



MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN

Department für Metallurgie
Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Entwicklung einer Feuerungsanlage für halmgutartige Biomassepellets

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
„Doktor der montanistischen Wissenschaften“ (Dr. mont.)
an der Montanuniversität Leoben

vorgelegt von Dipl.-Ing. Andreas Hammer
Leoben, Oktober 2012

Erstbegutachter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Raupenstrauch
Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik
Montanuniversität Leoben

Zweitbegutachter: Prof. Dr.-Ing. Hartmut Spliethoff
Lehrstuhl für Energiesysteme
Technische Universität München

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Affidavit

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Leoben, Oktober 2012

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen eines Forschungsprojekts am Lehrstuhl für Thermo-
prozesstechnik der Montanuniversität Leoben in Zusammenarbeit mit den Firmen JOSEF MEYER
GMBH und PERHOFER GMBH.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Raupenstrauch,
der es mir ermöglichte, diese Arbeit durchzuführen und mich dabei betreute. Weiters gilt mein
Dank Prof. Dr.-Ing. Hartmut Spliethoff für die Zweitbegutachtung dieser Arbeit.

Herzlich bedanke ich mich ebenso bei meinen Arbeitskollegen/Innen für ein sehr nettes kollegiales
Arbeitsumfeld und ihre Unterstützung, besonders bei Martina Poppenwimmer und Peter Karner
für die gute Zusammenarbeit. Ebenso bedanke ich mich bei Arnold Kozel und Wolfgang Rühl für
die tatkräftige Unterstützung beim Aufbau und Umbau der Anlage.

Ein großer Dank gilt auch meiner Familie, vor allem Marianne und Max, die an mich geglaubt
haben und mich vor allem in der Endphase der Arbeit sehr unterstützt haben.

Kurzfassung

Die thermische Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen wird aufgrund der langfristig steigenden Energiepreise und des steigenden Bedarfs am Rohstoff Holz zunehmend interessanter. Doch gibt es beim Einsatz in Kleinfeuerungsanlagen verschiedenste Probleme. Dazu zählen vor allem der niedrige Ascheschmelzpunkt, hohe Staubemissionen und ein hoher Stickstoffgehalt im Vergleich zu herkömmlichen Pellets aus Holz.

Im Rahmen der vorgelegten Dissertation wird ein Prototyp eines Brenners für eine Kleinfeuerungsanlage mit einer Brennstoffwärmeleistung von etwa 15 kW zur Verwertung von halmgutartigen Biomassepellets entwickelt. Bedingt durch den niedrigen Ascheschmelzpunkt dieser Brennstoffe ist die Feuerung mit einer neuartigen Luftführung, von oben auf das Brennstoffbett, ausgestattet.

Zunächst sind in der vorliegenden Arbeit eine einführende Beschreibung der Grundlagen zu Biomasse, der dafür notwendigen Feuerungstechnik zur Feststoffverbrennung und rechtlichen Rahmenbedingungen sowie normativen Vorgaben für Kleinfeuerungsanlagen in Kombination mit halmgutartigen Biomassepellets gegeben. In einem ausführlichen Technologieüberblick werden insgesamt 37 dafür geeignete Kleinfeuerungen bis zu einer Nennwärmeleistung von 100 kW dargestellt.

Ausgehend von einer handelsüblichen, für diese Brennstoffe völlig ungeeigneten Pelletsanlage mit Kipprost, wird in mehreren Versionen ein neuer Vorschubrost entwickelt. Dabei wird die Primärluft anfangs nur von unten, in der Letztversion ausschließlich von oben dem Brennstoffbett zugeführt. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die Partikel der untersten Schicht des Brennstoffbettes nicht überhitzen und dadurch Verklebungen mit dem Rost vermieden werden. Auf diese Weise kann auf aufwendige Konstruktionen, wie beispielsweise wassergekühlte Roste, verzichtet werden. Bei der Luftzufuhr von oben ist auf eine gleichmäßige Primärluftverteilung zu achten, um punktuelle Überhitzungen mit örtlichen Aufschmelzungen bzw. Stellen ohne Umsatz zu vermeiden und einen guten Ascheausbrand zu erzielen.

Im Zuge der Massen- und Energiebilanzierung werden bei der Brennstoffzufuhr mittels Stokerschnecke Unregelmäßigkeiten von bis zu 26 % aufgrund sich ständig ändernder Partikelverteilung und des Stokernachlaufs festgestellt. Dies hat gravierende Auswirkungen auf die Verbrennungsbedingungen, da die Primärluftmenge für eine unbestimmte Brennstoffwärmeleistung, die erst am Ende des Versuches feststeht, voreingestellt werden muss.

Ein weiteres Bewertungskriterium sind die Emissionen. Bei Feinstaubmessungen mit dem BLPI werden die Maxima in den Stufen mit den Partikeldurchmessern von 0,17 bzw. 0,34 μm ermittelt. In Versuchen mit dem Brennstoff Weizenstrohpellets wird der Gesamtstaubgrenzwert von 60 mg/MJ um ein Vielfaches überschritten. Damit ist der Betrieb ohne Entstaubungsanlage aus rechtlicher Sicht nicht möglich. Die Untersuchung des Staubes mittels REM/EDX identifiziert vor allem Kalium und Chlor, was auf KCl-Salz schließen lässt. Das bedeutet, dass diese Partikel aus den anorganischen Bestandteilen des Brennstoffs nach Fragmentierung und Verdampfung des Brennstoffpartikels bei darauffolgend sinkender Temperatur im Abgasweg durch Nukleation mit anschließender Koagulation, sowie direkter Kondensation im sog. *Fest-Dampf-Partikel-Pfad* entstehen. Somit können organische Kohlenstoffverbindungen (Ruß), Flugasche oder mitgerissene unverbrannte Brennstoffpartikel - zumindest in relevanten Mengen - ausgeschlossen werden.

Mittels einer Charakterisierung der verwendeten Brennstoffe Weizenstroh-, Miscanthus- und Holzpellets werden Parameter wie Partikelverteilung, Elementarzusammensetzung, Aschegehalt und Ascheschmelzverhalten bestimmt. Dabei werden bei Chlor und Asche überhöhte Werte festgestellt.

Abschließend ist zu sagen, dass die Verwendung dieser Brennstoffe in Kleinfeuerungsanlagen aufgrund z. B. notwendiger, jedoch wirtschaftlich nicht vertretbarer Entstaubungsanlagen nicht sinnvoll ist.

Abstract

Due to the in the long term rising energy prices and the rising need of raw material a wood the thermal use of agricultural residues becomes more and more interesting. But with the application in domestic small-scale furnaces different problems occur. First of all the low ash melting point, high dust emission and a high nitrogen content in comparison to conventional pellets from wood.

In this work the prototype of a combustion for a domestic small-scale furnace with a fuel power of 15 kW especially for the combustion of biomass pellets from agricultural products was developed. Due to the low ash melting point of these fuels the primery air supplies the fuel bed only from above.

This work begins with a description of the fundamentals of biomass, the firing technique necessary for the incineration of solid fuels and legal and normative defaults for small-scale furnaces in combination with agricultural biomass-pellets. In a detailed survey of technology altogether 37 small-scale furnaces for the incineration of these fuels up to a nominal heat output of 100 kW are described.

Based on a conventional incineration for wood pellets with a tilt over grate, which is not suitable for the combustion of fuels with a low ash melting point at all, in serveral versions a forward-acting reciprocating grate was developed. In the beginning of prototyping the primary air came from the bottom, in the lates version the primary air was supplied to the fuel bed only from above. The advantage of this procedure is that the particles in the bottom layer of the fuel bed do not overheat and in this way adherence with the grate can be avoided. In doing so complicated constructions, as for example water-cooled grates, can be avoided. When air supplying from above, an even primary air distribution is important for avoiding hot spots and local melting particles. On the other hand spots without reaction increase the carbon content in the ash.

While making mass balances and energy balances it was found out that the fuel supply by the stoker spirial varies up to 26 % due to changing particle distribution and the overrun of the stoker spiral. This has massive influence to the combustion conditions because primary air has to be initialized but the exact fuel power is not known till the end of the experiment.

Another assessment criterion are the particulate emissions. Measuring of the particulate matter with the BLPI shows maximas in the stages with particle aerodynamic diameter of 0,17 and 0,34 μm . Experiments with wheat straw pellets demonstrate that the TSP-limit of 60 mg is exceed many times. This means that an operation is legally not possible.

The analysis of the dust with REM/EDX identyifies potassium and chlorine which exists as KCl. These particles are formed from anorganic components of the fuel by fragmentation and evaporation of the fuel particles. In the following chilling phase small particles are generated via nucleation and agglomeration as well as direct condensation. Organic hydrocarbons (soot), fly ash and carried away non combusted fuel particles can be - at least in relevant quantite - excluded.

In a characterization of the applied fuels like wheat straw, Miscanthus and woodpellets parameters like particle distribution, elementary composition, ash content and ash melting point are determined. Thereby, excessive values are found out with chlorine and ash.

Finally it can bei stated, that application of these fuels in domestic small-scale furnaces makes no sense because of e.g. the necessity of installation of devices for flue gas treatment which is not economically justifiable.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Aufgabenstellung und Zielsetzung	4
2. Grundlagen zur Biomasse	5
2.1. Definition von Biomasse	5
2.2. Potentiale und Nutzung von Biomasse in Europa	5
2.2.1. Stand der Potentiale	6
2.2.2. Entwicklung der Potentiale bis 2020	6
2.2.3. Nutzung	7
2.2.4. Anteil der Biomasse im europäischen Energiesystem	8
2.3. Biogene Festbrennstoffe	8
2.3.1. Wirkungsgrad der Primärproduktion fester Biomasse	8
2.3.2. Molekulare Zusammensetzung fester Biomasse	9
2.3.3. Elementare Zusammensetzung fester Biomasse	10
2.3.4. Holz, Stroh, Miscanthus und deren Bereitstellungskonzepte für den Pelletsbereich	12
2.3.5. Physikalisch-mechanische Merkmale des Pelletbrennstoffes	16
2.3.6. Brennstofftechnische Eigenschaften des Pelletbrennstoffes	18
2.3.6.1. Heizwert und Brennwert	18
2.3.6.2. Flüchtige Bestandteile	20
2.3.6.3. Wassergehalt	21
2.3.6.4. Aschegehalt	21
2.3.6.5. Ascheerweichungsverhalten	23
3. Grundlagen der Feststoffverbrennung und Feuerungstechnik	26
3.1. Definitionen	26
3.1.1. Luftüberschusszahl λ	26
3.1.2. Feuerungstechnischer Wirkungsgrad η_f	26
3.1.3. Kesselwirkungsgrad η_k	28
3.1.4. Nutzungsgrad η_n	28
3.1.5. Freistrahler	28
3.2. Verbrennung von Feststoffen	30
3.2.1. Thermo-chemische Vorgänge bei der Verbrennung	31
3.2.2. Zeitliches Abbrandverhalten	35
3.2.3. Verbrennungsrechnung	35
3.2.4. Verbrennungstemperatur	37
3.2.5. Verbrennungskontrolle und Verbrennungsdreiecke	39
3.3. Emissionen von Biomasseverbrennungsanlagen	40
3.3.1. Umrechnung von verschiedenen Einheiten und Bezugszustände	41
3.3.2. Kohlenstoffmonoxid CO	43
3.3.3. Flüchtige organische Kohlenstoffverbindungen VOC (bzw. C_nH_m), Ruß, Teer	46
3.3.4. Stickstoffoxide NO_x	47
3.3.5. Schwefel, Chlor, Kalium	51

3.3.6.	Emission von Teilchen (TSP, PM)	52
3.3.7.	Rückstände aus der Biomasseverbrennung und Ascheausbrand	55
3.4.	Feuerungsanlagentechnik biogener Festbrennstoffe	55
3.4.1.	Anforderungen an die Feuerungsanlagentechnik	55
3.4.2.	Feuerungsprinzipien	57
3.4.3.	Pelletsfeuerungen für Holz und Halmgut	57
3.4.4.	Regelung automatisch beschickter Feuerungsanlagen	60
3.4.5.	Wärmeübertrager	61
3.4.6.	Wirkungsgrade von Holzfeuerungen	62
4.	Rechtliche Rahmenbedingungen und normative Vorgaben	64
4.1.	Gesetzliche Vorgaben	64
4.1.1.	Wirkungsgradanforderungen für das Inverkehrbringen von Kleinf Feuerungen	64
4.1.2.	Emissionsgrenzwerte für das Inverkehrbringen von Kleinf Feuerungen	64
4.1.3.	Emissionsgrenzwerte und Abgasverluste für den Betrieb von Feuerungsanlagen	65
4.1.4.	Prüfbedingungen für die Emissionsgrenzwerte	66
4.1.5.	Zulässige Brennstoffe	66
4.2.	Normative Vorgaben zur Heizkesselprüfung	67
4.2.1.	Bauanforderungen	67
4.2.2.	Heiztechnische Anforderungen	67
4.2.3.	Betriebsvorschriften der heiztechnischen Prüfung	67
4.2.4.	Bestimmung der Wärmeleistung und des Kesselwirkungsgrades	67
4.2.5.	Bestimmung der Emissionswerte	68
5.	Stand der Technik / Technologieüberblick bei Halmgutfeuerungen	69
5.1.	Geeignete Aggregate mit Beschreibung des Feuerungsprinzips	69
5.1.1.	Guntamatic Powercorn und Powerchip	69
5.1.2.	Heizomat	71
5.1.3.	Ökotherm	73
5.1.4.	Biokompakt Gerlinger	73
5.1.5.	Reka	75
5.1.6.	Ferro	76
5.1.7.	Hargassner	77
5.1.8.	C.S. Thermos	78
5.1.9.	Verner	80
5.1.10.	Benekov	81
5.1.11.	Baxi	82
5.1.12.	Passat	82
5.2.	Geeignete Aggregate, mangelhafte bis keine Beschreibung des Feuerungsprinzips	83
5.2.1.	Agroflamm AGRO 40	83
5.2.2.	P&H Energy	84
5.2.3.	UltraHeat	85
5.2.4.	Twin Heat	86
5.2.5.	Agriserve	86
5.2.6.	Refo	87
5.2.7.	Ala Talkkari	88
5.2.8.	Dan Trim	88
5.2.9.	Gejs	89
5.2.10.	FUMO	90
5.2.11.	CN Maskinfabrik A/S	90
5.2.12.	ETA	90

5.2.13. Fröling	91
5.3. Nicht bestätigte Aggregate, wenig bzw. keine Beschreibung des Feuerungsprinzips .	92
5.3.1. KWB	92
5.3.2. Heftberger	93
5.3.3. LawaMAT	93
5.3.4. Pelletheiztechnik	94
5.3.5. KSM-Stoker	94
5.3.6. WVT - Bioflam	94
5.3.7. Olymp	94
5.3.8. Biogen Heiztechnik	94
5.3.9. Blacksmith	95
5.3.10. Endreß	95
5.3.11. Pilevang	95
5.3.12. Cormall	95
6. Versuchs- und Messaufbau	96
6.1. Anlagenschema	96
6.2. Messtechnik	98
6.2.1. Gasförmige Emissionen	99
6.2.2. Gesamtstaubmessung	101
6.2.3. Feinstaubmessung mit dem Kaskadenimpaktor	103
7. Beschreibung und Charakterisierung der Brennstoffe	109
7.1. Art, Herkunft und physikalische Charakterisierung der verwendeten Brennstoffe . .	109
7.2. Elementarzusammensetzung und verbrennungstechnische Kenndaten	112
7.2.1. Weizenstrohpellets	113
7.2.2. Miscanthuspellets	114
7.2.3. Holzpellets	114
7.3. Ascheschmelzverhalten von Weizenstroh-, Miscanthus- und Holzpellets	115
7.4. Bunte Dreiecke für Holzpellets, Weizenstroh und Miscanthus	120
8. Adaptierung eines herkömmlichen Pelletsofens	122
8.1. Versuche mit Kipprost und Entwicklung eines Vorschubrostes	122
8.1.1. Betrieb mit Holzpellets	123
8.1.2. Verbrennung von Weizenstohpellets mit dem Standardbrenner (Kipprost) .	124
8.1.3. Verbrennung von Weizenstrohpellets mit einem Kessel der Fa. Verner . . .	124
8.1.4. Erste Version eines Vorschubrostes für die Verbrennung von Weizenstrohpellets	125
8.1.5. Zweite, längere Version des Vorschubrostes	127
8.1.6. Dritte Version des Vorschubrostes mit außen liegendem Motor und Schne-	129
ckengetriebe	129
8.1.7. Vierte Version des Vorschubrostes	131
8.1.8. Fünfte Version des Vorschubrostes	133
8.2. Optimierung der Einstellungen und Änderung der Luftführung für die Primärluft	134
an der fünften Version des Vorschubrostes	134
8.2.1. Anpassung des Brennstoffeintrages	134
8.2.2. Anpassung von Rostvorschub und Primärluftmenge	135
8.2.3. Änderung der Luftführung im Feuerraum	135
8.2.4. Emissionen und Ausbrand bei unterschiedlichen Einstellungen	138
8.3. Sechste Version des Brenners mit neuer Luftführung	140
9. Versuchsdurchführung und Berechnungen	143
9.1. Betrieb, Probleme und Optimierungen der sechsten Version	143

9.1.1. Flammenbilder mit neuem Brenner der sechsten Version	143
9.1.2. Problembereiche und Lösungsansätze	144
9.1.3. Isolierung des gesamten Brenner- und Kesselbereiches	148
9.2. Grundlegende Berechnungen an der Feuerungsanlage	148
9.2.1. Brennstoffeintrag	149
9.2.1.1. Stokertaktverhältnis und dessen Zusammenhang mit der Brennstoffwärmeleistung	149
9.2.1.2. Ermittlung Brennstoffwärmeleistung mittels Waage	151
9.2.2. Konsistenz des Rückstandes, Probenahme und Berechnung des Unverbrannten im Rückstand	153
9.2.3. Berechnung des theoretischen Energieinhalts im Rückstand	156
9.2.3.1. Fehlerkorrektur bei der Berechnung des Rückstand-Massenstromes aufgrund des Ascheverlustes über das Rauchgas	156
9.2.3.2. Gesamten brennbaren Anteile im Rückstand (Glühverlust) werden als Kohlenstoff angenommen	158
9.2.3.3. Bestimmung des Heizwertes des Rückstands	159
9.2.3.4. Elementaranalyse des Rückstands bezüglich Kohlenstoff und Wasserstoff	159
9.2.3.5. Vergleich der Berechnungsmethoden anhand von Rückständen verschiedener Versuche	159
9.2.4. Berechnung der relativen Primärluftmenge	159
9.2.5. Massenverhältnisse, Heizwert und Mindestluftbedarf von Flüchtigen und C_{fix}	161
9.2.6. Darstellung der Aufteilung in Primär- und Sekundärluft	163
9.2.7. Graphische Darstellung der Verschlackung und des Ausbrandes	164
9.3. Energie- und Massenbilanz der Feuerungsanlage für verschiedene Brennstoffe	166
9.3.1. Energiebilanzierung für die Serienanlage PK-V30 und umgebauter, teilisolierter Anlage	166
9.3.2. Energiebilanzierung im Zuge der Versuche zur Emissionsmessung	169
9.3.3. Massenbilanzen (C, H, N, S, Cl)	171
9.4. Messungen im Feuerraum	177
9.4.1. Messung der Verweilzeit des Brennstoffs am Vorschubrost	177
9.4.2. Temperaturmessung im Feuerraum	178
9.5. Messung der Emissionen	181
9.5.1. Gasförmige Emissionen	181
9.5.2. Feinstaubmessung	184
9.5.3. Gesamtstaubmessung	186
9.5.4. Feinstaubuntersuchungen mit REM/EDX	189
10. Schlussfolgerungen und Ausblick	192
Nomenklatur	196
Literaturverzeichnis	202
Abbildungsverzeichnis	215
Tabellenverzeichnis	223
A. Versuchsparameter und Daten	I
B. Darstellung von Messwerten und Berechnungen	VI
C. Daten zu den Emissionsmessungen	XIII

D. Verbrennungsrechnung der eingesetzten Brennstoffe	XVI
E. Ergebnisprotokolle Ascheschmelzverhalten	XX
F. Stoffwerte von Gasen	XXIII

1. Einleitung

Aufgrund des steigenden Bedarfs an Energie und, im Gegenzug dazu, knapper werdender Ressourcen an fossilen Energieträgern ist es von großer Wichtigkeit, einerseits dem Energieverbrauch durch verschiedene Strategien entgegenzuwirken und andererseits herkömmliche, nicht erneuerbare Energieträger durch erneuerbare zu substituieren. In Abbildung 1.1 ist dieser steile Anstieg des Bruttoinlandsverbrauchs¹ für Österreich des Zeitraumes von 1970 bis 2010 und die strukturelle Zusammensetzung der Energieträger für das Jahr 2009 dargestellt.

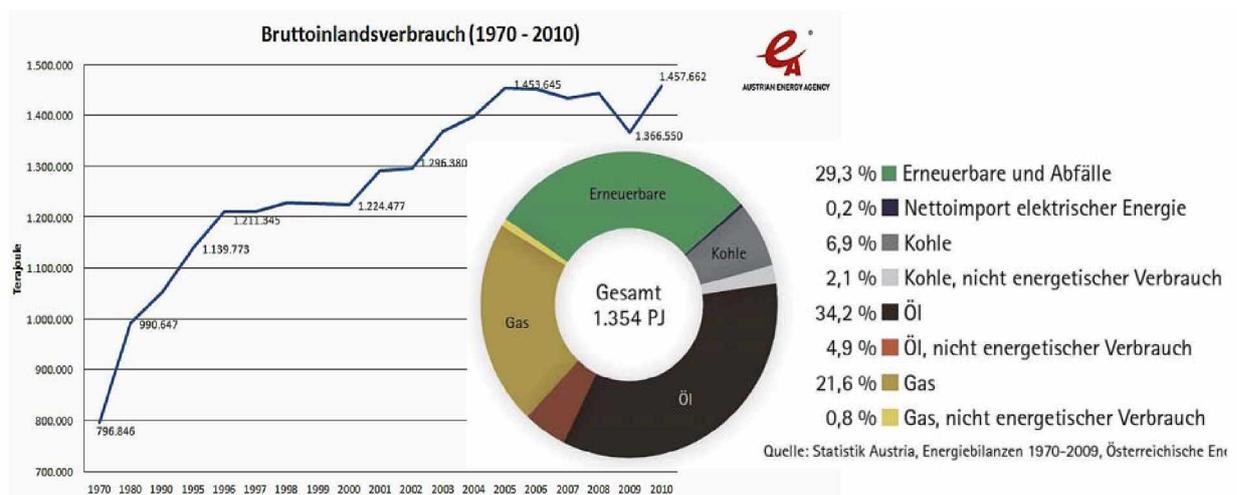


Abbildung 1.1.: Österreichischer Bruttoinlandsverbrauch von Energie für 2010 und dessen Struktur für 2009 [2], [3] nach STATISTIK AUSTRIA und ÖSTERREICHISCHE ENERGIEAGENTUR.

Als weiteres Argument neben der sich öffnenden Schere zwischen Bedarf und Ressourcen fossiler Energieträger darf natürlich auch dessen klimarelevanz bezüglich der CO₂-Emissionen nicht vergessen werden. Schließlich müssen hier auch die verbindlichen CO₂-Ziele der Staaten (Kyoto-Protokoll) und die Vorgaben der Europäischen Union (European Union Emission Trading System für energieintensive Unternehmen) eingehalten werden.

Weniger bekannt ist der volkswirtschaftliche Aspekt der importierten, hauptsächlich fossilen Energieträger. Die österreichische Außenhandelsbilanz nach Warenabschnitten zeigt für die meisten Warengruppen eine recht ausgeglichene Bilanz. Jedoch weist die Warengruppe „Brennstoffe, Energie“ in der Bilanz für das Jahr 2011 mit 11,5 Mrd. Euro das größte Handelsbilanzdefizit auf [4].

1.1. Motivation

Um den oben beschriebenen Entwicklungen entgegenzuwirken, hat die Europäische Union das Klima- und Energiepaket - die 20/20/20-Ziele - beschlossen, welches vom EU-Parlament im Dezem-

¹Als Bruttoinlandsverbrauch wird der gesamte Energiebedarf eines Landes mit den darin enthaltenen Eigenerzeugungen von Rohenergie, den Salden des Außenhandels sowie Lagerveränderungen bezeichnet. Das heißt, der Bruttoinlandsverbrauch ist definiert als gesamter Energiebedarf vor der Umwandlung in Kraftwerken, Heizwerken, Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, Raffinerien und Kokereien [1].

ber 2008 angenommen wurde. Diese rechtsverbindliche Handlungsleitlinie der 27 EU-Mitgliedsstaaten hat die Reduktion der Treibhausgasemissionen sowie den Ausbau der erneuerbaren Energien in der gesamten EU zum Ziel [5]:

- 20 % Erneuerbare Energie bis 2020
- 20 % Einsparung des Energieverbrauchs bis 2020
- 20 % Reduktion der CO₂-Emissionen

Die länderspezifischen Ziele sollen mit Berücksichtigung der bisherigen Werte, der Entwicklung der letzten Jahre und der Höhe der wirtschaftlichen Leistung eines Landes als solidarisch zumutbarer Beitrag festgelegt werden [6]. Wie in Abbildung 1.1 zu sehen ist, hat Österreich bereits einen Anteil von etwa 30 % (396,5 PJ für 2009) an erneuerbaren Energien am Bruttoinlandsverbrauch, der bis 2020 auf 34 % erhöht werden muss [2], [3].

In Abbildung 1.2 (oben) ist dieser Anteil weiter spezifiziert dargestellt. Dabei ist zu sehen, dass der Anteil der Bioenergie mit fast 60 % (233,4 PJ für 2009) unter den Erneuerbaren bei weitem überwiegt.

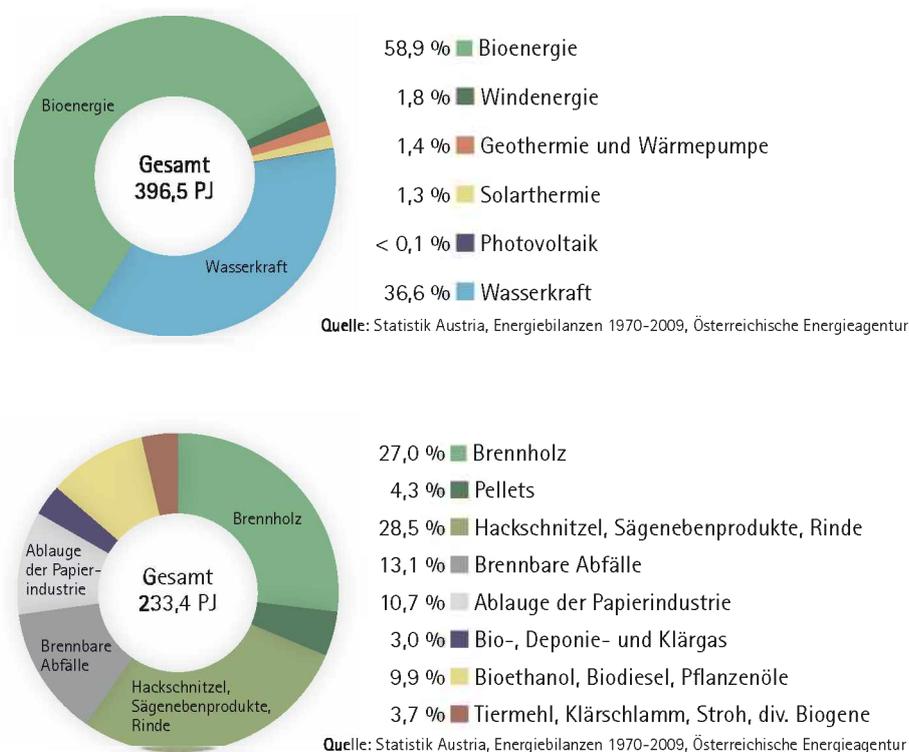


Abbildung 1.2.: Struktur der erneuerbaren Energie (oben) und Bioenergie (unten), jeweils als Bruttoinlandsverbrauch 2009 in Österreich, in [3] nach STATISTIK AUSTRIA und ÖSTERREICHISCHE ENERGIEAGENTUR .

Bei weiterer Analyse der Bioenergie 1.2 (unten) ist zu sehen, dass hier die Anteile 'Brennholz' (Stückholz) und 'Hackschnitzel, Sägenebenprodukte, Rinde' (hier sind auch die Pellets enthalten) mit jeweils fast 30 % den größten Anteil haben.

Für die Zukunft bezüglich Biomasse hat der Österreichische Biomasseverband der Wärmeerzeugung die höchst Priorität beigemessen, gefolgt von der Treibstoffproduktion und der Stromerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. Dabei hat man nach diesen Grundsätzen und dem heutigen Wissensstand die in Abbildung 1.3 dargestellten Größenordnungen mit insgesamt 280 PJ vorgeschlagen.

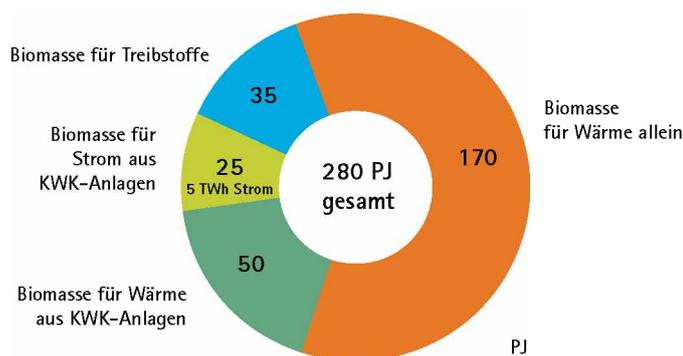


Abbildung 1.3.: Ziele und Potentiale der weiteren energetischen Biomassenutzung bis 2020 [6].

Die Steigerung soll ohne Gefährdung der Nahrungsmittelversorgung im Inland, beispielsweise durch verstärkte Nutzung des Holzzuwachses und Erfassung der Holz mengen im Nicht-Waldbereich, einer besseren Erfassung der Abfall- und Nebenprodukte (Gülle, Stroh etc.) oder Nutzung von Silllegungsflächen, möglich sein [6].

Eine Herausforderung bei der Biomassenutzung für den Wärmebereich, und hier speziell im Holzpelletsbereich, wird das sich verschärfende Spannungsfeld - speziell aufgrund stofflicher Nutzung durch beispielsweise durch Papier- und Zellstoffindustrie - zwischen der Nachfrage und dem lokal verfügbaren Angebot im Bereich der Sägenebenprodukte sein, was zu Preisschwankungen führen kann. So kam es im Winter 2006 aufgrund der sehr großen Nachfrage an Holzpellets zu einer exorbitanten Preissteigerung (vgl. Abbildung 1.4).

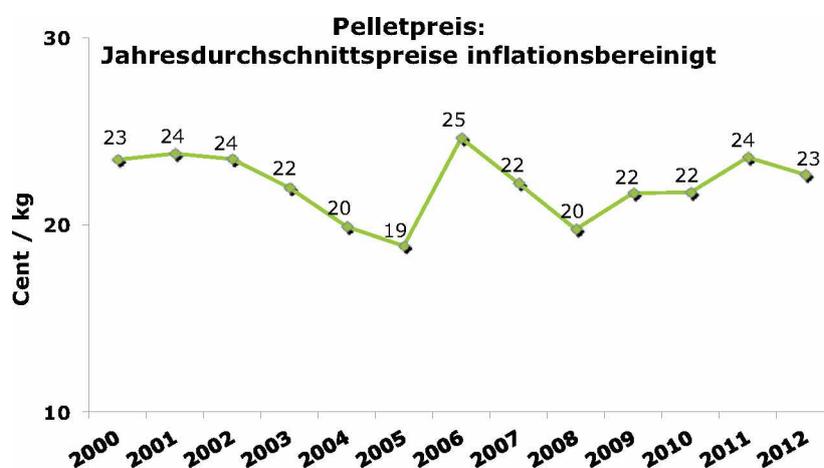


Abbildung 1.4.: Pelletspreisentwicklung [7].

Um sich aus der Abhängigkeit der Holzindustrie zu lösen oder den unwirtschaftlichen und nicht ökologischen Transport von Holzpellets zu vermeiden und gleichzeitig die Ziele der Energiestrategie zu unterstützen, sollten neue Brennstoffe für die thermische Verwertung erschlossen werden. Ein großes Augenmerk ist dabei auf landwirtschaftliche Reststoffe, wie vor allem Stroh, gerichtet, die in großen Mengen anfallen und derzeit nur in geringem Maße genutzt werden.

Um auch eine entsprechende Energiedichte zu erreichen sowie auch herkömmliche Förderanlagen, Lagertechnologien und Heizaggregate verwenden zu können, sind diese landwirtschaftlichen Reststoffe in Form von Pellets zu nutzen.

Erste Tests haben ergeben, dass die Verbrennung von Pellets verschiedener Strohzusammensetzungen in den derzeit am Markt erhältlichen „Holzpelletsöfen“ keine zufrieden stellenden Ergebnisse

erbringen. Es treten Verschlackungserscheinungen auf und die Emissionswerte scheinen darüber hinaus nicht den zu erfüllenden Richtlinien zu entsprechen.

1.2. Aufgabenstellung und Zielsetzung

Diese Arbeit hat zum Ziel, Pellets aus landwirtschaftlichen Reststoffen, vornehmlich Stroh, aber auch Energiepflanzen wie Miscanthus, als Energieträger für Kleinfeuerungsanlagen zugänglich zu machen. Dabei ist ein auf diese Brennstoffe abgestimmter Prototyp für eine Kleinfeuerungsanlage soweit zu entwickeln, dass dieser sich als Pilot- und Demonstrationsprojekt für die Verbrennung von Stroh- und Miscanthuspellets eignet.

Nach einer ausführlichen Literaturstudie zu bereits bestehenden Konzepten und Aggregaten soll, ausgehend von einem kommerziell erhältlichen Ofen, Rost und Brennraumgeometrie den besonderen Anforderungen der alternativen Pellets angepasst werden, um eine möglichst hohe Energieausbeute zu erzielen. Die Geometrie des Feuerraumes als auch die Feuerraumtemperatur sollen derart optimiert werden, dass es zu keinen Verschlackungserscheinungen kommt und die Emissionen (vor allem CO, Kohlenwasserstoffe, NO_x und Staub) den Richtlinien und Normen entsprechend eingehalten werden können.

Dabei soll das optimale Temperaturfenster im Feuerraum erarbeitet werden - ist dieses zu hoch, kann es unter anderem zu Verschlackungserscheinungen und erhöhten NO_x-Werten kommen, ist es zu niedrig, sind Probleme in Form erhöhter Emissionen zu erwarten. Neben der Verbrennungstemperatur sind eine entsprechende Sauerstoffversorgung, eine gute Vermischung zwischen Brenngas und Luft, sowie eine ausreichende Verweilzeit im Brennraum einzustellen. Für einen gleichmäßigen Abbrand sind die Feuerraumgröße und die Feststoffeintragungsgeschwindigkeit auf den Brennstoff zu optimieren. Die Konstruktion muss auch eine absolute Dichtheit zwischen dem Feuerraum und dem Tagesbehälter für Brennstoff gewährleisten.

Neben einer genauen Spezifizierung der verwendeten Brennstoffe sollen vor allem die Parameter Elementarzusammensetzung und Ascheschmelzverhalten mit den in der Literatur verfügbaren Angaben verglichen werden. Besonderes Augenmerk ist auf die Messung des Feinstaubanteiles im Abgas zu richten. Dabei sollen neben der Partikelverteilung auch die Zusammensetzung der Staubpartikel eingehend untersucht werden.

