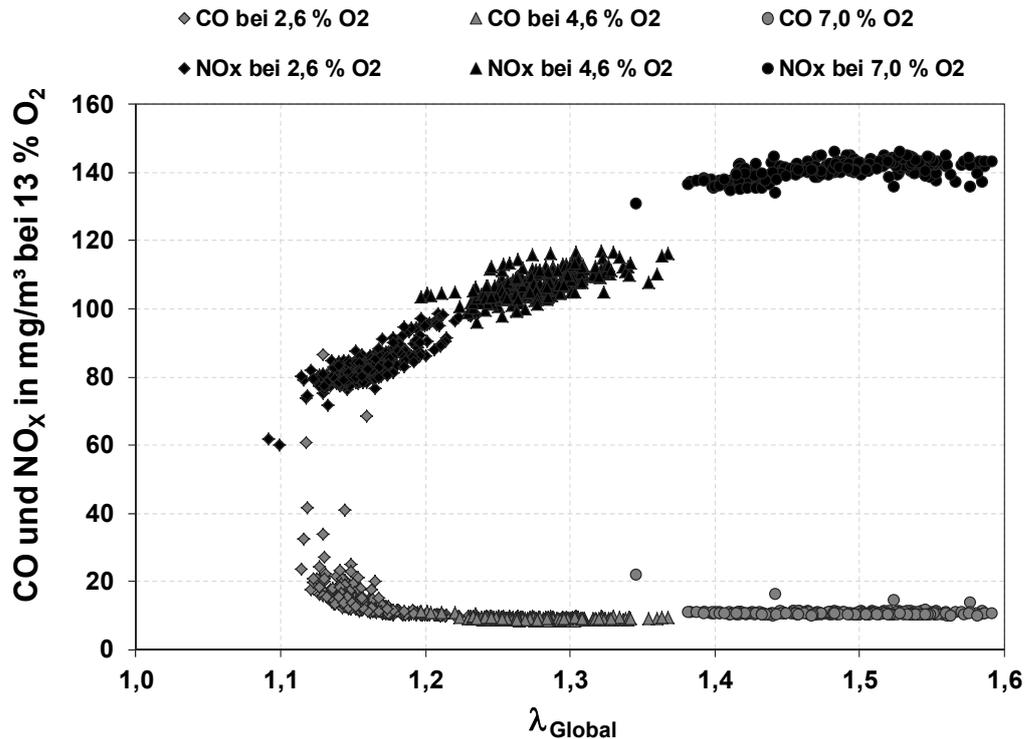


**Abbildung 30 Zusammenhang bei Holzpellets beim zweiten Prototyp:**  
**links: Luftüberschuss Primär und Umsetzung Kohlenstoff**  
**rechts: Umsetzung Kohlenstoff und Umsetzung Brennstoffstickstoff**

Wird die Umsetzung des Brennstoffstickstoffes über der Umsetzung des Kohlenstoffes wie in Abbildung 30 rechts aufgetragen, so kann kein signifikanter Zusammenhang gefunden werden. Dies bedeutet, dass bei dem vorhandenen zweiten Prototyp die Höhe der Stickstoffemissionen nicht durch die Reduzierung der Primärluftzahl bestimmt wird. Der freigesetzte Stickstoff, welcher als Stickstoffoxidemissionen in Erscheinung tritt, ist bei Holzpellets weitgehend unabhängig von der Umsetzung des Brennstoffes.

Allerdings konnte bei gleichem Brennstoffumsatz ein Zusammenhang zwischen Gesamtluftüberschuss und Stickstoffoxidemissionen gesehen werden. Abbildung 31 zeigt beispielhaft den Zusammenhang der Stickstoffoxidemissionen und der Gesamtluftüberschusszahl. Dargestellt ist eine Messreihe mit einem mittleren Restsauerstoffgehalt von 2,6 / 4,6 und 6,9 Vol% im Abgas, einer Primärluftzahl von  $\lambda_{pri} = 0,18$  und einer Kohlenstoffumsetzungsrate von 75 - 76 %. Dabei sind  $NO_x$ -Konzentrationen von 140  $mg/m^3$  bez. auf 13 Vol%  $O_2$  über einen Gesamtluftüberschussbereich von 1,4 bis 1,6 zu verzeichnen. Ab einer Gesamtluftüberschusszahl von 1,4 gehen die  $NO_x$ -Konzentrationen linear auf ein Minimum von ca. 80  $mg/m^3$  bez. auf 13 Vol%  $O_2$  zurück. Dieser Effekt der Stickstoffoxidreduktion ist im Bereich der Ausbrandzone im Flammrohr zu suchen und soll mit Hilfe der CFD-Simulation im nachfolgenden Kapitel „4.8 Simulation der Ausbrandzone“ beschrieben werden.

Die CO-Konzentrationen in Abbildung 31 liegen über einen weiten Bereich der Gesamtluftüberschusszahl bei ca. 10  $mg/m^3$  (bez. auf 13 Vol%  $O_2$ ) konstant niedrig. Ab einer Luftüberschusszahl von kleiner 1,2 ist ein leichter Anstieg der CO-Konzentrationen zu verzeichnen. Die Restsauerstoffkonzentration im Abgas liegt dann unter 2,2 Vol%. Bei diesem Zustand wird eine theoretische Luftüberschusszahl am Flammrohr von 0,94 errechnet.



**Abbildung 31** CO- und NO<sub>x</sub>-Konzentrationen von Holzpellets über die Gesamtluftüberschusszahl  $\lambda_{\text{Global}}$  beim zweiten Prototyp

Durch die Falschluff, welche über den Kesselkörper in die Ausbrandzone gelangt, wird das Verbrennungsgas um ca. 1 bis 2 Vol% O<sub>2</sub> verdünnt. Dadurch ist auch in der Realität mit einem Luftüberschuss von ca.  $\lambda_{\text{Flammrohr}} = 1$  am Flammrohr zu rechnen. Die niedrigen CO-Konzentrationen von  $< 10 \text{ mg/m}^3$  (bei 13 Vol% O<sub>2</sub>) sind nur bei einem ungestörten Betrieb und vollständig aufgeheizter Feuerungsanlage erreichbar.

In Abbildung 32 sind die Stickstoffoxidemissionen von Holzpellets bei unterschiedlichen Primärluftzahlen bzw. Umsetzungsraten über die Gesamtluftüberschusszahl  $\lambda_{\text{Global}}$  aufgetragen. Bei diesen unterschiedlichen Versuchen kann eine Reduktion der Stickstoffoxidkonzentrationen bei einer Verringerung des Gesamtluftüberschusses beobachtet werden. Auch hier sind die Steigung und das Niveau der Stickstoffoxidkonzentrationen abhängig von den lokalen Bedingungen in der Entgasungszone. Ein Zusammenhang zwischen den vorherrschenden Bedingungen im Brennstoffbett und den Stickstoffoxidkonzentrationen ist nicht auszumachen, hierzu bedarf es noch weiterer Forschungsarbeiten.

In Abbildung 33 links sind die CO-Konzentrationen der Versuche beim zweiten Prototyp mit Holzpellets über die Gesamtluftüberschusszahl logarithmisch aufgetragen. Die minimalen Konzentrationen werden bei einem Gesamtluftüberschuss  $\lambda_{\text{Global}} = 1,2$  erreicht. Diese niedrigen CO-Konzentrationen konnten bei einem Restsauerstoffgehalt von 4 Vol% im Abgas nach relativ kurzer Zeit im Flammrohr eingestellt werden.

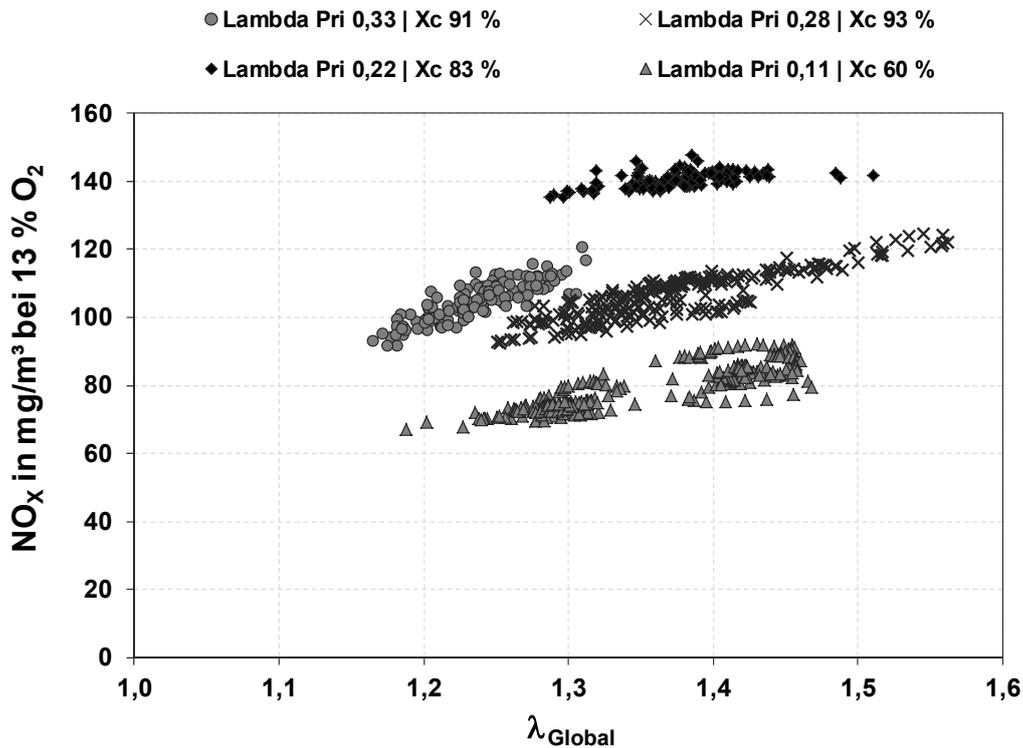


Abbildung 32 Stickstoffoxidemissionen von Holzpellets bei unterschiedlichen Primärluftzahlen über die Gesamtluftüberschusszahl  $\lambda_{Global}$  beim zweiten Prototyp