2. Grundlagen zur Biomasse

Grundsätzlich können die auf der Erde nutzbaren Energieströme drei unterschiedlichen primären Energiequellen zugeordnet werden: Dies sind die aus Planetengravitation und -bewegung resultierende Gezeitenenergie, die Erdwärme und die Solarstrahlung. Die mit Abstand größte Quelle des regenerativen Energieangebots ist dabei die von der Sonne eingestrahlte Energie, gefolgt von der Erdwärme und der Gezeitenenergie. Durch verschiedene natürliche Umwandlungen innerhalb der Erdatmosphäre werden aus diesen drei Quellen eine Reihe sehr unterschiedlicher weiterer Energieströme hervorgerufen.

Bei der Biomasse wird mit Hilfe von Pflanzen die solare Strahlung über den Prozess der Photosynthese in organische Materie umgewandelt. Im Gegensatz zu anderen Möglichkeiten der direkten und indirekten Sonnenenergienutzung (z. B. Solarthermie, Windenergie) ist Biomasse photosynthetisch fixierte Energie bzw. gespeicherte Sonnenenergie, die bei entsprechender Energienachfrage genutzt werden kann. Es treten keine Angebotsschwankungen innerhalb vergleichsweise kurzer Zeiträume auf, welche für einige regenerative Energien typisch sind und die technische Nutzbarmachung erschweren [8].

2.1. Definition von Biomasse

Mit dem Begriff „Biomasse“ bezeichnet man sämtliche Stoffe organischer Herkunft (d. h. kohlenstoffhaltige Materie). Biomasse umfasst damit

- in der Natur lebende Phyto- und Zoomasse (Pflanzen und Tiere),
- daraus resultierende Rückstände (z. B. tierische Exkreme),
- abgestorbene (aber noch nicht fossile) Phyto- und Zoomasse (z. B. Stroh),
- im weiteren Sinne alle durch beispielsweise technische Umwandlung und/oder stoffliche Nutzung entstandenen bzw. anfallenden Stoffe (z. B. Schwarzlauge, Papier und Zellstoff, Schlachthausabfälle, organische Hausmüllfraktion, Pflanzenöl, Alkohol).

Die Abgrenzung zu den fossilen Energieträgern beginnt beim Torf, der als fossiles Sekundärprodukt der Verrottung nicht mehr als Biomasse zu bezeichnen ist. In einigen Ländern (z. B. Schweden, Finnland) wird Torf aber durchaus noch der Biomasse zugerechnet. Weiters kann Biomasse zusätzlich in sogenannte Primär- und Sekundärprodukte eingeteilt werden: Zu den Primärprodukten zählen im Wesentlichen die gesamten Pflanzenmassen, die durch direkte photosynthetische Ausnutzung der Sonnenenergie entstanden sind. Als Sekundärprodukte wird jener Teil der Biomasse bezeichnet, der durch den Ab- oder Umbau organischer Substanz in höhere Organismen gebildet wurde und dessen Energie nur indirekt von der Sonne kam [8].

2.2. Potentiale und Nutzung von Biomasse in Europa

Vor dem Hintergrund des ständig steigenden Energieverbrauchs und den damit verbundenen sogenannten Energie-, Umwelt- und Klimaproblemen sollen für Europa die vorhandenen Biomassopotentiale und deren gegenwärtige Nutzung kurz aufgezeigt werden [9].

2.2.1. Stand der Potentiale

Das verfügbare technische Biomassepotential¹ ist zusammengesetzt aus den forstwirtschaftlichen Potentialen, den Potentialen aus Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen und den auf landwirtschaftlichen Flächen bereitstellbaren Energiepflanzenpotentialen [10].

Die Potentiale an Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen inkludiert alle anfallenden, energetisch nutzbaren organischen Stoffströme in der Landwirtschaft, bei der Holz- und Lebensmittelweiterverarbeitung sowie am Ende der Nutzungskette. Man unterscheidet dabei zwischen holzartigen, halmgutartigen und sonstigen Rückständen [9]:

- Das Potential holzartiger Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle in der EU-28 (EU-25, Bulgarien, Rumänien, Türkei) ist etwa 1550 PJ/a.
- Das verfügbare Strohpotential bei thermo-chemischer Umwandlung (d. h. Verbrennung) beläuft sich auf rund 870 PJ/a, wobei der Schwerpunkt bei den großen Flächenländern Frankreich und Deutschland zu sehen ist.
- Das Potential an sonstigen Stoffen wie Exkrementen, anderen Rückständen aus der Landwirtschaft (z. B. Ernterückstände, nahrungs- und futtermitteluntaugliches Getreide), industriellen Substraten, Klärschlamm sowie organischen Abfällen beträgt 1350 bis 1710 PJ/a.

Damit liegt das gesamte Potential an Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen, welches wesentlich von den EU-15 Ländern geprägt wird, in der EU-28 bei etwa 3772 PJ/a.

Das forstwirtschaftliche Potential, welches sich aus dem nicht stofflich genutzten Anteil des Einschlags² (Brennholz und Waldrestholz) und aus dem jährlichen Zuwachs³ (nicht eingeschlagen und genutzt) zusammensetzt, beträgt 3046 PJ. Dabei sind 66 % ungenutzter Zuwachs und 34 % Brenn- und Waldrestholz. Die größten forstwirtschaftlichen Potentiale haben die Länder Deutschland, gefolgt von Frankreich, Schweden, Polen, Rumänien, Italien und Österreich [9].

Die Potentiale an Energiepflanzen werden zum einen durch Brachflächen und zum anderen durch mögliche Flächenfreisetzungen aufgrund des Abbaus von Überschüssen bei der Produktion von Marktfrüchten bestimmt. Ein Anbau von Energiepflanzen mit heute in der Landwirtschaft erreichbaren Erträgen auf diesen Flächen ergibt ein Energiepflanzenpotential von rund 1182 PJ/a [9].

Insgesamt ergibt sich damit für die Länder der EU-28 ein gesamtes Potential für Bioenergieträger von 8450 PJ/a, wobei Deutschland und Frankreich die höchsten Potentiale aufweisen [9].

2.2.2. Entwicklung der Potentiale bis 2020

Das technische Biomassepotential, welches in den den kommenden Jahren zwangsläufig Veränderungen unterworfen ist, wird im Wesentlichen von den zukünftig verfügbaren Flächenpotentialen für den Energiepflanzenanbau dominiert werden. Bei stagnierender Nachfrage der in Europa produzierten Nahrungs- und Futtermittel auf dem Weltmarkt sowie gleichzeitigem technischen und züchterischen Fortschritt bei der Nahrungs- und Futtermittelproduktion werden vermutlich die verfügbaren Landwirtschaftsflächen für den Energiepflanzenanbau zunehmen [9]:

- Das zukünftige Potential an holzartigen Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen in der EU-28 dürfte im Vergleich zu heute näherungsweise mit etwa 1550 PJ/a konstant bleiben.

¹Das technische Potential ist der Teil des theoretischen Potentials, der bei Berücksichtigung der gegebenen technischen Restriktionen, Randbedingungen und strukturellen, ökologischen sowie gesetzlichen Vorgaben nutzbar ist.

²technisches Rohholzpotential des Einschlags

³technisches Rohholzpotential des Zuwachs

Dabei orientiert sich die Prognose für Industrierestholz und Schwarzlauge an der erwarteten Zunahme der Rundholznachfrage und -verarbeitung.

- Das EU-weite Strohpotential wird um etwa 6 % zurückgehen (818 PJ/a). Grund dafür ist eine Steigerung der Erträge und die damit verbundene Verschiebung des Korn-Stroh-Verhältnisses zu Ungunsten von Stroh.
- An sonstigen Stoffen wie Exkrementen, anderen Rückständen aus der Landwirtschaft und industrielle Substraten, Klärschlamm sowie organischen Abfällen wird infolge der erwarteten leichten Nachfragesteigerung nach Nahrungsmitteln einen leichte Potentialzunahme - vor allem in bevölkerungsstarken Ländern - erwartet.

Es wird insgesamt nicht damit gerechnet, dass sich die Potentiale an Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen in der EU bis 2020 signifikant verändern.

Bezüglich forstwirtschaftlichem Potential wird in den zehn neuen EU-Mitgliedsstaaten zukünftig ein größerer Rundholzbedarf und damit Einschlag erwartet. Aufgrund dieses steigenden Einschlags steigt einerseits die Verfügbarkeit an Waldrestholz, jedoch sinkt gleichzeitig das Potential an ungenutztem Zuwachs stärker, sodass das forstwirtschaftliche Biomassepotential auf einen Wert von etwa 2535 PJ/a sinken dürfte. Für einzelne Länder wie beispielsweise Belgien, Lettland, Portugal, die Tschechische Republik und die Türkei wird sogar ein über dem theoretischen Rohholzpotential liegender Einschlag erwartet, sodass daher in diesen Ländern 2020 voraussichtlich keine Reserven mehr aus ungenutztem Zuwachs für die energetische Nutzung zur Verfügung stehen werden [9].

Die Potentiale des Energiepflanzenanbaus auf landwirtschaftlichen Nutzflächen wird von den Faktoren Bevölkerungsentwicklung und somit Nahrungsmittelverbrauch, Umwidmung von bisher landwirtschaftlicher Flächen in andere Nutzungsarten sowie Ertrags- und Leistungssteigerungen in der Pflanzen- und Tierproduktion bestimmt. Mit Berücksichtigung der Entwicklung einzelner EU-Mitgliedsstaaten (Bevölkerungsentwicklung, Einflüsse des Klimas, Ertragszuwachsrate, umwelt- und agrarpolitische Rahmenbedingungen etc.) wird somit bis zum Jahr 2020 ein Energiepflanzenpotential von 2614 bis 7795 PJ/a prognostiziert [9].

Insgesamt ergibt sich damit für die Länder der EU-28 im Jahr 2020 ein gesamtes Potential für Bioenergieträger von bis zu 14750 PJ/a, wobei über die Hälfte der europäischen Biomassepotentiale in Frankreich, Spanien, Deutschland und Polen lokalisiert sind. Die größten Potentiale bei Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen haben die bevölkerungsreichsten Länder Mitteleuropas (Deutschland, Frankreich), bei Waldholz dominieren die nordeuropäischen Länder (Schweden, Finnland) [9].

2.2.3. Nutzung

Biomasse hat unter den erneuerbaren Energien die vielfältigsten nutzbaren Optionen und kann als fester, flüssiger und gasförmiger Energieträger eingesetzt werden. Dabei kann Biomasse zur Wärmebereitstellung und/oder Stromerzeugung als auch Kraftstoff genutzt werden [11].

Feste Biomasse trägt 2008 in der EU-27 zur *Wärmebereitstellung* mit etwa 2228 PJ/a bei, wobei hier der Hausheizungsbereich mit Kleinf Feuerungsanlagen überwiegt. An Nutzwärme aus Biogas wurde in der EU mindestens 33 PJ/a bereitgestellt, wobei hier die Länder Deutschland, Großbritannien und Frankreich mit dem größten Anteil beitragen. Aus Pflanzenöl wurde in der EU nur etwa 7 PJ an Wärme bereitgestellt, wobei dies ein bereits 12,5 % geringerer Wert als 2007 ist. Insgesamt wurden damit 2008 in Europa (EU-27) rund 2261 PJ/a an Wärme aus Biomasse bereitgestellt [11].

2008 wurden in der EU-27 aus fester Biomasse (inklusive der organischen Müllfraktion der OECD-Staaten mit etwa 28 TWh) rund 70 TWh/a *elektrische Energie* erzeugt. Dabei realisieren die

Länder Deutschland, Finnland und Schweden 51 % der gesamten Stromerzeugung aus biogenen Festbrennstoffen. Aus Biogas wurde rund 20,4 TWh elektrische Energie erzeugt, wobei Deutschland mit etwa 9 TWh mit Abstand den größten Anteil dazu beiträgt. Pflanzenöl leistet mit rund 3,6 TWh elektrischer Energie einen bescheidenen Beitrag, wobei hier der Trend auch aufgrund des deutlich gestiegenen Pflanzenölpreises stark rückläufig ist. Insgesamt wurden damit 2008 in Europa (EU-27) rund 94 TWh elektrische Energie aus Biomasse bereitgestellt [11].

Kraftstoff in der Form von Ethanol aus Biomasse wurde 2008 mit einer Energiemenge von rund 42 PJ erzeugt. Die Energiemenge an erzeugtem Biodiesel und Pflanzenöl betrug etwa 285 PJ bzw. 16 PJ. Damit wurden 2008 in Europa (EU-27) Kraftstoff mit einer Energiemenge von rund 343 PJ produziert [11].

2.2.4. Anteil der Biomasse im europäischen Energiesystem

In der EU-25 wurden 2007 rund 73 EJ an fossil biogenen und fossil mineralischen Primärenergieträgern (d. h. einschließlich Kernenergie) sowie an Wasserkraft eingesetzt [12]. Dieser gesamte Primärenergieverbrauch wurde zu etwa 40 % durch Erdöl, zu knapp 25 % aus Erdgas, zu ca. 18 % durch Kohlen, zu rund 12 % durch elektrische Energie aus Kernkraft und zu knapp 5 % durch Wasserkraft gedeckt. Diese Anteile variieren natürlich jedoch erheblich in Abhängigkeit von nationalen Gegebenheiten, welche durch politische Vorgaben und unterschiedliche Primärenergievorkommen bestimmt sind [9].

Werden Biomassenutzung (ca. 4,4 EJ/a) und Energieeinsatz an fossilen Energieträgern (einschließlich Kernenergie) und Wasserkraft (ca. 73 EJ/a) gegenübergestellt, so zeigt sich, dass der Biomasseinsatz mit einem Anteil von ca. 6 % der konventionellen Energieträgern eine nur untergeordnete Rolle spielt [13]. Stellt man die geringeren Wert der Biomassenutzung von WITT [11] des Jahres 2008, wie in Punkt 2.2.3 dargestellt (3 EJ/a), den konventionellen Energieträgern gegenüber, so ergibt sich lediglich ein Anteil von ca. 4,1 %.

Natürlich sind auch hier regional erhebliche Unterschiede zu verzeichnen. So ist beispielsweise in den Ländern Nordeuropas die Biomassenutzung weitaus stärker etabliert als in den übrigen europäischen Regionen [9].

2.3. Biogene Festbrennstoffe

In diesem Abschnitt werden einerseits die für die Verbrennung relevanten Eigenschaften dargestellt, andererseits wird auch auf die Bereitstellungskonzepte und die auf die Zusammensetzung wirkenden Faktoren wie beispielsweise Bodenbeschaffenheit oder Düngung eingegangen.

2.3.1. Wirkungsgrad der Primärproduktion fester Biomasse

Der Wirkungsgrad bzw. der Nutzeffekt der Photosynthese gibt den Anteil der in der Biomasse chemisch gespeicherten Energie in Bezug auf die gesamte von der Sonne eingestrahltene Energie an. Dabei kann theoretisch ein Wert von 33,2 % erreicht werden. Da nur etwa 50 % der gesamten Strahlungsenergie im photosynthetischen aktiven Wellenlängenbereich von 400 bis 700 nm liegen und durch die Atmung der Pflanze ein zusätzlicher Substanzverlust auftritt, können nur bis zu 9 % der eingestrahltene Energie tatsächlich in chemische Energie umgewandelt werden. Durch verschiedenste Einflüsse wie Bodenbeschaffenheit, Nährstoff- und Wasserangebot, Temperatur- und Witterungseinflüsse etc. können in weiten Teilen Europas im Durchschnitt über die Vegetationsperiode Nutzungseffekte im Mittel von nur 0,8 bis 1,2 % erreicht werden.

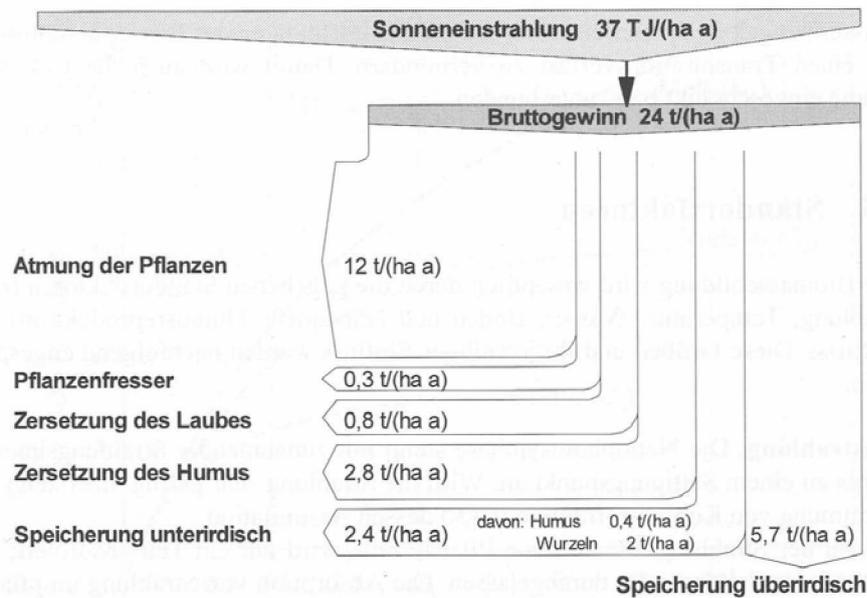


Abbildung 2.1.: Stoffbilanz einer Pflanzengesellschaft am Beispiel eines Hainbuchenwaldes (nach [14] aus [15])

In Abbildung 2.1 ist der Nettobiomassegewinn eines Ökosystems am Beispiel eines Hainbuchenwaldes zu sehen. Dabei werden durch Ausnutzung von 1% der eingestrahltten Sonnenenergie 24 t Biomasse (Trockenmasse) je Hektar gebildet. Durch Atmung der Pflanzen geht dabei die Hälfte verloren, ein Teil wird dem Boden über abfallende Blätter zugeführt und von Mikroorganismen zersetzt, sodass die Nettospeicherung an Biomasse pro Hektar und Jahr ca. 5,7 t oberirdisch (ergibt einen Wirkungsgrad von rund 0,24%) und etwa 2,4 t unterirdisch in Form von Wurzeln und Humus erfolgt [15].

2.3.2. Molekulare Zusammensetzung fester Biomasse

Biogene Festbrennstoffe sind hauptsächlich aus den drei Biopolymeren Cellulose, Hemicellulose (auch Polyose) und Lignin zusammengesetzt. Neben geringen Mengen aus Extraktstoffen (u. a. Fette und Harze), Asche und Proteinen machen diese bei Holzbrennstoffen mehr als 95% der Pflanzentrockenmasse aus [16].

Cellulose, ein unverzweigtes Polysaccharid, das in der Natur unter allen organischen Stoffen den am weitesten verbreiteten Stoff darstellt, bildet die Gerüstsubstanz der unverholzten Zellwand und ist für die Zugfestigkeit der Biomasse verantwortlich [17].

Die Gruppe der Hemicellulosen (auch Polyosen) besteht im Unterschied zur Cellulose aus monomeren Einheiten aufgebauten, verzweigten Polysacchariden. Die Aufgabe der Hemicellulose in der Pflanze sind unter anderem stützende Wirkung in der Zellmembran, sowie Quell- und Klebstoffwirkung zur Verkittung der Zellwände [16].

In Lignocellulosematerialien ist der eigentliche Füllstoff jedoch das Lignin, eine dreidimensional vernetzte aromatische Polymerverbindung mit Alkylbenzolstruktur. Durch die verkittende und versteifende Wirkung ist es beispielsweise beim Holz für die Druckstabilität verantwortlich. Hohe Ligningehalte gewährleisten ein aufrechtes Stehen der Pflanze auch bei geringem Wasserdruck. Bei weniger lignifizierten Pflanzen sorgt dieser Druck in erster Linie für die Stabilität. Deshalb hat stark lignifizierte Biomasse (z. B. Holz) vergleichsweise geringe Wassergehalte oder die Biomasse kann nach dem Absterben der Pflanzensubstanz abtrocknen (z. B. halmgutartige Pflanzen bei der

Reife auf dem Feld). Lignin hat mit 64% einen deutlich höheren Kohlenstoffgehalt als Cellulose (42%). Unterschiede in der makromolekularen Zusammensetzung haben somit auch Auswirkungen auf den Gesamtkohlenstoff, was folglich auch den Heizwert beeinflusst [16].

2.3.3. Elementare Zusammensetzung fester Biomasse

Pflanzliche Biomasse setzt sich aus einer Vielzahl von chemischen Elementen zusammen. Von den auf der Erde natürlich vorkommenden Elementen sind davon 26 für die Pflanzen biologisch essentiell [18]. Dabei wird zwischen den sogenannten Haupt- und Spurenelementen unterschieden. Zu den Hauptelementen zählen, neben den mengenmäßig dominierenden und aus der CO₂-Assimilation und H₂O-Aufnahme stammenden Elementen Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O) und Wasserstoff (H), vor allem die sechs Hauptnährstoffe Stickstoff (N), Kalium (K), Phosphor (P), Kalzium (Ca), Magnesium (Mg) und Schwefel (S) sowie das ebenfalls relativ häufige, aber nicht als Nährstoff zu bezeichnende Chlor (Cl). In Tabelle 7.2 sind die Gehalte verschiedener Biomasse-Festbrennstoffe und als Vergleich jene von Kohlen dargestellt. Als wesentlich am stofflichen Aufbau der Biomasse beteiligte Elemente spielen diese auch als Düngemittelbegleitstoffe eine wichtige Rolle [16].

Die pflanzliche Biomasse enthält neben diesen Hauptelementen eine ganze Reihe unterschiedlicher Spurenelemente wie u. a. Silizium (Si), Natrium (Na), Eisen (Fe), Mangan (Mn), Zink (Zn), Kupfer (Cu), Molybdän (Mo), Kobalt (Co), Blei (Pb), Aluminium (Al), Chrom (Cr), Cadmium (Cd), Nickel (Ni), Quecksilber (Hg) und Arsen (As). Einige davon gelten als lebensnotwendige (essentielle) Mikronährstoffe, während andere auch Pflanzen schädigen können [16].

Emissionsrelevante Elemente und Einflüsse auf dessen Gehalte

Die Art und Größe der Emissionen hängt, neben den Verbrennungsbedingungen, in hohem Maße auch von den Elementen im Brennstoff selbst ab. Wie in Tabelle 7.2 zu sehen ist, unterscheiden sich die biogenen Brennstoffe bei den emissionsrelevanten Inhaltsstoffen zu Teil erheblich. So ist beispielsweise der Stickstoffgehalt (N) bei holzartigen Brennstoffen mit ca. 0,1 bis 0,2% und bei den meisten Strohreststoffen mit ca. 0,5% relativ gering, während eiweißreiche Pflanzen (mit Körnern und Samen, z. B. Getreide) deutlich darüber liegen können. Die Schwankungsbreiten sind bei allen Nicht-Holzreststoffen vor allem aufgrund der Unterschiede bei der Stickstoffdüngung (Düngungsniveau, Düngungszeitpunkt etc.) deutlich größer als beim Holz. Der Brennstoff-Stickstoff geht bei der Verbrennung zu einem Großteil in die Gasphase über und wirkt sich somit direkt auf die Stickstoffoxid-Bildung (NO_x) aus. Die Einbindung des Stickstoffs in die Asche findet kaum statt [21] [16].

Im Vergleich zu Kohlenreststoffen ist der Schwefelgehalt (S) biogener Festbrennstoffe relativ gering. Während die meisten Holzreststoffe im Bereich von 0,02 bis 0,05% der Trockenmasse liegen, hat Getreidestroh einen Anteil von unter 0,1% und Rapsstroh mit durchschnittlich 0,3% den höchsten Schwefelgehalt unter den biogenen Festbrennstoffen (Tabelle 7.2). Oft ist Schwefel ein Begleitstoff in Düngemitteln, was sich im Gegensatz zu ungedüngten Waldkulturen oder kaum gedüngten schnellwachsenden Hölzern (Kurzumtriebsplantagen) bei gedüngten Feldkulturen (halmgutartige Biomasse) deutlich auf den Schwefelgehalt auswirkt. Der Schwefelgehalt bestimmt bei der vollständigen thermo-chemischen Umwandlung (Verbrennung) primär die Schwefeldioxid-Emission (SO₂, SO₃ und Alkalisulfate). Bei der Abkühlung der Abgase im Abgasweg kommt es wie bei den Chloriden zu teilweiser Rückkondensation, wobei sich Alkali- und Erdalkalisulfate entweder an den mitgeführten Flugaschepartikeln oder an den Wärmeübertragerflächen niederschlagen

Tabelle 2.1.: Gehalte an Hauptelementen in naturbelassenen Biomasse-Festbrennstoffen (Mittelwerte nach [19]) und Stein- und Braunkohle als Vergleich (Mittelwerte nach [20]), nach Darstellung von [16].

Brennstoff/Biomasseart	C	H	O	N	K	Ca	Mg	P	S	Cl
in % der Trockenmasse										
Fichtenholz (mit Rinde)	49,8	6,3	43,2	0,13	0,13	0,70	0,08	0,03	0,015	0,005
Buchenholz (mit Rinde)	47,9	6,2	45,2	0,22	0,15	0,29	0,04	0,04	0,015	0,006
Pappelholz (Kurzumtrieb)	47,5	6,2	44,1	0,42	0,35	0,51	0,05	0,10	0,031	0,004
Weidenholz (Kurzumtrieb)	47,1	6,1	44,3	0,54	0,26	0,68	0,05	0,09	0,045	0,004
Rinde (Nadelholz)	51,4	5,7	38,7	0,48	0,24	1,27	0,14	0,05	0,085	0,019
Roggenstroh	46,6	6,0	42,1	0,55	1,68	0,36	0,06	0,15	0,085	0,40
Weizenstroh	45,6	5,8	42,4	0,48	1,01	0,31	0,10	0,10	0,082	0,19
Triticalestroh	43,9	5,9	43,8	0,43	1,05	0,31	0,05	0,08	0,056	0,27
Gerstenstroh	47,5	5,8	41,4	0,46	1,38	0,49	0,07	0,21	0,089	0,40
Rapsstroh	47,1	5,9	40,0	0,84	0,79	1,70	0,22	0,13	0,27	0,47
Maisstroh	45,7	5,3	41,7	0,64	-	-	-	-	0,12	0,35
Sonnenblumenstroh	42,5	5,1	39,1	1,11	5,00	1,90	0,21	0,20	0,15	0,81
Hanfstroh	46,1	5,9	42,5	0,74	1,54	1,34	0,20	0,25	0,10	0,20
Roggenganzpflanzen	48,0	5,8	40,9	1,14	1,11	-	0,07	0,28	0,11	0,34
Weizenganzpflanzen	45,2	6,4	42,9	1,41	0,71	0,21	0,12	0,24	0,12	0,09
Triticaleganzpflanzen	44,0	6,0	44,6	1,08	0,90	0,19	0,09	0,22	0,18	0,14
Roggenkörner	45,7	6,4	44,0	1,91	0,66	-	0,17	0,49	0,11	0,16
Weizenkörner	43,6	6,5	44,9	2,28	0,46	0,05	0,13	0,39	0,12	0,04
Triticalekörner	43,5	6,4	46,4	1,68	0,62	0,06	0,10	0,35	0,11	0,07
Rapskörner	60,5	7,2	23,8	3,94	-	-	-	-	0,10	-
Miscanthus	47,5	6,2	41,7	0,73	0,72	0,16	0,06	0,07	0,15	0,22
Landschaftspflegeheu	45,5	6,1	41,5	1,14	1,49	0,50	0,16	0,19	0,16	0,31
Rohrschwengel	41,4	6,3	43,0	0,87	1,94	0,38	0,17	0,17	0,14	0,50
Weidelgras	46,1	5,6	38,1	1,34	-	-	-	-	0,14	1,39
Straßengrasschnitt	37,1	5,1	33,2	1,49	1,30	2,38	0,63	0,19	0,19	0,88
Steinkohle	72,5	5,6	11,1	1,3	-	-	-	-	0,94	< 0,13
Braunkohle	65,9	4,9	23,0	0,7	-	-	-	-	0,39	< 0,1

können. Auf diese Weise kann ein großer Teil des Schwefelgehaltes im Brennstoff (ca. 40 bis 90 %), je nach Effizienz der Entstaubungseinrichtung, in die Asche eingebunden werden [21] [16].

Chlor (Cl), das ein bedeutender Begleitstoff in Düngemitteln (vor allem in Kaliumdüngern [19]) ist, kommt in gedüngten halmgutartigen Biomassen in deutlich höheren Konzentrationen vor als in Holz von ungedüngten Flächen. Die Chlorgehalte von Holzbrennstoffen liegen mit etwa 0,005 bis 0,02 % der Trockenmasse wesentlich niedriger als bei Getreidestroh (Mittelwerte von 0,2 bis 0,5 % der Trockenmasse). Neben der Düngung ist auch die hohe Mobilität des Chlorids für die hohen Gehaltsschwankungen von halmgutartigen Brennstoffen verantwortlich. So kann das Chlorid durch Niederschläge während der Bodentrocknung von Stroh oder Gras leicht ausgewaschen und der Chlorgehalt dabei um etwa 60 bis 80 % reduziert werden. Deshalb ist ausgewaschenes, sogenanntes „graues“ Stroh dem frischen „gelben“ Stroh bei Nutzung in Feuerungsanlage vorzuziehen, wobei ein aktives Auswaschen wirtschaftlich nicht sinnvoll ist. Eine große Bedeutung hat das Chlor im Brennstoff bei der Bildung von Chlorwasserstoff (HCl) und Dioxinen bzw. Furanen [22] [23]. Chlor kann zwar mit Raten von 40 bis 95 % [23] in die Asche eingebunden werden, jedoch können bei bestimmten chlorreichen Brennstoffen (z. B. Getreidestroh) beispielsweise die HCl-Emissionen zum

Problem werden, sodass Sekundärmaßnahmen ergriffen werden müssen. Zusätzlich wirkt Chlor im Zusammenspiel mit anderen Elementen (v. a. Eralkalimetalle und Schwefeldioxid SO_2) korrosiv in Verbrennungsanlagen. Zudem zählt Chlor zu den aerosolbildenden Elementen [24], was zum Anstieg der Partikelemissionen (Feinstaub) führen kann [21] [16].

Beim Kaliumgehalt in der Biomasse kommt es, ähnlich wie beim Stickstoff, ebenfalls zu deutlichen Unterschieden zwischen meist ungedüngten Holzkulturen und regelmäßig gedüngten Feldkulturen. Dabei befindet sich das Kalium, anders als der Stickstoff, vermehrt in Stängeln und Blättern. Neben der Düngung hat auch der Auswaschungseffekt durch den Regen, ähnlich wie beim Chlor, einen Einfluss auf den Kaliumgehalt [19]. Kalium (und Natrium) können bei der Verbrennung gasförmige Alkalichloride bilden und so bei Korrosionsvorgängen mitwirken wenn diese bei der Abkühlung an Wärmeübertragerflächen oder an Flugstaubpartikeln kondensieren. Dieser Vorgang ist bei OBERNBERGER [23] ausführlich beschrieben. Zudem zählt Kalium, wie auch Chlor, zu den aerosolbildenden Elementen [24]. Weiters erniedrigt das Kalium den Schmelzpunkt der Asche [16].

Der Gehalt an Kalzium (Ca) ist in Holz (ausgenommen bei Rinde) mit 0,3 bis 1 % deutlich höher als bei den meisten Getreide- oder Getreidestroharten. Kalzium wirkt sich im Verbrennungsprozess positiv aus, indem es einerseits den Ascheschmelzpunkt erhöht und andererseits großteils den Schwefels bindet. Der Magnesium(Mg)-Gehalt ist bei Holzbrennstoffen als auch fast bei allen Halmgutbrennstoffen relativ niedrig. Dies gilt ebenso für Phosphor (P). Kalzium (K), Magnesium (Mg) und Phosphor (P) erhöhen den Düngewert in der Asche, wobei diese dann in oxidischer Form vorliegen [16].

2.3.4. Holz, Stroh, Miscanthus und deren Bereitstellungskonzepte für den Pelletsbereich

In der Literatur bei Kaltschmitt [25] wird bei der Herkunft bzw. Generierung der Biomasse einerseits zwischen angebaute Biomasse und andererseits Nebenprodukten, Rückständen und Abfällen unterschieden.

Bei der angebauten Biomasse wiederum wird zwischen forstwirtschaftlich und landwirtschaftlich produzierten Lignocellulosepflanzen, Ölpflanzen und Zucker- und Stärkepflanzen unterschieden. Ersterer ist die Biomasse der Wälder zuzuordnen. Zur Gruppe der landwirtschaftlich produzierten Lignocellulosepflanzen zählen schnellwachsende Baumarten in Kurzumtriebsplantagen (u. a. Pappeln und Weiden), halmgutartige Biomasse wie z. B. Miscanthus, Getreideganzpflanzen und verschiedene Gräser [25].

Dabei ist der Begriff der HALMGUTARTIGEN BIOMASSE nicht klar und eindeutig definiert, sodass sich in unterschiedlichen Sprachräumen verschiedenen Bedeutungen etabliert haben. Im europäischen Brennstoff-Klassifizierungsschema laut Vornorm ÖNORM CEN/TS 14961-1 [26] ist Halmgut mit der Hauptgruppe der „Halmgut und krautartige Brennstoffe“ in Gruppe 2 vergleichbar. Bei THRÄN [27] wird unter halmgutartiger Biomasse nur das resultierende organische Aufkommen aus ein- und mehrjährigen Nicht-Holz-Pflanzen bezeichnet. Im Gegensatz zum mehrjährig gewachsenen Holz werden Halmgutbrennstoffe aus dem saisonalen, maximal einjährigen Aufwuchs oder aus Rückständen und Nebenprodukten jährlicher Feld- und Wiesenkulturen gewonnen [27].

Unter Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen versteht man jene Biomasse, die bei der Herstellung von Produkten mit meist stofflicher Nutzung anfällt und dann zur Nutzung von Bioenergie verwendet wird. Dabei wird wiederum in holzartige (Landschaftspflegeholz, Industrierestholz, Altholz), halmgutartige (Stroh, weitere Erntereste aus der Landwirtschaft, Halmgüter aus der Landschaftspflege) und sonstiger Biomasse eingeteilt [25].

Bereitstellungskette für Holzpellets

Heute wird der Großteil der Holzpellets aus Hobel- und Sägespänen sowie Holzstaub hergestellt. Rohstoffe wie Waldhackgut oder Industriehackgut spielen für die Pelletierung derzeit noch eine untergeordnete Rolle, werden jedoch in Zukunft aufgrund der Begrenztheit der Mengen von Sägespänen mehr an Bedeutung gewinnen. Beispielsweise werden in Italien oder Schweden bereits seit Jahren Energieholzplantagen betrieben, jedoch werden daraus im industriellen Maßstab noch keine Pellets produziert. Außerdem ist zu beachten, dass für die Herstellung von Pellets beim Rohstoff die Rinde entfernt werden muss, um die ÖNORM oder DIN erfüllen zu können (zu hoher Aschegehalt der Rinde). Da Altholz sehr oft mit Fremdstoffen belastet wird, wird dieses auch nicht für die Herstellung von Pellets verwendet [25][28].

Da Sägespäne in der Regel mit einem höheren Wassergehalt vorliegen, müssen diese im Gegensatz zu Hobelspänen und Holzstaub vor der Feinzerkleinerung auf einen Wassergehalt von ca. 10 % getrocknet werden (Bandtrockner, Rohrbündeltrockner, Trommeltrockner). Für die Feinzerkleinerung, wobei für die Produktion von Pellets mit einem Durchmesser von 6 mm eine Soll-Korngröße < 4 mm als Richtwert angegeben wird, werden in der Regel Hammermühlen verwendet. Wird Hackgut als Rohstoff verwendet, so ist eine Grobzerkleinerung vor der Trocknung empfehlenswerter, was ebenfalls mit Hammermühlen durchgeführt wird. Hackgut aus Rundholz wird heute hauptsächlich mit Trommel- oder Scheibenhackern erzeugt [28].

Bereitstellungskette für Getreidestrohpellets

Als Stroh bezeichnet man den bei der landwirtschaftlichen Produktion anfallenden Ernterückstand von mähdruschtauglichen Körnern liefernden Kulturen wie Getreide, Ölsaaten, Körnerleguminosen und Körnermais. Eine teilweise Bergung und Nutzung von Stroh findet in der Regel nur beim Getreidestroh statt, der größte Teil des anfallenden Strohs verbleibt jedoch direkt auf dem Feld. In Abhängigkeit von den jeweiligen Boden- und Klimabedingungen kann dies aus Sicht der Bodenfruchtbarkeit jedoch oft am sinnvollsten sein. Bei stofflicher Nutzung, z. B. als Einstreu, wird Stroh in Form von Mist wieder auf die Anbaufläche ausgebracht und auf diese Weise die Stoffkreisläufe geschlossen. Insgesamt betrachtet kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund von konkurrierender Nutzung (Einstreu, Böschungsbegrünung), Wachstumsbedingungen, Erntebedingungen und räumlicher Verteilung der Anbaugelände die realistischen Potentiale für die energetische Strohnutzung nur bei etwa 10 bis 40 % der insgesamt produzierten Strohmenge liegen [27].

Stroh fällt als Nebenprodukt vor allem in den Sommer- und frühen Herbstmonaten an und wird durch den Mähdröschler im Schwad auf dem Feld abgelegt (absätziges Verfahren). Zum Erntezeitpunkt können Wassergehalte bis zu 40 % vorliegen, wobei aber im Schwad eine Abtrocknung auf Wassergehalte um 15 % möglich sind. Durch Niederschläge ist es auch möglich einen Teil des Chlors (Cl) aus dem liegenden Schwad auszuwaschen. Aufsammlerpresse nehmen das zuvor vom Mähdröschler abgelegte oder vom Schwader geformte Schwad, wobei heute unter den Aufsammlerpresse Quaderballenpresse für kubische Großballen und Rundballenpresse dominieren. Daneben sind auch Vollernte-Verfahren üblich, bei dem der Mäh- und Ballenpressvorgang in einem Aggregat durchgeführt werden. Das Stroh kann in Ballenform gut transportiert und gelagert werden. Im Zuge des Bereitstellungs-konzeptes der Pelletierung müssen durch Ballenauflöser der Zusammenhalt des Materials und die ursprüngliche Dichte wieder hergestellt werden, um den nachfolgenden Schritt der Mahlzerkleinerung durch Schneid- oder Prallzerkleinerungsmühlen (Hammermühlen, Schlagradmühlen) durchführen zu können. Bei der Zerkleinerung wird eine Häcksellänge von bis zu 28 mm angestrebt. Um die Mühle vor Metallverunreinigungen zu schützen, sollte davor eine Metalldetektor angeordnet werden. Um die Mühlen nicht unnötig mit bereits ausreichend zerkleinertem Material zu belasten und Störstoffe wie Steine abzutrennen bzw. Brückenbildung aufgrund

zu großer Teilchengröße bei der Pelletierung zu vermeiden, kann es sinnvoll sein, Siebe oder Zyklone in die Aufbereitungslinien zu integrieren[29][30].

Bereitstellungskette für Miscanthuspellets

Miscanthus (*Miscanthus x giganteus*) wird auch Chiniasschilf genannt und gehört zur Familie der Süßgräser. Das perennierende⁴ C₄-Gras⁵, das aus dem osteuropäischen Raum stammt, kann ab dem dritten Bestandsjahr eine Höhe bis zu 4 m erreichen. Da es keine fertilen Samen bildet, muss es über Klonung vermehrt werden.

Miscanthus hat im Vergleich zu anderen Halmgutbrennstoffen günstige Brennstoffeigenschaften. Dies äußert sich durch seinen geringen Wassergehalt sowie niedrige Asche-, Stickstoff-, Kalium- und Chlorgehalte. Als mehrjährige Pflanze liefert Miscanthus einen Betrag zur Verringerung der Bodenerosion, unterstützt die Fixierung von Kohlenstoff im Boden und hat einen positiven Effekt auf die Bodenfruchtbarkeit. Nach Anbau der Pflanzen (Rhizome) können diese über einen Zeitraum von 20 bis 25 Jahren genutzt werden. Die Ernte erfolgt jährlich von etwa Februar bis Mitte April, wobei dann Trockenmassegehalte von bis zu 80 % erreicht werden können. Aufgrund von Auswaschungserscheinungen durch Niederschläge im Winter verringert sich der Gehalt an Kalium (K) und Chlor (Cl). Je nach Standortbedingungen kann mit einem Ertrag zwischen 10 und 30 t pro Hektar und Jahr gerechnet werden [31].

Miscanthus kann als Mähgut oder als Häckselgut geerntet werden.

Wird Mähgut geerntet - dies kann mit Balkenmähwerken, rotierenden Mähwerken oder vorzugsweise mit einem reihenunabhängigen Maisgebiss durchgeführt werden - so muss die abgelegte Schwad in der Folge wieder von einer Maschine aufgenommen (absätziges Verfahren) und entweder zu Ballen weiterverarbeitet oder gehäckselt werden. Daneben gibt es auch das Vollernte-Verfahren, wo das Mähen und Ballenpressen, ohne Ablage der Schwad am Boden, in einer Maschine durchgeführt wird. Dies hat den Vorteil, dass keine störenden Fremdstoffe (Steine, am Boden liegender Blättermulch) aufgenommen werden können und das Material auch keine Feuchtigkeit des Bodens aufnehmen kann. Das in Ballen verdichtete Material wird nach etwaiger Zwischenlagerung in einer stationären Anlage mittels Ballenauflöser wieder weitgehend in die ursprüngliche Form gebracht. Als nächster Schritt erfolgt die Mahlzerkleinerung in Schneid- oder Prallzerkleinerungsmühlen (Hammermühlen, Schlagradmühlen), um das Halmgut in die für die Pelletierung geeignete Form zu bringen [29][30][32].

Bei der Ernte des Miscanthus als Häckselgut wird ebenfalls in absätziges und kontinuierliche Verfahren unterschieden. Beim absätzigem Verfahren muss die nach dem Mähen am Boden abgelegte Schwad wieder aufgenommen und einem Zerkleinerungsaggregat zugeführt werden. Bei den kontinuierlichen Ernteverfahren (Vollernte-Verfahren), mit den oben beschriebenen Vorteilen, wird z. B. mit einem konventionellen Maishäcksler das Halmgut in einem Schritt geerntet und mittels Häcksler (vorzugsweise Scheibenrad- und Trommelfeldhäcksler, auch Schlegelfeldhäcksler) zerkleinert. Dabei wird bei Miscanthus, wie auch bei Getreide, eine Häcksellänge von bis zu 28 mm angestrebt[30].

Vor dem Pelletiervorgang ist, wie beim Stroh, oft noch eine Metallabscheidung und Klassierung (Siebung, Zyklonabscheider) notwendig um Störstoffe zu entfernen bzw. zu große oder zu kleine Korngrößen abzutrennen [25].

⁴perennierende Pflanze: eine ausdauernde, überwinterte mehrjährige Pflanze

⁵In C₄-Pflanzen entsteht bei der Dunkelreaktion der Photosynthese als erstes Produkt C₄-Dicarbonsäure, im Gegensatz zu C₃-Körpern der C₃-Pflanzen. C₄-Pflanzen haben durch die nicht vorhandene Lichtatmung (Schließung der Spaltöffnungen bei höheren Temperaturen), die für die Pflanze ein Substanzverlust ist, eine höhere Nettostoffproduktion[15].

Pelletierung

Vor der eigentlichen Pelletierung ist gegebenenfalls eine sogenannte Konditionierung des Aufgabematerials notwendig, um die Ausbildung von Haftmechanismen während des Verdichtungsprozesses zu unterstützen. Dabei wird dem bereits aufbereiteten Aufgabematerial direkt vor der Pelletierung in einem Mischer Dampf oder Wasser zugegeben, sodass sich an der Oberfläche der Teilchen ein Flüssigkeitsfilm ausbildet, der Unebenheiten ausgleicht und so die Haftmechanismen verstärkt. Auch die Zugabe von Presshilfsmitteln (z. B. Melasse, Stärke) ist eine weitere Art der Konditionierung, die bei der Produktion von Holzpellets mit einem Durchmesser von 6 mm beinahe unumgänglich ist, um die Qualitätskriterien der Abriebbeständigkeit erfüllen zu können. Dabei ist jedoch die Zugabe von Presshilfsmitteln gemäß ÖNORM M 7135 mit einer Obergrenze von max. 2% [33] beschränkt. Mittlerweile hat die Praxis jedoch gezeigt, dass z. B. durch vier- bis sechswöchige Lagerung von Sägespänen Pelletsqualitäten erreicht werden können, die bei frischem Rohmaterial nur durch Presshilfsmittel zu erreichen sind. Durch Zugabe von Kalk als Zuschlagstoff kann auch das ungünstige Ascheerweichungsverhalten von halmgutartiger Biomasse positiv beeinflusst werden [28][34].

Die aus der Futtermittelindustrie stammende Technologie [28] und für Holzpellets ursprünglich in Kanada entwickelte Pelletiertechnik wurden in den 1990er Jahren den europäischen Marktanforderungen angepasst. Obwohl die Pelletierung auch derzeit vor allem zur Herstellung von Holzpellets eingesetzt wird, werden Biomassepellets inzwischen auch aus den unterschiedlichsten Rohstoffen und für verschiedenartige Einsatzbereiche von der Einzelfeuerstätte über Zentralheizungsanlagen bis hin zum Kraftwerkseinsatz hergestellt [34].

Nach Trocknung, Zerkleinerung und Konditionierung des Rohmaterials wird dieses der Pelletspresse zugeführt. Heute werden für die Holzpelletierung vor allem Ring- oder Flachmatrizenpressen eingesetzt, die einen Lochdurchmesser von 6 oder 8 mm aufweisen. Bei der Ringmatrizenpresse (Abbildung 2.2) wird das zu verpressende Produkt seitlich in einen umlaufenden Matrizenring und von diesem Ring zu zwei feststehenden Kollerrollen gefördert [34].

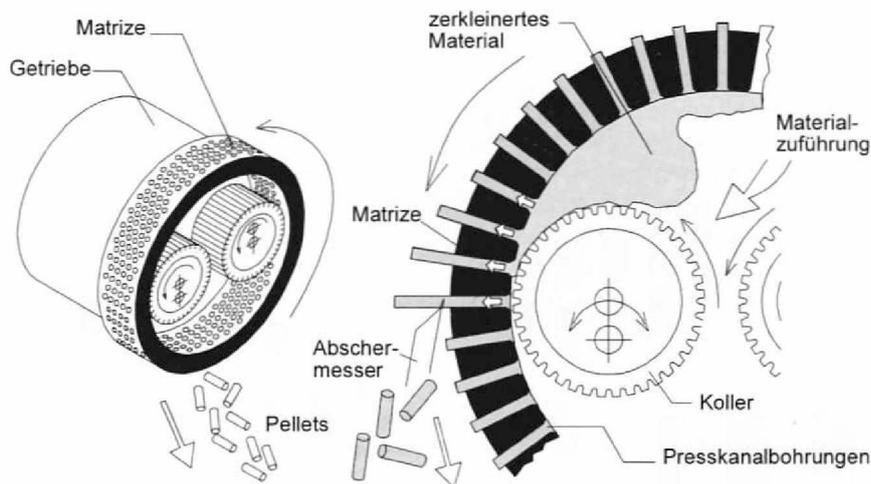


Abbildung 2.2.: Prinzip von Kollergangpressen mit Ringmatrize [34].

Diese pressen dann das Material von innen nach außen durch die Bohrungen der umlaufenden Matrize, wobei ein gleichmäßiger Verschleiß erreicht wird. Dieses Prinzip der Ringmatrize ist das am häufigsten eingesetzte Pelletierverfahren. Bei der Flachmatrizenpresse (Abbildung 2.3) überfahren die Koller mit ihrer profilierten Lauffläche berührungslos die flache Matrizenoberfläche mit den Bohrungen. Dabei rotieren die einzelnen Koller um die eigenen Achse und werden meist passiv

durch die Reibung mit der Matrize bzw. deren Pressgutaufgabe angetrieben [34].

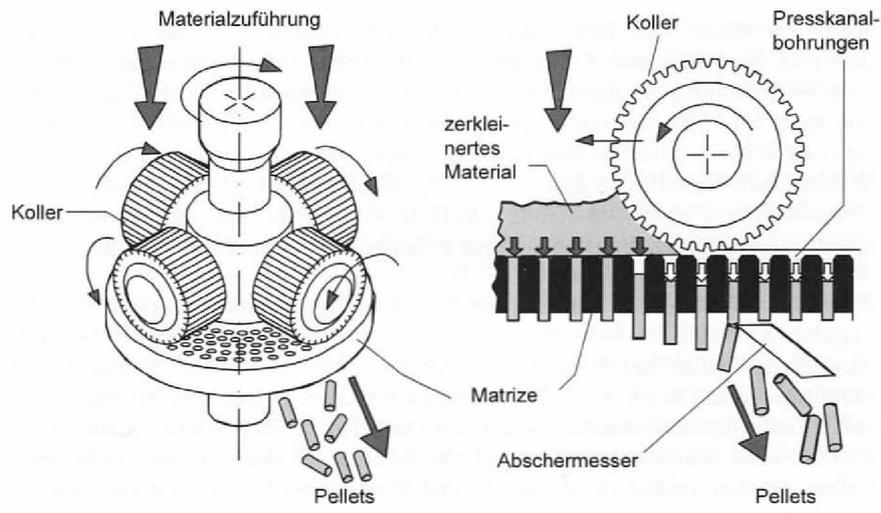


Abbildung 2.3.: Prinzip von Kollergangpressen mit Flachmatrize [34].

Das von oben zugeführte Material wird dabei von den Kollern von oben nach unten durch die Matrizenbohrungen gepresst. Generell soll das eingespeiste Rohmaterial gleichmäßig im Pressraum verteilt werden. Durch das Überrollen des in der Matrize gebildeten Materialteppichs von den Kollern steigt dabei die Druckkraft so weit an, dass der im Kanal befindliche Materialpfropfen weitergeschoben wird. Der aus der Bohrung austretende endlose Materialstrang bricht entweder zufällig ab oder wird von den an der Außenseite der Matrize angeordneten Messern abgeschert. Eine wichtige Kenngröße der Pelletsproduktion ist das Pressverhältnis, welches das Verhältnis zwischen dem Durchmesser der Bohrung und der Länge des Presskanals beschreibt. Dieses Pressverhältnis soll für den jeweiligen Rohstoff angepasst werden und beträgt beispielsweise für holzartige Biomasse wie Hobel- und Sägespäne zwischen 1:3 und 1:5 [35]. Durch die hohe Reibung im Presskanal erhitzt sich das Material, was die natürlichen Haftmechanismen des im Holz enthaltenen Lignins aktiviert und zum Zusammenhaften der Holzfasern führt; das am Pellets als glänzende Oberfläche sichtbare Lignin ist der natürliche „Klebstoff“ [36]. Materialien mit hohen eigenen Bindungskräften erfordern daher kürzere Presskanäle als Materialien mit geringen eigenen Bindungskräften [28][34].

Das italienische Unternehmen ECO TRE SYSTEM entwickelte eine patentierte Pelletierungstechnologie (ETS-Technik) [37] [38], mit der der Energieverbrauch für die Pelletierung je nach Holzart laut Firmenangaben auf Werte zwischen 0,025 und 0,045 kWh/kg FS_P deutlich gesenkt werden kann (bei Ringmatrizenpressen üblicherweise $> 0,06$ kWh/kg FS_P). Die Betriebstemperatur der Pelletspresse erreicht dabei nur 55 bis 60 °C im Gegensatz zur herkömmlichen Pelletstechnologie mit 80 bis 130 °C. Durch diese geringen Temperaturen können die Pellets ohne vorherige Kühlung gelagert werden. Bei dieser Technologie wird der Rohstoff in der Pelletspresse von außen nach innen durch zwei gegeneinander laufende Matrizen gepresst (siehe Abbildung 2.4). Dabei werden die Matrizen simultan angetrieben, sodass zwischen den Matrizen kein Schlupf entsteht. Dadurch verschleßen die Matrizen weniger schnell [28].

2.3.5. Physikalisch-mechanische Merkmale des Pelletbrennstoffes

Die physikalischen Brennstoffmerkmale sind überwiegend „äußerlich sichtbar“ und werden vor allem durch die Ernte- und Aufbereitungstechnik bestimmt. Kenngrößen sind u. a. Abmessungen (Stückigkeit), Größenverteilung der Brennstoffteilchen, Feinanteil, Brückenbildungsneigung

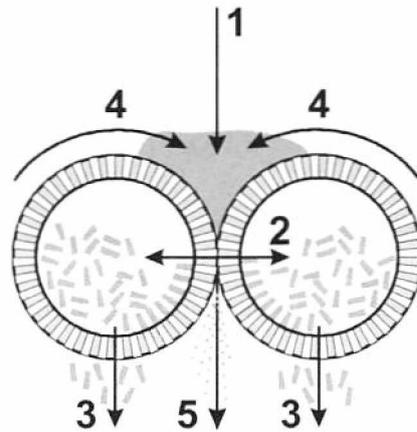


Abbildung 2.4.: Arbeitsprinzip der ETS-Technik durch zwei gegenlaufende Matrizen [28].

Schütt- und Rohdichte und Abriebfestigkeit. Einige physikalische Merkmale spielen eine wichtige Rolle beim Transport, beim Umschlag und bei der Lagerung des Brennstoffs, andere lassen auch Rückschlüsse auf das Brennverhalten und mögliche Schadstoffemissionen zu [39]. Die Anforderungen für beispielsweise Strohpresslinge sind in der ÖNORM C 4002:2010 [40] festgelegt.

Im Folgenden werden einige physikalische Merkmale für den Pelletsbrennstoff diskutiert.

Dimensionen von Pellets (Abmessungen, Stückigkeit)

Die richtige Auswahl der Brennstoffförder- und Feuerungstechnik wird üblicherweise von der Form und Partikelgröße des Brennstoffes bestimmt. So erfordern beispielsweise größere Partikelteilchen robustere Fördereinrichtungen und längere Ausbrandzeiten. Die Durchmesser und Längen von Pellets wurden durch Normung (ÖNORM EN 14961-1 [26]) in Klassen eingeteilt (siehe dazu Tabelle 2.2). Dies erleichtert die Auswahl von Förder- und Feuerungseinrichtungen deutlich. Durch die Erzeugung festerer und abriebfesterer Pellets wurden die Pellets immer länger und dies führte häufig zu Verblockungsproblemen in Fördersystemen. Außen an der Matrize angeordnete Messer längen nun den Pelletsstrang ab, um die definierten Normlängen einzuhalten [28].

Tabelle 2.2.: Bezeichnung der Größenklassen (Durchmesser (D) bzw. Länge (L) von Biomassepellets nach ÖNORM EN 14961-1 [26]

Durchmesserklasse	Durchmesser (D) und Länge (L)	Pelletform
D06	6 mm \pm 1,0 mm und $3,15 \leq L \leq 40$ mm	
D08	8 mm \pm 1,0 mm und $3,15 \leq L \leq 40$ mm	
D10	10 mm \pm 1,0 mm und $3,15 \leq L \leq 40$ mm	
D12	12 mm \pm 1,0 mm und $3,15 \leq L \leq 50$ mm	
D25	25 mm \pm 1,0 mm und $10 \leq L \leq 50$ mm	

Korngrößenverteilung

Die Fließ- und Transporteigenschaften von Schüttgütern werden neben Partikelform und -größe auch durch die Korngrößenverteilung und den Feinanteil (z. B. Hafteigenschaften des Ausgangs-

materials, Art und Menge von Bindemittel, Abrieb) bestimmt. So führen zu große oder zu lange Teilchen beispielsweise zu Blockaden und Schäden an den Förderaggregaten oder senken die Durchsatzleistung. Zu feine Brennstoffanteile können sich entmischen, sodass die Homogenität des Brennstoffs sinkt. Die Bestimmung der Korngrößenverteilung erfolgt dabei mittels Siebung. Dabei wird auch der Feingehalt bestimmt, wobei ein Sieb mit einem Lochdurchmesser von 3,15 bzw. 1 mm (international uneinheitlich) verwendet wird. Dies ist besonders eine für Holzpellets relevante Brennstoffgröße, da der Holzstaub bei einer Lagerbeschickung durch pneumatische Förderung ein Explosionsrisiko darstellt [16].

Abrieb von Pellets

Abriebfestigkeit von hoch verdichteten Presslingen (Pellets, Briketts) wird durch den Zusammenhalt von Brennstoffteilchen im Verbund gewährleistet. Diese Eigenschaft ist besonders dann von Bedeutung, wenn im Rahmen von Transport- und Umschlagprozessen die Pellets einer starken mechanischen Beanspruchung unterliegen, bei der sich kleine Teilchen ablösen und zur Bildung von Staub beitragen [16].

Da es aufgrund eines zu hohen Feinanteils im Lagerraum des Endkunden zur Brückenbildung kommen kann, ist der Abrieb von Pellets einer der wichtigsten Parameter der Pelletsproduktion. Ein zu hoher Feinanteil kann auch zu einer Verstopfung des Schneckenkanals führen. Darüber hinaus steigen die Staubemissionen während der Verbrennung durch einen zu hohen Feinanteil im Brennstoff [28].

Einen großen Einfluss auf die Abriebfestigkeit hat offenbar auch die Materialart selbst, da dessen Zusammensetzung und makromolekulare Struktur die wirksamen Bindungskräfte im Pellet beeinflussen. Deshalb sind beispielsweise Strohpellets meist weniger stabil als Holzpellets [41] [16].

Die Bestimmung der Abriebfestigkeit von Pellets erfolgt laut Norm CEN/TS 15 210-1 [42]. Dabei wird eine gesiebte Pelletprobe in eine rotierende, staubdichte, quaderförmige Prüfkammer mit innen liegendem Prallblech gefüllt und anschließend durch Rotation einer definierten mechanischen Beanspruchung ausgesetzt. Bei anschließender Aussiebung (Rundlochsieb mit 3,15 mm Lochdurchmesser) soll dabei ein Gewichtsanteil von 97,5 % auf dem Sieb verbleiben [16].

2.3.6. Brennstofftechnische Eigenschaften des Pelletbrennstoffes

Die brennstofftechnischen Eigenschaften spielen eine entscheidende Rolle bei der thermo-chemischen Umwandlung. Der Großteil wird mittels Brennstoffanalyse bestimmt, wobei zwischen der Elementaranalyse und der Kurzanalyse unterschieden wird. Werden bei der Elementaranalyse die einzelnen brennstofftechnisch relevanten Elemente Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Stickstoff (N), Schwefel (S), Chlor (Cl) analysiert, so werden bei der Kurzanalyse (auch Immediatanalyse genannt) der Anteil an Wasser, die flüchtigen Bestandteile (Flüchtige), der fixierte Kohlenstoff (Fixed C bzw. C_{fix}) und der Aschegehalt bestimmt [43].

Im Folgenden werden Heiz- und Brennwert, Gehalt an flüchtigen Bestandteilen, Wassergehalt, Aschegehalt, Ascheerweichungsverhalten erläutert.

2.3.6.1. Heizwert und Brennwert

Brennstoffe werden wärmetechnisch anhand ihrer Verbrennungswärme definiert. Da in Biomassebrennstoffen stets Wasser und Wasserstoff enthalten ist, beinhaltet die Verbrennungswärme immer auch Kondensationswärme des beim Verbrennungsprozess entstandenen Wasserdampfes [39].

Der *Brennwert* H_o eines festen Brennstoffes ist definiert als der Quotient aus der durch vollständige Oxidation frei werdende Wärmemenge und der Masse des festen Brennstoffes; dabei muss der bei der Oxidation gebildete Wasser flüssig vorliegen und die Temperaturen von Brennstoff vor der Oxidation und der dabei entstandenen Verbrennungsprodukte müssen den jeweils gleichen festgelegten Wert haben [44]. Da die Kondensationswärme bei Biomassefeuerungen, vor allem im kleinen Leistungsbereich bis 100 kW, nur selten erfolgt, wird im Regelfall nicht der Brennwert H_o , sondern der Heizwert H_u als wärmetechnische Bewertungsgröße herangezogen [39]. Der *Heizwert* H_u eines festen Brennstoffes ist definiert als der Quotient aus der durch vollständige Oxidation frei werdende Wärmemenge und der Masse des festen Brennstoffes, wobei das bei der Oxidation gebildete Wasser dampfförmig vorliegt; die Temperatur des Brennstoffes vor der Oxidation und der dabei entstandenen Verbrennungsprodukte müssen den jeweils gleichen festgelegten Wert haben [44]. Sowohl für den Brennwert als auch den Heizwert gilt laut ÖNORM EN 14918 [45] eine Temperatur von 25 °C.

Der bei der thermo-chemischen Umwandlung des Brennstoffes entstehende Wasserdampf entstammt zum einen aus der chemischen Reaktion des im Brennstoff gebundenen Wasserstoffes mit dem Sauerstoff und zum anderen aus dem im Brennstoff vorhandenen freien und gebundenen Wasser. Für jeden Prozentpunkt Wasserstoff in 1 g Trockensubstanz ergibt sich eine Kondensationswärmemenge von 218,3 J (bei 25 °C). Die Kondensationswärmemenge beim freien und gebundenen Wasser, welches in der Biomasse vorhanden ist, beträgt für einen Prozentpunkt Wassergehalt in 1 g Brennstoff 24,43 J [16].

Ein formaler Zusammenhang zwischen Brennwert H_o und Heizwert H_u wird in Gleichung 2.1 von STOCKINGER ET. AL. [46] angegeben:

$$H_{u(OS)} = H_{o(wf)} \cdot \left(1 - \frac{W}{100}\right) - 2,447 \cdot \frac{W}{100} - \frac{H}{200} \cdot 18,02 \cdot 2,447 \cdot \left(1 - \frac{W}{100}\right) \quad (2.1)$$

Bei absolut trockenen biogenen Festbrennstoffen liegt der Brennwert H_o durchschnittlich um ca. 6 % (Rinde), 7 % (Holz) bzw. 7,5 % (Halmgut) über dem Heizwert. Ist die Biomasse dagegen feucht, so vergrößert sich dieser relative Abstand und der Energiegewinn aus der Rekondensation des Wasserdampfes steigt entsprechend (siehe Abbildung 2.5).

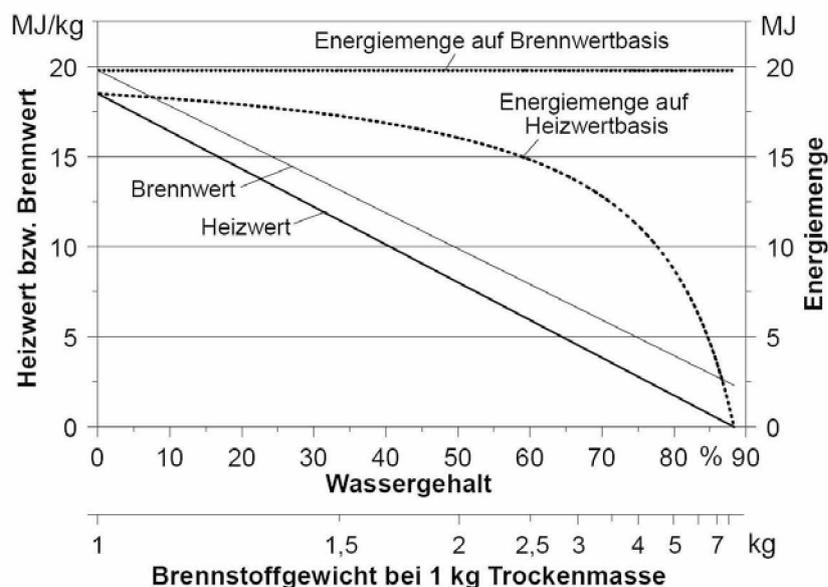


Abbildung 2.5.: Differenz zwischen Heiz- und Brennwert von holzartigem Brennstoff in Abhängigkeit vom Wassergehalt [19].

Die Bestimmung des Brennwertes erfolgt mittels Bombenkalorimeter. Dabei wird der Brennstoff in einer sogenannten Bombe verbrannt, welche sich in einem Wasserbad befindet. Da sich diese Anordnung in einem adiabaten Gefäß befindet, kann aufgrund der Temperaturerhöhung des Wasserbades auf den Brennwert geschlossen werden. Nach dieser experimentellen Bestimmung des Brennwertes H_o kann der Heizwert H_u berechnet werden. Dieses Verfahren wird in der ÖNORM EN 14918 [45] genau beschrieben.

Der Heizwert lässt sich auch aus der Elementarzusammensetzung ermitteln. Da jedoch biogene Brennstoffe sehr hohe Sauerstoffgehalte aufweisen, liegt ein Teil der oxidierbaren Komponenten bereits in Verbindungen mit höheren Oxidationsstufen vor. Daher können diese sauerstoffhaltigen Verbindungen oft nur eingeschränkt unter Energieabgabe weiter oxidiert werden, was folglich nur eine näherungsweise Berechnung des Heizwertes aus der Elementarzusammensetzung zulässt. Oft wird Gleichung 2.2 (Näherungsformel von BOIE [47]) verwendet, welche für biogenen Festbrennstoffe Werte mit einem mittleren Fehler von 4% liefert. Dabei werden die Elementgehalte in Massen-% der Trockenmasse (TM) eingesetzt, den Heizwert im wasserfreien Zustand $H_{u(wf)}$ erhält man in der Einheit MJ/kg [16] [19].

$$H_{u(wf)} = 34,8 \cdot C + 93,9 \cdot H + 10,5 \cdot S + 6,3 \cdot N - 10,8 \cdot O \quad (2.2)$$

Eine neuere Korrelation für den Brennwert wurde von FRIEDL [48] speziell für Biomasseproben aus 122 Datensätzen abgeleitet (Gleichung 2.3), wobei $H_{o(wf)}$ in kJ/kg ausgegeben wird, wenn die Elementgehalte in Massen-% der trockenen Biomasse eingesetzt werden.

$$H_{o(wf)} = 3,55 \cdot C^2 - 232 \cdot C - 2230 \cdot H + 51,2 \cdot C \cdot H + 131 \cdot N + 20600 \quad (2.3)$$

Der Heizwert bezogen auf die wasserfreie Masse $H_{u(wf)}$ liegt bei biogenen Festbrennstoffen normalerweise zwischen 16,5 und 19 MJ/kg. Halmgutbrennstoffe, die durchschnittlich einen um ca. 9% niedrigeren Heizwert als Holzbrennstoffe aufweisen, liegen im Bereich von 16,5 bis 17,5 MJ/kg (siehe Tabelle 2.3). Nadelholz hat aufgrund des höheren Ligningehaltes und zum Teil auch erhöhten Gehalten an Harzen, Wachsen und Fetten einen um ca. 2% höheren Heizwert als Laubholz [16].

2.3.6.2. Flüchtige Bestandteile

Flüchtige Bestandteile (auch kurz nur „Flüchtige“ genannt) sind flüchtige, meist brennbare Produkte, die bei der pyrolytischen Zersetzung durch Erhitzung von Brennstoffen unter definierten Bedingungen entstehen. Da der Anteil je nach Brennstoff sehr verschieden sein kann, ist diese Eigenschaft charakteristisch für jeden Brennstoff [16].

Die Bestimmung der Gehaltes an Flüchtigen Bestandteilen erfolgt durch Erhitzen von 1 g Probe für 7 min auf 900 °C unter Luftabschluss, wobei durch den Masseverlust (abzüglich des Wassergehaltes) auf die Flüchtigen Bestandteile geschlossen werden kann. Diese Messmethode wird in der Norm ÖNORM EN 15148 [49] detailliert beschrieben. Der Gehalt an flüchtigen Bestandteilen lässt beispielsweise auf die Flammenbildung oder Gasbildung bei der Vergasung schließen und beeinflusst somit die Feuerungskonstruktion maßgeblich. So muss für Brennstoffe mit einem hohen Flüchtigengehalt die Zugabe von Sekundärluft deutlich gesteigert werden, um einen vollständigen Gasausbrand zu gewährleisten. Auch erhöht sich bei einem hohen Flüchtigengehalt die Zündfreudigkeit des Brennstoffes [50]. Bei Lignozellulosebrennstoffen liegt der Anteil der flüchtigen Bestandteile am gesamten Brennstoff meist bei 74 bis 83% der Trockenmasse. Dabei liegen Holzbrennstoffe mit durchschnittlich 82% am oberen Bereich und halmgutartige Brennstoffe am untern Ende dieser Bandbreite. Im Vergleich dazu liegen Steinkohlen mit 6 bis 45% bzw. Hart-

und Weichbraunkohlen mit 45 bis 63 % deutlich darunter. In Tabelle 2.3 sind die Anteile an flüchtigen Bestandteilen der meisten festen biogenen Brennstoffe, sowie als Vergleich auch Kohlen, dargestellt [16].

2.3.6.3. Wassergehalt

Der Wassergehalt w ist der Anteil an Wasser, der sich unter definierten Bedingungen aus dem Brennstoff entfernen lässt. Dabei kann noch in grobe und hygroskopische Feuchte unterschieden werden, wobei die grobe Feuchtigkeit durch Liegen des Brennstoffes an der Luft bei Raumtemperatur verdunstet werden kann [43]. Wie in Gleichung 2.4 dargestellt ist der Wassergehalt definiert als Quotient aus der Masse an Wasser m_W und der Gesamtmasse, dies ist die Summe der Masse an Wasser m_W und der trockenen Biomasse m_B . Der Bezugswert ist also die Frischmasse.

$$w = \frac{m_W}{m_B + m_W} = \frac{u}{1 + u} \quad (2.4)$$

Anstelle des Wassergehaltes wird in der Forstwirtschaft häufig auch der Begriff der Brennstoff-Feuchte u verwendet. Im Gegensatz zum Wassergehalt wird die Brennstoff-Feuchte auf die Trockenmasse bezogen. Somit wird die Brennstoff-Feuchte, wie in Gleichung 2.5 zu sehen ist, aus dem Quotienten der Masse an Wasser m_W und der trockenen Biomasse m_B (Trockenmasse oder Trockensubstanz) gebildet.

$$u = \frac{m_W}{m_B} = \frac{w}{1 - w} \quad (2.5)$$

Gleichungen 2.4 und 2.5 beinhalten auch die Umrechnung von Feuchte in Wassergehalt bzw. umgekehrt. Demnach entspricht ein Wassergehalt von z. B. 50 % einer Brennstoff-Feuchte von 100 %, wobei bei der Angabe der Feuchte auch Werte von über 100 % möglich sind.

Bei der energetischen Nutzung der Biomasse hat sich international der Wassergehalt durchgesetzt [51]. Die Bestimmung des Wassergehaltes w erfolgt durch Trocknung der Probe in einem Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz und ist in der Norm ÖNORM EN 14774-1 [52] genau beschrieben.

Der Wassergehalt w hat auch einen deutlichen Einfluss auf den Heizwert H_u biogener Festbrennstoffe, was mit Gleichung 2.6 beschrieben wird. In Abbildung 2.5 ist dieser Zusammenhang grafisch dargestellt.

$$H_{u(w)} = \frac{H_{u(wf)} \cdot (100 - W) - 2,443W}{100} \quad (2.6)$$

Die Variable $H_{u(wf)}$ bezeichnet den Heizwert H_u der biogenen Trockenmasse im wasserfreien Zustand und die Konstante 2,443 ist die Verdampfungswärme des Wassers, ebenfalls in MJ/kg, bezogen auf 25 °C.

Waldfrisches Holz hat einen Wassergehalt w (je nach Baumart, Alter und Jahreszeit) von 45 bis 60 %, lufttrockenes Holz im Gleichgewichtszustand liegt je nach Jahreszeit im Bereich von 10 bis 20 %. Im Vergleich dazu wird abgestorbenes oder bodengetrocknetes Halmgut mit einem Wassergehalt w von maximal 15 % eingelagert [16] [53].