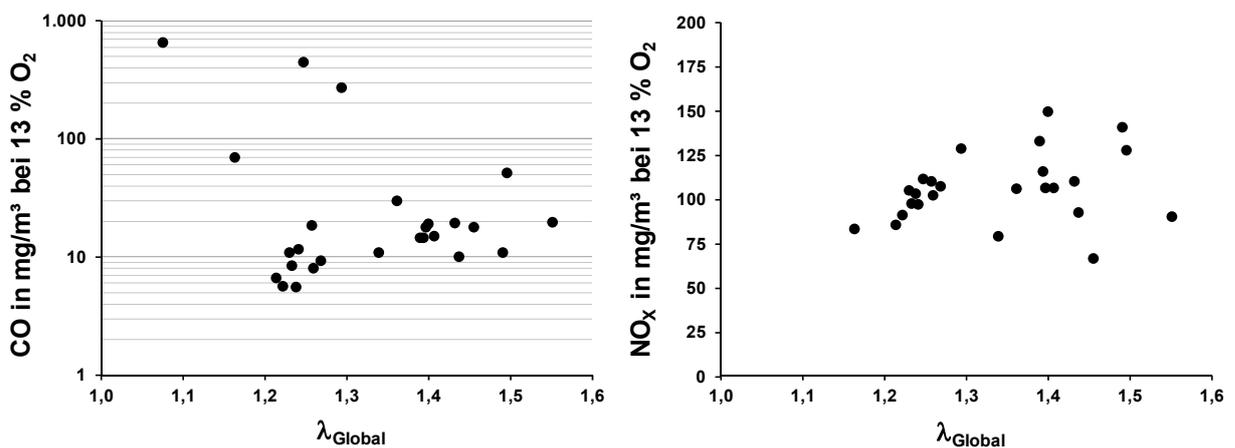
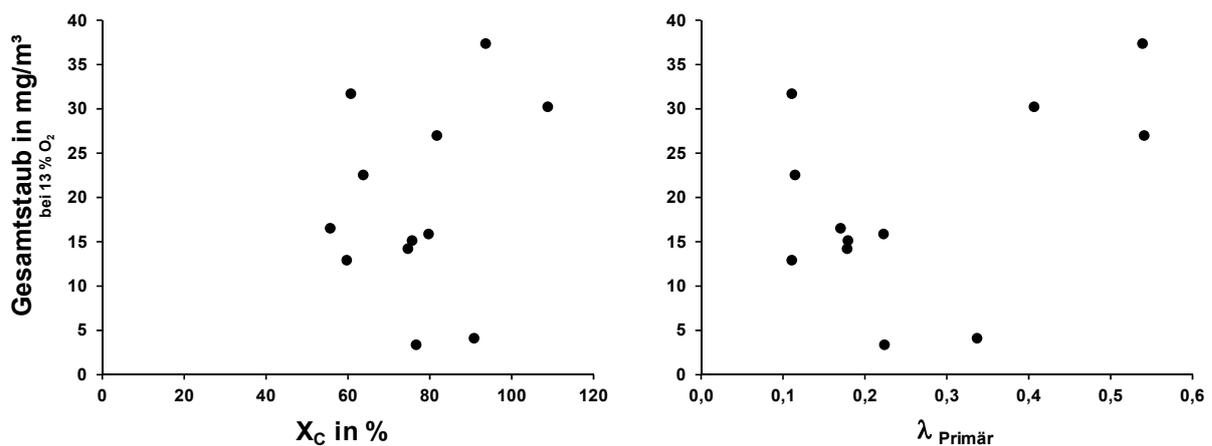


Abbildung 33 Konzentrationen in Abhängigkeit der Gesamtluftzahl bei Versuchen mit zweitem Prototyp und Holzpellets  
links: Kohlenmonoxid  
rechts: Stickstoffoxide

Abbildung 33 rechts zeigt die mittleren NO<sub>x</sub>-Konzentrationen der Versuche mit Holzpellet am zweiten Prototyp in Abhängigkeit der Gesamtluftüberschusszahl. Die mittleren Konzentrationen von NO<sub>x</sub> liegen zwischen 80 mg/m<sup>3</sup> und 160 mg/m<sup>3</sup> bei

13 Vol% O<sub>2</sub>. Zwischen einer Gesamtluftüberschusszahl von 1,2 bis 1,3 ist der Effekt der Stickstoffoxidreduktion durch Verringerung des Luftüberschusses auch bei den Mittelwerten gut erkennbar. Bei größeren Gesamtluftüberschusszahlen ist der Zusammenhang nicht mehr ersichtlich. Dies liegt an der großen Streuung der Sauerstoffkonzentrationen und damit verbunden der NO<sub>x</sub>-Konzentrationen im Abgas.

Die Gesamtstaubkonzentrationen für Holzpellet beim zweiten Prototyp liegen in einem Bereich von ca. 15 bis 30 mg/m<sup>3</sup>, bezogen auf 13 Vol% O<sub>2</sub>. Dabei konnte kein Einfluss der Primär- bzw. Gesamtluftzahl oder des Umwandlungsgrades X<sub>C</sub> für Kohlenstoff auf die Gesamtstaubemissionen festgestellt werden. Abbildung 34 rechts zeigt die Gesamtstaubkonzentration in Abhängigkeit des umgesetzten Kohlenstoffes bei den Versuchen mit Holzpellets beim zweiten Prototyp. Die Höhe der Gesamtstaubemissionen wird vermutlich durch lokale Temperaturspitzen im Brennstoffbett verursacht, denn es sind große zeitliche Schwankungen zu beobachten. Dies erklärt auch die Gesamtstaubkonzentration von kleiner 5 mg/m<sup>3</sup> in Abbildung 34 rechts, da diese Staubbemessung zufällig bei geringen Konzentrationen und in einem relativ kleinen Zeitfenster stattfand.



**Abbildung 34 Gesamtstaubkonzentration bei Versuchen mit Holzpellets im zweiten Prototyp in Abhängigkeit**  
links: der Umsetzung des Kohlenstoffes  
rechts: der Primärluftzahl

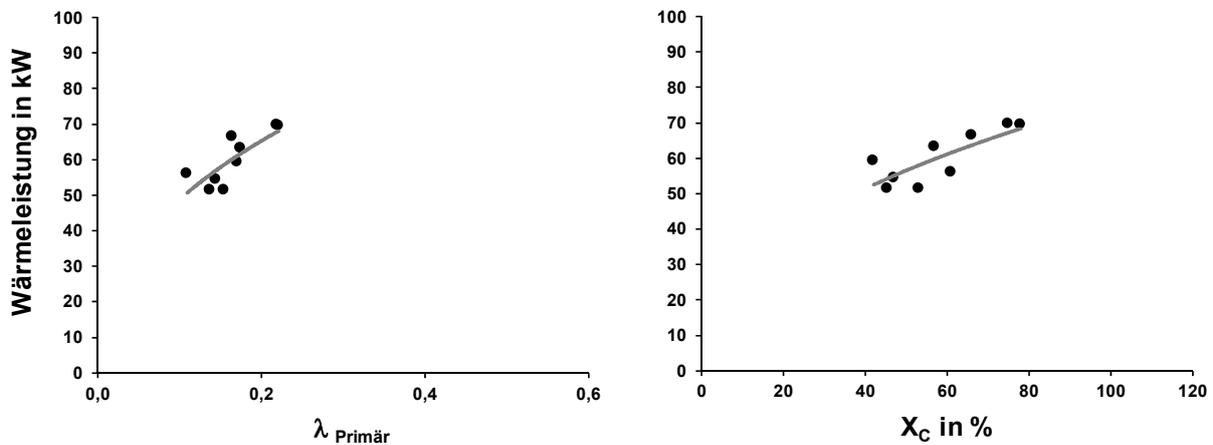
#### 4.7 Ergebnisse zweiter Prototyp mit Heupellets

Bei den Versuchen mit Heupellets wurden diese mit Hilfe von Holzpellets gezündet und die Feuerung auch damit auf Wärmeleistung gebracht. Dies ist aufgrund des relativ langen und geruchsintensiven Startvorgangs bei Heupellets begründet.

Bei den Versuchen mit Heupellets wurden ebenfalls Bilanzierungs- und Kontrollrechnungen aufgestellt, es war auch hier möglich, diese mit den Messwerten in Deckung zu bringen und den Umwandlungsgrad des Brennstoffstickstoffes in Stickstoffoxide zu bestimmen. Allerdings ist der berechnete Umwandlungsgrad von Stickstoff immer

noch etwas fehlerbehaftet, da der Massenstrom an Entgasungsrückständen empirisch ermittelt wurde und die Zusammensetzung nicht in jedem Betriebszustand ermittelt werden konnte.