2.3.6.4. Aschegehalt

Der Aschegehalt ist der bei der Verbrennung eines Festbrennstoffes zurückbleibende anorganische Rückstand. Er ist ein Maß für den Mineralstoffgehalt eines Brennstoffes. Dieser Rückstand

muss nicht nur vom Brennstoff selbst kommen, Anteile davon können auch von Verschmutzungen während des Durchlaufens der Bereitstellungskette stammen. Die Bestimmung des Aschegehaltes erfolgt durch Erhitzen der Probe mittels genau definiertem Gradienten auf eine Temperatur von 550 °C, welche über mindestens 120 Minuten beizubehalten ist. Dieses Verfahren ist in ÖNORMEN 14775 genau beschrieben [54]. Früher wurde die für Kohlebrennstoffe angewandte Messvorschrift nach DIN 51719 [55] mit einer Temperatur von 815 °C angewendet, wodurch es zu Abweichungen kommen kann. Die Ursache ist mit dem Verlust von flüchtigen anorganischen Verbindungen, weitere Oxidationen anorganischer Verbindungen (höhere Oxidationsstufe) oder durch Aufspaltung von Carbonaten mit Freisetzung von CO₂ zu begründen, wobei die Abweichungen zwischen Null und mehreren Prozentpunkten ausmachen können [19].

Holz (mit Rinde) hat von allen biogenen Festbrennstoffen mit ca. 0,5 % der Trockenmasse (TM) den geringsten Aschegehalt, wobei größere Überschreitungen dieses Wertes meist auf Sekundärverunreinigungen zurückzuführen sind. Holz aus Kurzumtriebsplantagen (z. B. Pappeln, Weiden) liegt aufgrund des relativ hohen Rindenanteils beim jungen Holz mit ca. 2 % Aschegehalt deutlich darüber. Der Aschegehalt von Halmgutbrennstoffen hingegen beginnt erst bei einem Wert von 2 %, der Großteil der Halmgutbrennstoffe liegt im Bereich zwischen 4 und 7 % (siehe Tabelle 2.3). Wie in Abbildung 2.6 zu sehen ist, beeinflusst der Aschegehalt auch den Heizwert [16].

Abbildung 2.6.: Einfluss des Aschegehaltes auf den Heizwert von Holz- und Halmgutbrennstoffen (jeweils bezogen auch die Trockenmassen TM) [19].

Neben dem Einfluss auf die technische Auslegung einer Feuerungsanlage hat der Aschegehalt auch Auswirkungen auf die Schadstoffemissionen. So steigen häufig die freigesetzten Staubfrachten mit zunehmendem Aschegehalt. Außerdem erhöht sich der Aufwand für die Entaschung und die Reinigung der Wärmeübertragerflächen.

In der bei der Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen anfallenden Asche sind auch bedeutende Mengen an Nährstoffen enthalten. Für Holz (Grobasche) sind dies vor allem CaO (42 %), K₂O (6 %), MgO (6 %), P₂O₅ (2,5 %) und kleine Anteile an Na₂O. Der Rest besteht im wesentlichen aus SiO₂ (25 %), Al₂O₃ (5 %) und geringeren Gehalten an CO₂, Fe₂O₃, MnO, SO₃ sowie Spuren von Schwermetallen. Die größten Unterschiede zu Strohaschen ergeben sich durch die Gehalte an CaO (8 %), K₂O (14 %), sowie SiO₂ (54 %) [16]. In Abbildung 2.7 sind die typischen Aschezusammensetzungen von Weizenstroh, Fichtenholz und Steinkohle in oxidischer Form aus einer anderen Literaturquelle (OTTMANN [56]) dargestellt.

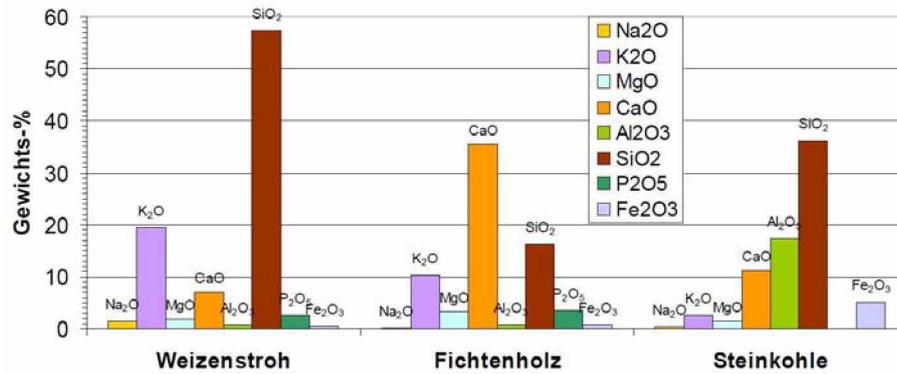


Abbildung 2.7.: Typische Aschezusammensetzung von Weizenstroh, Fichtenholz und Kohle, dargestellt als Oxide [56]

2.3.6.5. Ascheerweichungsverhalten

Aufgrund der hohen Temperaturen, die bei der thermo-chemischen Umwandlung vorherrschen, kann es im Glutbett zu physikalischen Veränderungen der Asche kommen. Abhängig vom Temperaturniveau und der elementaren Zusammensetzung der Asche, ist ein Verkleben („Versintern“) bis zum völligen Aufschmelzen der Aschepartikel möglich. In Konversionsanlagen kann dies zu erheblichen Problemen bis hin zum völligen Erliegen des Prozesses führen. Deshalb zählt das Ascheerweichungs- oder Schmelzverhalten auch zu den brennstoffspezifischen Merkmalen [16].

Die Bestimmung des Ascheerweichungsverhaltens erfolgt durch experimentelle Bestimmung charakteristischer Temperaturen und ist in der Norm ÖNORM CEN/TS15370-1 [57] genau beschrieben. Dabei wird nach dem Veraschen der Probe laut ÖNORMEN 14775 [54] die Asche gemahlen und mithilfe eines Bindemittels (Wasser, Dextrin oder Ethanol) ein zylinderförmiger Probenkörper von 3 bis 5 mm Höhe und gleichem Durchmesser gepresst. Durch Erhöhen der Temperatur durchläuft dieser Probenkörper charakteristische Phasen der Veränderung, welche mittels Digitalkamera festgehalten und durch eine spezielle Software ausgewertet, klassifiziert und Temperaturen zugeordnet werden. Dies sind *Beginn der Schrumpfung*, die *Erweichungstemperatur*, die *Halbkugeltemperatur* und die *Fließtemperatur* [16].

Der *Beginn der Schrumpfung* (engl. Shrinkage Starting Temperature, SST) ist definiert als Flächenreduktion auf unter 95 % der Ausgangsfläche bei 550 °C. Ursache sind z. B. die Freisetzung von Kohlendioxid, flüchtigen Alkaliverbindungen und/oder Sintervorgänge. Bei der *Erweichungstemperatur* (engl. Deformation Temperature, DT) treten infolge des Schmelzens erste Anzeichen einer Abrundung von Kanten des Probenkörpers auf. Die *Halbkugeltemperatur* (engl. Hemisphere Temperature, HT) kennzeichnet die annähernd halbkugelförmiger Form des Probenkörpers und bei der *Fließtemperatur* (engl. Flow Temperature, FT) ist die erweichte Asche auf der sie tragenden Platte in einer Schicht ausgebreitet, deren Höhe die halbe Höhe des Probenkörpers bei der Halbkugeltemperatur entspricht. Die Formen der Ascheprobenkörper sind in Abbildung 2.8 dargestellt [16].

Diese oben angeführte Definition in der neuen Bestimmungsmethode für feste Biomassebrennstoffe weicht geringfügig von der bisher auch bei fester Biomasse angewendeten Prüfnorm DIN 51730 für Kohlebrennstoffe [58] ab. Dort werden die charakteristischen Temperaturen als Erweichungstemperatur (Kennbuchstabe A), Sphärischtemperatur (Kennbuchstabe B), Halbkugeltemperatur (Kennbuchstabe C), Fließtemperatur (Kennbuchstabe D) und auch Erweichungsbereich bzw. Schmelzbereich definiert. In Tabelle 2.3 sind die charakteristischen Temperaturen vieler fester Biobrennstoffe, sowie als Vergleich auch von Stein- und Braunkohle, dargestellt.

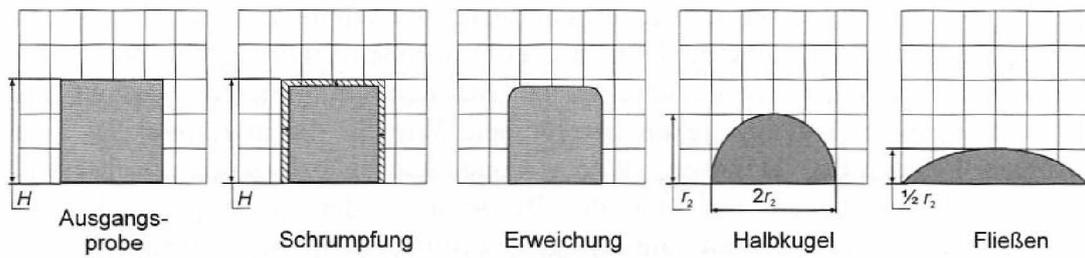


Abbildung 2.8.: Zylindrischer Asche-Probenkörper mit charakteristischen Phasen während des Schmelzvorganges gemäß ÖNORM CEN/TS 15370-1 [57] (Die Ausgangsform entspricht der Größe bei 550 °C; H Höhe der Probe, r_2 Radius der Halbkugel).

Tabelle 2.3.: Verbrennungstechnische Kenndaten von naturbelassenen Biomasse-Festbrennstoffen (jeweils bezogen auf Trockensubstanz) im Vergleich zu Stein- und Braunkohle [16] (Mittelwerte nach [19], Kohle nach [20], Bestimmung der Ascheerweichungspunkte nach DIN 51 730 [58]).

Brennstoff/ Brennstoffart	Heizwert in MJ/kg	Brennwert in MJ/kg	Aschegehalt in %	flüchtige Bestandteile in %	Ascheerweichung ^b		
					DT ^a in °C	HT ^a in °C	FT ^a in °C
Steinkohle	29,7 ^c		8,3	34,7	1250		
Braunkohle	20,6 ^c		5,1	52,1	1050		
Fichtenholz (mit Rinde)	18,8	20,2	0,6	82,9	1426		1583
Buchenholz (mit Rinde)	18,4	19,7	0,5	84,0			
Pappelholz (Kurzumtrieb)	18,5	19,8	1,8	81,2	1335		1475
Weidenholz (Kurzumtrieb)	18,4	19,7	2,0	80,3	1283		1490
Rinde (Nadelholz)	19,2	20,4	3,8	77,2	1440	1460	1490
Roggenstroh	17,4	18,5	4,8	76,4	1002	1147	1188
Weizenstroh	17,2	18,5	5,7	77,0	998	1246	1302
Triticalestroh	17,1	18,3	5,9	75,2	911	1125	1167
Gerstenstroh	17,5	18,5	4,8	77,3	980	1113	1173
Rapsstroh	17,1	18,1	6,2	75,8	1273		1403
Maisstroh	17,7	18,9	6,7	76,8	1050	1120	1140
Sonnenblumenstroh	15,8	16,9	12,2	72,7	839	1178	1270
Hanfstroh	17,0	18,2	4,8	81,4	1336	1420	1456
Roggenganzpflanzen	17,7	19,0	4,2	79,1			
Weizenganzpflanzen	17,1	18,7	4,1	77,6	977	1155	1207
Triticaleganzpflanzen	17,0	18,4	4,4	78,2	833	982	1019
Roggenkörner	17,1	18,4	2,0	80,9	710		810
Weizenkörner	17,0	18,4	2,7	80,0	687	887	933
Triticalkörner	16,9	18,2	2,1	81,0	730	795	840
Rapskörner	26,5		4,6	85,2			
Miscanthus	17,6	19,1	3,9	77,6	973	1097	1170
Landschaftspflegeheu	17,4	18,9	5,7	75,4	1061		1228
Rohrschwengel	16,4	17,8	8,5	72,0	869	1197	1233
Weidelgras	16,5	18,0	8,8	74,8			
Straßengrasschnitt	14,1	15,2	23,1	61,7	1200	1270	1286

^aDT Erweichungs(„deformation“-) temperatur, HT Halbkugel(„hemisphere“-) temperatur, FT Fließ(„flow“-) temperatur (nach CEN/TS 15370-1 [57]); ^bhier: Bestimmung nach DIN 51730 [58], Abweichung zu Ergebnissen nach neuer Standardmethode sich möglich; ^ctypischer Wassergehalt Steinkohle 5%; Rohbraunkohle 50% [20]

Wie schon eingangs erwähnt besteht bei Brennstoffen mit niedrigen Ascheerweichungstemperaturen ein hohes Risiko von Anbackungen und Ablagerungen in Konversionsanlagen, die zu Störungen, Betriebsunterbrechungen, Veränderungen bei der Verbrennungsluftzufuhr etc. führen können und nur durch aufwändige Zusatzeinrichtungen wie z. B. wassergekühlte Rostsysteme, Bewegungselemente im Glutbett, Aschebrecher oder durch Brennstoffadditivierung vermieden werden. Des Weiteren wird die Hochtemperaturkorrosion begünstigt [16].

Während von Holz und Rinde die Erweichungstemperatur (DT) mit ca. 1300 bis über 1400 °C aus technischer Sicht in Konversionsanlagen unkritisch ist, liegt diese beim Getreidestroh oft zwischen 900 bis 950 °C [16].

Die Ascheerweichungstemperatur kann auch, ähnlich wie der Heizwert, näherungsweise aus dem Gehalt der relevanten Elemente berechnet werden. Dabei werden in die Formeln für die Erweichungstemperatur DT (Glg. 2.7) und Fließtemperatur FT (Glg. 2.8) die Anteile an Kalium (K), Kalzium (Ca) und Magnesium (Mg) in % der Brennstofftrockenmasse eingesetzt [19].

$$DT = 1172 - 53,9K + 252,7Ca - 788,4Mg \quad (2.7)$$

$$FT = 1369 - 43,4K + 192,7Ca - 698Mg \quad (2.8)$$

Daraus kann abgeleitet werden, dass durch Verwendung von kalziumhaltigen (z. B. dolomitischer Kalk) und alkalien-bindenden Hilfsstoffen (z. B. Kaolin) der Ascheerweichungspunkt gesteigert werden kann [59]. Auch durch Auswaschung des Kaliums durch Niederschläge während der Bodontrockung von z. B. Stroh kann eine Erhöhung der Erweichungstemperatur der Asche von 100 bis 200 °C erreicht werden [19].

In der am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik durchgeführten Dissertation von POPPENWIMMER [60] wurde der Einfluss von Zuschlagsstoffen auf das Ascheschmelzverhalten untersucht. Dabei konnte durch Beigabe von Melasse und Hochofenschlacke neben positiver Auswirkung auf die Ascheerweichungstemperatur auch eine vermehrte sekundäre Pyrolyse und dadurch eine verringerte Teerbildung festgestellt werden.

3. Grundlagen der Feststoffverbrennung und Feuerungstechnik

Biogene Festbrennstoffe werden neben der Umwandlung in Sekundärenergieträger zum größten Teil direkt durch vollständige Verbrennung (z. B. in Kleinf Feuerungsanlagen) in die End- bzw. Nutzenergie (z. B. Wärme) umgewandelt [61]. In diesem Kapitel sollen die dabei ablaufenden thermochemischen Umwandlungsprozesse betrachtet werden. Weiters werden hier auch die Schadstoffbildungsmechanismen zur Entstehung der Emissionen diskutiert und die Feuerungsanlagentechnik speziell für den Bereich der Kleinf Feuerungsanlagen genauer durchleuchtet.

3.1. Definitionen

In diesem Abschnitt werden zum Verständnis der Terminologie und der Zusammenhänge einige wichtige Begriffe erläutert.

3.1.1. Luftüberschusszahl λ

Um die vollständige Oxidation aller im Brennstoff enthaltenen oxidierbaren organischen Verbindungen zu gewährleisten, wird die Verbrennungsluft, d.h. mehr Sauerstoff, dem Verbrennungsprozess üblicherweise im Überschuss zugeführt. Der Grad des Luftüberschusses erfolgt durch Beschreibung mittel Luftüberschusszahl λ . Wie in Gleichung 3.1 dargestellt, ist die Luftüberschusszahl λ definiert als das Verhältnis zwischen der insgesamt zugeführten Luftmenge $m_{Luft,ges}$ zu der für die vollständige Oxidation stöchiometrisch minimal benötigten Luftmenge $m_{Luft,min}$.

$$\lambda = \frac{m_{Luft,ges}}{m_{Luft,min}} \quad (3.1)$$

Somit muss die Luftüberschusszahl λ für eine vollständige Oxidation mindestens 1 betragen. In der Praxis jedoch wird bei Holzfeuerungen eine Luftüberschusszahl λ zwischen 1,5 und 2,5 eingestellt. Diese Einstellung ist u.a. deshalb notwendig, da bei der Verbrennung von Feststoffen in Festbettfeuerungen keine optimale Vermischung des Brennstoffes bzw. den gasförmigen Zwischenprodukten mit der Verbrennungsluft möglich ist.

Bei thermo-chemischen Prozessen mit einer Luftüberschusszahl λ zwischen 0 und 1 spricht man hingegen von einer Vergasung. Wird kein Sauerstoff zugeführt, ist die Luftüberschusszahl λ gleich 0, wobei genau genommen auch hier Sauerstoff aus dem Brennstoff selbst vorhanden ist. Es ist hier auch anzumerken, dass auch bei jedem Verbrennungsvorgang nach der Trocknung des Brennstoffes Pyrolysevorgänge stattfinden [61].

3.1.2. Feuerungstechnischer Wirkungsgrad η_f

Beim feuerungstechnische Wirkungsgrad η_f (Gleichung 3.2) werden die Abgasverluste der Feuerung in thermischen Verlusten V_{therm} , in Form von fühlbarer Wärme im Abgas, und chemischen

Verlusten V_{chem} , in Form von unverbrannten Abgaskomponenten, berücksichtigt. Aufgrund von uneinheitlicher Abgrenzung in der Literatur werden jedoch oftmals auch die Verluste an unverbranntem Kohlenstoff (z. B. Flugkoksverluste) bei der Berechnung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades miteinbezogen. Die Verluste durch Strahlung und Konvektion oder Stillstandsverluste sind bei dieser Definition jedoch nicht zu berücksichtigen. Beide Einflussgrößen, sowohl thermische als auch chemische Verluste, werden dabei immer auf den Heizwert H_u des eingesetzten Brennstoffes bezogen [62].

$$\eta_f = 1 - V_{therm} - V_{chem} \quad (3.2)$$

Die thermische Verluste V_{therm} sind von der spezifischen Abgaswärme, von der Abgasmenge und vor allem von der Temperaturdifferenz zwischen Abgas- und Umgebungstemperatur abhängig. Wie in Gleichung 3.3 dargestellt werden die thermischen Verluste V_{therm} durch Bildung des Quotienten aus der Enthalpiedifferenz ΔH_A zwischen Abgas und Umgebungsluft und dem Heizwert H_u des Brennstoffes berechnet [62].

$$V_{therm} = \frac{\Delta H_A}{H_u} \quad (3.3)$$

Die thermischen Verluste V_{therm} können auch (für Holzfeuerung, $CO < 0,5$ Vol.-%, $CO_2 > 5$ Vol.-%, Abgastemperatur < 400 °C) mit der praxisüblichen Zahlenwertgleichung 3.4 ermittelt werden. Dabei ist u die Feuchte des Holzbrennstoffes und wird in % in die Gleichung 3.4 eingesetzt.

$$V_{therm} = 0,01 \cdot \frac{(T_A - T_U) \cdot [1,39 + \frac{122}{CO_2 + CO} + 0,02 \cdot u]}{\frac{H_{u(wf)}}{100} - 0,25 \cdot u} \quad (3.4)$$

Die Berechnung der chemischen Verluste V_{chem} wird gemäß Gleichung 3.5 durchgeführt. Dabei sind $H_{u(wf)}$ der Heizwert des absolut trockenen Brennstoffes und H_{CO} die Bildungsenthalpie des Kohlenstoffmonoxides (beide in MJ/kg); die Konzentrationen von Kohlenstoffmonoxid CO und Kohlenstoffdioxid CO_2 im Abgas werden in Vol.-% eingesetzt [62].

$$V_{chem} = 0,01 \frac{\Delta H_{CO}}{H_{u(wf)}} \cdot \frac{CO}{CO_2 + CO} \quad (3.5)$$

Die chemischen Verluste V_{chem} können auch (für Holzfeuerung, $CO < 0,5$ Vol.-%, $CO_2 > 5$ Vol.-%, Abgastemperatur < 400 °C) mit der Zahlenwertgleichung 3.6 ermittelt werden. Dabei ist u die Feuchte des Holzbrennstoffes und wird in % in die Gleichung 3.6 eingesetzt [62].

$$V_{chem} = 0,01 \cdot \frac{11800}{\frac{H_{u(wf)}}{100} - 0,25 \cdot u} \cdot \frac{CO}{CO_2 + CO} \quad (3.6)$$

Wird anstelle der Kohlenstoffdioxid-Konzentration CO_2 die Sauerstoff-Konzentration O_2 gemessen, kann mit Gleichung 3.7 auf CO_2 umgerechnet werden [62].

$$CO_2 = 0,98 \cdot (21 - O_2) - 0,61 \cdot CO \quad (3.7)$$

3.1.3. Kesselwirkungsgrad η_k

Der Kesselwirkungsgrad η_k setzt die mit dem Wärmeträgermedium (z. B. Wasser, Thermoöl) abgeführte Wärmemenge mit der zugeführten Brennstoffenergie in Beziehung. Dabei werden neben den in den feuerungstechnischen Wirkungsgrad einfließenden Abgas- und chemischen Verlusten auch die Strahlungs- und Rostverluste berücksichtigt. Strahlungsverluste entstehen, indem Wärme aus der Feuerung durch die Anlage hindurch an die Umgebung abgegeben wird. Dies ist meist durch eine warme Anlagenoberfläche zu bemerken. Rostverluste entstehen durch unverbrannte Brennstoffanteile, welche sich dann in der Asche (inkl. Energieinhalt der Asche [63]) wiederfinden. Verluste durch unverbrannten Kohlenstoff im Abgas bzw. Ablagerungen dessen im Abgasweg (z. B. Flugkoksverluste, Ruß) sind ebenfalls zu den Rostverlusten zu zählen. Aufgrund der beiden zusätzlichen Verluste liegt der Kesselwirkungsgrad stets niedriger als der feuerungstechnische Wirkungsgrad. Jedoch können durch eine gute Wärmedämmung des Verbrennungsaggregates und durch einen guten Ascheausbrand diese Verluste deutlich reduziert werden, sodass der Kesselwirkungsgrad dem feuerungstechnischen Wirkungsgrad sehr nahe kommt [62].

3.1.4. Nutzungsgrad η_n

Hier wird ebenfalls der Quotient aus abgeführter Wärmeenergie und zugeführter Brennstoffenergie gebildet. Anders als beim feuerungstechnischen Wirkungsgrad η_f und beim Kesselwirkungsgrad η_k wird hier nicht ein kurzer Moment, quasi eine Leistung betrachtet, sondern ein sehr langer Beobachtungszeitraum. Dies bedingt natürlich, dass verschiedenste Lastzustände des Kessels, wie Vollast, Teillast, Abfahr- und Anfahrvorgänge, Ladebetrieb, Gluterhaltung und Bereitschaftsbetrieb mit berücksichtigt werden. Werden weitere Verluste, wie Speicher- und Verteilungsverluste mit berücksichtigt, so spricht man vom Anlagenwirkungsgrad. Als wesentliche Kenngröße wird der Nutzungsgrad einer energietechnischer Anlage als „Güte“ bezeichnet [62].

3.1.5. Freistrahler

Die Freistrahlertheorie ist ein wesentliches Element zur Beschreibung von Vermischungsvorgängen wie sie vor allem bei in der Verbrennung (z. B. Luft oder gasförmiger Brennstoff in einer Ofenatmosphäre) zur Anwendung kommen. Ein Freistrahler entsteht durch Ausströmen eines Fluids aus einer Düse in eine unbegrenzte Umgebung mit geringerer Geschwindigkeit (z. B. in eine ruhende Umgebung). Das Umgebungsmedium wird durch Impulsaustausch in Bewegung versetzt, die Strahlsubstanz wird verzögert. Stromabwärts verbreitert sich der Strahl durch Erfassen von mehr und mehr Umgebungsluft, die strömende Masse erhöht sich, die Geschwindigkeit nimmt jedoch ab (siehe Abbildung 3.1).

Da der Impulsstrom konstant bleibt, entspricht jener über den gesamten Querschnitt an einer Stelle x dem Impulsstrom am Düsenaustritt. In der industriellen Anwendung tritt vorwiegend der turbulente Freistrahler auf. Dieser stellt sich ein, wenn die Bedingung

$$Re_a = \frac{c_0 \cdot d_a}{\nu_a} \geq 1500 \quad (3.8)$$

gilt. Dabei ist Re_a die Reynoldszahl am Düsenaustritt, c_0 die Düsenaustrittsgeschwindigkeit, d_a der Düsendurchmesser und ν_a die kinematische Viskosität des Fluids am Düsenaustritt. [65]

In [65] wird die Ausbildung des Freistrahlers der Länge nach in 3 Zonen eingeteilt:

Der *Kernbereich* vom Düsenaustritt bis etwa $x \approx 4 \cdot d_a$ (bei ECK [64] wird diese Länge mit 4 bis 4,74-fach des Strahldurchmessers angegeben, bei NEUNASS [66] wurde bei Versuchen der 5-

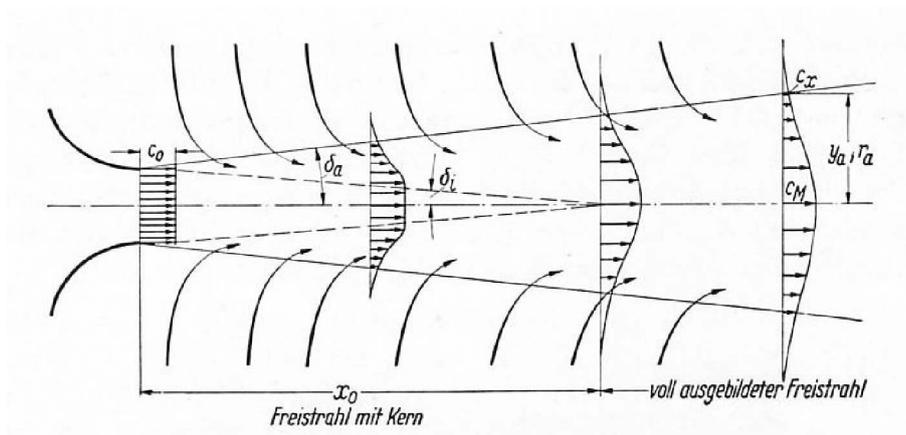


Abbildung 3.1.: Entwicklung eines Freistrahles [64]

fache Strahldurchmesser ermittelt) hat Austrittsgeschwindigkeit c_0 . Im Falle einer runden Düse hat dieser Kernbereich die Form eines Kegels.

Der *Übergangsbereich* schließt sich an den Kernbereich an und erreicht eine Länge bis etwa $x \approx 8 \cdot d_a$. Der Strahl verbreitert sich und die Geschwindigkeit nimmt insbesondere auf der Strahlachse durch Impulsaustausch ab.

Der *Ähnlichkeitsbereich* erstreckt sich bis zu $x \approx (100 \text{ bis } 200) \cdot d_a$ und ist für industrielle Anwendungen sehr wichtig. Hier sind alle Geschwindigkeitsprofile über den Strahlquerschnitt ähnlich und können für jeden Abstand von der Düse mit der selben Funktion beschrieben werden.

Für die Berechnung der Strahlbreite $y_a(x)$ (Glg. 3.9) und der mittleren Geschwindigkeiten $c_m(x)$ (Glg. 3.10) im Freistrah, jeweils an der Stelle x , werden vom Institut für ENERGIEVERFAHRENS-TECHNIK UND BRENNSTOFFTECHNIK der TU-Clausthal [65] folgende mathematische Zusammenhänge angegeben:

$$y_a(x) = \frac{d_a}{2} \cdot 0,32 \cdot \left(\frac{x}{d_a} + 0,6 \right) \quad (3.9)$$

Vorerst wird die mittlere Impulsgeschwindigkeit $c_i(x)$ an der Stelle x ermittelt:

$$c_i(x) = c_0 \cdot \frac{\frac{d_a}{2}}{y_a(x)} \quad (3.10)$$

Die mittlere Massengeschwindigkeit kann über die Gleichung 3.11 ermittelt werden:

$$\frac{c_m(x)}{c_i(x)} \approx 1,26 \quad (3.11)$$

Von ECK [67] wurden folgende mathematische Zusammenhänge für Strahlausbreitung $r_a(x)$ (Glg. 3.12 und 3.13) (für $c/c_m = 0,5$) und Mittelgeschwindigkeit $c_m(x)$ publiziert:

$$r_a = m \cdot \sqrt{\frac{\ln 2}{2}} \cdot x \quad (3.12)$$

beziehungsweise

$$r_a = d_a \cdot \sqrt{\frac{\ln 2}{2}} \cdot \frac{x}{x_0} \quad (3.13)$$

Die Mittelgeschwindigkeit wird laut Gleichung 3.14 ermittelt

$$c_m(x) = c_0 \cdot \frac{x_0}{x} \quad (3.14)$$

wobei für die Kernlänge x_0 folgende Beziehung gemäß Gleichung 3.15 gilt (für Turbulenz m^1 : $0,1 < m < 0,3$):

$$x_0 = \frac{d_a}{m} \quad (3.15)$$

In Versuchen hat RUMMEL (zitiert in ECK [67]) die oben dargestellten Gesetzmäßigkeiten überprüft und dabei die Reichweite eines Strahles, bis eine bestimmte Mittelgeschwindigkeit erreicht ist, in Diagrammen dargestellt. In Abbildung 3.2 können die Reichweiten für die Geschwindigkeitsgrenzen von 1 m/s und 2 m/s in Abhängigkeit von Düsendurchmesser und Austrittsgeschwindigkeit ermittelt werden.

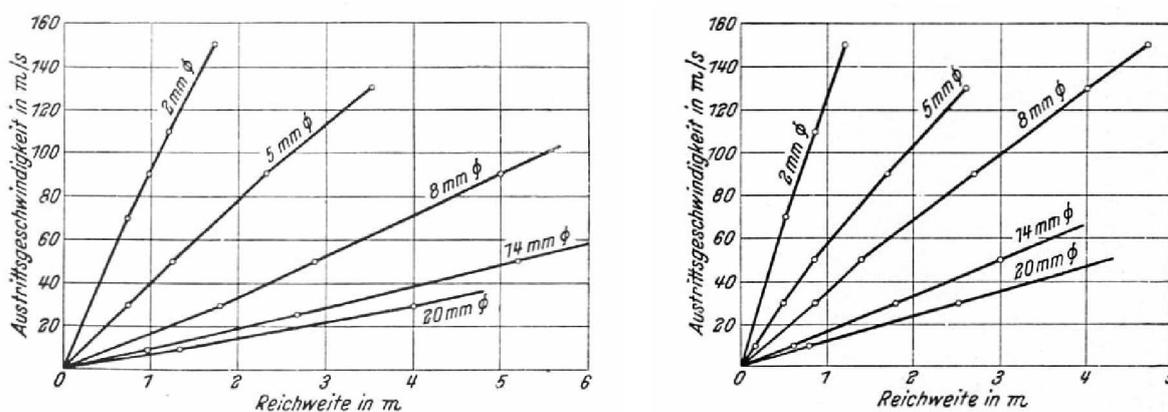


Abbildung 3.2.: Reichweite der 1 m/s (links) und 2 m/s (rechts) -Geschwindigkeitsgrenze bei unterschiedlichen Düsendurchmessern (nach RUMMEL zitiert in ECK [67])

NEUNASS [66] publizierte für die Vergrößerung des Durchmessers des gesamten Freistrahls folgenden mathematischen Zusammenhang:

$$r_a = \frac{d_a + 2 \cdot 0,145 \cdot x}{2} \quad (3.16)$$

3.2. Verbrennung von Feststoffen

Das Ziel des thermo-chemischen Umwandlungsprozesses der Verbrennung ist, anders als bei der Vergasung, Pyrolyse, Torrefizierung oder Verflüssigung, die möglichst vollständige Umwandlung der oxidierbaren Bestandteile des Brennstoffes (vor allem Kohlenstoff C und Wasserstoff H) in gasförmige und feste Oxidationsprodukte (Abgas, Asche) und unverbrennbare mineralische Rückstände (Asche). In diesem Abschnitt sollen die bei der Verbrennung ablaufenden Vorgänge, wie Trocknung, Pyrolyse, Vergasung und Oxidation, weiters das zeitliche Abbrandverhalten, sowie die Grundzüge der Verbrennungsberechnung diskutiert werden (vgl. z. B. [68][69][61][39][53]).

¹Der Turbulenzfaktor m berücksichtigt den Einfluss der Turbulenz auf die Eindringtiefe, was sich in der Größenordnung 1:3 auswirken kann. So können laminare Strahlen wesentlich tiefer als turbulente Strahlen in Räume eindringen [67].

3.2.1. Thermo-chemische Vorgänge bei der Verbrennung

Bei HOFBAUER ET. AL. [61] wird die thermo-chemische Umwandlung in vier verschiedene Teilschritte - „Aufheizung und Trocknung“, „pyrolytische Zersetzung“, „Vergasung“ und „Oxidation“ - aufgeteilt (Abbildung 3.3). Diese können sowohl weitgehend unabhängig voneinander als auch parallel und im Zusammenspiel miteinander ablaufen. Diese Phasen unterscheiden sich teilweise durch die Reaktionen, durch das Temperaturniveau und vor allem durch die Größe des Luftüberschusses.

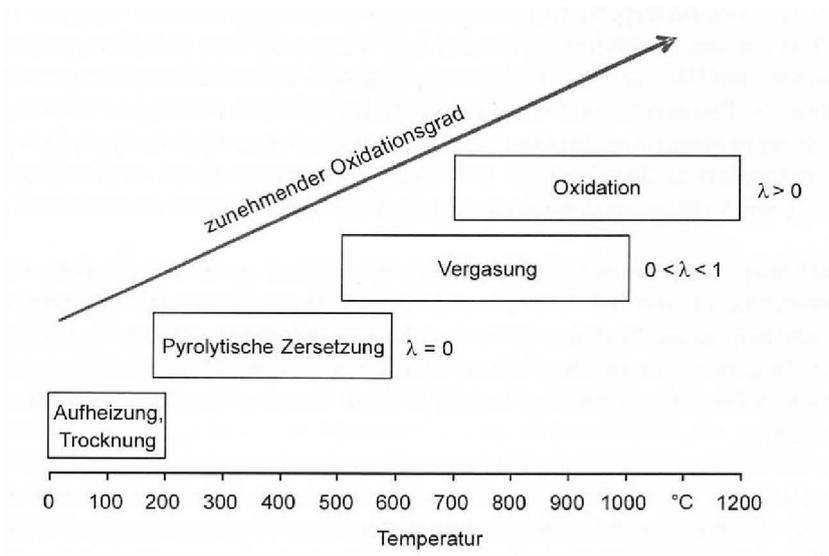


Abbildung 3.3.: Teilschritte der thermo-chemischen Umsetzung biogener Festbrennstoffe [61].

In der Phase *Aufheizung und Trocknung*, welche bis zu etwa 200 °C reicht und endotherm abläuft, verdampft das in den Strukturen eingelagerte und in der organischen Substanz gebundene Wasser. Aufgrund der hohen Verdampfungsenthalpie des großteils in Form von Dampf aus dem Brennstoff austretenden Wassers ist in der Thermogravimetriekurve der Abbildung 3.4 bei etwa 100 °C ein starke Verzögerung der Temperaturzunahme zu beobachten. Durch die Bildung von Rissen in der Struktur des Brennstoffes, welche durch Spannungen aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der verschiedenen Raumachsen ausgelöst werden, wird die Oberfläche vergrößert und daher der Wärmeübergang verbessert (vgl. [61]).

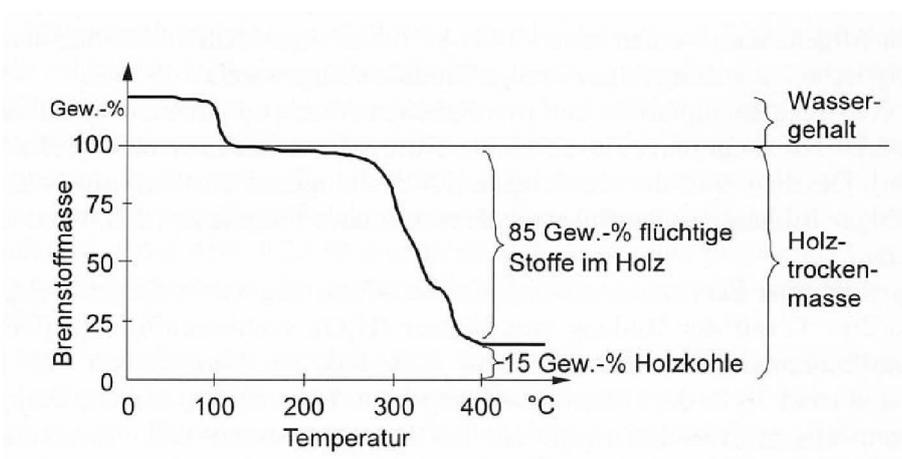


Abbildung 3.4.: Massenabnahme von Holz bei Temperaturerhöhung ohne Sauerstoffzufuhr (nach [70] in [61]).

Nach der Aufheizung und Trocknung folgt die Phase der *pyrolytischen Zersetzung*, die ab Temperaturen von etwa 150 °C einsetzt (siehe dazu Abbildungen 3.5 und 3.6). Im Temperaturbereich von ca. 150 bis 220 °C werden erste Makromoleküle durch Aufbrechen ihrer Struktur irreversibel zerstört und bis ca. 280 °C beginnt die pyrolytische Zersetzung unter Freisetzung größerer Mengen an gebildeten Wasserdampf sowie Kohlenstoffdioxid, Essig- und Ameisensäure. Waren diese Phasen noch endotherm, so ist die darauffolgende (ca. 280 bis 500 °C) geprägt von einer heftigen exothermen Reaktion, wobei bei Holz eine Wärmemenge von etwa 880 kJ/kg frei wird. Dabei entstehen brennbare Gase wie Kohlenstoffmonoxid, Methan, Formaldehyd, Essig- und Ameisensäure als auch Methanol und Wasserstoff. Durch die hohe Austrittsgeschwindigkeit dieser Gase werden „*feinste Tröpfchen an kondensierbaren organische Verbindungen*“ [61] mitgerissen, die als Rauch erkennbar werden. Diese Vorgänge finden fast immer unter Sauerstoffausschluss statt ($\lambda = 0$). Sollte jedoch Sauerstoff in der den Brennstoff umgebenden Atmosphäre vorhanden sein, so kommt dieser aufgrund der ausströmenden Pyrolyseprodukte nicht an den Brennstoff heran. In der endothermen Phase oberhalb von 500 °C (bis ca. 700 °C), die sich bereits mit der Vergasung überschneidet, wird der durch die verkohlten Schichten hindurchtretende Gasstrom vor allem in die brennbaren Gase Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff aufgespalten. Nach der pyrolytischen Zersetzung bleiben etwa 15 bis 20 % der Ausgangsmenge als fester Rückstand in Form von Kohlenstoff und Asche (fixierter Kohlenstoff C_{fix}) übrig, was in Abbildung 3.4 gut zu sehen ist. Halmgüter (Gras, Stroh) in zerkleinerter Form unterscheiden sich nur unwesentlich im Verhalten von dem zuvor beschriebenen Holz (vgl. [71][61]).

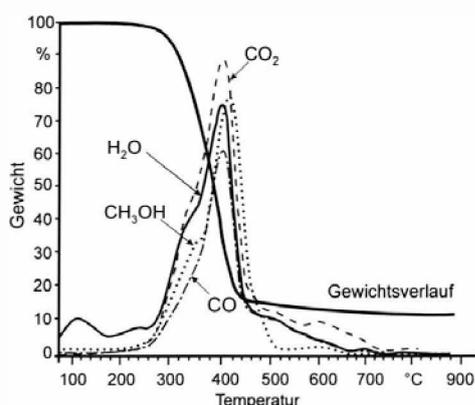


Abbildung 3.5.: Pyrolyseprodukte und Gewichtsverlauf beim pyrolytischen Abbau von trockenem Buchenholz [72].

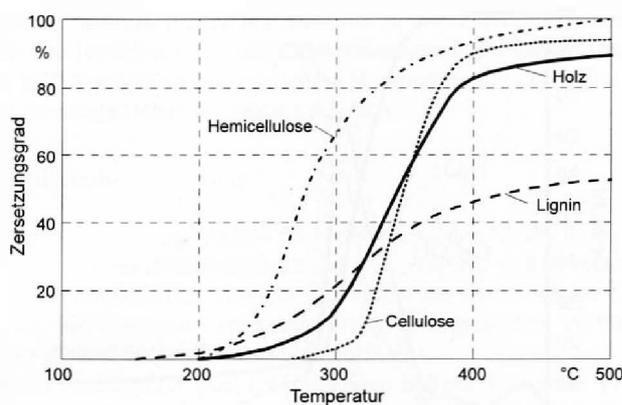
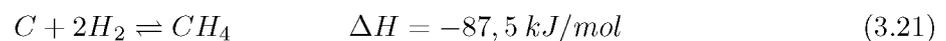
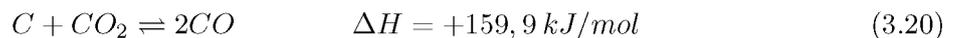
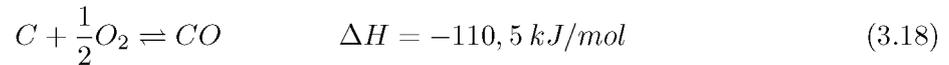
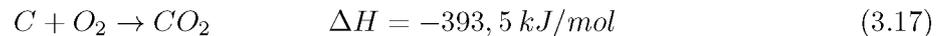


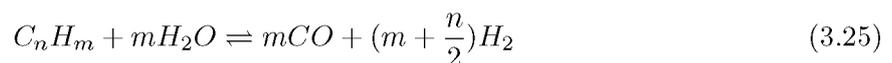
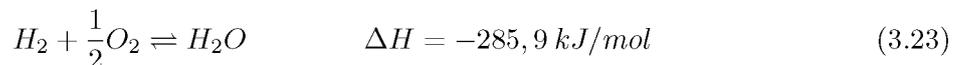
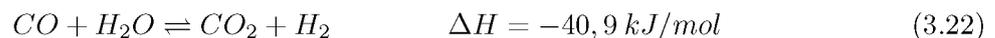
Abbildung 3.6.: Pyrolytische Zersetzung von Holz und seiner Komponenten [73].

Die Hauptaufgabe der *Vergasung* ist vor allem die möglichst vollständige Umsetzung des nach der pyrolytischen Zersetzung verbleibenden Restkohlenstoffs mit einem Vergasungsmittel in brennbare Gase. Dies geschieht bei einer Luftüberschusszahl λ zwischen 0 und 1. Die dabei ablaufenden, meist wärmeinduzierten Reaktionen sind temperatur- und druckabhängig und können für Pyrolyseprodukte bereits in der Phase der pyrolytischen Zersetzung ab einer Temperatur von 600 °C ablaufen. Hier liegen bereits sauerstoffhaltige Verbindungen in den Pyrolyseprodukten vor (z. B. Wasser, Kohlenstoffdioxid), die als Vergasungsmittel fungieren. Die Vergasung des Pyrolysekokes kann jedoch nur nach der pyrolytischen Zersetzung stattfinden, da vor allem bei kleinen Partikeln der Austritt der Pyrolyseprodukte den Zutritt des Vergasungsmittels verhindert. Bei größeren Partikeln können jedoch auch pyrolytische Zersetzung im Inneren und Vergasung an der Oberfläche beobachtet werden. Die bei der Vergasung, je nach Temperatur- und Druckbedingungen bzw. vorhandenem Vergasungsmittel, relevanten heterogenen Gas-Feststoff-Reaktionen sind vollständige (Glg. 3.17) und partielle Kohlenstoffoxidation (Glg. 3.18), heterogene Wassergas-Reaktion

(Glg. 3.19), Boudouard-Reaktion (Glg. 3.20) und hydrierende Vergasung (Glg. 3.21) (vgl. [61]):



Die Produkte dieser Gas-Feststoff-Reaktionen können zusammen mit Komponenten der pyrolytischen Zersetzung durch katalysierte (homogen oder heterogen) Gas-Gas-Reaktionen wie Wassergas-Shiftreaktion (Glg. 3.22), Oxidation von Wasserstoff (Glg. 3.23), Methanisierungs-Reaktion (Glg. 3.24) und Reformierung von Kohlenwasserstoffen (Glg. 3.25) weiter umgewandelt werden.



Die Vergasungsreaktionen sind Gleichgewichtsreaktionen und daher von Druck und Temperatur abhängig. Für das Boudouard-Gleichgewicht und die heterogenen Wassergas-Reaktion sind die Temperatur- und Druckabhängigkeiten in Abbildung 3.7 exemplarisch dargestellt.

Da jedoch aufgrund der kurzen Verweilzeiten die Gleichgewichtszustände oft nicht erreichbar sind, spielt auch die Kinetik der Reaktionen eine wichtige Rolle. Damit die heterogenen Feststoffvergasungsreaktionen am Pyrolysekoks stattfinden können, sind die Teilschritte Stofftransport der gasförmigen Reaktionspartner in die Reaktionszone des Partikels, Diffusion durch die Gasgrenzschicht, Diffusion in die Poren, Reaktion des Vergasungsmittels mit dem Feststoff, Diffusion der gasförmigen Vergasungsprodukte aus den Poren des Partikels, Diffusion durch die Grenzschicht und Stofftransport aus der Reaktionszone notwendig. Der langsamste Teilschritt bestimmt die Geschwindigkeit der Gesamtreaktion, wobei vor allem meist die vorherrschende Temperatur maßgebend ist, ob die Kinetik der chemischen Reaktion oder die Diffusion limitierend sind. Wie in Abbildung 3.8 zu sehen ist, bestimmt bis etwa 600 °C die Kinetik der chemischen Reaktion die Größe der effektiven Geschwindigkeitskonstanten. Hier reicht der Stofftransport aus, den verbrauchten Sauerstoff zu ersetzen. Im Temperaturfenster zwischen 600 und 1300 °C nimmt die Temperaturabhängigkeit ab, weil die Diffusion des Sauerstoffs in die Poren bzw. jene der Vergasungsprodukte aus den Poren die Gesamtkinetik beeinflusst. Dabei nimmt die Konzentration des Sauerstoffs in den Poren gegen den Reaktionsort ab. Oberhalb von 1300 °C wird so viel Sauerstoff verbraucht, dass auch

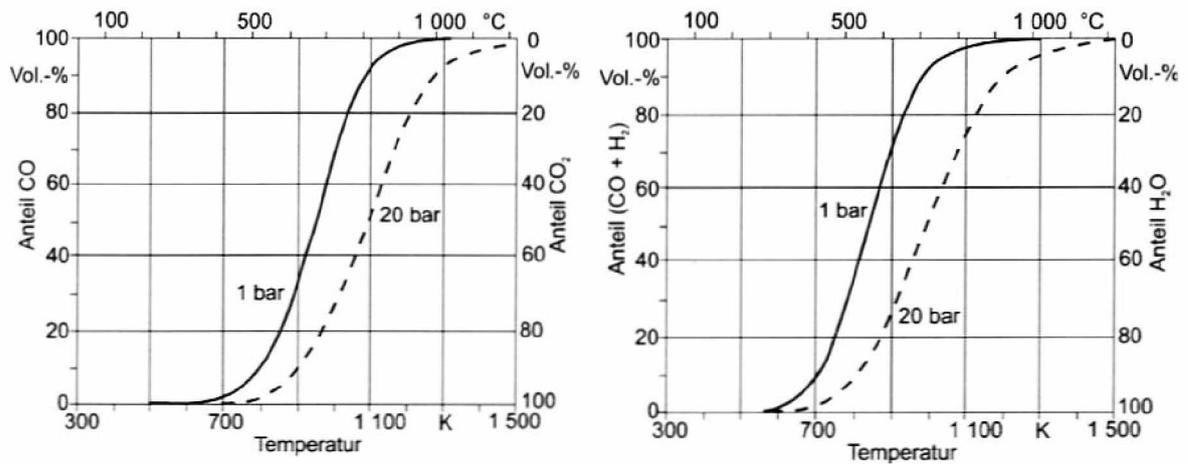


Abbildung 3.7.: Boudouard-Gleichgewicht und Gleichgewicht der heterogenen Wassergas-Reaktion in Abhängigkeit der Temperatur (nach SCHILLING [74] aus [61])

die Grenzschicht an Sauerstoff verarmt und die Filmdiffusion durch die Grenzschicht geschwindigkeitsbestimmend wird. Durch die geringe Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten (proportional $T^{1,5}$ bis T^2) ergibt sich eine beinahe konstante Reaktionsgeschwindigkeit. Da die Diffusionsschichtdicke von der Gasgeschwindigkeit abhängt, ist für eine rasche Umsetzung eine hohe Gasgeschwindigkeit notwendig (vgl. [61]).

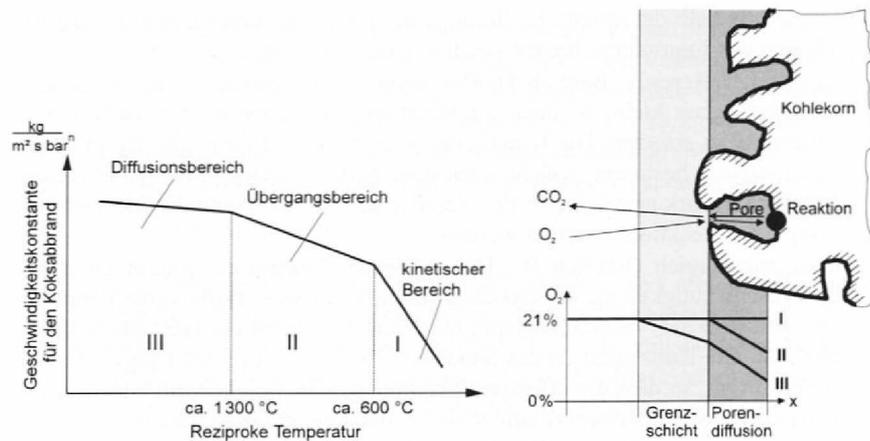


Abbildung 3.8.: Abhängigkeit der effektiven Geschwindigkeitskonstante bei der Verbrennung von Pyrolysekoks von der Temperatur [61].

Bei der nachfolgenden *Oxidation* werden bei Luftüberschuss ($\lambda > 1$) die bei der pyrolytischen Zersetzung und Vergasung gebildeten Produkte möglichst vollständig oxidiert. Die unter Wärme-freisetzung gebildeten Produkte sind im wesentlichen Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf. Um diese möglichst vollständige Umsetzung (Gasphasenoxidation) zu gewährleisten, sind vor allem 3 wichtige Faktoren von entscheidender Bedeutung: Zeit, Temperatur und Durchmischung („3-T-Regel“: Time-Temperature-Turbulence) (vgl. [61]).

3.2.2. Zeitliches Abbrandverhalten

Gelangt ein Holzpartikel in eine kontinuierlich beschickte und stationär betriebene Rostfeuerung, erfolgt zuerst die Erwärmung und Trocknung des Holzes durch Rückstrahlung von Flamme, Glutbett und Feuerraumwänden. Bei weiterer Temperaturzunahme wird das Holz pyrolytisch zersetzt und der verbleibende feste Kohlenstoff durch Vergasung in gasförmige Produkte umgewandelt. Die jeweils gasförmig freigesetzten Produkte werden dann mit Luftsauerstoff, räumlich und zeitlich von den vorherigen Prozessschritten getrennt, möglichst vollständig oxidiert. Abbildung 3.9 zeigt die zeitlichen Phasen der Feststoffumsetzung und der Gasverbrennung bei der Umsetzung eines Holzpartikels in einer Rostfeuerung. Dabei erfolgt die Trennung zwischen Aufheizung, Trocknung, pyrolytischer Zersetzung und Vergasung horizontal auf verschiedenen Rostzonen (vgl. [61]).

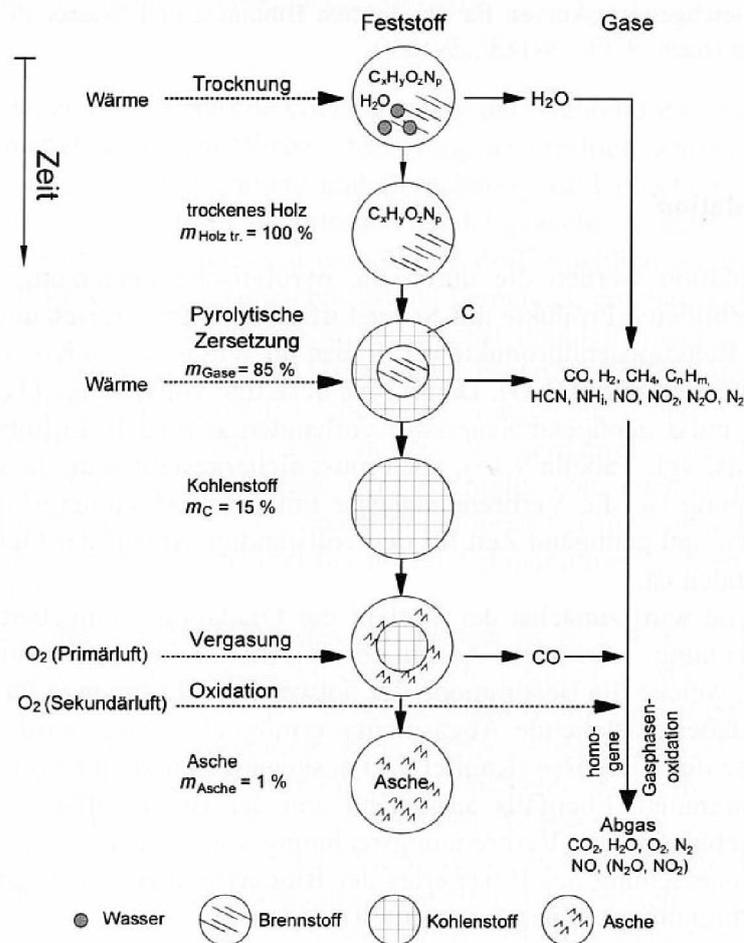


Abbildung 3.9.: Zeitliches Verhalten eines Holzpartikels in einer Rostfeuerung [75].

3.2.3. Verbrennungsrechnung

Die Verbrennungsrechnung für feste und flüssige Brennstoffe soll hier nur kurz angesprochen werden, da dies bereits in der Literatur an vielen Stellen ausführlich behandelt wurde (vgl. [76], [77], [61], [78], [79], [63]). Allerdings wurden bei den Gleichungen 9.19, 3.27 und 3.30 genauere Werte als in der Literatur angegeben für das molare Volumen verwendet.

Wenn von der Verbrennungsrechnung die Rede ist, interessieren im allgemeinen der für die Verbrennung notwendige Sauerstoffbedarf und die Abgasmenge bzw. deren quantifizierbaren Bestandteile.

In Abb. 3.10 sind die Stoffströme einer technischen Feuerung anschaulich dargestellt.

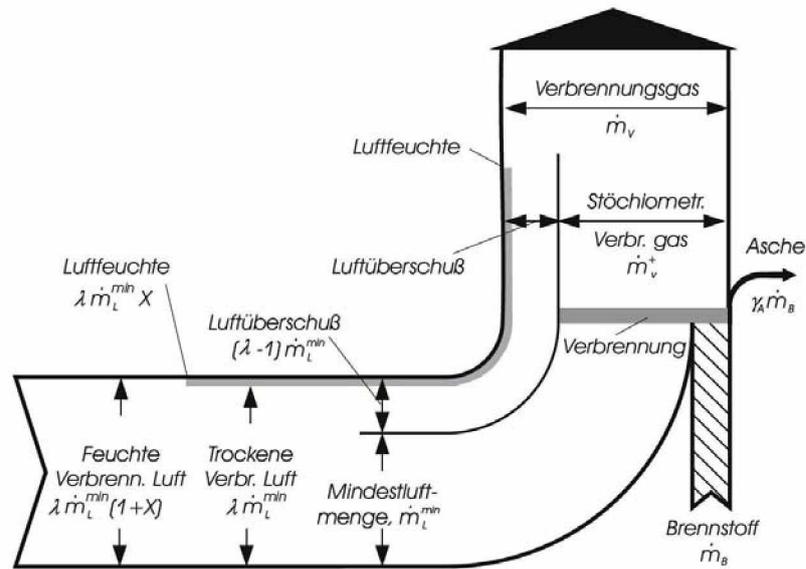


Abbildung 3.10.: Sankey-Diagramm der Stoffströme einer technischen Feuerung [63].

Dabei werden in der Regel die Elemente Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Schwefel (S) und Sauerstoff (O) des Brennstoffs in die Berechnung einbezogen, wobei daraus die Oxidationsprodukte Kohlenstoffdioxid (CO_2), Wasser (H_2O) und Schwefeldioxid (SO_2) gebildet werden. Der Stickstoff des Brennstoffs wird im Allgemeinen bei der Verbrennungsrechnung von Holz nicht berücksichtigt, sollte aber vor allem bei halmgutartigen Brennstoffen, die einen nicht unwesentlichen Anteil an Stickstoff enthalten, mit berücksichtigt werden. Über die relevanten chemischen Reaktionen kann die Gleichung 9.19 für die theoretische Mindestluftmenge l_{\min} in m^3 Luft pro kg Brennstoff aufgestellt werden:

$$l_{\min} = \frac{22,392}{0,21} \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \right) = 8,886 \cdot c + 26,657 \cdot h + 3,332 \cdot s - 3,332 \cdot o \quad (3.26)$$

Dabei sind c , h , s und o die Massenanteile von Kohlenstoff, Wasserstoff, Schwefel und Sauerstoff im Brennstoff (in kg/kg), 22,392 ist das molare Volumen des Sauerstoffs (in l pro mol) und 0,21 der Volumenanteil von Sauerstoff in der Luft. Über die Luftüberschusszahl λ (siehe dazu auch 3.1.1) kann die tatsächlich zugeführte Luftmenge l ermittelt werden.

Das trockene Mindestabgasmenge $v_{a,\min,tr}$ setzt sich laut Gleichung 3.27 aus den Abgasbestandteilen von Kohlenstoffdioxid, Schwefeldioxid, Brennstoffstickstoff sowie dem Stickstoffanteil des Mindestluftanteils zusammen:

$$v_{a,\min,tr} = 22,261 \cdot \frac{c}{12} + 21,856 \cdot \frac{s}{32} + 22,403 \cdot \frac{n}{28} + 0,79 \cdot l_{\min} \quad (3.27)$$

Die Terme 22,261, 21,856 und 22,403 sind die molaren Volumen von Kohlenstoffdioxid, Schwefeldioxid und Stickstoff, der Faktor 0,79 der Volumenanteil von Stickstoff in der Luft.

Hier ist kein Sauerstoff mehr vorhanden, da hier nur die Mindestmenge an Oxidationsmittel ($\lambda = 1$) der Verbrennung zugeführt wird. Bei Sauerstoffüberschuss ($\lambda > 1$) wird der Sauerstoffanteil im Abgas nach Gleichung 3.28 ermittelt:

$$v_{a,O_2} = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot l_{\min} \quad (3.28)$$

Der Stickstoffanteil der Verbrennungsluft berechnet sich nach Gleichung 3.29:

$$v_{a,N_2} = 0,79 \cdot \lambda \cdot l_{min} \quad (3.29)$$

Aufgrund von Brennstoffwassergehalt w , Wasserstoff im Brennstoff und Luftfeuchtigkeit ist auch ein nicht unerheblicher Anteil von Wasser im gasförmigen Aggregatzustand im Abgas. Der gesamte Wasseranteil v_{a,H_2O} im Abgas ist mit den drei Termen in Gleichung 3.30 zusammengefasst:

$$v_{a,H_2O} = 22,414 \cdot \frac{w}{18} + 22,414 \cdot \frac{h}{2} + w_L \cdot l_{min} \cdot \lambda \quad (3.30)$$

Der Faktor 22,414 ist hier das molare Volumen von Wasserdampf, w_L die Beladung der Luft mit Wasser in m^3 Wasser pro m^3 trockener Luft. Da w_L nicht direkt an einem Luftfeuchtemessgerät abgelesen werden kann, muss dieser aus dem h-X-Diagramm entnommen werden. Dabei wird bei Kenntnis der relativen Luftfeuchtigkeit φ_L und der Lufttemperatur die Beladung der Luft mit Wasser direkt an der Abszisse abgelesen. Diese Beladung X hat die Einheit kg Wasser pro kg trockener Luft und muss für den Einsatz in Gleichung 3.30 mittels der Dichte der trockenen Luft ρ_L und der Dichte von Wasserdampf ρ_{H_2O} laut Gleichung 3.31 umgerechnet werden.

$$w_L = X \cdot \frac{\rho_L}{\rho_{H_2O}} \quad (3.31)$$

Die Gleichung 3.31 ist aber eine Ableitung der Gleichung 3.32 [76]:

$$w_L = \frac{p_d^*}{p_L^*} = \frac{p_d^*}{p_0 - p_d^*} = \frac{\varphi_L \cdot p_s}{p_0 - \varphi_L \cdot p_s} \quad (3.32)$$

Dabei sind p_d^* bzw. p_L^* die Partialdrücke von Wasserdampf bzw. Luft, p_0 bzw. p_s der Luftdruck bzw. der Sättigungsdampfdruck von Wasser.

3.2.4. Verbrennungstemperatur

Die bei der Verbrennung eines Brennstoffes erreichbare Verbrennungstemperatur (nachfolgende Darstellung nach [76], [63], [61]) ist in zweierlei Hinsicht von Bedeutung: Einerseits ist die Kenntnis der Verbrennungstemperatur für einen bestimmten Prozess bzw. den Wirkungsgrad von Arbeitsprozessen wichtig und andererseits für verfahrensrelevante Aspekte (z. B. Materialbeanspruchung, Schadstoffbildung, Ascheschmelzverhalten). Als adiabate Verbrennungstemperatur wird die mittlere Gastemperatur ohne Abfuhr von Wärme bezeichnet, wobei diese vom Heizwert und dem Luftüberschuss abhängt. Bei Kenntnis des Heizwertes bzw. der Zusammensetzung des Brennstoffes kann die adiabate Verbrennungstemperatur rechnerisch ermittelt werden. Dabei wird bei Luftüberschusszahlen von $\lambda \geq 1$ von einer vollständigen Oxidation ausgegangen, bei $\lambda < 1$ werden die Gleichgewichtszusammensetzungen der heterogenen und homogenen Reaktionen der Vergasung berücksichtigt. Wie in Abbildung 3.11 zu sehen ist, muss die einem System zugeführte Summe der Enthalpien (Enthalpie des Brennstoffes $H_{Br,ges}$ und Enthalpie der Verbrennungsluft H_L) jener der abgeführten Enthalpie des Verbrennungsgases $H_{a,max}$ entsprechen, wobei jedoch die Enthalpie der Asche vernachlässigt wird. Dabei setzt sich die Brennstoffenthalpie $H_{Br,ges}$ aus dem chemisch gebundenen Anteil (H_{Br} , als Heizwert bezeichnet) und dem durch die Temperatur des Brennstoffes ($H_{u,0^\circ C}$) resultierenden Anteil zusammen.

Bei Aufstellung des Energiebilanz ergibt sich Gleichung 3.33:

$$H_{Br,ges} + H_L = H_{a,max} \quad (3.33)$$

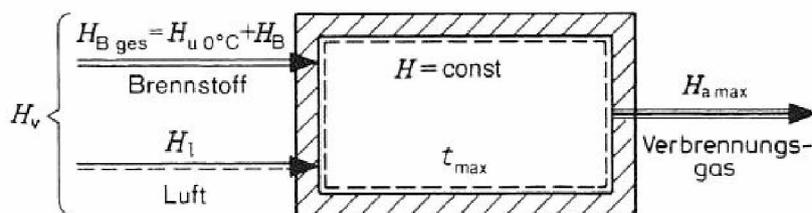


Abbildung 3.11.: Modell zur Berechnung der adiabatischen Verbrennungstemperatur [76].

Für die Enthalpie des Verbrennungsgases $H_{A,max}$ gilt nach Gleichung 3.34:

$$H_{a,max} = v_a \cdot c_{pa} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{t_{max}} \cdot (t_{max} - 0^\circ\text{C}) \tag{3.34}$$

Dabei ist v_a die Verbrennungsgasmenge, c_{pa} die spezifische Wärmekapazität des Abgases (jeweils bezogen auf die Brennstoffmenge) und t_{max} die adiabate Verbrennungstemperatur. Die spezifische Wärmekapazität des Abgases c_{pa} setzt sich aus den anteiligen Wärmekapazitäten der Komponenten des Abgases zusammen.

Somit ergibt sich für die adiabate Verbrennungstemperatur Gleichung 3.35:

$$t_{max} = \frac{H_{u,0^\circ\text{C}} + H_{Br} + H_L}{v_a \cdot c_{pa} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{t_{max}}} + 0^\circ\text{C} \tag{3.35}$$

In Abbildung 3.12 ist die adiabate Verbrennungstemperatur von Holz in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl für verschiedene Holzfeuchten dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die höchsten Temperaturen von über 2000 °C bei einem Luftüberschuss von $\lambda = 1$ und trockenem Holz erreichbar sind. Das Absinken der Kurven im überstöchiometrischen Bereich ist auf die zu erwärmende größere Gasmenge zurückzuführen, im unterstöchiometrischen Bereich sind noch oxidierbare Bestandteile im Abgas vorhanden.

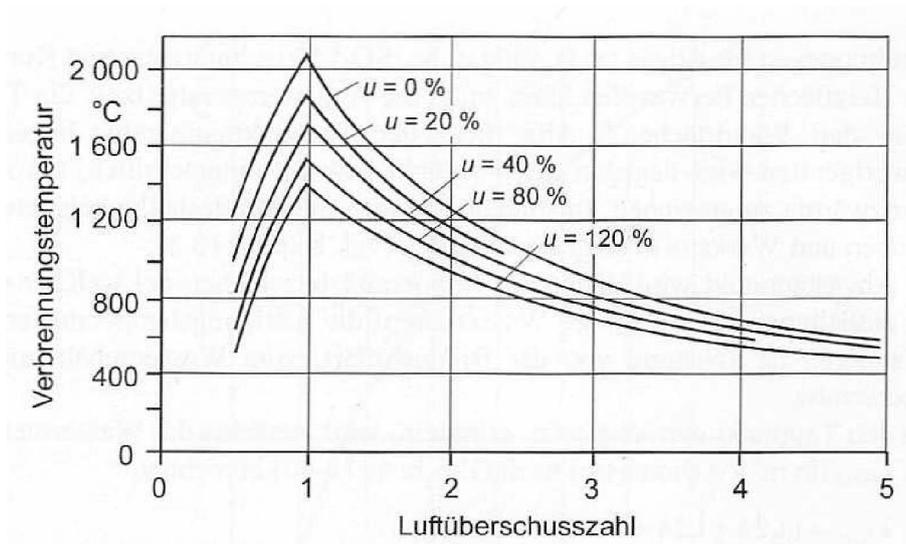


Abbildung 3.12.: Adiabate Verbrennungstemperatur von Holz in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl und bei verschiedenen Holzfeuchten (u) [61].

Ein steigender Wasseranteil im Brennstoff erfordert einen steigenden Energieaufwand für die Verdampfung, was sich ebenfalls durch sinkende Verbrennungstemperaturen äußert. Die bei einer

Verbrennung realistisch erreichbare Temperatur ist jedoch aufgrund von Wärmeabfuhr durch Strahlung und Konvektion geringer. Bei nicht-optimaler Vermischung von Brennstoff und Oxidationsmittel im Feuerraum kann es lokal zu sehr abweichenden Temperaturen (in beiden Richtungen) kommen, was sich örtlich durch erhöhte Materialbeanspruchung, Schlackebildung oder Schadstoffbildung äußern kann.

3.2.5. Verbrennungskontrolle und Verbrennungsdreiecke

Das Ziel einer guten Verbrennung ist die vollständige Nutzung des Brennstoffes ohne unverbrannten Anteile und möglichst wenig Schadstoffen im Abgas. Für eine Überprüfung diesbezüglich müssten demnach neben der Brennstoffzufuhr auch die Luftzufuhr, eventuell noch vorhandene brennbare Abgasbestandteile, Schadstoffe und feste Rückstände ermittelt werden. Da jedoch die unmittelbare Messung der Verbrennungsluftmenge aufgrund der Problematik von Falschlufte als auch die Abgasmenge nur mit großen Schwierigkeiten und Unsicherheiten gemessen werden kann, wird das Luftverhältnis und die spezifische Abgasmenge aus der Abgaszusammensetzung berechnet. Voraussetzung ist dabei jedoch die Kenntnis der eventuell noch vorhandenen festen brennbaren Rückstände (vgl. [76]).

Durch Aufstellung einer Stoffbilanz und entsprechender Umformung der Gleichung kann die Luftüberschusszahl λ aus den Anteilen von CO_2 und CO laut Gleichung 3.36 im Abgas ermittelt werden:

$$\lambda = 1 + \frac{v_{a,min,tr}}{l_{min}} \cdot \left(\frac{CO_{2,max}^a}{CO_2^a + CO^a} - 1 \right) \quad (3.36)$$

Dabei ist $v_{a,min,tr}$ die kleinstmögliche trockene Abgasmenge bei stöchiometrischer Verbrennung, l_{min} der Mindestluftbedarf einer vollständigen Verbrennung, $CO_{2,max}^a$ der größtmögliche CO_2 -Anteil im Abgas, CO_2^a und CO^a die Anteile von CO_2 bzw. CO im Abgas. Mit der relativ groben Näherung $v_{a,min,tr} \approx l_{min}$, die für Brennstoffe mit hohem Brenn- und Heizwert zulässig ist, kann die Gleichung 3.36 nochmals vereinfacht werden [76].

Eine grafische Ermittlung des Luftverhältnisses ist durch Verbrennungsdreiecke möglich. Dabei wird der Zusammenhang zwischen CO_2 -, O_2 - und CO -Gehalt des Abgases anschaulich dargestellt. Beim BUNTE-DREIECK wird für jeweils einen Brennstoff bei vollständiger Verbrennung ($CO^a = 0$) der CO_2 -Gehalt über dem O_2 -Gehalt aufgetragen (Abbildung 3.13).

Bei der höchstmöglichen Luftüberschusszahl ($\lambda = \infty$) entspricht der Anteil des Sauerstoffs O_2 im Abgas jenem in der Luft (21%), durch die unendliche Verdünnung fällt der CO_2 -Wert auf null. Bei stöchiometrischer Verbrennung mit $\lambda = 1$ ist kein Restsauerstoff mehr im Abgas und die Kohlenstoffdioxidkonzentration CO_2^a erreicht den für diesen Brennstoff (Kohlenstoffgehalt) maximal erreichbaren Wert $CO_{2,max}^a$ [76].

Dieser maximal erreichbare Kohlenstoffdioxidgehalt $CO_{2,max}^a$ kann durch Formel

$$CO_{2,max}^a = \frac{1,864 \cdot c \cdot 100}{v_{a,min,tr}} \quad (3.37)$$

berechnet werden [80].