Die Entgasungsrückstände wurden bei einem Betriebszustand entnommen und auf die Hauptelemente analysiert. Die Werte sind in Tabelle 4 aufgelistet. Für die Bilanzierung des Systems wurde ein konstantes Verhältnis von Stickstoff zu Kohlenstoff angenommen. In Abbildung 35 links ist der Zusammenhang zwischen der Primärluftzahl und der Wärmeleistung bei den Versuchen mit Heupellets am zweiten Prototyp aufgetragen. Gegenüber Holzpellets ist ein Zusammenhang zwischen der Primärluftzahl und der Wärmeleistung erkennbar. Auch korreliert der berechnete Kohlenstoffumsatz gut mit der Wärmeleistung (Abbildung 35 rechts).



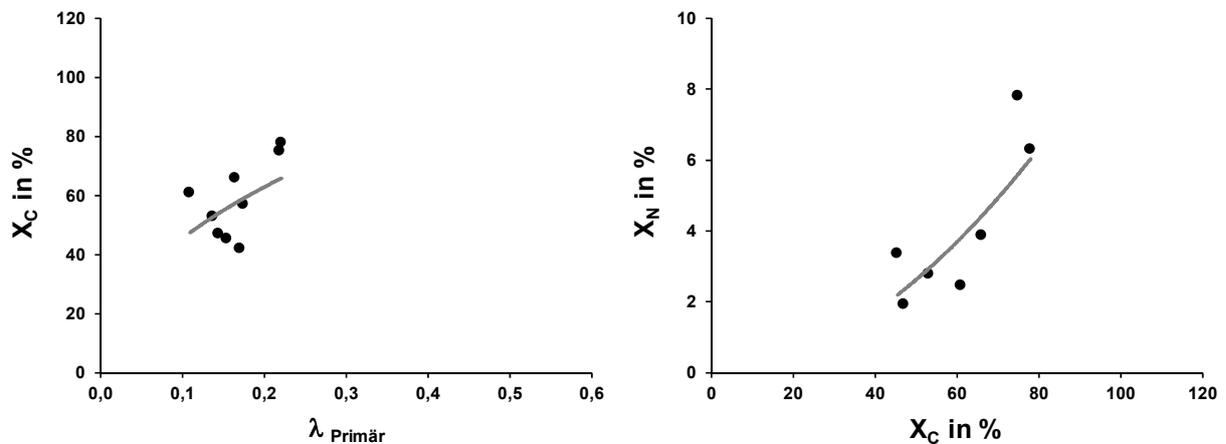
**Abbildung 35 Zusammenhang bei Heupellets beim zweiten Prototyp:**  
**links: Luftüberschuss Primär und Wärmeleistung**  
**rechts: Umsetzung Kohlenstoff und Wärmeleistung**

Entscheidend für die Wärmeleistung ist der Umsatz des Brennstoffes und dieser ist nicht nur von der Primärluftzahl abhängig. In Abbildung 36 ist die Umsetzung des Kohlenstoffes über der Primärluft aufgetragen. Dabei ist der Zusammenhang zwischen Primärluft und umgesetztem Brennstoff nicht eindeutig. Der Brennstoffumsatz hängt zusätzlich von den herrschenden Betttemperaturen, der Brennstoffbetthöhe, dem Verhältnis frischer Brennstoff zu Entgasungsrückständen, der Brennstoffbewegung und dem lokalen Sauerstoffüberschuss ab.

Wird die Umsetzung des Brennstoffstickstoffes über der Umsetzung des Kohlenstoffes wie in Abbildung 36 rechts aufgetragen, kann eine Abnahme der Umsetzungsrate mit sinkender Brennstoffumsetzung festgestellt werden. Dadurch hat indirekt die Primärluftzahl einen Einfluss auf die Höhe der Stickstoffoxidkonzentrationen. Die geringeren  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen im Abgas ergeben sich dadurch, dass der Stickstoff in den Entgasungsrückständen verbleibt und dem System zur Umsetzung in  $\text{NO}_x$  nicht mehr zur Verfügung steht. Da das Brennersystem über keine Reduktionskammer mit Temperaturen von  $> 1.100\text{ }^\circ\text{C}$  für den Abbau der Stickstoffverbindung in der Gasphase besitzt, gehen die  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen 1:1 mit dem Brennstoffumsatz einher.

Bei abnehmender Brennstoffumsetzung verbleibt der Stickstoff in den Entgasungsrückständen und wird mit diesen ausgeschleust.

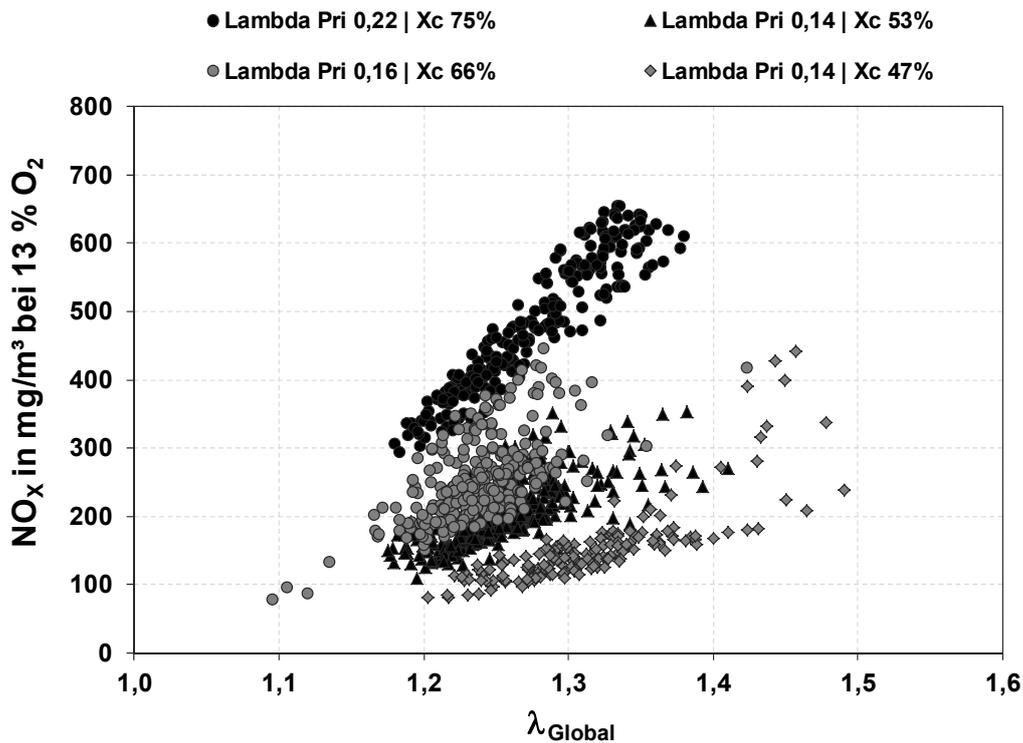
Bei Versuchen, in denen die Entgasungsrückstände weiter umgesetzt wurden, konnten keine erhöhten Stickstoffoxidkonzentrationen beobachtet werden. Allerdings führte die weitere Umsetzung des Entgasungsrückstandes in der Sekundärkammer nach einiger Zeit zu Betriebsstörungen. Durch die sich hierdurch ergebende relativ kurze Messzeit konnte keine Bilanzgleichung aufgestellt werden und es bedarf noch weiterer Forschung, um diesen Effekt im Detail zu bestätigen.



**Abbildung 36 Zusammenhang bei Heupellets beim zweiten Prototyp:**  
links: Luftüberschuss Primär und Umsetzung Kohlenstoff  
rechts: Umsetzung Kohlenstoff und Brennstoffstickstoff

Wie schon bei den Versuchen mit Holzpellets im zweiten Prototyp kann auch bei den Versuchen mit Heupellets ein Zusammenhang zwischen dem Gesamtluftüberschuss und den Stickstoffoxidkonzentrationen gesehen werden. Abbildung 37 zeigt beispielhaft den Zusammenhang der  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen und der Gesamtluftüberschusszahl. Der Effekt der Stickstoffoxidreduktion durch Reduzierung des Gesamtluftüberschusses ist im Bereich der Ausbrandzone im Flammrohr zu suchen und soll mit Hilfe der CFD-Simulation im nachfolgenden Kapitel „4.8 Simulation der Ausbrandzone“ beschrieben werden.