Die Verbindung zwischen diesen beiden Extremwerten ist linear und kann somit durch eine Gerade dargestellt werden. Nach [76] kann die Berechnung der Luftüberschusszahl λ aus dem Restsauerstoffgehalt O_2 im Abgas durch die Gleichung 3.38 erfolgen:

$$\lambda = 1 + \frac{v_{a,min,tr}}{l_{min}} \cdot \left(\frac{O_2^a}{21 - O_2^a} \right) \quad (3.38)$$

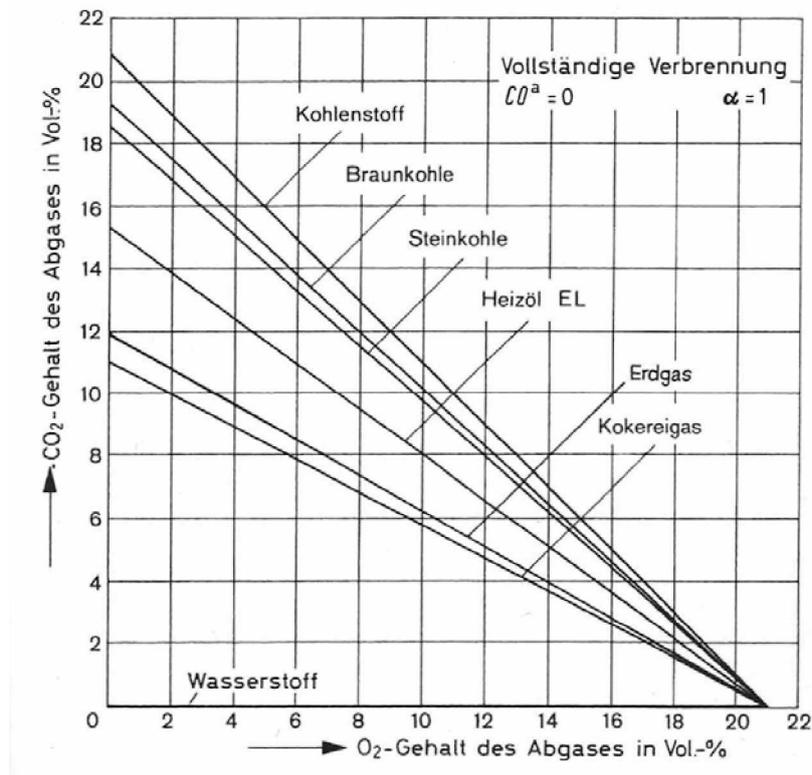


Abbildung 3.13.: Verschiedene Brennstoffe im BUNTE-DREIECK [76]. $\alpha = 1$ bedeutet, dass der gesamt Kohlenstoff vergast wurde und kein unverbrannter mehr übrig ist.

Dabei ist O_2^g der im Abgas noch vorhandene Restsauerstoff.

Beim OSTWALD-DREIECK kann die unvollständige Verbrennung des Kohlenstoffs in Form von CO ermittelt werden, wobei jedoch keine festen brennbaren Rückstände ($\alpha = 1$) zurückbleiben dürfen. Durch Kenntnis zweier Abgaskomponenten (z. B. CO_2 , O_2) kann die dritte (CO) ermittelt werden bzw. die Richtigkeit der Abgasanalyse überprüft werden. Ebenso kann auch die Luftüberschusszahl λ ermittelt werden. In Abbildung 3.14 ist das Ostwald-Dreieck für Heizöl S dargestellt [76].

Auf genaue Herleitung bzw. Berechnung wird hier verzichtet und auf die Literatur (z. B. [76], [79]) verwiesen.

3.3. Emissionen von Biomasseverbrennungsanlagen

Bei der thermochemischen Umsetzung von Brennstoffen können Schadstoffe verschiedenster Art entstehen. Dabei hängt die Art und Menge der emittierten Schadstoffe von unterschiedlichsten Einflussgrößen wie z. B. Art des Verbrennungsprozesses, Brennstoff oder Verbrennungsführung ab. Die bei der Verbrennung von Biomasse entstehenden luftgetragenen Verbrennungsprodukte können dabei in vier Gruppen eingeteilt werden (siehe Abbildung 3.15, vgl. [81], [61]):

- Stoffe aus der vollständigen oxidativen Umsetzung der Hauptbrennstoffbestandteile (C, H, O werden zu CO_2 und H_2O)
- Stoffe aus der unvollständigen Oxidation der Hauptbrennstoffbestandteile (Kohlenstoffmonoxid CO, Kohlenwasserstoffe C_nH_m , Teere, Ruß, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe PAK, unverbrannte Kohlenstoffpartikel)
- Nebenprodukte der vollständigen Verbrennung (thermisches NO_x)

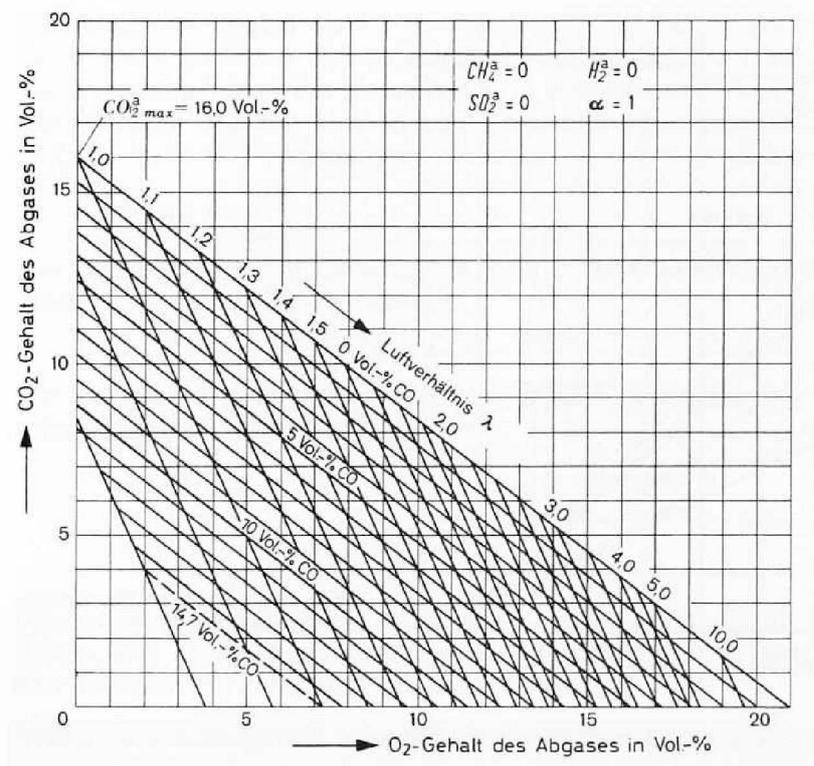


Abbildung 3.14.: OSTWALD-DREIECK für Heizöl schwer [76].

- Stoffe aus Brennstoffverunreinigungen bzw. Spurenelementen. Dies sind luftgetragene Staub- und Aschepartikel, Schwermetalle (z. B. Cu, Pb, Zn, Cd), Stickstoffverbindungen (NO, NO₂, HCN, NH₃, N₂O), Schwefel-, Chlor- und Kaliumverbindungen (SO₂ HCl, KCl) und Dioxine bzw. Furane.

In diesem Abschnitt sollen jedoch nur die wichtigsten Emissionen diskutiert werden, für weiteres wird auf die Literatur verwiesen (vgl. [81], [25], [23]).

3.3.1. Umrechnung von verschiedenen Einheiten und Bezugszustände

Die Angabe von Grenzwerten, beispielsweise in Rechtsvorschriften, in Normen oder die Messwertangaben von Emissionsmessgeräten erfolgt oft in verschiedenen Einheiten. Um diese vergleichbar zu machen, ist eine Umrechnung notwendig. Die in der Emissionsmesstechnik am häufigsten vorkommenden Einheiten sind:

- Parts per million (ppm) - Teile oder Volumenanteile innerhalb einer Million Teile bzw. Volumenteilen. ($1 \text{ ppm} = 1 \cdot 10^{-6} = 10^{-4} \%$)
- Milligramm pro Kubikmeter (mg/m³) bei Normbedingungen
- Milligramm pro Megajoule (mg/MJ); diese Einheit wird auch Emissionfaktor genannt.

Die Umrechnung von ppm in mg/m³ ist in Gleichung 3.39 dargestellt:

$$c \left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right] = c [\text{ppm}] \cdot 10^{-6} \cdot \frac{M_M \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right] \cdot 10^3}{V_M \left[\frac{\text{l}}{\text{mol}} \right] \cdot 10^{-3}} \quad (3.39)$$

Dabei ist c die Konzentration, M_M die Molare Masse und V_M das molare Volumen der betreffenden Substanz. Die Faktoren 10^3 und 10^{-3} dienen zur Umrechnung von g in mg bzw. l in m³.

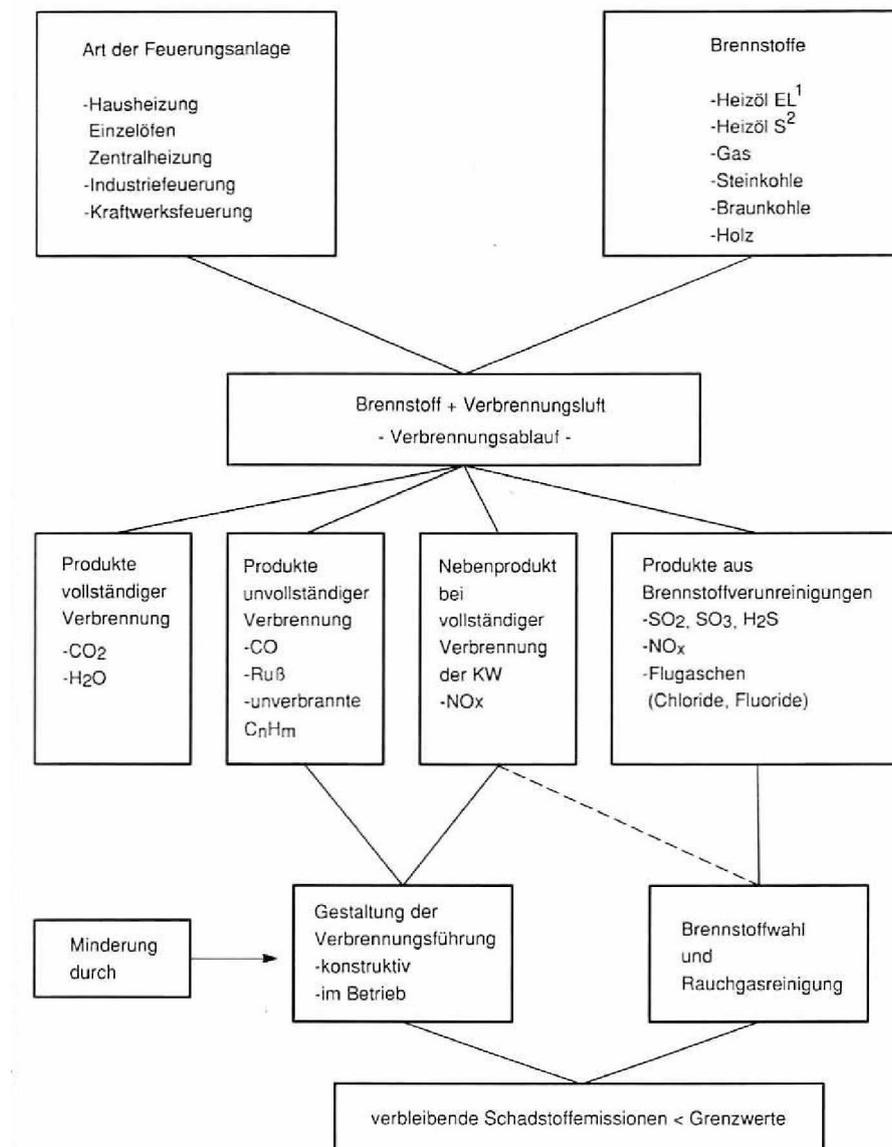


Abbildung 3.15.: Quellen und Einflussgrößen auf die Art und Größe der Schadstoffemissionen bei Feuerungsanlagen [81].

Die Umrechnung von mg/m^3 in mg/MJ ist in Gleichung 3.40 dargestellt:

$$c \left[\frac{\text{mg}}{\text{MJ}} \right] = c \left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right] \cdot \frac{v_a \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{Br}} \right]}{H_u \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{Br}} \right]} \quad (3.40)$$

Dabei ist v_a das spezifische Abgasvolumen und H_u der Heizwert des Brennstoffes, wobei das spezifische Abgasvolumen für jenen Restsauerstoffgehalt berechnet werden muss, der dem der Konzentration entspricht. In den Gesetzesvorschriften für Grenzwerte ist meist auch diese Umrechnung in Form von Umrechnungsfaktoren für die verschiedenen Brennstoffe (und die vorgeschriebenen Restsauerstoff-Bezugswerten) dargestellt (siehe Tabelle 3.1 , vgl. [82], [83]).

Auch beim Sauerstoffrestgehalt im Abgas ist eine Normierung zur besseren Vergleichbarkeit unumgänglich. So könnten sonst die Emissionswerte durch willkürliche Verdünnung des Abgases mit Umgebungsluft vor der Messstelle auf gewünschte Werte reduziert werden. Deshalb spricht man

Tabelle 3.1.: Umrechnungsfaktoren für Holzfeuerungen. Diese gelten jedoch nur für Abgase mit einem Sauerstoffgehalt von 13 % [83].

Umrechnung von	in				
	ppm	mg/m ³	mg/MJ*	mg/kWh*	mg/kg*
1 ppm CO →	1	1.25	0.84	3.03	14.3
1 mg/m ³ CO →	0.80	1	0.67	2.40	11.4
1 mg/MJ* CO →	1.19	1.49	1	3.60	16.7
1 mg/kWh* CO →	0.33	0.41	0.28	1	4.7
1 mg/kg* CO →	0.07	0.09	0.06	0.21	1
1 mg/m ³ Staub →	-	1	0.67	2.40	11.4
1 mg/MJ* Staub →	-	1.49	1	3.60	16.7
1 mg/kWh* Staub →	-	0.41	0.28	1	4.7
1 mg/kg* Staub →	-	0.09	0.06	0.21	1

beim Sauerstoffgehalt im Abgas von einer Führungsgröße, die bei jeder Emissionsmessung miterfasst werden muss. Diese Werte sind in den Rechtsvorschriften neben den Angaben der Grenzwerte dargestellt (je nach Art der Verbrennungsanlage bzw. des Brennstoffs). Für die Darstellung in Milligramm pro Megajoule (mg/MJ) ist ein Sauerstoffbezug jedoch nicht notwendig.

Die Umrechnung eines Emissionswertes (vgl. [80], [84]) bei tatsächlichem Sauerstoffwert im Abgas auf Bezugsbedingungen ist mit Gleichung 3.41 möglich:

$$c_{bez} = c_{gem} \cdot f \tag{3.41}$$

Hier sind c_{bez} bzw. c_{gem} die Schadstoffkonzentrationen bei Bezugssauerstoffgehalt bzw. Sauerstoffgehalt bei der Messung. Der Umrechnungsfaktor f wird mit Gleichung 3.42 ermittelt :

$$f = \frac{21 - O_{2,bez}}{21 - O_{2,gem}} \tag{3.42}$$

Hier sind $O_{2,bez}$ bzw. $O_{2,gem}$ Bezugssauerstoffgehalt bzw. Sauerstoffgehalt bei der Messung in Volumenprozent.

3.3.2. Kohlenstoffmonoxid CO

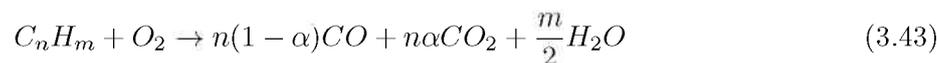
Kohlenstoffmonoxid (CO, auch Kohlenoxid oder Kohlenmonoxid genannt) ist ein geruch-, geschmack- und farbloses Gas mit einer Dichte von 96,5 % jener von Luft. CO ist in Wasser schlecht löslich. Da CO eine 370-mal größere Affinität zu Hämoglobin, dem menschlichen Blutfarbstoff, aufweist, sind auch geringe Konzentrationen in der Atemluft für den Menschen gefährlich. Durch die vermehrte Bindung von CO an das Hämoglobin kann weniger Sauerstoff zu den Körperzellen transportiert werden. Bei einem Volumenanteil von nur 60 ppm CO in der Atemluft werden bereits 10 % des Hämoglobins für den Sauerstoff blockiert und es treten Anzeichen von Sehschwäche und leichte Kopfschmerzen ein. Schon eine Konzentration von über 250 ppm kann zur Bewußtlosigkeit führen, mehr als 750 ppm über einen längeren Zeitraum hinweg sind tödlich. Zusammen mit den Stickoxiden gilt CO als Vorläufersubstanz für die Bildung des bodennahen Ozons [85].

Ist Kohlenstoffmonoxid CO im Abgas vorhanden, zeugt dies von einer unvollständigen Verbrennung bzw. nicht optimalen Verbrennungsbedingungen, denn CO sollte bei der Verbrennung von

Kohlenstoff nur ein Zwischenprodukt sein [39]. Für die Entstehung des Kohlenstoffmonoxids bei der Verbrennung von Biomasse wurden vier Mechanismen identifiziert [86]:

Eine Quelle des Kohlenstoffmonoxids ist die Freisetzung direkt bei der pyrolytischen Zersetzung von Festbrennstoffen.

Als weitere Quelle kann Kohlenstoffmonoxid aus Kohlenwasserstoffen der Pyrolyse gebildet werden, bei deren Oxidation CO nach Glg. 3.43 als Zwischenprodukt gebildet wird:



α wird allgemein Mechanismusfaktor benannt; bei $\alpha = 0$ wird nur CO gebildet, bei $\alpha = 1$ entsteht nur CO_2 . Aufgrund der viel langsameren Oxidation des hier gebildeten Kohlenstoffmonoxids zu Kohlenstoffdioxid sind die Emissionen von CO meist viel höher als jene der Kohlenwasserstoffe. In Abbildung 3.16 ist die Beziehung von Kohlenwasserstoffen zu Kohlenstoffmonoxid im Abgas von verschiedenen Holzfeuerungen zu sehen.

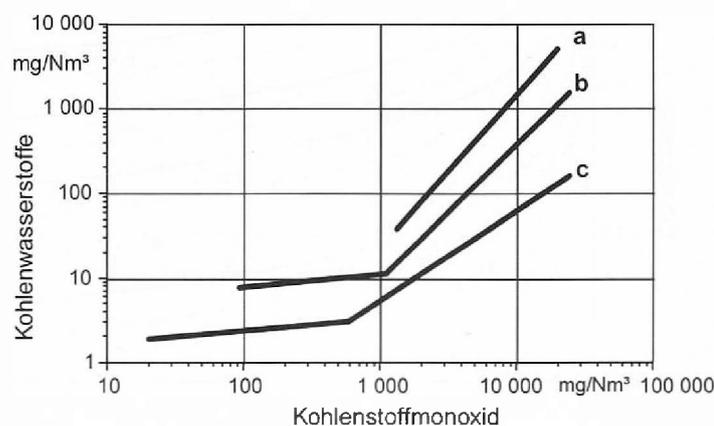


Abbildung 3.16.: Emissionen von flüchtigen organischen Kohlenstoffverbindungen und Kohlenstoffmonoxid in Holzfeuerungen (11 % Restsauerstoff, a: geschlossener Kaminofen, b: Stückholzkessel mit unterem Abbrand, c: Unterschubfeuerung) [75].

Dabei zeigt sich, dass die Kohlenwasserstoffe um etwa ein bis zwei Größenordnungen unter den Konzentrationen von Kohlenstoffmonoxid liegen. Aufgrund dieser Tatsache und wegen der einfacheren und zuverlässigeren Bestimmung wird zur Beurteilung der Ausbrandqualität häufig im Vergleich zu C_nH_m der weniger umweltrelevante CO-Gehalt der Abgase herangezogen. Aufgrund der Temperaturabhängigkeit des CO-Abbaus ist eine genügend hohe Temperatur von über $800\text{ }^\circ\text{C}$ für eine rasche Oxidation, neben einer guten Durchmischung, von entscheidender Bedeutung. Wie bedeutend die ideale Durchmischung der Ausbrandluft mit den heißen Gasen ist, d. h. die Gestaltung des Brennraumes, wird in Abbildung 3.17 veranschaulicht. Dabei ist der Restanteil von CO im Abgas in Abhängigkeit der Verweilzeit bei verschiedenen Temperaturen für einerseits einen idealen Rührkessel in der Mischzone und für andererseits einen idealen Rohrreaktor in der Nachbrennkammer (turbulente Strömung in der Nachbrennzzone ohne axiale Rückvermischung) dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass im Rohrreaktor die chemischen Umsätze wesentlich höher sind als im verglichenen Rührkesselreaktor mit gleichem Volumen [86].

Neben den oben beschriebenen Gasphasenreaktionen wurden zwei weitere Quellen durch den Mechanismus von heterogenen Reaktionen mit festem Kohlenstoff identifiziert. Zum einen ist dies die Reaktion von Kohlenstoffdioxid im Glutbett einer Holzfeuerung oder an Kohlenstoffpartikeln

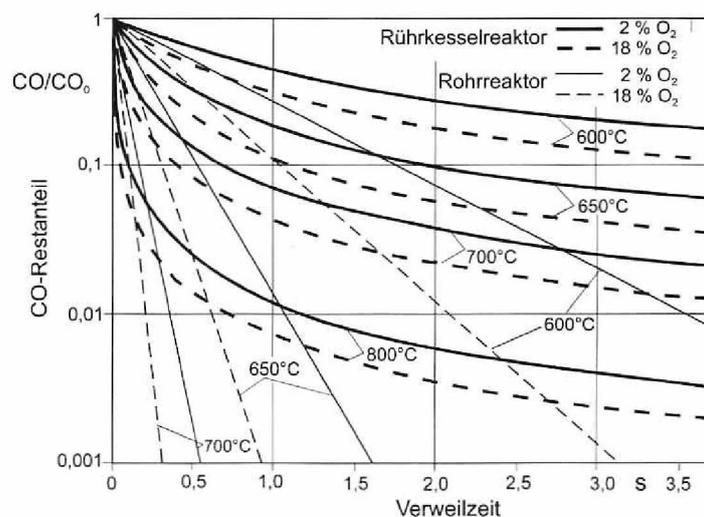


Abbildung 3.17.: Restanteil von CO in Abhängigkeit der Verweilzeit bei verschiedenen Temperaturen exemplarisch für das Brennkammerverhalten eines Rührkessel- und Rohrreaktors (nach [87] aus [86]).

in einer Holzflamme (Boudouard-Reaktion, Glg. 3.20), wobei das Gleichgewicht dieser Reaktion, wie in Abbildung 3.7 zu sehen ist, bei Temperaturen über 800 °C fast vollständig beim CO liegt. Zum anderen kann auch durch die heterogene Wassergas-Reaktion (Glg. 3.19) analog zur Boudouard-Reaktion bei hohen Temperaturen CO gebildet werden. Diese Reaktionen sind im Bereich der Vergasungszone für die Umsetzung des festen Kohlenstoffs notwendig, jedoch muss in der Ausbrandzone dies vermieden werden, um nicht CO und H₂ in die Umwelt zu entlassen. Daher ist in einer Feuerung eine Trennung von heterogener Feststoffvergasung (im Glut- bzw. Kohlenstoffbett) und homogener Gasphasenreaktion (Ausbrand- oder Nachbrennzone) erforderlich. In nachgeschalteten Anlagenteilen (z. B. im ersten Teil des Wärmeübertragers) dürfen sich auch keine Kohlenstoffablagerungen bilden, da es durch die oben beschriebenen heterogenen Reaktionen zur Bildung von CO oder H₂ kommen kann [86].

Um biogene Festbrennstoffe in Feuerungsanlagen optimal zu verbrennen, d.h. einen guten Ausbrand und damit geringe Freisetzung an Schadstoffen aus unvollständiger Verbrennung zu erzielen, sind an die Auslegung der Feuerungsanlage die folgenden Anforderungen zu stellen [86]:

- Bei Biomasse, die einen hohen Flüchtigengehalt aufweist und daher Gase und Kohlenstoff getrennt verbrennen, soll die Verbrennungsluft in Primär- und Sekundärluft aufgeteilt werden. Die Primärluft bewerkstelligt die Vergasung des Brennstoffs und beeinflusst die Feuerungsleistung und die Sekundärluft beeinflusst den Ausbrand der Verbrennungsgase. Diese Konstellation ermöglicht eine bessere Regelung der Ausbrandbedingungen.
- Um eine vollständige Verbrennung zu erreichen, muss das Oxidationsmittel im Überschuss zugeführt werden. Dies ist bei modernen Biomassefeuerungen eine Luftüberschusszahl λ von 1,4 bis 1,8 (siehe Abbildung 3.18). Bei kleinerem Luftüberschuss λ treten aufgrund unzureichender Vermischung der brennbaren Gase mit Verbrennungsluft Zonen mit lokalem Sauerstoffmangel auf, was sich unmittelbar durch einen starken Anstieg der CO-Konzentration auswirkt. Im Gegensatz dazu sinkt bei zu großem Luftüberschuss λ die Verbrennungstemperatur, die ablaufenden Reaktionen werden langsamer und die CO-Konzentration steigt wiederum.
- Da die Gase im Verbrennungsraum aufgrund der hohen Temperaturen eine hohe Viskosität besitzen, ist die Vermischung mit Sekundärluft erschwert. Um eine gute Vermischung zu

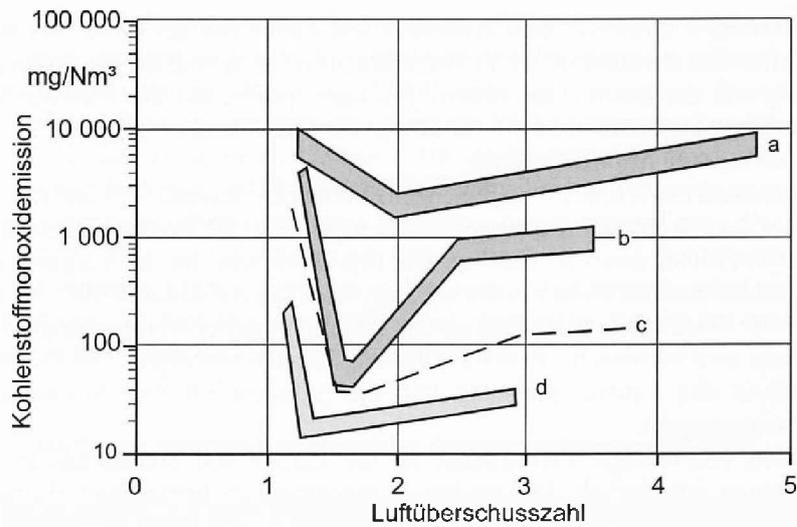


Abbildung 3.18.: Kohlenstoffmonoxid-Emission als Funktion der Luftüberschusszahl (11 % Restsauerstoff) für verschiedene Feuerungsanlagen. (a einfache handbeschickte Holzfeuerung, b Stückholzkessel mit unterem Abbrand, c automatisch beschickte Holzfeuerung mit Verbrennungstechnik - Stand 1990, d automatisch beschickte Holzfeuerung mit optimierter Verbrennungstechnik - heutiger Standard) [86].

gewährleisten und Strahlenbildung zu vermeiden, sind hohe Einströmgeschwindigkeiten der Sekundärluft und starke Turbulenzen im Ausbrandbereich notwendig.

- Weiters ist eine genügend hohe Temperatur von mindestens 850 °C und eine ausreichende Verweilzeit der Gase von 0,5 s in der heißen Zone erforderlich. Dabei sind Abkühleffekte an kalten Wänden und ein weites Verweilzeitenspektrum in der Nachbrennkammer zu vermeiden.

3.3.3. Flüchtige organische Kohlenstoffverbindungen VOC (bzw. C_nH_m), Ruß, Teer

Die für die Umwelt relevanten flüchtige organische Kohlenstoffverbindungen (VOC, Volatile Organic Compounds) umfassen im Wesentlichen Kohlenwasserstoffe C_nH_m (Aliphaten, Aromaten), Alkohole, Karbonsäuren, Aldehyde und Ketone. Bezüglich der Emissionen aus Verbrennungsanlagen haben die Kohlenwasserstoffe hier die größte Bedeutung. Kohlenwasserstoffe sind gemeinsam mit den Stickoxiden bei starker Sonneneinstrahlung die Ursache zur Bildung des photochemischen Smogs (Sommer-Smog oder Los-Angeles-Smog). Die dabei entstehenden Substanzen sind Ozon und Peroxyacetylnitrat (PAN), die beide Schleimhäute und Augen reizen und die Atemwege schädigen. Für den Menschen besonders gefährlich sind höhere Kohlenwasserstoffe, wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe PAK (z. B. Benzo[a]pyren, Anthrazen) bzw. Organohalogenverbindungen, wie Dioxine und Furane, welche eine hochtoxische bzw. kanzerogene Wirkung aufweisen [85].

Emissionen von Kohlenwasserstoffen aus Feuerungsanlagen sind vor allem auch wegen ihrer Geruchsbelästigung von Bedeutung. Aufgrund der komplizierten Stoffgemische ist eine Zuordnung der Geruchsstoff-Emissionen zu gaschromatographisch bestimmbar Kohlenwasserstoffen nur schwer möglich. So können auch geringe, kaum erfassbare Konzentrationen zu erheblicher Geruchsbelastung beitragen [81]

Flüchtige organische Kohlenwasserstoffe bzw. Kohlenwasserstoffverbindungen entstehen bei der pyrolytischen Zersetzung von biogenen Festbrennstoffen. Dabei können in brennstoffreichen Zo-

nen der Flamme aus niedermolekularen aromatischen Ringverbindungen (vor allem aus dem Lignin) durch Anlagerung von Ethin-Radikalen weitere Ringe und somit polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) entstehen. Werden diese aromatischen Kohlenwasserstoffe durch beispielsweise ungenügende Flammentemperaturen nicht verbrannt, sind diese im Abgas vorhanden. Durch Weiterwachsen dieser PAK's können schließlich Makromoleküle entstehen, die durch ihre Größe als feinste Partikel freigesetzt werden. Bilden sich Agglomerationen von diesen Makromolekülen, so wird dies als *Ruß* bezeichnet. Neu gebildetet Ruß besteht dabei aus Polyzyklen mit Seitenketten und einem Verhältnis von Wasserstoff zu Kohlenstoff von etwa eins. Weitere hoch siedende aromatische Kohlenwasserstoffe können die bereits bestehenden Rußpartikel als Kondensationskeime nutzen. Rußteilchen mit darauf kondensierten Teeren (d. h. langkettigen organischen Verbindungen) treten als sichtbarer Rauch, wie er etwa bei schlechter Verbrennung von Holz auftritt, in Erscheinung. Der aerodynamische Durchmesser derartiger Kondensationsaerosole beträgt zwischen 0,1 und 0,8 µm und ist somit in den Bereich der Feinstäube einzuordnen (vgl. [86], [88], [89]).

Teere sind eine komplexe Mischung aus organischen Kohlenwasserstoff-Verbindungen und entstehen infolge der pyrolytischen Zersetzung. Im Allgemeinen versteht man darunter alle Komponenten mit einem Molgewicht größer als Benzen (78 g/mol) bzw. wird auch eine durchschnittliche Siedetemperatur (z. B. 300 °C) zur Beschreibung von Teer herangezogen. Teere können in kühlen Ecken oder an kühlen Wänden des Feuerraumes aufgrund ihrer Kondensation Ablagerungen bilden [90].

3.3.4. Stickstoffoxide NO_x

Wird von Stickstoffoxid NO_x (auch oft Stickoxid) gesprochen, so sind die beiden Oxide Stickstoffmonoxid NO und Stickstoffdioxid NO_2 gemeint. Sie werden bei der Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen gebildet, in besonderen Fällen entstehen auch kleinere Mengen an Distickstoffmonoxid N_2O . NO ist ein farbloses, giftiges, reaktives, nicht brennbares Gas, das in Wasser nur wenig löslich ist. NO_2 ist ein braunrotes, giftiges und eigenartig riechendes Gas, das chemisch aggressiv ist und als starkes Oxidationsmittel wirkt. Distickstoffmonoxid N_2O ist ein farbloses, schwach süßlich riechendes Gas, das in Wasser nur wenig löslich ist. In der Feuerung selbst wird zum Großteil NO gebildet, das sich im Abgasweg bzw. in der Atmosphäre zu NO_2 umwandelt. Als NO_x -Konzentration wird die auf N_2O bezogene Summe der Konzentrationen von NO und NO_2 bezeichnet. Auch die Grenzwerte sind als NO_2 angegeben, da sich letztlich alles NO in NO_2 umwandelt. Stickoxide tragen zur Bildung von Saurem Regen bei und sind für die Bildung von bodennahem Ozon und Peroxyacetylnitrat (PAN) eine essentielle Komponente ([85], [91], [81]).

Bei der Bildung von NO_x unterscheidet man drei Bildungswege (Abbildung 3.19): Die Bildung *thermischer Stickstoffoxide* bei hohen Temperaturen, die Bildung *prompter Stickstoffoxide* bei sauerstoffarmer Verbrennung (Anwesenheit von Kohlenwasserstoffen) bei hohen Temperaturen und die Bildung von *Brennstoff- NO_x* aus Brennstoff-Stickstoff (vgl. [81], [91]).

Signifikante Gehalte von *thermischen Stickstoffoxiden* entstehen bei hohen Temperaturen oberhalb von 1300 bis 1400 °C aus dem Luftstickstoff und Sauerstoff in der Nachreaktionszone nach der Flammenfront. Entscheidend dafür sind nicht mittlere Temperaturen, sondern lokal auftretende Maximaltemperaturen. Dabei laufen gemäß vereinfachtem (Glg. 3.44 und 3.45) und erweitertem (Glg. 3.46) ZELDOVICH-Mechanismus folgende Reaktionen ab:



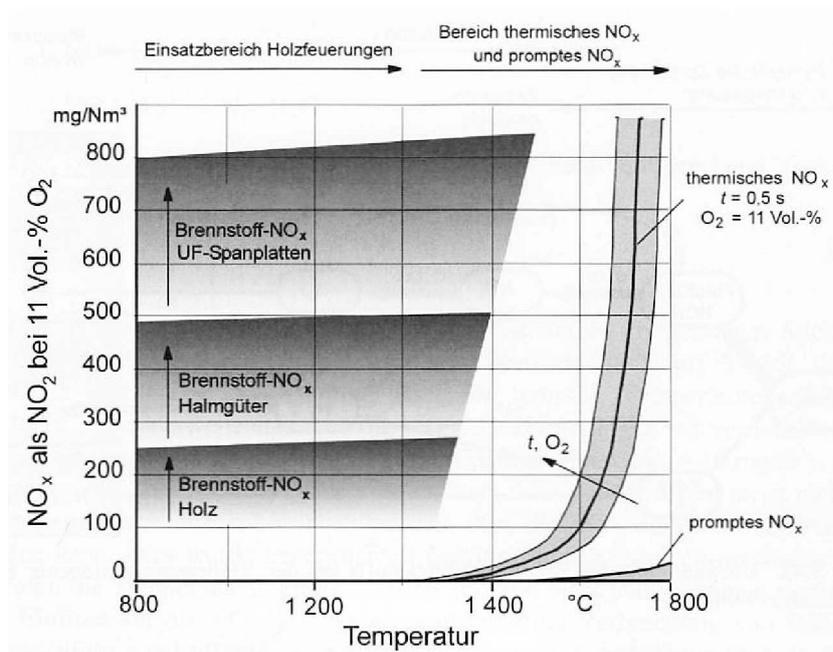


Abbildung 3.19.: Entstehung von Brennstoff-, thermischem und promptem NO_x in Abhängigkeit der Feuerraumtemperatur mit typischen Bereichen (Richtwerte) für Holz, Halmgüter und UF-Spanplatten [91].

Dabei müssen sauerstoffreiche Bedingungen vorherrschen. Der geschwindigkeitsbestimmende Schritt dabei ist Gleichung 3.44.