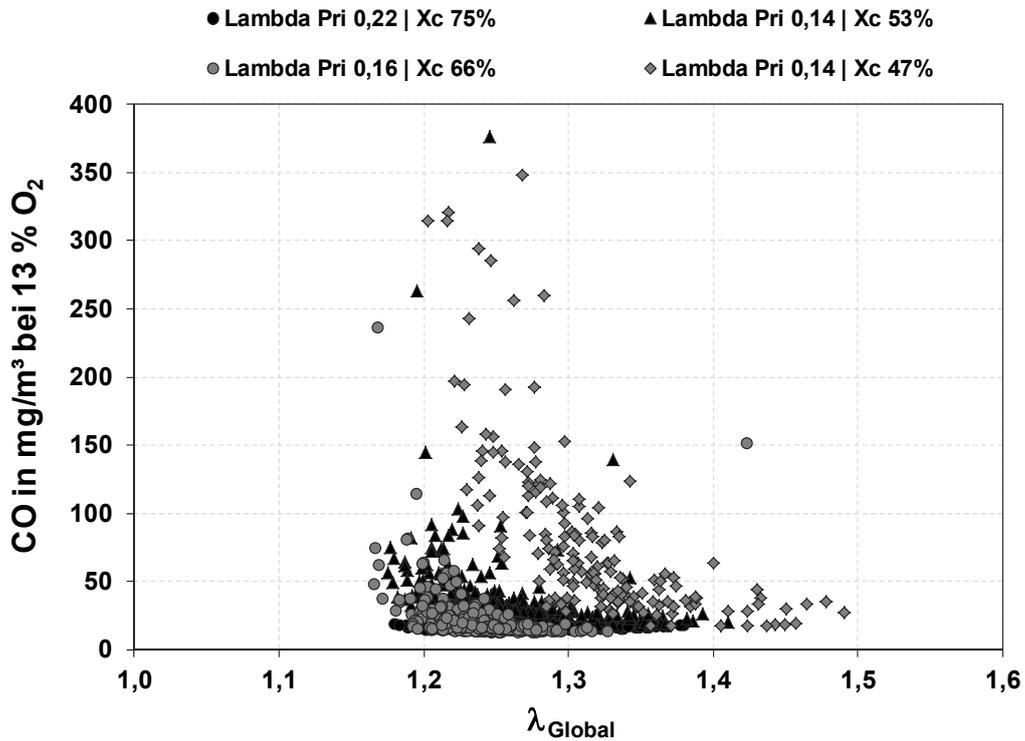
Dargestellt sind in Abbildung 37 Messreihen mit unterschiedlichen Primärluftzahlen, einhergehend mit unterschiedlichen Kohlenstoffumsetzungsraten. Deutlich ist der Zusammenhang zwischen Gesamtluftüberschuss und  $\text{NO}_x$ -Konzentration erkennbar. Dabei sind  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen von  $650 \text{ mg/m}^3$  bez. auf  $13 \text{ \% O}_2$  bei einem Gesamtluftüberschussbereich von 1,35 und einer Primärluftzahl von 0,22 zu verzeichnen. Wird die Primärluftzahl auf 0,14 reduziert, so werden  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen im Bereich von  $150 \text{ mg/m}^3$  erreicht.



**Abbildung 37** NO<sub>x</sub>-Konzentrationen bei der Verbrennung von Heupellets im zweiten Prototyp in Abhängigkeit der Gesamtluftüberschusszahl  $\lambda_{\text{Global}}$

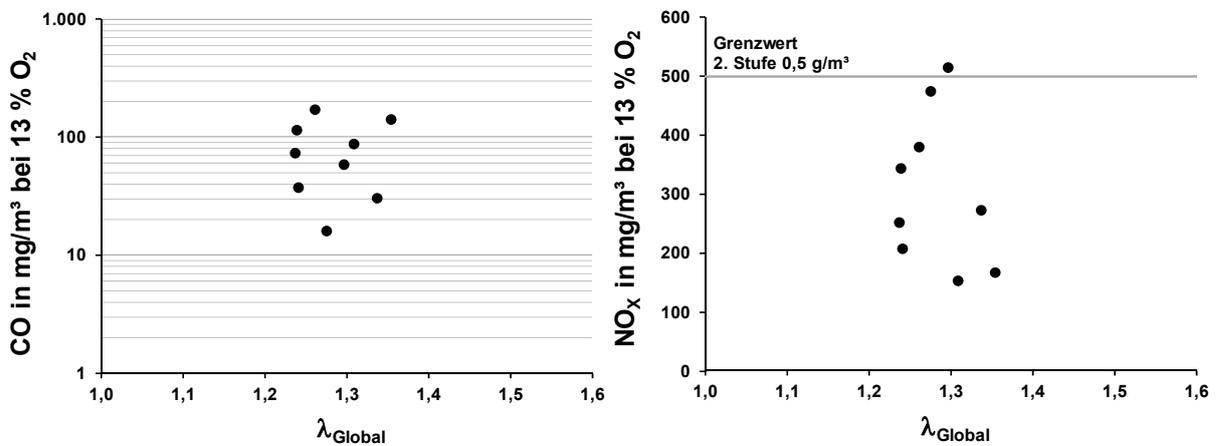
Auffällig an diesem Brennstoff ist, dass die Grenzlinien der Punktwolke sich in einem Punkt bei einer Gesamtluftzahl von ca. 1,1 und einer Stickstoffoxidkonzentration von ca. 100 mg/m<sup>3</sup> schneiden. Dadurch wäre es möglich, unabhängig der Primärluftzahl und der Umsetzungsrate des Brennstoffes äußerst niedrige Stickoxidemissionen zu erreichen. Allerdings sind dann die Mischungsgüte und die Verweilzeit für eine vollständige Oxidation ungenügend.

Abbildung 38 zeigt die CO-Konzentrationen beim zweiten Prototyp und der Verbrennung von Heupellets in Abhängigkeit der Gesamtluftzahl bei unterschiedlichen Primärluftzahlen. Mit abnehmender Umsetzung verschiebt sich der Anstieg der CO-Konzentration hin zu höheren Gesamtluftzahlen. Damit wird bei der derzeitigen Konstruktion die Reduktion der Stickoxidemission bei geringen Gesamtluftzahlen durch das Ziel eines vollständigen Ausbrandes begrenzt. Bei Umsetzungsraten über 75% sind auch CO-Konzentrationen von unter 100 mg/m<sup>3</sup> und NO<sub>x</sub>-Konzentrationen von unter 400 mg/m<sup>3</sup> bei einer Gesamtluftzahl von 1,2 möglich. Allerdings ist dies nur bei einem ungestörten Betrieb und bei vollständig aufgeheizter Feuerung möglich.



**Abbildung 38** CO-Konzentrationen bei der Verbrennung von Heupellets im zweiten Prototyp in Abhängigkeit der Gesamtluftüberschusszahl  $\lambda_{\text{Global}}$

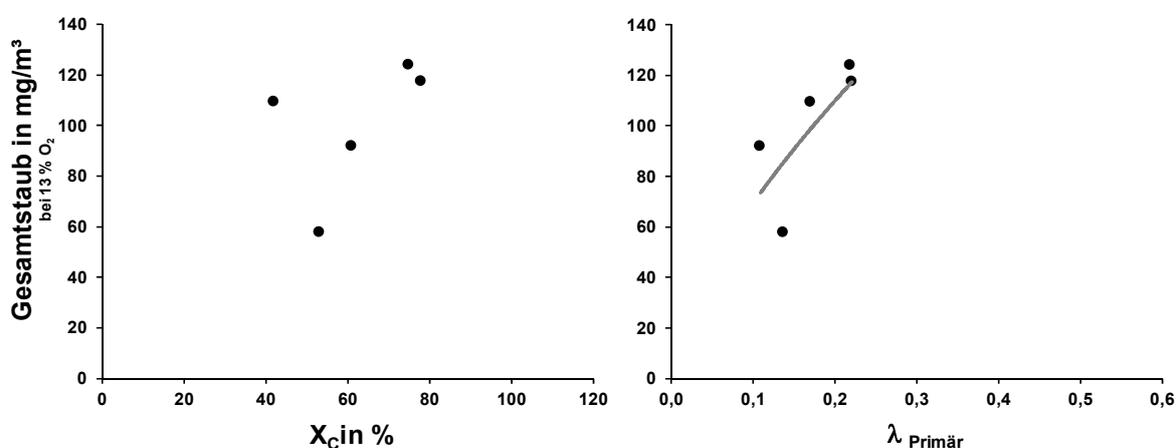
In Abbildung 39 links sind die CO-Konzentrationen der Versuche mit Heupellets im zweiten Prototyp in Abhängigkeit der Gesamtluftüberschusszahl logarithmisch aufgetragen. Gegenüber Holzpellets ist bei Heupellet das Niveau der CO-Konzentration leicht höher.



**Abbildung 39** Emissionskonzentrationen in Abhängigkeit der Gesamtluftzahl beim zweiten Prototyp und Heupellets:  
links: Kohlenmonoxid      rechts: Stickstoffoxide

Abbildung 39 rechts zeigt die  $\text{NO}_x$ -Konzentration als Mittelwert bezogen auf 13 Vol%  $\text{O}_2$ . Mit Heupellets werden  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen zwischen  $150 \text{ mg/m}^3$  und  $510 \text{ mg/m}^3$  erreicht. Durch die Mittelwertbildung ist der Einfluss der Stickoxidreduktion durch Verringerung des Gesamtluftüberschusses nicht erkennbar. Dies liegt an den instationären Vorgängen im Brennstoffbett und die damit verbundenen starken Schwankungen des Luftüberschusses.

Abbildung 40 zeigt links die Konzentration an Gesamtstaub in Abhängigkeit der Umsetzungsrate des Kohlenstoffes und rechts über der Primärluftzahl. Die Gesamtstaubkonzentrationen für Heupellets im zweiten Prototyp liegen in einem Bereich von ca.  $130$  bis  $60 \text{ mg/m}^3$ , bezogen auf 13 Vol%  $\text{O}_2$ .



**Abbildung 40** Gesamtstaubkonzentration bei Versuchen mit Heupellets im zweiten Prototyp in Abhängigkeit der:  
links: Umsetzungsrate des Kohlenstoffes  
rechts: Primärluftzahl

#### 4.8 Simulation der Ausbrandzone

Bei der Verbrennung von Holz- und Heupellets zeigte sich eine deutliche Stickstoffoxidreduktion bei einer Verringerung der Gesamtluftzahl  $\lambda_{\text{Global}}$  in dem hier untersuchten zweiten Prototyp. Diese Stickstoffoxidminderung findet im Bereich der Ausbrandzone im Flammrohr statt und soll mit Hilfe einer CFD-Simulation (Computational Fluid Dynamics = numerische Strömungsmechanik) beschrieben werden.

CFD ist die räumlich aufgelöste Simulation von Strömungsprozessen. Die Qualität der Simulationsergebnisse hängt stark von den zugrunde liegenden Strömungs- und Reaktionsmodellen, dem mathematischen Rechengitter und den gewählten bzw. zu bestimmenden Randbedingungen ab. Für die Durchführung einer Simulationsrechnung bedarf es ein hohes Maß an Erfahrung und Wissen, um plausible Rechenergebnisse zu generieren, denn die Simulationsrechnungen werden mit vereinfachten chemischen Modellen und globalen Reaktionsmechanismen durchgeführt. Dabei kommt es teilweise zu einer Überschätzung der Temperaturen und der  $\text{CO}$ -Konzentrationen.

Damit ist die Aussagekraft der Simulationsergebnisse bezüglich der absoluten Temperatur und CO-Werte begrenzt. Allerdings können Änderungen in den Betriebsparameter oder der Konstruktion mit relativ geringem Aufwand umgesetzt werden. Die Simulationsergebnisse können dann mit einem definierten Anfangszugzustand verglichen werden, wodurch eine Bewertung der Änderungen möglich wird.

Als Reaktionsmodell wurde eine zwei-Schritt Reaktion von Methan gewählt. Im ersten Schritt reagiert Methan mit Sauerstoff zu Kohlenmonoxid und Wasserdampf. Das Kohlenmonoxid reagiert dann in einem zweiten Schritt mit Sauerstoff zu Kohlendioxid. Das bei den Versuchen in der primären Entgasungszone entstandene Pyrolysegas besteht aus einer Vielzahl von komplexen Verbindungen, die nur teilweise durch aufwendige Messtechnik bestimmbar sind und daher nicht als Randbedingung für die Simulation zur Verfügung steht.

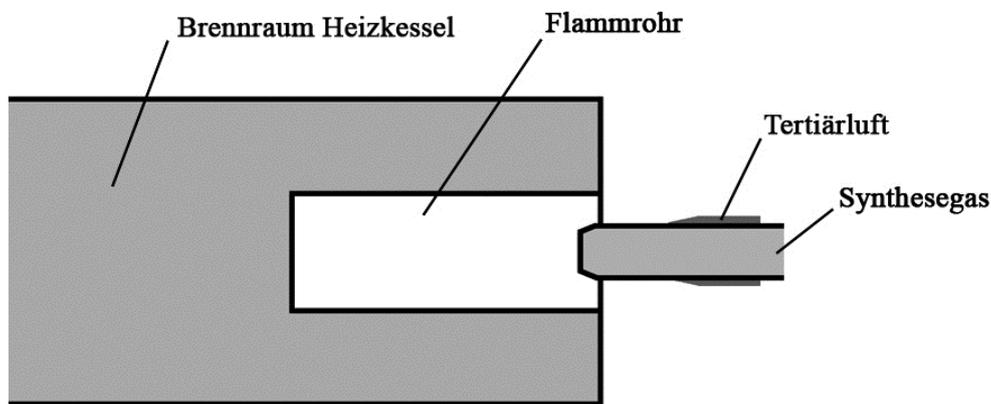
Da die chemischen Vorgänge im Brennstoffbett zu komplex sind und sich mit dem derzeitigen Kenntnisstand nicht mathematisch beschreiben lassen, wird ein Synthesegas bestehend aus CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O und N<sub>2</sub> definiert. An Hand einer typischen Brennstoffzusammensetzung für Holzpellets (vgl. Tabelle 4) kann, unter Annahme einer vollständigen Verbrennung, eine Massenbilanzgleichung aufgestellt und die Zusammensetzung des Synthesegases bestimmt werden. Die Freisetzung von Vorläufersubstanzen, aus denen sich Stickstoffoxide bilden können, wie Cyanwasserstoff, Ammoniak und Stickstoffmonoxid aus dem Brennstoffbett und die Reaktionspfade zur Bildung von Stickstoffoxiden sind nur mit großem Aufwand bestimmbar und daher mathematisch schwer zu beschreiben. Daher soll die Wirkung der Reduktionszone nicht durch eine Berechnung der Stickstoffoxidkonzentrationen, sondern indirekt, über die Temperatur- und Sauerstoffverteilung beschrieben werden.

Es wurden Simulationsrechnungen für drei verschiedene Gesamtluftzahlen durchgeführt. Die Zusammensetzung, Temperatur und der Massenstrom des Synthesegases wurde konstant gehalten. Die Randbedingungen können aus Tabelle 12 entnommen werden.

**Tabelle 12** Randbedingungen für die CFD-Simulation Ausbrandzone im Flammrohr

	$\lambda_{\text{Global}}$	Massenstrom	Temperatur	CH <sub>4</sub>	CO	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>
	-	g/s	°C	in Massen %					
Synthesegas		9,53e <sup>-2</sup>	350	6,7	26,8	0,0	11,1	15,1	40,3
Tertiärluft Fall 1	1,26	2,19e <sup>-2</sup>	20			23,1			76,9
Tertiärluft Fall 2	1,05	1,75e <sup>-2</sup>	20			23,1			76,9
Tertiärluft Fall 3	0,94	1,53e <sup>-2</sup>	20			23,1			76,9

In Abbildung 41 ist das Modell für die CFD-Simulation illustriert. Das Synthesegas wird mit der ringförmig einströmenden Sekundärluft vermischt und tritt in das Flammrohr ein, das in den Brennraum des Heizkessels eingebracht ist (vgl. Abbildung 14). Die Ausbrandzone befindet sich im Bereich des Flammrohres. Der Heizkessel fungiert als Wärmeübertrager. Wärmeverluste über die Oberfläche wurden nicht berücksichtigt, daher sind die in der Simulation errechneten Temperaturen in der Tendenz zu hoch. Validierungsmessungen der auftretenden Temperaturen im Brennraum des Heizkessels oder am Flammrohr waren auf Grund der Unzugänglichkeit nicht durchführbar. Ebenso wurde ein Falschlufteintrag über den Heizkessel in der Simulation nicht berücksichtigt, da keine Informationen über den Ort der Einbringung bekannt sind. Daher liegen die berechneten Sauerstoffkonzentrationen im Brennraum des Heizkessels zu niedrig und stimmen nicht genau mit den Messergebnissen überein.

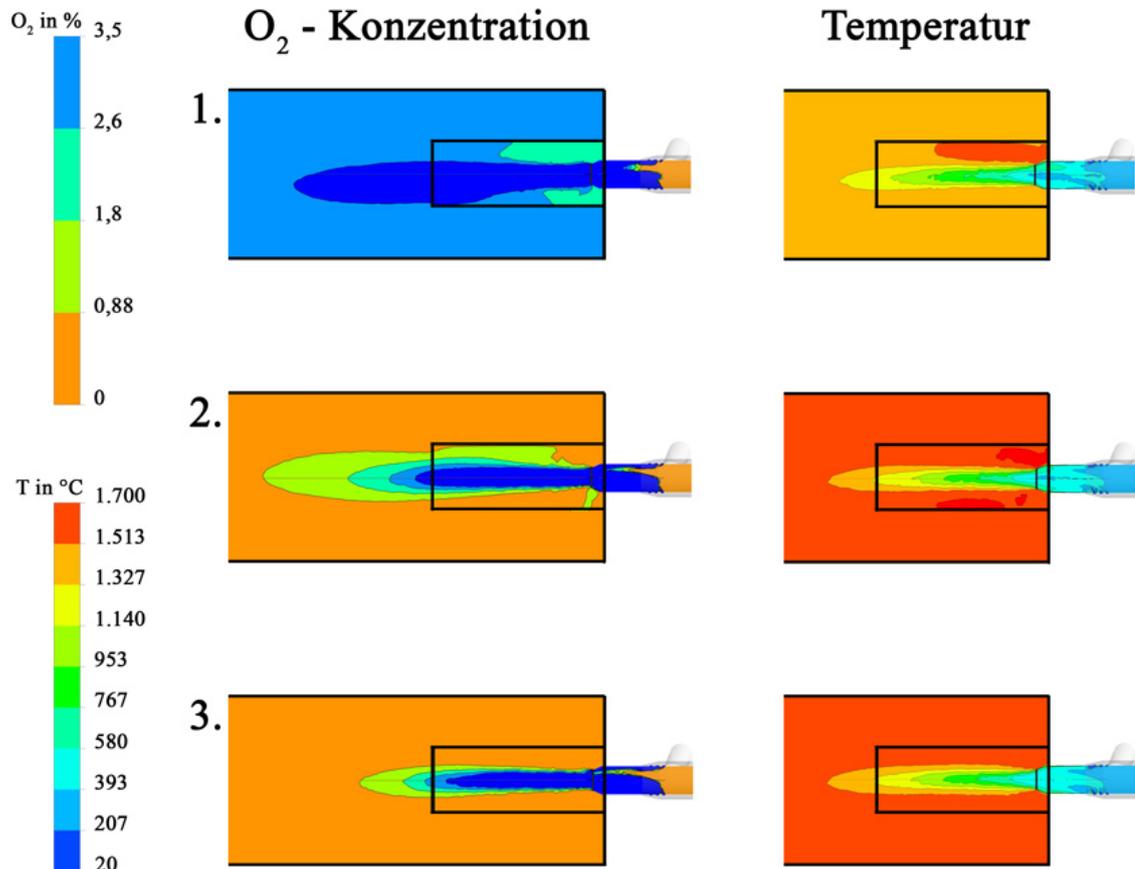


**Abbildung 41 Modell der Ausbrandzone für die CFD-Simulation**

Die flächenhafte Verteilung der Sauerstoffkonzentrationen und der Temperaturen in der Symmetrieebene der Simulation für die drei untersuchten Gesamtluftzahlen ist in Abbildung 42 dargestellt. Eine hohe  $\text{NO}_x$ -Reduktion ist nach [Keller, 1994] bei einer Temperatur von ca.  $1.200^\circ\text{C}$  und der gleichzeitigen Abwesenheit von Sauerstoff zu erwarten. Im berechneten Fall 1 ist keine Reduktionszone feststellbar, obwohl Temperaturen über  $1.200^\circ\text{C}$  im Flammrohr und im Brennraum des Heizkessels herrschen. Um reduzierende Bedingungen und damit ein Abbau der Stickstoffoxidemissionen zu erreichen, ist die Abwesenheit von Sauerstoff nötig. Im Fall 1 sind Sauerstoffkonzentrationen von über 1,8 % in der Ausbrandzone vorhanden.