Gleichung 3.46 läuft in unterstöchiometrischen bzw. brennstoffreichen Zonen der Flamme ab.

Die Bildung von *prompten Stickstoffoxiden* erfolgt vor allem bei sehr hohen Temperaturen und Anwesenheit von Kohlenwasserstoff-Radikalen in der Flammenfront. Dabei reagiert Luftstickstoff mit einem Kohlenwasserstoff-Radikal unter Freisetzung von atomarem Stickstoff (Glg. 3.47):



Das gebildete Stickstoff-Atom reagiert anschließend weiter nach Glg. 3.45 zu NO , wobei auch HCN zu NO_x reagieren kann. Promptes NO_x wird nur bei sehr hohen Temperaturen gebildet und ist wie das thermische NO_x für Biomassefeuerungen kaum von Bedeutung.

Brennstoffstickstoff ist in biogenen Festbrennstoffen in Form von Aminen und Proteinen enthalten. Die NO_x -Bildung läuft über eine Reihe von Radikalen wie NH_2 , NH , CN und N , welche in der Flammenzone im Zeitbereich von 1 ms entstehen (Glg. 3.48 und 3.49). Danaben läuft auch noch Glg. 3.45 ab.



In Abbildung 3.20 ist zu sehen, dass nicht sämtlicher Brennstoffstickstoff zu NO_x , sondern in Abhängigkeit der Verbrennungsbedingungen größtenteils in molekularen Stickstoff umgewandelt wird. Ein kleiner Anteil des Stickstoffs kann auch in die Asche eingebunden werden.

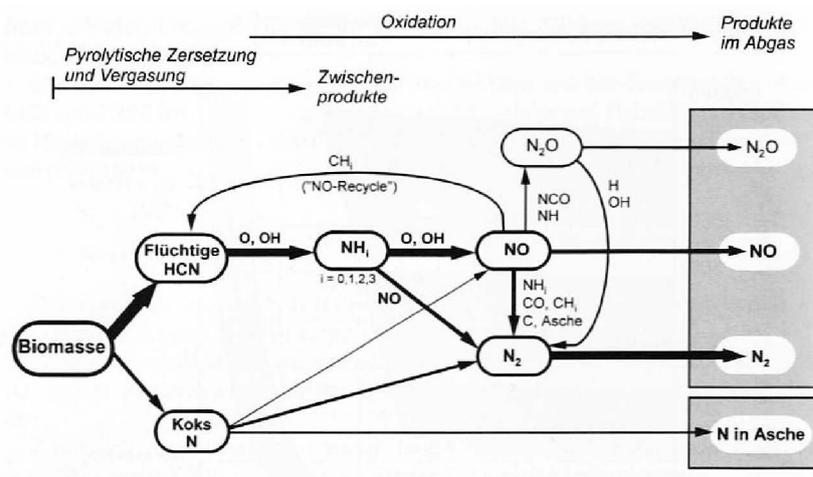


Abbildung 3.20.: Reaktionswege des Brennstoff-Stickstoffs bei der Verbrennung biogener Festbrennstoffe (nach [92] aus [91]).

In oxidierender Atmosphäre wird Stickstoff (N_2) vermehrt zu NO_x umgesetzt, die Anwesenheit von Wasser (OH -Radikale) verstärkt diesen Mechanismus. Unter reduzierenden Bedingungen erfolgt vermehrt die Umsetzung zu molekularem Stickstoff (N_2), wobei hier Zwischenprodukte aus dem Brennstoffstickstoff (NH_i) als Reduktionmittel fungieren (Glg. 3.50 ist hauptverantwortlich für NO_x -Reduktion bei Luftstufung).



Bereits gebildetes NO kann auch als Oxidationsmittel für unverbrannte Stoffe wie CO , C_nH_m und H_2 wirken (Glg. 3.51 bis 3.53).



Eine geringere Rolle spielt die heterogene NO_x -Reduktion an festem Kohlenstoff in der Glutzone (Glg. 3.54).



Reduktion von NO_x : Für Holzfeuerungen können aufgrund der typischen Temperaturen von 800 bis 1300 °C und Verweilzeiten von 0,1 bis 1 s die Mengen an thermischen ($< 10 \text{ mg/m}^3$) und promptem Stickstoffoxiden vernachlässigt werden. Von NUSSBAUMER [91] werden vor allem drei Haupteinflussgrößen auf die Bildung von NO_x -Emissionen angegeben: Der Stickstoffgehalt des Brennstoffs (Abb. 3.21), der Sauerstoffgehalt im Feuerraum bzw. in der Ausbrandzone und die Ausbrandqualität der Abgase bzw. CO-Gehalt.

Daneben gibt es noch weitere Einflussgrößen wie z. B. die Feuerraumbelastung, die Homogenisierung der Verbrennungsgase im Rostbereich oder die Strömungsführung über dem Rost. Das vorrangige

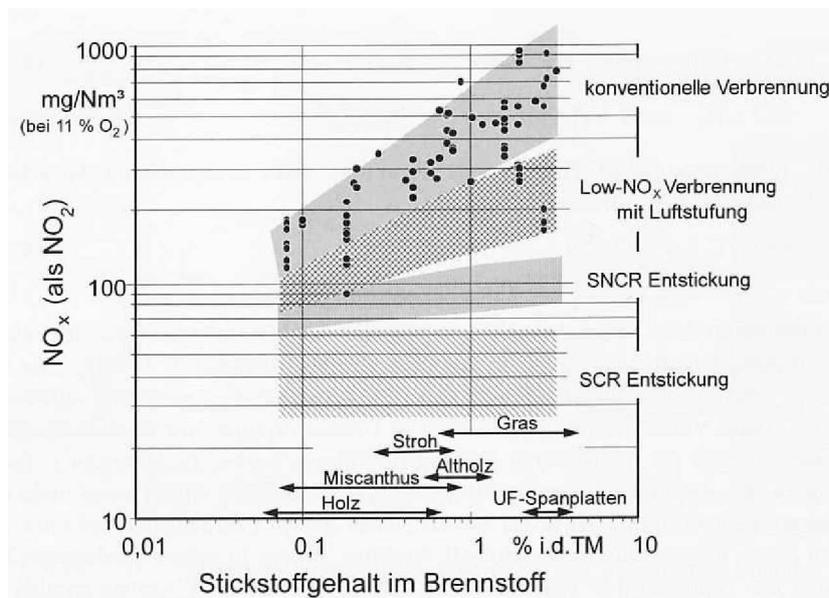


Abbildung 3.21.: Stickstoffoxidemissionen als Funktion des Stickstoffgehalts im Brennstoff für konventionelle Verbrennung, Low- NO_x Verbrennung mit Luftstufung und Entstickung durch SNCR- und SCR-Verfahren für verschiedene biogene Festbrennstoffe (nach [93] aus [91]).

Ziel von Primärmaßnahmen zur NO_x -Reduktion ist die Umwandlung von Brennstoffstickstoff zu molekularem Stickstoff und die Reduktion von bereits gebildetem NO_x mittels Zwischenprodukten der Verbrennung, wie NH - und CH -Radikalen, Kohlenstoffmonoxid und festem Kohlenstoff. Die wichtigsten Verfahren zur Durchführung dieser Primärmaßnahmen sind vor allem Luft- und Brennstoffstufung und in geringerem Maße auch Abgasrezirkulation [91].

Bei der *Abgasrezirkulation* wird abgekühltes Abgas aus dem Abgasweg in die Flammenzone eingebracht. Durch Absenkung des Sauerstoffgehaltes und der Verbrennungstemperatur in der Flamme wird die Bildung von thermischem NO_x vermindert. Daneben wird auch die Bildung von Brennstoff- NO_x beeinflusst, indem durch eine verbesserte Vermischung der Gase im Brennraum die Feuerung bei einem niedrigeren Luftüberschuss betrieben werden kann. Zudem kann die Wirksamkeit der Gleichungen 3.50 bis 3.54 durch Rückführung bereits gebildetem NO_x in die Reaktionszone verstärkt werden [91].

Als *Luftstufung* bezeichnet man die Zufuhr von Verbrennungsluft in mindestens zwei Zonen (Abb. 3.22).

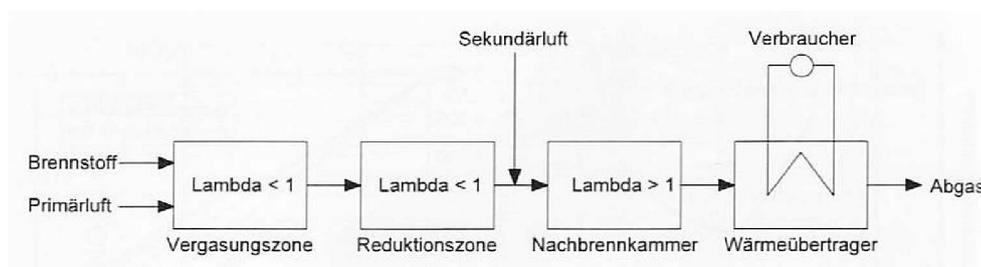


Abbildung 3.22.: NO_x -Reduktion durch Luftstufung [91].

Durch Einhalten unterstöchiometrischer Bedingungen ($\lambda < 1$) wird der Abbau von Brennstoffstickstoff gemäß Gleichungen 3.50 bis 3.54 zu molekularem Stickstoff (N_2) unterstützt. Idealerweise sind hier NO_x -Reduktionen von 50 bzw. 75 % für Holz bzw. UF-Spanplatten [94], [95] möglich,

ohne ausgeprägte Reduktionskammer ist noch eine Minderung um etwa die Hälfte der angegebenen Werte möglich. Dabei sollten Bedingungen wie eine Verweilzeit um 0,5 s ($> 0,3$ s), Turbulenz, Temperaturen zwischen 1100 und 1200 °C und eine Primärluftzahl zwischen 0,7 und 0,8 eingehalten werden. Insbesondere die Einhaltung der Primärluftzahl ist sehr wichtig; da bei $\lambda < 0,7$ in der Reduktionszone kaum NO zur Verfügung steht, werden die NH-Verbindungen deshalb in der Nachbrennkammer zur NO oxidiert. Bei $\lambda > 1$ werden dagegen bereits in der Vergasungszone stickstoffhaltige Zwischenprodukte zu NO oxidiert und in der Reduktionszone sind dann keine NH-Verbindungen zur NO-Reduktion vorhanden. Aufgrund der notwendigen hohen Temperaturen bei der Luftstufung sind die Einsatzmöglichkeiten für stark verschlackende Brennstoffe jedoch beschränkt [91].

Durch *Brennstoffstufung* können ebenfalls reduzierende Bedingungen zur NO_x -Reduktionen in einer definierten Zone der Feuerung eingestellt werden. In einer ersten Stufe wird der Hauptbrennstoff mit Luftüberschuss ($\lambda > 1$) verbrannt und in das Abgas anschließend ein Zweitbrennstoff eingemischt (Stufen- oder Reduktionsbrennstoff). Daraus resultieren reduzierende Bedingungen ($\lambda < 1$) und durch NH- und CH-Verbindungen aus dem Zweitbrennstoff werden zuvor in der Hauptbrennzone gebildete Brennstoff- und thermische Stickstoffoxide reduziert (Abb. 3.23).

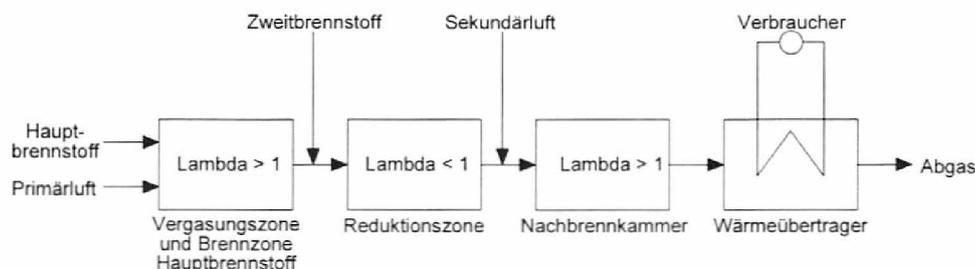


Abbildung 3.23.: NO_x -Reduktion durch Brennstoffstufung [91].

Als Stufenbrennstoff eignen sich alle kohlenstoffhaltigen Brennstoffe, wobei ein hoher Stickstoff- und Flüchtigengehalt von Vorteil ist. Brennstoffstufung weist schon bei Temperaturen um 700 bis 800 °C ein zur Luftstufung vergleichbares Minderungspotential auf [96], was für Brennstoffe mit niedrigem Ascheschmelzpunkt von Vorteil ist. Aufgrund der zusätzlichen Brennstoffzuführung und der aufwändigen Prozessregelung ist Brennstoffstufung erst für Anlagen ab einer thermischen Leistung von einigen MW realisierbar [91].

3.3.5. Schwefel, Chlor, Kalium

Im Gegensatz zu Holz haben bei Halmgutbrennstoffen die Gehalte an Schwefel (S), Chlor (Cl) und Kalium (K) bezüglich Ascheschmelzverhalten und Emissionen mehr Bedeutung (vgl. [97]).

Der sich im Brennstoff befindliche *Schwefel* kann mit den Abgasen ausgetragen (in der Form von SO_2/SO_3 oder H_2S) oder in die Asche eingebunden werden (z. B. als $CaSO_4$, K_2SO_4). Generell sind aber bei biogenen Festbrennstoffen aufgrund des geringen Schwefelgehaltes (auch bei Halmgütern) keine Minderungsmaßnahmen notwendig.

Chlor, das vor allem in Halmgütern vorhanden ist, liegt nach der Verbrennung in Form von Salzen (v. a. KCl, NaCl) vor, welche sich v. a. in der Asche wiederfinden. Auch können sich kleine Anteile an HCl (Problem der Korrosion) und geringste Mengen an polychlorierten Dioxinen und Furanen bilden.

Kalium hat große Bedeutung für das Erweichungsverhalten der Asche und ist für die Bildung von Ablagerungen und die Korrosion in Feststoff-Feuerungen verantwortlich. Hat Kaliumsulfat

(K_2SO_4) mit $1070\text{ }^\circ\text{C}$ einen vergleichsweise hohen Schmelzpunkt, so ist jener von Kaliumchlorid (KCl) mit $760\text{ }^\circ\text{C}$ relativ niedriger. Der Schmelzpunkt des Gemisches aus KCl und K_2SO_4 beträgt überhaupt nur $690\text{ }^\circ\text{C}$ [97].

3.3.6. Emission von Teilchen (TSP, PM)

Aus Verbrennungsvorgängen können feste und flüssige Teilchen (Partikel und Tröpfchen) in einem breiten Korngrößenpektrum von 1 nm bis mehr als $100\text{ }\mu\text{m}$ emittiert werden. Kolloide Systeme aus Gasen und fein verteilten Teilchen werden Aerosole genannt. Die Masse des Gesamtstaubes (TSP Total Suspended Particles) wird in die Teilmengen Grobstaub ($>10\text{ }\mu\text{m}$) und Feinstaub PM_{10} ($<10\text{ }\mu\text{m}$) unterteilt. Im Bereich des Feinstaubes (PM Particulate Matter) wird auch noch zwischen $PM_{2,5}$ ($<2,5\text{ }\mu\text{m}$) bzw. Ultrafeinstaub ($<0,1\text{ }\mu\text{m}$) [85] unterschieden. Partikel und Tröpfchen können Pflanzen direkt schädigen, indem sie sich auf der Blatt- und Nadeloberfläche anlagern und somit die Photosynthese beeinträchtigen und die Poren verstopfen. Partikel kleiner als $10\text{ }\mu\text{m}$ können bis tief in die Lunge eingeatmet, dort abgelagert oder im Körper weitertransportiert werden und toxisch, mutagen etc. wirken [98][85].

Die Emission von Aerosolen kann sowohl durch vollständige und unvollständige Verbrennung als auch durch das Mitreißen von Partikel aus dem Brennstoff oder der Asche entstehen. Dabei werden primäre Partikel und Tröpfchen direkt aus den Prozessen freigesetzt, sekundäre bilden sich erst aus den Vorläufersubstanzen durch chemische oder physikalische Vorgänge (z. B. Absorption, Nukleation, Kondensation, Abb. 3.24) [98].

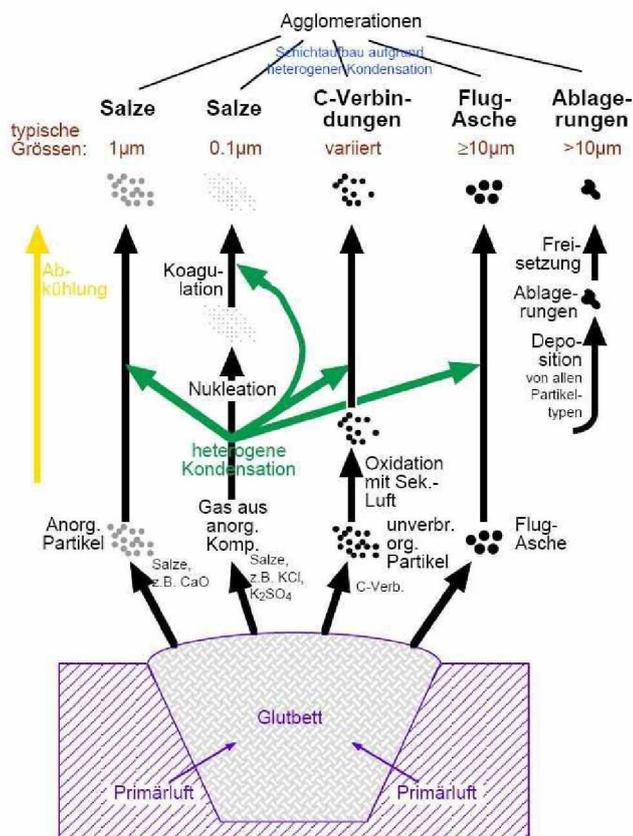


Abbildung 3.24.: Schema der Partikelbildung von naturbelassenem Holz in automatischen Feuerungen [99].

Brennstoff-Aerosole: Durch hohe Gasgeschwindigkeiten, bei Brennstoffen geringer Dichte, beim

oberen Abbrand, bei nicht ausreichender Durchmischung von Verbrennungsluft mit Brennstoff als auch bei nicht durchgängig ausreichenden Verbrennungstemperaturen können Teile des Brennstoffs mit dem Gasstrom mitgerissen und unverbrannt in die Atmosphäre gelangen. Die Partikelgröße liegt deutlich über $1\ \mu\text{m}$ und kann mehrere Millimeter erreichen [98].

Kohlenstoff-Partikel aus unvollständiger Verbrennung: Diese werden bei der pyrolytischen Zersetzung frei und im Anschluss nicht vollständig ausgebrannt. Dabei wird zwischen festen und flüssigen Zersetzungsprodukten sowie kondensierten kohlenstoffhaltigen Syntheseprodukten unterschieden. Kohlenstoffhaltige Zersetzungsprodukte sind Fragmente der polymeren Holzbestandteile Cellulose, Hemicellulose und Lignin aus der pyrolytischen Zersetzung des Brennstoffs. Kohlenstoffhaltige kondensierte Syntheseprodukte (z. B. Ruß) entstehen in der Flamme durch Agglomeration kleiner Kohlenstoff-Cluster aus Fragmenten von z. B. Ethin. Die Rußbildung wird zusätzlich begünstigt durch ungenügende Luftzufuhr, ungleichmäßige Entzündung und schlechte Durchmischung von Brennstoff und Luft. Solche schlechte Verbrennungsbedingungen treten häufig bei einfachen handbeschiekten Holzfeuerungen auf, wobei auch noch besonders toxische Substanzen an Rußpartikel angelagert sein können [98].

Aerosole aus vollständiger Verbrennung: Dies sind anorganische Bestandteile des Brennstoffs und entstehen nach Fragmentierung und Verdampfung des Brennstoffpartikels bei darauf folgend sinkenden Temperaturen durch Nukleation mit anschließender Koagulation sowie direkter Kondensation. Auf diesem Weg können sich bei Biomasseanlagen die Teilchenklassen der schwerflüchtigen mineralischen Aschebestandteile (Fest-Partikel-Pfad [99]) und jene durch Verdampfung und Neubildung in der Feuerung (Fest-Dampf-Partikel-Pfad [99]) bilden. Daneben ist die Bildung von Partikeln aus Schwermetallen möglich. Über den *Fest-Partikel-Pfad* anorganischer Bestandteile der Biomasse gelangen feste Komponenten in den Abgasstrom, die in der Abkühlphase durch Koagulation und Kondensation wachsen. Hier handelt es sich um Verbindungen wie z. B. CaO , Al_2O_3 oder SiO_2 mit einer typischen Partikelgröße von ca. $1\ \mu\text{m}$. Dieser Bildungspfad ist bei der Rindenverbrennung der bedeutendste, da hier gegenüber von Holz um Faktoren größere Calciumfrachten frei werden. Über den *Fest-Dampf-Partikel-Pfad* werden anorganische Bestandteile der Biomasse während der Verbrennung verdampft, die in der Abkühlphase durch Nukleation², Koagulation³ und Kondensation⁴ Partikel im typischen Größenbereich von ca. $0,1\ \mu\text{m}$ bilden. Hier handelt es sich um Verbindungen wie z. B. KCl , K_2SO_4 und Nitrate. Dieser Bildungspfad hat bei naturbelassenem Holz mit üblichem Rindenanteil und vor allem bei Halmgutbrennstoffen (hoher Kaliumgehalt) die größte Bedeutung [98][99].

Partikel durch Mitreißen von Ascheteilchen: Durch spezielle Strömungsverhältnisse im Feuerraum bzw. zu hohe Strömungsgeschwindigkeiten in der Glutzone, sowie durch wieder freigesetzte Ablagerungen können Aschepartikel, sog. Flug-Asche, mit dem Abgas ausgetragen werden. Aufgrund ihrer Größe von über $10\ \mu\text{m}$ können sie Großteils mit einem Zyklon aus dem Abgasstrom entfernt werden [98][99].

Vor allem Elemente im Brennstoff wie u. a. Kalium (K), Schwefel (S), Chlor (Cl), Natrium (Na), Zink (Zn), Silizium (Si) und Phosphor (P) bestimmen bei der vollständigen Verbrennung die Bildung der festen und flüssigen Teilchen. Dies ist in den Abbildungen 3.25 deutlich zu sehen. Diese Tatsache kann in der Folge auch auf die verschiedenen biogenen Brennstoffe umgelegt werden, was in Abbildung 3.26 gut zu sehen ist.

Zunächst werden für die Bildung von Partikeln und Tröpfchen im heißen Feuerraum Siliziumoxid

² Unter Nukleation bezeichnet man bei der Feinstaubbildung das Wachstum einer Ansammlung von Molekülen, eines sogenannten Clusters zu einem Kern [98].

³ Bei Koagulation kommt es zu einem Korngrößenwachstum bereits gebildeter Aerosolbestandteile, indem Partikel und Tröpfchen durch das aufeinander Stoßen aufgrund der Oberflächenkräfte aneinander haften bleiben [98].

⁴ Kondensation ist das Resultat eines Zusammenstoßes zwischen einem Gasmolekül und einem bereits existierenden partikulären Keim in einem übersättigten Medium. Kondensation ist der dominierende Bildungsprozess in einem übersättigten Medium, wenn Kondensationskerne in ausreichender Menge vorhanden sind [98].

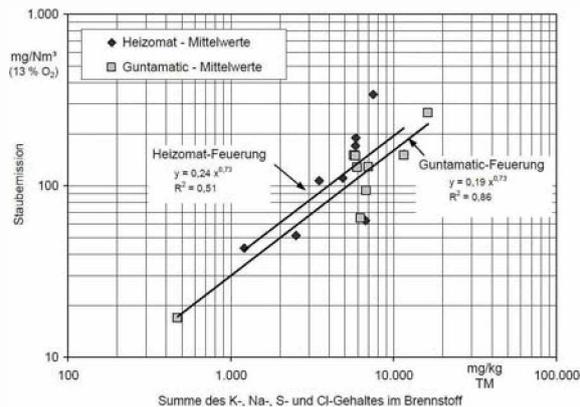


Abbildung 3.25.: Zusammenhang zwischen Gesamtstaubemission und Gehalt an Hauptaerosolbildnern (Kalium, Natrium, Schwefel, Chlor) [100].

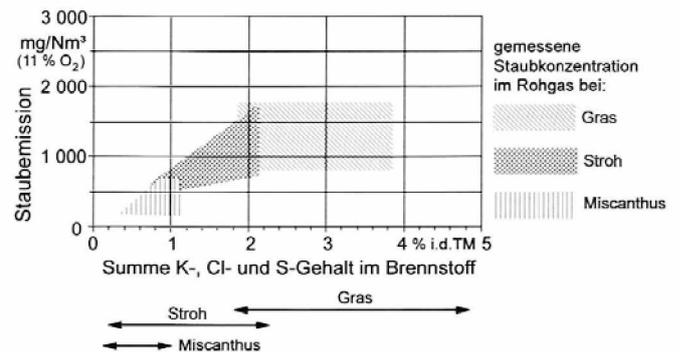


Abbildung 3.26.: Staubemission von biogenen Brennstoffen mit unterschiedlichen Kalium-, Chlor- und Schwefelgehalten [98].

(SiO₂), Kalziumoxid (CaO) und Zinkoxid (ZnO) zum Teil direkt als Feststoffe aus dem Glutbett herausgerissen. Dabei kommt es bei einer Temperatur um 1050 °C zur Nukleation von Kaliumsulfat (K₂SO₄), welches sich an die schon vorhandenen Partikel anlagert. Bei Temperaturen um etwa 650 °C kondensiert dann Kaliumchlorid (KCl) aus. Der Großteil der Aerosolfracht besteht aus KCl und K₂SO₄. Bei Störung der vollständigen Verbrennung, auch nur partiell, können sich organische Verbindungen an mineralischen Flugaschebestandteilen anlagern. Partikel und Tröpfchen aus automatisch beschickten Biomassefeuerungen weisen eine unimodale Korngrößenverteilung mit einem Maximum von 0,05 bis 0,2 µm auf, wobei je nach Verbrennungsbedingungen oder Brennstoff eine Verschiebung zu geringfügig größeren oder kleineren Teilchen auftreten kann [98].

Beeinflussung der Staubemissionen: Der größte Anteil der Partikel entsteht über den Fest-Dampf-Partikel-Pfad. Hier sind es vor allem Salze aus Kaliumverbindungen. Durch Erzeugung von Sauerstoffarmut im Glutbett kann die Bildung von leichtflüchtigen Kaliumverbindungen unterdrückt und jene von schwerflüchtigen gefördert werden. Natürlich muss jedoch die Verbrennungs- bzw. Vergasungstemperatur aufrecht erhalten werden. In Experimenten konnte so eine Variation der Kalium-Fracht um den Faktor 7 gemessen werden. Aufgrund des großen Anteils von Kaliumverbindungen an der gesamten Partikelmasse ist somit insgesamt eine Variation um den Faktor 5 bis 6 möglich. Die Anzahl der durch Nukleation gebildeten Partikel kann durch Koagulation verringert und die Partikel vergrößert werden, indem der Gesamt-Luftüberschuss und damit der Abgasvolumenstrom verringert wird. Auf den Fest-Partikel-Pfad und dessen Bildung von hauptsächlich Kalziumverbindungen hat man kaum Einflussmöglichkeiten bei der Verbrennungsführung. Dies ist vor allem vom Brennstoff abhängig (Ca-Gehalt) und hat jedoch nur bei z. B. Rinde eine größere Bedeutung. Partikel in Form von Kohlenstoffverbindungen können durch einen vollständigen Gasausbrand reduziert werden [99] [25]. Die von [99] gewonnenen Erkenntnisse zur Reduktion von Partikel im Abgas (bezüglich Masse und Anzahl) kann wie folgt zusammengefasst werden:

- geringer Luftüberschuss im Glutbett von 0,2 bis 0,4
- ausreichender Gesamt-Luftüberschuss für einen vollständigen Ausbrand, jedoch möglichst gering um Koagulation zu fördern (zw. 1,3 und 1,4)
- genügend hohe Verbrennungstemperatur im Feuerraum von mindestens 600 °C
- gleichmäßige Durchströmung des Glutbetts, um lokal höheren Luftüberschuss zu vermeiden
- genügend Luftstufung mit großem Abstand zwischen Glutbett und Eintritt der Sekundärluft, um bei wenig Primärluft eine Rückströmung zum Glutbett zu verhindern

3.3.7. Rückstände aus der Biomasseverbrennung und Ascheausbrand

Bei der thermischen Umsetzung von Biomasse fällt stets Asche an, bei sehr hohen Verbrennungstemperaturen oder bei niedrigem Ascheschmelzpunkt auch in Form von Schlacke. Bei größeren Biomassefeuerungen wird dabei in die drei Fraktionen Grob- oder Rostasche, Zyklonasche und Feinstflugasche unterschieden. Bei Kleinfeuerungen bis 100 kW Nennwärmeleistung ohne Entstaubungseinrichtung ist keine automatische Austragung der einzelnen Fraktionen möglich. Diese können nur durch periodische Reinigung am Anfallort ausgeschleust werden. Die Anteile der Fraktionen sind in Abbildung 3.27 dargestellt. Demnach verbleiben im Abgas etwa 2 bis 6 % der insgesamt ausgetragenen Partikel [101] [22].

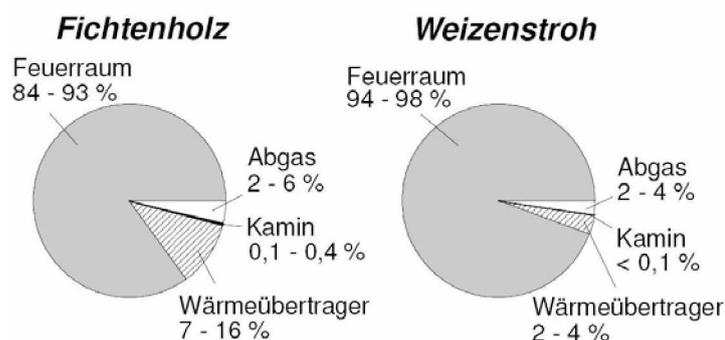


Abbildung 3.27.: Zuordnung des Ascheanfalls in einer automatisch beschickten Kleinfeuerungsanlage für Fichtenholz und Weizenstroh (nach [22] aus [21]).

Soll ein vollständiger Brennstoffausbrand bzw. Ascheausbrand erreicht werden, sind eine ausreichende Verweilzeit des Brennstoffs im Glutbett, eine gute Verteilung der Verbrennungsluft und hohe Temperaturen in der Zone des Kohlenstoffausbrandes notwendig. Dadurch kann in der Regel ein guter Ausbrand der Rostasche von weniger als 1% Kohlenstoffgehalt in der Asche erreicht werden. Bei stark zu Versinterungen und Verschlackungen neigenden Brennstoffen kann durch die Bildung einer kompakten Schicht der Zutritt von Sauerstoff zu unterhalb liegenden Brennstoffschichten vermindert oder sogar verhindert werden. Ein zu kurzer Rost, eine zu hohe Brennstoffauflage, zu häufige Rostvorschubbewegungen oder eine schlechte bzw. ungleichmäßige Durchmischung des Brennstoffbettes mit Luft in der Koksausbrandzone können Ursachen für einen schlechten Ascheausbrand sein. Werden Brennstoffpartikel durch Primärluft aufgewirbelt und im Flug nicht vollständig ausgebrannt oder tritt durch unzureichende Ausbrandbedingungen in der Nachbrennkammer Rußbildung auf, so kann in der Flugasche ein erhöhter Kohlenstoffgehalt auftreten [86].

3.4. Feuerungsanlagentechnik biogener Festbrennstoffe

Das Ziel einer guten Feuerungsanlagentechnik ist die Erreichung eines möglichst hohen Wirkungsgrades bei gleichzeitig niedrigen Emissionswerten. Durch den hohen Gehalt an flüchtiger Substanzen muss die Feuerungstechnik für biogene Festbrennstoffe speziell ausgelegt werden [102].

3.4.1. Anforderungen an die Feuerungsanlagentechnik

Wie schon in den Unterschnitten 3.2.1 und 3.2.2 ausgeführt, sind die wichtigsten Teilschritte bei der Verbrennung die Erwärmung des Brennstoffs durch Rückstrahlung von Flamme, Glutbett und Feuerraumwänden, die Trocknung ab 100 °C, die pyrolytische Zersetzung, die Vergasung des

festen Kohlenstoffs, die Oxidation der brennbaren Gase und die Wärmeabgabe der Flamme an die Feuerraumwände und an den neu zugeführten Brennstoff. Abbildung 3.28 zeigt ein Schema dieser Vorgänge.

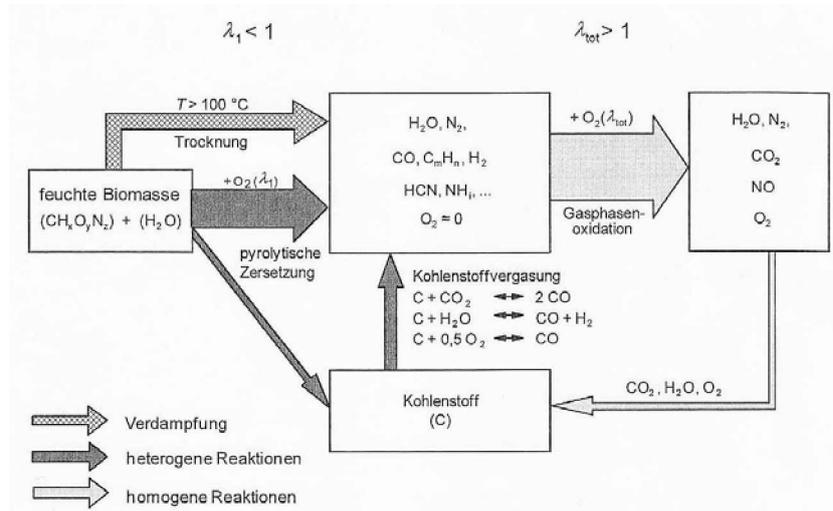


Abbildung 3.28.: Abläufe bei der Biomasseverbrennung (Pfeilstärke symbolisiert Molanteile bei $w = 20\%$) [102].

Für eine vollständige Oxidation von biogenen Brennstoffen ist in Anbetracht der Abbildung 3.28 eine räumliche Trennung der pyrolytischen Zersetzung des Brennstoffs und die Vergasung des Kokes von der anschließenden Verbrennung der Pyrolyse- und Vergasungsprodukte erforderlich. Damit können für beide Bereiche voneinander unabhängig optimale Bedingungen eingestellt werden. Für die pyrolytische Zersetzung und Vergasung sind dies eine gute Verteilung der Primärluft und ausreichend hohe Temperaturen für Pyrolyse und Vergasung. Quench-Effekte [86] wie das schlagartige Abkühlen der Flamme an kalten Wänden oder durch zu große Luftmengen ist zu vermeiden. Für die Gasphasenoxidation sollte Oxidationsmittel im Überschuss zugeführt werden, das Brenngas-Luft-Gemisch ausreichend lange in der Reaktionszone verweilen, die Verbrennungstemperaturen ausreichend hoch sein, Brenngas mit Luft gut turbulent gemischt werden und eine enge Verweilzeitverteilung in der Nachbrennkammer vorherrschen (vgl. „ β -T-Regel“). Zonen mit Rückströmung und undurchströmte Bereiche [86] sind zu vermeiden. Die Bedingungen sollten durch getrennt regelbare Zuluftströme beeinflussbar sein. Dabei beeinflusst die Primärluft die Feuerungsleistung und die Sekundärluft den Gasausbrand. Durch eine gute Vermischung der Brenngase mit Verbrennungsluft kann der Luftüberschuss gesenkt und durch die höheren Temperaturen eine vollständigere Oxidation gewährleistet werden. Dadurch erhöht sich auch gleichzeitig der Wirkungsgrad. Eine ausreichend hohe Verbrennungstemperatur ist auch mit Hilfe einer wärmedämmenden Auskleidung (z. B. Schamotte, Keramikfasermaterialien) von Primär- und Nachverbrennungsraum sicherzustellen. Bei zur Verschlackung neigenden Brennstoffen ist aber auch eine gezielte Nutzwärmeentnahme aus dem Feuerraum zur Senkung der Glutbetttemperatur notwendig. Hier kommen beispielsweise wassergekühlte Roste oder Feuerraumwände zum Einsatz, um einen Betrieb ohne als Kühlluft eingesetzte, überschüssige Primärluft zu gewährleisten [102]. Auch ein kontinuierliches in-Bewegung-Halten von Brennstoff und Asche kann ein Haftenbleiben an Feuerraumbauteilen verhindern [103].