Wird die Gesamtluftzahl durch Verringerung der Sekundärluft reduziert, ist eine Verteilung der Sauerstoffkonzentration wie im berechneten Fall 2 zu verzeichnen. Auch bei diesem Fall 2 herrschen Temperaturen von  $> 1.200^\circ\text{C}$  im Flammrohr und im Brennraum des Heizkessels. Hinzu kommt der deutlich geringere Luftüberschuss im heißen Bereich der Ausbrandzone. Dadurch ergeben sich in einigen Bereichen des Flammrohres reduzierende Bedingungen. Wird die Sekundärluft noch weiter reduziert, sodass nur noch eine vollständige Oxidation von brennbaren Verbindungen mit Einbeziehung der Falschlufteinträge stattfinden würde, kann eine ausgeprägte Reduktionszone

im Flammrohr geschaffen werden. Dies zeigen die Ergebnisse der Simulation im Fall 3 mit hohen Temperaturen und Bereiche mit der Abwesenheit von Sauerstoff.



**Abbildung 42** Berechnete flächenhafte Verteilung der Sauerstoffkonzentration und der Temperatur in der Ausbrandzone des zweiten Prototypen bei unterschiedlichen Gesamtluftzahlen (Fall 1:  $\lambda_{Global} = 1,26$  / Fall 2:  $\lambda_{Global} = 1,05$  / Fall 3:  $\lambda_{Global} = 0,94$ )

#### 4.9 Gewonnene Erkenntnisse mit den beiden Prototypen

Mit Holzpellets konnte in den beiden Prototypen ein ungestörter Betrieb über längere Zeit realisiert werden. Die Konzentrationen an Kohlenmonoxid konnten nach einer relativ kurzen Aufheizphase auf ein niedriges Niveau konstant gehalten werden. Bedingt durch den geringen Gehalt an Stickstoff in den Holzpellets wurde für dieses Projekt keine Minderungsnotwendigkeit gesehen. Der strenge Grenzwert der 1. BImSchV für die Gesamtstaubemission konnte mit Holzpellet teilweise erreicht werden. Einen Zusammenhang zwischen Betriebsparameter und Staubemissionen konnte bei Holzpellets bei den durchgeführten Untersuchungen nicht gefunden werden. Das Ausschleusen der Entgasungsrückstände war mit dem Schiebersystem im Prototyp 1 nicht ohne kurzzeitige Emissionsspitzen realisierbar. Außerdem zeigte sich das Schiebersystem

als anfälliges und hoch beanspruchtes Bauteil, dass keine hohe Dauerhaltbarkeit und Betriebssicherheit gewährleisten kann. Durch die thermische Belastung verzog sich der Rost und die Bewegungselemente blockierten. Bedingt durch die aufwendige Konstruktion wies das Schleusensystem auch Undichtigkeiten gegenüber der Umgebung auf, sodass je nach Betriebszustand Rauch austrat bzw. Falschluf in das System eintrat. Dadurch konnten keine definierten Bedingungen geschaffen werden, die für eine Stoffbilanzierung und für eine Verbrennungsregelung unabdingbar sind.

Im Prototyp 2 wurden die Undichtigkeiten beseitigt und es konnte ein Zusammenhang zwischen der Gesamtluftzahl  $\lambda_{\text{Global}}$  und den  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen ermittelt werden. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass eine Reduktion der stickstoffbildenden Vorläufersubstanzen in der Ausbrandzone im Bereich des Flammrohres stattfindet. Damit wurde eine effektive primäre Minderungsmaßnahme für Stickstoffoxide entwickelt, die auch messtechnisch validiert wurde.

Die thermische Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen stellt große Anforderung an die Feuerungs- und Anlagentechnik. Mit dem neu entwickelten zweiten Prototyp lag bei Heupellets im stationären Betrieb das Emissionsniveau von Kohlenmonoxid deutlich unter dem Grenzwert. Die Stickstoffoxidemissionen sind bei Heupellets abhängig von der Umsetzrate des Brennstoffes und signifikant von den Reduktionsbedingungen in der Reduktionszone im Flammrohr. Es besteht noch Potential in einer weiteren Verbesserung der Reduktions- und Ausbrandzone, um bei noch höherer Stickstoffoxidreduktion und gleichzeitiger niedrigerem Luftüberschuss auch einen vollständigen Ausbrand zu garantieren. Der Grenzwert der Gesamtstaubemissionen mit Heupellets kann nur durch eine nachgeschaltete Abgasfiltration erreicht werden, mit Primärmaßnahmen ist dies aufgrund der Brennstoffeigenschaften nach derzeitigem Kenntnisstand nicht möglich.

Das Design der Rostfläche ist für die Entgasungsrate des Brennstoffes entscheidend. Bei falsch gewähltem Rostdesign kann die gewünschte Entgasungsrate und damit die anvisierte Wärmeleistung nicht erreicht werden. Eine Brennstoffbewegung bei Heupellets wirkt sich positiv auf die Entgasungsrate aus. Auch beim neuen Prototyp 2, der mit einer sehr niedrigen Primärluftzahl und einem Bewegungselement im Brennraum betrieben wurde, konnten die Verschlackungen nicht in jedem Betriebszustand verhindert werden. Dabei zeigte sich, dass ein Verkleben der einzelnen Heupellets schon in der Zündphase stattfindet. Die Verklebungen lassen sich durch Bewegung mit einem Rührstab leicht lösen. Dieses Verkleben des Brennstoffes beginnt bereits bei relativ niedrigen Temperaturen und kann, wie die Versuche mit dem ersten Prototyp mit Heupellets gezeigt haben, nicht durch sehr geringe Luftzahlen in der primären Entgasungszone unterbunden werden. Der verklebte Brennstoff dient als Bildner für die massiven Verschlackungen. Werden die Verklebungen durch Rühren gelöst, treten in einer späteren Phase der Brennstoffentgasung keine Verschlackungen oder Verklebungen mehr auf.

Wenn keine Reaktionen der Entgasungsrückstände in der sekundären Entgasungszone vorliegen, hat die Primärluft eine Sauerstoffkonzentration von ca. 21 Vol%. Da die Primärluft unterhalb des Rostes zugeführt wird, ist der Ausgangspunkt der Verklebungen und der Verschlackungen direkt oberhalb des Rostes, da hier dann die höch-

ten Sauerstoffkonzentrationen vorliegen. Im Strömungsverlauf der Verbrennungsluft durch das Brennstoffbett nimmt der Sauerstoffgehalt kontinuierlich ab, im letzten Bereich bzw. oberhalb des Brennstoffbettes liegt die Sauerstoffkonzentration dann im Bereich von 0 Vol%. Somit kommt es im Bereich oberhalb des Rostes aufgrund örtlich hoher Sauerstoffkonzentrationen zu hohen Reaktionsraten an der Brennstoffoberfläche und dadurch wird die Ascheerweichungstemperatur an der Oberfläche des Brennstoffes erreicht. Ob noch andere Effekte das Verkleben der Pellets untereinander auslöst, ist mit dem derzeitigen Wissensstand nicht zu beantworten. Das Auftreten von Verklebungen und Verschlackungen konnte beim Betrieb des vorliegenden Anlagenkonzeptes ohne Reaktionen in der sekundären Entgasungszone deshalb durch eine reduzierte Primärluft nicht verhindert werden. Um das Verkleben des Brennstoffes oberhalb des Rostes möglichst gering zu halten, muss die Sauerstoffkonzentration der Primärluft gesenkt werden.

Werden die Entgasungsrückstände in der sekundären Entgasungszone weiter oxidiert, wie dies im zweiten Prototyp vorgesehen wurde, kann die Sauerstoffkonzentration der Verbrennungsgase, welche in die primäre Entgasungszone gelangen, reduziert werden. Dies wurde in einen Versuch im zweiten Prototyp getestet. Dabei traten zwei Schwierigkeiten auf. Wird so viel Primärluft zugeführt, dass eine vollständige Umsetzung der Entgasungsrückstände in der sekundären Entgasungszone stattfindet, steigt die Temperatur des Verbrennungsgases über 900°C. Dies führt zu einem Aufschmelzen der Asche in der darüber liegenden primären Entgasungszone. Einhergehend mit großflächigen Verschlackungen, die nicht durch das Bewegungselement verhindert werden konnten.

Wird der Primärluftstrom reduziert, sinkt die Temperatur des Verbrennungsgases entsprechend ab und eine Ascheaufschmelzung in der darüber liegenden primären Entgasungszone wird verhindert. Allerdings kommt es dadurch zu einer Anhäufung von Entgasungsrückständen in der sekundären Entgasungszone. Zusätzlich konnte, auf Grund der geringen Temperatur und der Abwesenheit von Sauerstoff im Verbrennungsgas, die erforderliche Entgasungsleistung in der primären Entgasungszone nicht erreicht werden. In Folge dessen sinkt die Feuerungsleistung und es kommt zu einem Flammenabriss, das wiederum zum Abschalten der Anlage führt.

In den Entwicklungsschritten von ersten zum zweiten Prototypen wurden noch weitere Versuche bzw. Konzepte ausgetestet, welche anfangs sehr vielversprechend waren, doch nach Verbrennungsversuchen wieder verworfen werden mussten, da es zu einer Flammenpulsation und zu Drückstößen von einigen 100 Pa kam. So wurde, um die hohen Temperaturen in der sekundären Entgasungszone zu begrenzen, eine interne gekühlte Abgasrezirkulation eingebaut. Verbrennungsgas wurde unterhalb des Rostes in der sekundären Entgasungszone angesaugt und durch einen Rohrbündelwärmeübertrager auf ca. 80°C abgekühlt. Dieses gekühlte Verbrennungsgas wurde der Verbrennungsluft vor der sekundären Entgasungszone wieder beigemischt. Die Temperatur der Verbrennungsgase, welche von der sekundären Entgasungszone durch den Rost in die primäre Entgasungszone gelangt, konnte dadurch auf ca. 650°C begrenzt werden. Durch die Zuführung dieses sauerstoffarmen, relativ kühlen Verbrennungsgases wurden Verklebungen oder Versinterungen der Heupellets verhindert. Dadurch

konnte in der primären Entgasungszone oberhalb der Rostfläche die Sauerstoffkonzentration gering gehalten werden, wodurch sich relativ niedrige Oberflächentemperaturen aufgrund der verzögerten Oxidation der Heupellets ergaben. Die Temperatur der Verbrennungsgase lag unterhalb der Schmelztemperatur der Asche.

Teilweise konnten die Verschlackungen auch dadurch unterbunden werden, dass der Ascheschieber des Kreuzbalkenrührers direkt über die Rostfläche strich. Die aus Brennstoff und Asche bestehende Schicht, wenige Zentimeter oberhalb des Rostes, wird dadurch in einen anderen Bereich der primären Entgasungszone transportiert. Eventuell vorhandene verklebte Agglomerate werden in kältere, sauerstoffärmere Regionen transportiert. Diese Agglomerate werden dann durch die Brennstoffbewegung aufgelöst bzw. zerkleinert. Damit dieser Brennstofftransport stattfindet, muss sich der Rührer plan auf dem Rostboden bewegen. Zusätzlich muss die Entaschung durch den Rost zuverlässig funktionieren. Aufgrund der hohen thermischen Belastung des Rostes und des Bewegungselements konnte die Ascheschicht nicht immer zuverlässig von der Rostoberfläche abtransportiert werden. Dadurch kam es zur Versinterung der Aschepartikel auf der Rostoberfläche und in den Löchern des Rostes, wodurch sich die Verschlackungsvorgänge aufschaukelten.

Zur Lösung der Verschlackungsproblematik muss ein verbessertes Konzept für die primäre Entgasungszone erarbeitet werden. Durch die im Forschungsvorhaben gewonnenen Kenntnisse sind Ideen für eine verbesserte primäre Entgasungszone vorhanden, mit denen Verschlackungen vermeidbar sein sollten.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die starke Nachfrage nach Holzbrennstoffen und steigenden Preisen aller Energieträger führt zur Suche nach alternativen Biomassebrennstoffen für die Wärmeerzeugung. Die derzeit auf dem Markt verfügbaren Feuerungen im Bereich von 100 kW für landwirtschaftliche Reststoffe können weder die Betriebssicherheit noch das geforderte Emissionsniveau mit einem vertretbaren Wartungsaufwand garantieren. Daher wurde mit der Fa. Wörle UmweltTechnik GmbH ein neues Verbrennungskonzept untersucht und weiterentwickelt. Die entwickelte Feuerungsanlage wurde mit einer Luftstufung ausgerüstet, deren Prinzip auf der Aufteilung der Verbrennungsphasen Entgasung, Oxidation der Entgasungsrückstände und Verbrennung der Pyrolysegase in räumlich getrennten Reaktionsräumen beruht. Als Vertreter für landwirtschaftliche Reststoffe wurden Heupellets und als Referenzbrennstoff wurden DINplus Holzpellets verfeuert.

Mit Holzpellets konnten in den beiden Prototypen ein ungestörter Betrieb über längere Zeit realisiert werden. Die Konzentrationen an Kohlenmonoxid konnten während des stationären Betriebs auf einem niedrigen Niveau konstant gehalten werden. Das eingesetzte Konzept der Schubböden im ersten Prototyp funktionierte nur teilweise. Das Ausschleusen der Entgasungsrückstände war mit dem Schiebersystem im ersten Prototyp nicht ohne kurzzeitige Emissionsspitze realisierbar. Bei Heupellets traten im ersten Prototyp, trotz niedriger Primärluftzahl, großflächige und massive Verschlackungen auf, die einen vernünftigen Betrieb und eine Abfuhr des entgasteten Brennstoffs in

die Sekundärzone unmöglich machten. Die Ergebnisse mit dem ersten Prototyp machte ein Redesign notwendig, das aus Zeitgründen vom IFK entwickelt und umgesetzt wurde.

Wie die Versuche im ersten Prototyp mit Holz- und Heupellets zeigten, ist die Ausbrandzone (Flammrohr mit Tertiärluftzugabe) weitgehend richtig dimensioniert und es sind in allen Betriebsbereichen sehr geringe CO-Konzentrationen bei niedrigem Luftüberschuss zu realisieren. Daher wurde das Redesign ausschließlich auf die Funktion der Schubböden und dem Entgasungsbereich der Pellets beschränkt. Dabei wurde eine neue Ausschleusung für die Entgasungsrückstände entwickelt. Das neue Schleusensystem wird direkt im Ascheschieber integriert und ermöglicht ein kontinuierliches ausschleusen von Entgasungsrückständen. Die Brennstoffbewegung wird durch einen Kreuzbalkenrührer bewerkstelligt. Bedingt durch den geringeren Falschlufteintrag über das Brennersystem im zweiten Prototyp, konnten die Bilanzierungs- und Kontrollrechnungen mit den Messwerten zur Deckung gebracht werden. Damit war es möglich, den Umwandlungsgrad  $X_C$  des Kohlenstoffes in  $CO_2$  und den Umwandlungsgrad  $X_N$  des Brennstoffstickstoffes in Stickstoffoxide  $NO_x$  zu bestimmen.

Bei Holzpellets konnte, im Gegensatz zu [Keller, 1994] und [Houshfar et al., 2012], keine direkte Abhängigkeit von der Primärluft auf den Umwandlungsgrad  $X_N$  von Brennstoffstickstoff zu  $NO_x$  gefunden werden. Auch ist bei Holzpellets eine direkte Abhängigkeit des Umwandlungsgrad  $X_C$  des Kohlenstoffes auf den Umwandlungsgrad des Brennstoffstickstoffes zu  $NO_x$  nicht erkennbar. Die mittleren  $NO_x$ -Konzentrationen lagen bei Holzpellets zwischen  $80 \text{ mg/m}^3$  und  $160 \text{ mg/m}^3$  bei 13 Vol%  $O_2$ .

Ein signifikanter Zusammenhang der Reduktionsbedingungen für  $NO_x$  konnte in der Ausbrandzone gefunden werden. Je nach Sauerstoff- und Temperaturverteilung in der Ausbrandzone liegen reduzierende Bedingungen für eine effektive Stickstoffoxidminderung vor. Dieser Effekt der Reduktion von Stickstoffoxiden findet im Bereich der Ausbrandzone im Flammrohr statt und konnte indirekt mit Hilfe der numerischen Simulation anhand der Temperatur- und Sauerstoffverteilung beschrieben werden.

Die Gesamtstaubemissionen für Holzpellets liegen in einem Bereich von ca.  $15$  bis  $30 \text{ mg/m}^3$ , bezogen auf 13 Vol%  $O_2$ . Dabei konnte kein Einfluss der Primär- bzw. Gesamtluftzahl oder des Umwandlungsgrad  $X_C$  des Kohlenstoffes auf die Gesamtstaubemissionen festgestellt werden.

Auch bei Heupellets konnte keine direkte Abhängigkeit von der Primärluft auf den Umwandlungsgrad  $X_N$  von Brennstoffstickstoff zu  $NO_x$  gefunden werden. Allerdings konnte bei Heupellets bei sinkendem Umwandlungsgrad  $X_C$  des Kohlenstoffes eine Abnahme des Umwandlungsgrades  $X_N$  von Brennstoffstickstoff in  $NO_x$  festgestellt werden. Der Umwandlungsgrad  $X_C$  des Kohlenstoffes hängt nicht nur von der Primärluft ab, sondern von den herrschenden Betttemperaturen, der Brennstoffbetthöhe, dem Verhältnis frischer Brennstoff zu Entgasungsrückständen, der Brennstoffbewegung und dem lokalen Sauerstoffüberschuss. Dadurch hat indirekt die Primärluftzahl einen Einfluss auf die Höhe der Stickstoffoxidkonzentrationen.

Wie schon bei Holzpellets kann auch bei Heupellets ein signifikanter Zusammenhang zu den Reduktionsbedingungen in der Ausbrandzone gefunden werden. Je nach Sauerstoff- und Temperaturverteilung in der Ausbrandzone werden reduzierende Bedingungen für eine erfolgreiche Stickoxidminderung geschaffen. Die mittleren Konzentrationen  $\text{NO}_x$  liegen bei Heupellets zwischen  $150 \text{ mg/m}^3$  und  $510 \text{ mg/m}^3$  bei 13 Vol%  $\text{O}_2$ . Die Gesamtstaubemissionen für Heupellets liegen in einem Bereich von ca. 60 bis  $130 \text{ mg/m}^3$ , bezogen auf 13 Vol%  $\text{O}_2$ . Eine Abhängigkeit des umgesetzten Kohlenstoffes auf die Gesamtstaubemissionen ist bei Heupellets nicht erkennbar, jedoch kann ein Zusammenhang zwischen Primärluft und Gesamtstaubemissionen vermutet werden.

Die ausgeprägte Verschlackungsproblematik bei Heupellets konnte beim Betrieb der Anlage ohne Verbrennung der Entgasungsrückstände in der sekundären Entgasungszone durch eine Reduzierung der Primärluft nicht unterbunden werden, da die Verbrennungsluft im Brennstoffbett direkt oberhalb des Rostes eine zu hohe Sauerstoffkonzentration aufwies. Es zeigte sich, dass ein Verkleben der einzelnen Heupellets schon in der Zündphase stattfindet. Die Verklebungen lassen sich durch Bewegung mit einem Rührstab leicht lösen. Der verklebte Brennstoff dient als Bildner für die Verschlackungen. Werden die Verklebungen durch Rühren gelöst, treten in einer späteren Phase der Brennstoffentgasung keine Verschlackungen oder Verklebungen mehr auf. Das im zweiten Prototyp integrierte Bewegungselement konnten die Verschlackungen nicht in jedem Betriebszustand verhindern.

Durch die im Forschungsvorhaben gewonnen Erkenntnisse zur Stickstoffoxidreduktion stehen Informationen zur Entwicklung von neuen Konzepten für primäre Minderungsmaßnahmen zur Verfügung. Bei der Gestaltung der Reduktions- und Ausbrandzone besteht noch Verbesserungspotential, um bei einer noch weitergehenden Stickstoffoxidreduktion und bei noch geringerem Gesamtluftüberschuss einen vergleichbar vollständigen Ausbrand zu erreichen.

Ebenso konnten wichtige Erkenntnisse gesammelt werden, die das Versintern des Brennstoffes und die Verschlackungen erklären. Dieses spezielle Verhalten muss eingehender untersucht werden, um neue Konzepte für die primäre Entgasungszone zu entwickeln, die eine Versinterung und Verschlackung verhindern. Durch die im Forschungsvorhaben gewonnenen Kenntnisse, sind bereits Ideen für eine verbesserte primäre Entgasungszone vorhanden.

Für eine praxistaugliche Feuerungsanlage zur thermischen Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen ist in Bezug auf Betriebssicherheit und Betriebsstabilität, geringe Gesamtstaub- und Stickstoffoxidkonzentrationen ein weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf vorhanden.

## 6 Literatur

- [Aeckersberg 2011]  
Aeckersberg, Roland: Analyse des Ascheschmelzverhaltens von Holzpellets in Abhängigkeit ausgewählter Aschekomponenten. Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredlung Band 41, Shaker Verlag, Aachen 2011.
- [BMU, 2002]  
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft. 24.07.2002. Internetfassung unter: [http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/taluft.pdf\\_2002](http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/taluft.pdf_2002).
- [BMU, 2010]  
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. 1. BImSchV: Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen. 22.03.2010. Internetfassung unter: <http://www.bmub.bund.de/service/publikationen/downloads/details/artikel/1-bimschv-verordnung-ueber-kleine-und-mittlere-feuerungsanlagen/>.
- Eder, Gottfried; Luisser, Markus; Wörgetter, Manfred: Energiekornmonitoring - Erforschung der technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten für die thermische Nutzung von Energiekorn und Strohpellets in Kleinfeuerungsanlagen im Praxisbetrieb; Austrian Bioenergy Centre GmbH, Graz, Juni 2006.
- [Good et al., 1996]  
Good, Jürgen; Nussbaumer, Thomas, Bühler, Ruedi; Jenni, Andreas; Schaffner, Hanspeter: Erfolgskontrolle SNCR-Verfahren zur Entstickung von Holzfeuerungen; Bundesamt für Energie BFE; Zürich, August 1996.
- [Hartmann et al., 2007]  
Hartmann, Hans; Roßmann, Paul; Turowski, Peter; Ellner-Schuberth, Frank; Hopf, Nobert; Bimüller, Armin: Getreidekörner als Brennstoff für Kleinfeuerungen - Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte; Technologie- und Förderzentrum (TFZ); Straubing, Oktober 2007.
- [Houshfar et al., 2012]  
Houshfar, Ehsan; Løvås, Terese; Skreibert, Øyvind: Experimental Investigation on NOx Reduction by Primary Measures in Biomass Combustion: Straw, Peat, Sewage Sludge, Forest Residues and Wood Pellets. *Energies* 2012, 5, 270-290; ISSN 1996-1073.
- [Kaltschmitt et al., 2009]  
Kaltschmitt, Martin; Hartmann, Hans; Hofbauer, Hermann: Energie aus Biomasse. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2009.
- [Keller, 1994]  
Keller, Roland: Primärmassnahmen zur NOx-Minderung bei der Holzverbrennung mit dem Schwerpunkt der Luftstufung. Diss ETH Nr. 10514 - Eidgenössische Technische Hochschule ETH, Zürich, 1994.
- [Kiesewalter et al., 2002]  
Kiesewalter, Pophia; Röhricht, Chr.: Entwicklung einer wirtschaftlichen Prozesskette zur energetischen Nutzung von halmgut- und holzartiger Biomasse im Freistaat Sachsen; Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft; Dresden, Dezember 2002.
- [Launhardt et al. 2000]  
Launhardt, Thomas; Hartmann, Hans; Link, Heiner; Schmid, Volker: Verbrennungsversuche mit naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen in einer Kleinfeuerungsanlage - Emissionen und Aschequalität; Institut und Bayerische Landesanstalt für Landtechnik der Technischen Universität München-Weihenstephan; Freising-Weihenstephan, September 2000.
- [Oberberger, 2014]  
Oberberger, Ingwald: Strategy for the Application of Novel Characterization Methods for Biomass Fuels: Case Study of Straw. *Energy & Fuels*, 28, pp. 1041-1052, 2014.

- [Oser et al., 2003]  
Oser, M; Nussbaumer, T.; Müller, P.; Mohr, M.; Figi, R: Grundlagen der Aerosolbildung in Holzfeuerungen. Projekt im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Energie und des Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Verenum, Zürich 2003.
- [Pohl et al. 2001]  
Pohl, M.; Bernhardt, D.; Beckmann, M; Spiegel, W: Brennstoffcharakterisierung zur vorausschauenden Bewertung des Korrosionsrisikos. In: Born, M. (Hrsg.): Dampferzeugerkorrosion 2011, Freiberg. SAXONIA Standortentwicklungs- und Verwaltungsgesellschaft mbH, 2011, S. 67-83.
- [Stöcklein 2003]  
Stöcklein, Frank: Messprogramm zur Begleitung des vorübergehenden Getreideeinsatzes in Feuerungsanlagen (Projekt 1300); Bayerisches Landesamt für Umweltfragen; Messungen durch Firma Müller-BBM; Augsburg, November 2003.
- [Struschka et al., 2006]  
Struschka, Michael; Juschka, Winfried; Baumbach, Günter; Schütz, David: Emissionsmessungen an der Heuverbrennungsanlage in Sonnenbühl; Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) der Universität Stuttgart; Stuttgart, August 2006.
- [Struschka et al., 2008.05]  
Struschka, Michael; Kiess, Joachim; Zieba, Mariusz; Rieder, Alexander; Juschka, Winfried; Schuster, Anja: Dezentrale energetische Nutzung von Getreide und Stroh - Entwicklung neuer genehmigungsfähiger Verbrennungsanlagen; Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) der Universität Stuttgart; Stuttgart, Mai 2008.
- [Struschka et al., 2008.07]  
Struschka, Michael; Springmann, Maik; Schuster, Anja; Baumbach, Günter: Messungen an Pilotanlagen zur Getreideverbrennung in Hessen - Messbericht für die Heizperioden 2005/06, 2006/07 und 2007/08; Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) der Universität Stuttgart; Stuttgart, Juli 2008.
- [Struschka et al., 2010]  
Struschka, Michael; Goy, Julia; Juschka, Winfried: Untersuchungen zur Verbrennung von Getreide und Getreidereststoffen in eine Gewerblichen Holzfeuerung; Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart; Stuttgart, September 2010.
- [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; Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart; Stuttgart, April 2014.
- [TÜV BAYERN 2001]  
TÜV BAYERN Landesgesellschaft Österreich GmbH: TYPENPRÜFUNG eines Heizkessels für feste Brennstoffe, mit automatischer beschickter Feuerungen, Nenn-Wärmeleistung bis 300 kW analog ÖNORM EN 303-5:1999. Hersteller: Baxi A/S, Typ MULTI-HEAT 4.0; Jenbach, 16.11.2001.
- [TÜV BAYERN SZA 2003]  
TÜV BAYERN SZA: Prüfbericht analog ÖNORM EN 303-5:1999; Hersteller: P & H, Typ PH 47; Wien, 06.06.2003.
- [UMEG 2003]  
UMEG Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit: Emissionsmessungen an der Rapskornfeuerung in der Grundschule Geislingen-Binsdorf; Baden-Württemberg, 2003.
- [Vetter et al., 2006]  
Vetter, Armin; Hering, Armin; Peisker, Denis: Energetische Verwertung von Getreide und Halmgutpellets; Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena, April 2006.