Für Halmgutfeuerungen ist aufgrund des hohen Aschegehaltes eine leistungsstarke Entaschung erforderlich, wobei bei Bildung von Schlacke oftmals sogar eine Vorrichtung zur Zerkleinerung von Verkrustungen sinnvoll ist [103]. Zusätzlich können bei Halmgutbrennstoffen als auch bei Getreide die erhöhten Chlor-, Alkalien- und Schwefelgehalte zu verstärkten Korrosionserscheinungen (z. B. Hochtemperatur-Chlorkorrosion) an Wärmeübertragern und im Feuerraum führen [23].

3.4.2. Feuerungsprinzipien

In der Feuerungsagententechnik wird zwischen handbeschiekten und automatisch beschickten Anlagen unterschieden. Bei handbeschiekten Anlagen, wo der Brennstoff von Hand in den Feuerraum eingebracht wird, kommt es durch das Öffnen der Fülltür und das Brennstoffnachlegen zu einer Störung der Verbrennungsbedingungen und somit zu schlechten Emissionswerten. Außerdem erfolgt meistens keine Anpassung der Verbrennungsbedingungen an die aktuellen Anforderungen in der Abbrandperiode. Bei automatisch beschickten Anlagen erfolgt eine weitgehend kontinuierliche Dosierung eines möglichst homogenen und gut dosierbaren Brennstoffs in den Feuerraum. Dadurch können möglichst optimale Abbrandbedingungen eingehalten werden und es ist bei vielen Aggregaten eine Teillastfähigkeit bis zu 30% der Nennlast möglich [102].

Automatisch beschickte Feuerungsanlagen kann man anhand der Relativgeschwindigkeit zwischen Brennstoffpartikeln und Luft in Festbett-, Wirbelschicht- und Flugstromfeuerungen unterteilen. Bei Festbettfeuerungen wird das Brennstoffbett von der Verbrennungsluft durchzströmt, ohne dass dieses dadurch wesentlich aufgelockert wird. Werden die Partikel durch die durchströmende Luft aufgelockert, angehoben und in Schwebelage gehalten bzw. bereits partiell ausgetragen und wieder zurückgeführt, so spricht man von einer stationären bzw. zirkulierenden Wirbelschicht. Erfolgt jedoch ein Transport sämtlicher Partikel mit dem Gasstrom, findet die Umsetzung im Flugstrom statt [103].

Festbettfeuerungen, welche in einem weiten Leistungsbereich eingesetzt werden, lassen sich nach Hartmann [103] v. a. bezüglich der Brennstoffzuführung zu drei Grundtypen zuordnen (Abbildung 3.29): der Unterschubfeuerung, der Feuerung mit seitlichem Einschub und der Abwurfffeuerung.

Bei der *Unterschubfeuerung* wird der Brennstoff mittels Förderschnecke von unten in die Feuermulde (Retorte) eingeschoben. Die Primärluft wird in die Retorte eingeblasen, die Sekundärluft wird vor dem Eintritt in die Ausbrandzone mit den brennbaren Gasen vermischt. Unterschubfeuerungen sind für aschearme, feinkörnige Holzhackschnitzel und Pellets geeignet. Bei *seitlichem Einschub* wird der Brennstoff von der Seite in den Feuerraum eingeschoben. Dieser kann mit (starr oder bewegte Vorschub- bzw. Walzenroste) oder ohne Rost ausgestattet sein. Die rostlose Schubbodenfeuerung oder „Einschubfeuerung“ funktioniert ähnlich der Unterschubfeuerung und kann durch Ausstattung mit einer wassergekühlten Brennmulde auch mit aschereichen und zu Verschlackung neigenden Brennstoffen (Getreide, Halmgut) betrieben werden. Die Primärluft wird durch Luftdüsen im Seitenbereich der Brennmulde, durch den ggf. vorhandenen Rost oder über Luftkanäle in den Rostelementen (Rostkühlung) eingeblasen. Die Sekundärluft wird oberhalb des Rostes bzw. vor Eintritt in die Nachbrennkammer zugeführt. Bei der *Abwurfffeuerung*, die speziell für den Einsatz von Pellets entwickelt wurde, fallen die mit einer Förderschnecke zugeführten Pellets über ein Rohr oder einen Schacht von oben auf das Glutbett. Dabei kann der Brenner als Kipprostfeuerung, Schalen-, Tunnel- oder Sturzbrandbrenner ausgeführt sein [103].

3.4.3. Pelletsfeuerungen für Holz und Halmgut

Schalenbrenner (Abb. 3.30) werden vorwiegend für Pellet-Kaminöfen verwendet. Die Zündung erfolgt meist elektrisch (Heißluftgebläse oder Heizstab) und die Luft wird durch ein gestuftes drehzahlgeregeltes Gebläse über Primär- und Sekundärluftdüsen in der Brennerschale dem Brennstoff zugeführt. Auch die Zuführung der Sekundärluft oberhalb der Brennerschale ist möglich. Bei Bedarf kann die Asche per Hand aus der Brennerschale und dem darunter liegenden Aschekasten entnommen werden. Beim *Tunnelbrandprinzip*, bei dem die Pellets in ein Verbrennungsrohr hineinrieseln, streicht die Verbrennungsluft horizontal durch das Verbrennungsrohr, wobei die Brennerflamme am anderen Ende seitliche aus dem Kesselraum austritt. Bei einer *Kipprostfeuerung* (Abb. 3.30) wird die Asche periodisch (z. B. alle 16 h) durch eine Kippbewegung des Rostes in den darunter liegenden Rostaschesammler geworfen. Die Primärluftzufuhr erfolgt von unten

Prinzip	Variante	Typ	Schema	Nennwärmeleistung	Brennstoffe		
Unterschubfeuerung	—	—		ab 10 kW (bis 2,5 MW)	Holzhackschnitzel, Holzpellets		
			als Rostfeuerung	starrer Rost, z.T. mit Ascheräumer oder Kipprost		ab 35 kW	Holzhackschnitzel, Holzpellets
				bewegter Rost (Vorschubrost)		ab 15 kW bis 60 MW	Holzhackschnitzel, Holzpellets, Späne, Rinde
				Walzenrostfeuerung		ab 40 kW bis 450 kW	Holzhackschnitzel, Holzpellets
Feuerungen mit seitlichem Einschub (Schnecke/Kolben)	—	—		ab 25 kW bis 800 kW	Holzhackschnitzel, Holzpellets (>15 kW) Halmgut, Körner (bei Wasserkühlung)		
			als Schubbodenfeuerung (ohne Rost)	—	—	—	—
Abwurffeuerung	mit Rost	—	Kipprostfeuerung		ab 15 kW bis 30 kW	Holzpellets, evtl. Präzisionshackgut	
			Schalensbrenner		ab 6 kW bis 30 kW	Holzpellets	
	ohne Rost	—	Tunnelbrenner		ab 10 kW	Holzpellets	
			Sturzbrandbrenner		ab 14 kW bis 60 kW	Holzpellets, Scheitholz, Holzhackschnitzel (ab 20 kW)	

Abbildung 3.29.: Einteilungssystematik von Festbettfeuerungen [104].

durch den Rost, die Sekundärluft wird meist ringförmig oberhalb des Brennstoffbettes zugeführt. Die Zündung erfolgt wie schon beim Schalenbrenner elektrisch [103].

Das Prinzip der *Unterschubfeuerung* wurde im vorigen Unterabschnitt schon dargestellt. Bei der *Vorschubrostfeuerung* liegt der Brennstoff auf einem horizontalen oder schräg stehenden Vorschubrost, wobei hier aber auch Planroste, Treppenroste, Wanderroste oder Walzenroste möglich sind. Der Brennstoff wandert durch eine Vor- und Rückwärtsbewegung der Rostelemente auf dem Schrägrost nach unten. Die Primärluft wird durch den Rost hindurch von unten in das Brennstoffbett eingebracht (gleichzeitige Rostkühlung). Neben der Funktion des Transports des Brennstoffs erfüllt der Rost auch die Funktion des Schürens und Umwälzens, wodurch die Homogenität und die Durchströmbarkeit mit Primärluft verbessert wird. Je nach Bewegungsrichtung von Brennstoffbett und Brenngasen wird zwischen Gegen-, Mittel- und Gleichstromprinzip (Abb. 3.31) unterschieden. So eignet sich beispielsweise das Gegenstromprinzip besonders für die Verbrennung von sehr feuchtem Brennstoff, da der dem Brennstoffbett entgegenströmende, heiße Gasstrom die Aufheizung und Trocknung des neu zugeführten Brennstoffs verstärkt. Für asche- und schlackereiche Brennstoffe sind Rostfeuerungen gut geeignet [103].

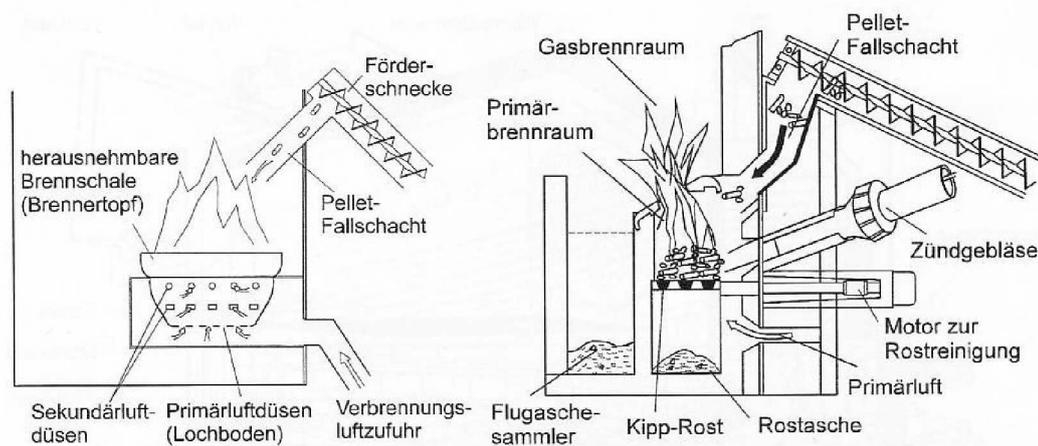


Abbildung 3.30.: Prinzip des Schalenbrenners (links) und einer Feuerung mit Kipprost (rechts) [105].

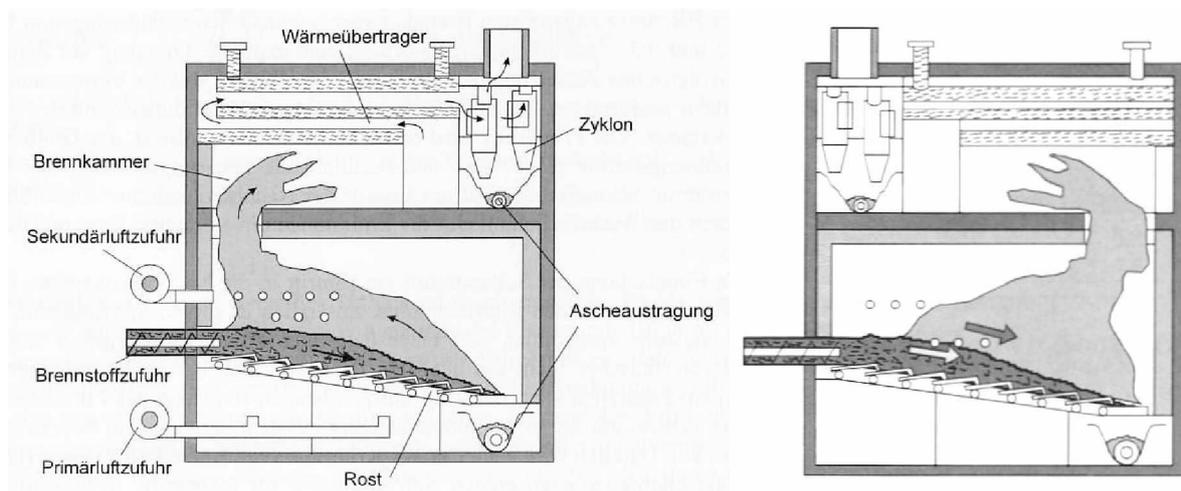


Abbildung 3.31.: Vorschubrost im Gegenstrom- (links) und Gleichstromprinzip (rechts) [103].

Bei der *Vorofenfeuerung* (Voröfen) wird die Primär- und Sekundärluft in baulich getrennten Modulen zugeführt. Im schamottierten Vorofen (Vorschubrost oder bei kleinen Anlagen Festrost) findet die Pyrolyse und Vergasung des Brennstoffs statt, die gebildeten Gase werden dann im separierten Nachbrennraum vollständig oxidiert [103].

Feuerungsanlagen für Halmgüter und Getreide müssen für den etwa drei- bis vierfachen Aschegehalt gegenüber Holz mit einer leistungsstarken Entaschung ausgestattet sein. Auch sollte dem merklich ungünstigeren Ascheerweichungsverhalten Rechnung getragen werden. Hier gilt es die Brennraumtemperatur zu begrenzen und Ascheanbackungen und Anhaftungen durch technische Maßnahmen wie Wirbelschichttechnologie, gekühlte Rostelemente, wassergekühlte Brennraumbooberflächen oder durch das kontinuierliche Bewegen von Brennstoff und Asche zu verhindern. Weiters besteht auch die Möglichkeit durch kalkhaltige Zuschlagsstoffe wie Branntkalk, Kaolin etc. oder durch Mischen mit Holzbrennstoffen den Ascheerweichungspunkt zu erhöhen. Durch die im Vergleich zu Holzbrennstoffen erhöhten Chlor-, Alkalien-, und Schwefelgehalte besteht eine erhöhte Gefahr durch Korrosion (z. B. Hochtemperatur-Chlorkorrosion). Hier muss verstärkt durch Verwendung von z. B. Edelstahl für den Wärmeübertrager oder Siliziumoxid für die Feuerraumauskleidung einer signifikanten Verkürzung der Lebensdauer der Bauteile entgegengewirkt werden.

Aufgrund der Bildung von leichtflüchtigen Salzen ist die Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte ohne zusätzlicher Abgasreinigungsanlagen oft nicht möglich. Durch den hohen Stickstoffgehalt im Brennstoff sind auch die Stickoxidemissionen erhöht. Als prozessintegrierte Maßnahme zur Stickoxidreduktion ist nur die Brennstoffstufung möglich, da die Luftstufung ein Aufschmelzen der Asche aufgrund der hier notwendigen hohen Temperaturen verursacht [103].

Im Kapitel 5 sind die derzeit am Markt erhältlichen Pelletsfeuerungen für Halmgüter bzw. Getreide angeführt und beschrieben.

3.4.4. Regelung automatisch beschickter Feuerungsanlagen

In Feuerungen werden, unabhängig von Sensoren und Stellgrößen, folgende Gruppen von mikroprozessorgesteuerten Regelungen eingesetzt: Dies sind die *Multivariable Robust-Regelung*, wo die Anlage mehrere Prozessvariablen an einprogrammierte Sollwerte anpasst, die *Adaptive Regelung*, bei der einprogrammierte Sollwerte und Entscheidungsregeln im Prozessverlauf dynamisch angepasst werden und die *Fuzzy Logic Regelung*, bei der die dynamische Anpassung nicht nach einem mathematisch definierten Zusammenhang, sondern nach Expertenwissen empirisch gekoppelt wird. Eine wichtige Funktion der Regelung ist auch das Wahrnehmen von sicherheitstechnischen Aufgaben [103].

Die wichtigsten Regelkreise automatisch beschickter Feuerungen sind die nachfolgend erläuterte Unterdruckregelung, die Leistungsregelung und die Verbrennungsregelung (vgl. [103]).

Bei der *Unterdruckregelung* misst ein Differenzdruckfühler den Unterdruck in der Brennkammer, wobei Druckänderungen durch die Saugleistung des Abgasventilators ausgeglichen werden. Somit wird das Austreten giftiger oder brennbarer Gase in die Umgebung verhindert und es können konstante Verbrennungsbedingungen unabhängig vom Kaminzug gewährleistet werden.

Heute verfügen die meisten automatischen Holzfeuerungen über eine *Leistungsregelung*. Dabei werden Brennstoff- und Luftzufuhr in Schritten oder sogar stufenlos variiert und an die erforderliche Leistung angepasst. Als Regelgrößen dienen dabei beispielsweise die Differenz zwischen Istwert und außentemperaturabhängigen Sollwert der Kesseltemperatur oder die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf. Bei trockenen Brennstoffen ist dabei der Betrieb im Leistungsbereich von 100 bis 30 % der Nennlast, oder sogar noch mehr, möglich. Darunter wird die Anlage ausgeschaltet oder im Gluterhaltungsbetrieb gefahren.

Bei der *Verbrennungsregelung* soll durch die optimale Einstellung des Brennstoff-Luft-Verhältnisses eine hohe Ausbrandqualität und ein hoher Wirkungsgrad erreicht werden. Bei der sehr häufig angewandten *Lambda-Regelung* (Abb. 3.32) wird der Luftüberschuss bzw. Restsauerstoff im Abgas mittels z. B. Lambda-Sonde gemessen. Bei niedrigem Luftüberschuss wird die Sekundärluftmenge erhöht bzw. die Brennstoffmenge reduziert und umgekehrt. Bei der *Verbrennungstemperatur-Regelung* (Abb. 3.32) erfolgt die Messung der Flamm- bzw. Feuerraumtemperatur mittels Thermoelement. Abweichungen von der Soll-Temperatur werden durch z. B. Änderungen der Brennstoffmenge korrigiert.

Dabei sind Betriebszustände wie z. B. Teillast- oder Anfahrbetrieb durch verschiedene Sollwerte zu berücksichtigen. Bei der *CO/Lambda-Regelung* erfolgen Messung von Lambda bzw. Restsauerstoff und CO-Gehalt im Abgas. Dadurch ist eine verbesserte Regelung und somit ein höchstmöglicher Wirkungsgrad erreichbar. Bei Rostfeuerungen wird als Ergänzung zu den Leistungs- und Verbrennungsregelungen auch die *Schichthöhenregelung* eingesetzt. Mit Sensoren wird dabei die Höhe des Glutbettes an verschiedenen Orten des Rostes gemessen und durch Regelung der Brennstoffzufuhr und gezielter Bewegung einzelner Rostelemente ein konstantes Brennstoffbett eingestellt. Dadurch kann sich die Primärluft besser verteilen und Vergasungs- und Oxidationszone werden deutlicher getrennt. In wiederum anderen Verfahren erfolgt eine optische Erfassung des Glutbettes, um mit

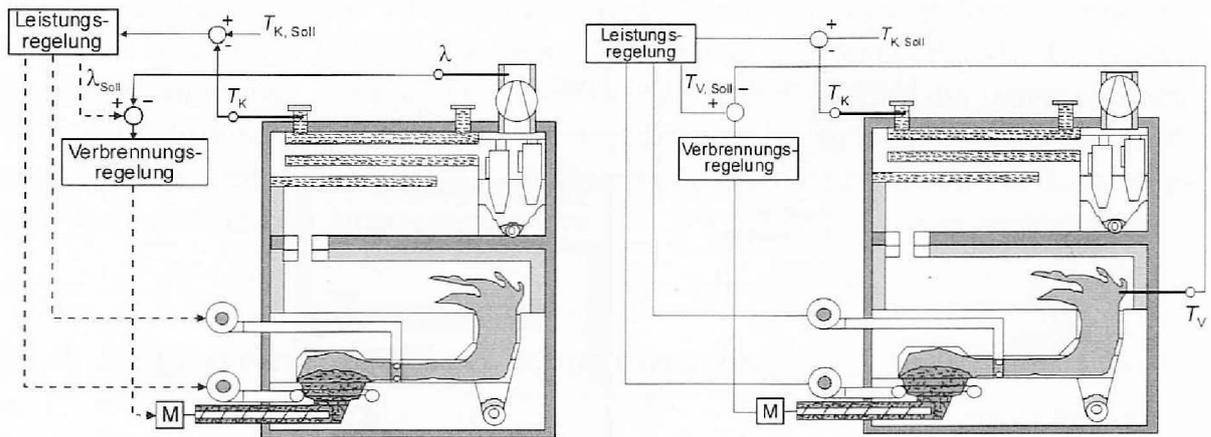


Abbildung 3.32.: Funktionsschema der Lambda-Regelung (links, Luftüberschuss und Brennstoffmenge werden gemessen, Verbrennungsluftmenge wird durch Leistungsregelung vorgegeben) und der Verbrennungstemperatur-Regelung (rechts, Verbrennungstemperatur wird gemessen und die Brennstoffmenge geregelt, Verbrennungsluftmenge wird durch Leistungsregelung vorgegeben) [103].

optimalem Rostvorschub die Grenze zwischen noch Brennbarem und Asche möglichst nahe zum Rostende zu bringen [103].

3.4.5. Wärmeübertrager

Um die bei der Verbrennung frei werdende Wärme abzuführen bzw. zu nutzen, sind die Feuerungen mit Wärmeübertragerflächen versehen. Neben Flächen für die direkte Wärmeabstrahlung und Heizgaszügen oder Nachheizkästen zur Wärmespeicherung und Erzeugung einer Konvektion, wird die in der Feuerung erzeugte Wärme vor allem möglichst vollständig an ein zirkulierendes Wärmeträgermedium wie Wasser, Thermoöl etc. abgegeben. Dabei sollte das Abgas, soweit es bezüglich Rücklauftemperatur, Taupunkt oder Korrosionsneigung etc. möglich ist, möglichst weit abgekühlt werden, um einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen. In Feuerungsanlagen für biogene Festbrennstoffe kommen dabei hauptsächlich Rauchrohr- und Wasserrohrkessel zum Einsatz [103].

Beim *Rauchrohrkessel*, welcher bei Biomassefeuerungen am häufigsten eingesetzt wird, werden die Heizgase durch die Rauchrohre geleitet. Die Außenseite der Rauchrohre wird dabei vom Wärmeträgermedium umspült. Kleinere Anlagen sind einzügig mit horizontalen oder vertikalen Rohren ausgestattet, beim klassischen Dreizug-Rauchrohrkessel wird das Rauchgas in zwei Wendekammern umgelenkt. Der Vorteil des Rauchrohrkessels ist die einfache Reinigung mittels Tubulatoren (bei kleinen Anlagen, auch zur Erzielung gleichmäßiger Gasverweilzeiten), Bürsten oder Druckluft. Die relative Unempfindlichkeit gegenüber Lastschwankungen steht eine gewisse Trägheit im Aufheiz- und Regelverhalten gegenüber [103].

Im Gegensatz dazu befindet sich das Wasser beim *Wasserrohrkessel* in den Rohren. Die Vorteile sind die Möglichkeit zu höherem Systemdruck bis 100 bar sowie schnelleres Anfahr- und Regelverhalten. Dem stehen Nachteile wie der erhöhte Platzbedarf im Vergleich zum Rauchrohrkessel, die Anfälligkeit gegenüber Lastschwankungen und die erschwerte Reinigungsmöglichkeit gegenüber [103].

3.4.6. Wirkungsgrade von Holzfeuerungen

Neben dem Schadstoffausstoß sind die Wirkungsgrade die am besten geeigneten Merkmale für die technisch-ökologische Bewertung von Feuerungsanlagen. Während bei Einzelfeuerstätten und erweiterten Einzelfeuerstätten aufgrund der direkten Wärmeabgabe an die Umgebung nur der feuerungstechnische Wirkungsgrad (siehe 3.1.2) relevant ist, hat bei Zentralheizungskesseln der Kesselwirkungsgrad (siehe 3.1.3) die größere Bedeutung. In Abb. 3.33 ist anhand eines typischen Wärmefflusschemas einer Hackschnitzelanlage der Unterschied zwischen feuerungstechnischem und Kesselwirkungsgrad anschaulich zu erkennen [21].

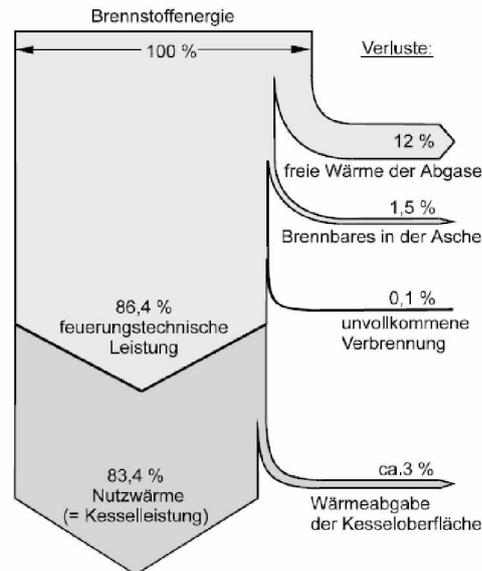


Abbildung 3.33.: Typisches Wärmefflusschema einer Hackschnitzelanlage mit 50 kW bei Nennwärmeleistung (nach [106] aus [21]).

Dabei ist jedoch anzumerken, dass hier das Brennbare in der Asche fälschlicherweise schon beim feuerungstechnischen Wirkungsgrad berücksichtigt wurde. Wie schon in den Unterabschnitten 3.1.2 bzw. 3.1.3 beschrieben und auch durchgehend in der Literatur dargestellt (vgl. [63] [76] [107] [62]), bezieht sich der feuerungstechnische Wirkungsgrad lediglich auf die Abgasverluste. Daher sind die Verluste durch Brennbare in der Asche erst beim Kesselwirkungsgrad zu berücksichtigen. Anhand Abb. 3.33 ist zu sehen, dass mit dem warmen Abgas die meiste Energie verloren geht. Aber vor allem wegen des Taupunktes und der damit verbundenen Kondensatbildung sind der Abkühlung des Abgases Grenzen gesetzt.

Die Wirkungsgrade von handbeschickten Einzelfeuerstätten liegen im Bereich von 70 bis 80%, jene von Pelletöfen bei ca. 87% (siehe Abb. 3.34 links). Die Wirkungsgrade von Holz-Zentralheizungsanlagen liegen durchwegs im Bereich von mehr als 85%, wobei die Kessel der neuesten Bauart mehrheitlich über 90% liegen, dies betrifft vor allem Pellet-Zentralheizungen (siehe Abb. 3.34 rechts) [21].

Die Ermittlung der Kesselwirkungsgrade erfolgt üblicherweise im Betrieb bei Nennlast. Ein Absenken der Heizlast führt, anders als vielleicht vermutet, zu einem Ansteigen des Wirkungsgrades, da bei verminderter Leistung auch die Abgastemperatur absinkt, welche den einflussreichsten Parameter bezüglich der Verluste darstellt [21].

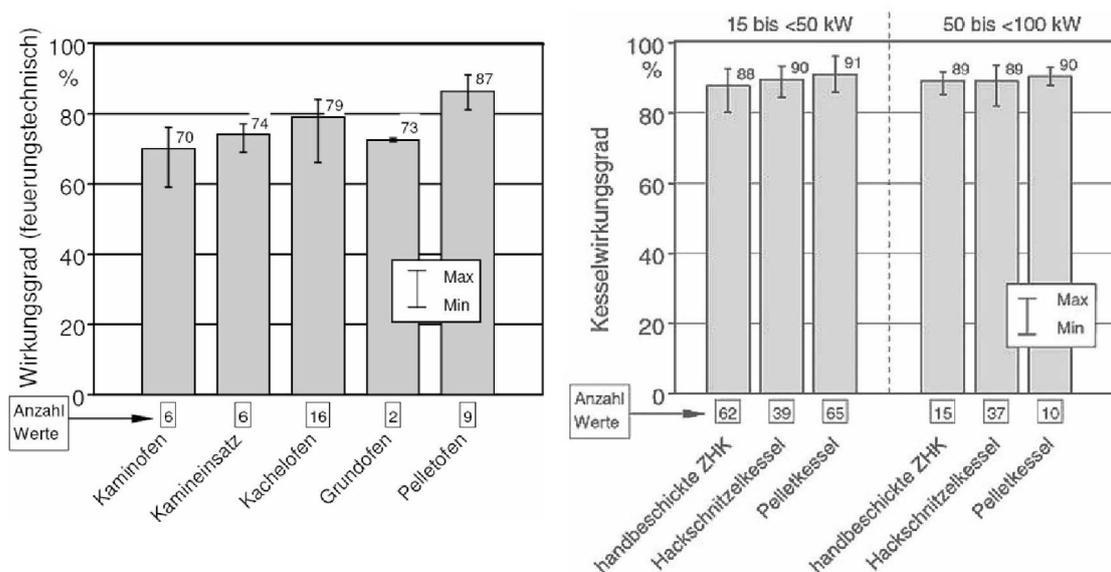


Abbildung 3.34.: Feuerungstechnische Wirkungsgrade von Einzelfeuerstätten (links), Kesselwirkungsgrade von Zentralheizungsanlagen (rechts) [21].

Durch die stark forcierte technische Entwicklung bei Holzheizungsanlagen ist der Kesselwirkungsgrad seit den 80-er Jahren um etwa 30 Prozentpunkte gestiegen (siehe Abb. 3.35).

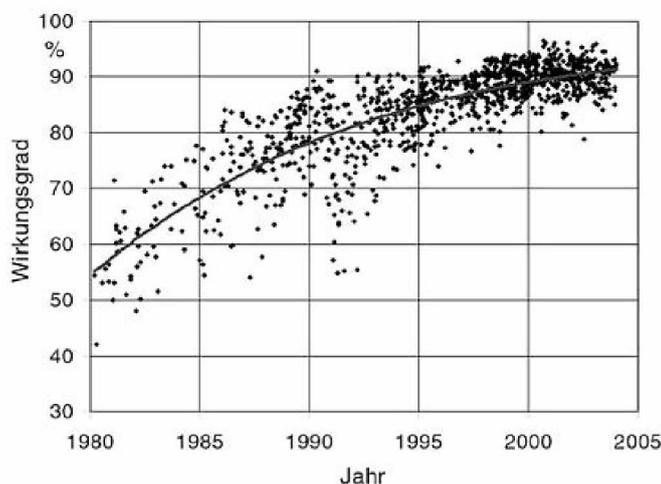


Abbildung 3.35.: Verbesserung der Kesselwirkungsgrade von hand- und automatisch beschickten Holzfeuerungen kleinerer Leistung (Ergebnisse aus Typenprüfung nach [108] aus [21]).

Weitere Steigerungen sind nur mehr durch „Brennwerttechnik“ (Kondensation des Rauchgases durch z. T. zusätzliche Wärmeübertrager) möglich. Im Biomassebereich wird diese Technik vor allem bei größeren Anlagen und bei Bedarf von Niedertemperaturwärme angewandt. Inzwischen gibt es aber bereits Anlagen mit Brennwertkessel für den Haushaltsbereich. Ein positiver Nebeneffekt ist dabei die vermehrt Abscheidung von Partikel aus dem Rauchgas [21].

4. Rechtliche Rahmenbedingungen und normative Vorgaben

Ziel in diesem Kapitel ist die Darstellung des Rahmens, sowohl rechtlich als auch normativ, in welchem Feuerungsanlagen (vor allem Kleinf Feuerungen) in Österreich betrieben werden dürfen. Dies ist in dieser Arbeit vor allem für die Einordnung der eigenen Feuerungsanlage bezüglich Emissionswerte und Wirkungsgrade von Bedeutung, um Problembereiche und Optimierungsmöglichkeiten identifizieren zu können.

Da dies in der Diplomarbeit von KARNER [109] bereits ausführlich erfolgte, werden hier nur mehr die wichtigsten Eckpunkte umrissen und die derzeit gültigen Werte dargestellt.

4.1. Gesetzliche Vorgaben

Da das Inverkehrbringen von Kleinf Feuerungen in den Ländergesetzen verankert ist, war man bestrebt, die teilweise verschiedenen Regelungen zu vereinheitlichen. Im Zuge der Länderexpertenkonferenz auf Grundlage des Art. 15a B-VG wurde eine „*Vereinbarung mit dem Ziel der einheitlichen Regelung der in den Zuständigkeitsbereich der Länder fallenden Maßnahmen für Heizungsanlagen und Blockheizkraftwerke, hinsichtlich luftreinhaltender Aspekte sowie hinsichtlich Energieeffizienz bei Feuerungsanlagen*“ [110] getroffen, die in der letztgültigen Fassung [111] z. B. vom Steiermärkischen Landtag am 25. November 2010 für das Bundesland Steiermark beschlossen wurde. Diese Vereinbarung gilt für Anlagen zur Beheizung von Räumen bzw. zur Warmwasserbereitung. Für Feuerungsanlagen, die gewerblich genutzt werden gilt jedoch die 331. Feuerungsanlagenverordnung (FAV) [112] des Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten (BMWA) [113]. Die folgenden Angaben sind Auszüge aus der „*Vereinbarung gemäß Art. 15a B-VG über das Inverkehrbringen von Kleinf Feuerungen und die Überprüfung von Feuerungsanlagen und Blockheizkraftwerken*“ [111], welche für die in dieser Arbeit verwendeten Feuerungsanlage relevant sind.

4.1.1. Wirkungsgradanforderungen für das Inverkehrbringen von Kleinf Feuerungen

Kleinf Feuerungen dürfen sowohl mit Nennlast als auch unter Teillast die in Tabelle 4.1 angegebenen Wirkungsgrade nicht unterschreiten. Dieser Nachweis muss bei einer Typen- oder Einzelprüfung in einer akkreditierten Prüfstelle erbracht werden [109].

4.1.2. Emissionsgrenzwerte für das Inverkehrbringen von Kleinf Feuerungen

Die in Tabelle 4.2 angegebenen Emissionsgrenzwerte gelten für das Inverkehrbringen von Kleinf Feuerungen und dürfen, analog den Anforderungen beim Wirkungsgrad, bei einer Typenprüfung nicht überschritten werden [111].

Tabelle 4.1.: Mindestwirkungsgrade von Zentralheizungsgeräten für feste fossile und standardisierte biogene Brennstoffe in Abhängigkeit der Nennwärmeleistung [111].

	Mindestwirkungsgrad in %
a) mit händischer Beschickung	
bis 10 kW	79
über 10 bis 200 kW	$(71,3 + 7,7 \log P_n)$
über 200 kW	89
b) mit automatischer Beschickung	
bis 10 kW	80
über 10 bis 200 kW	$(72,3 + 7,7 \log P_n)$
über 200 kW	90

Tabelle 4.2.: Emissionsgrenzwerte für feste Brennstoffe mit automatischer Beschickung [111].

Parameter	Emissionsgrenzwerte (mg/MJ)			
	Holzpellets Raumheizgeräte	Holzpellets Zentralheizgeräte	sonstige Holzbrennstoffe	sonstige standardisierte biogene Brennstoffe
CO	500*	250*	250*	500*
NO _x	150 / 100**	150 / 100**	150 / 100**	300
OGC	30	30 / 20**	30	30 / 20**
Staub	50 / 25**	40 / 20**	50 / 30**	60 / 35**

*Bei Teillastbetrieb mit 30% der Nennwärmeleistung kann der Grenzwert um 50% überschritten werden.

**ab 1.1.2015 geltende Werte

4.1.3. Emissionsgrenzwerte und Abgasverluste für den Betrieb von Feuerungsanlagen

Neben den Grenzwerten für das Inverkehrbringen der Anlagen gibt es auch Vorschriften für den Betrieb. Die in Tabelle 4.3 angeführten Abgasverluste und Emissionsgrenzwerte sind auf Normbedingungen und die Probenahmendauer bezogene Mittelwerte und gelten für Feuerungsanlagen mit einer Leistung unter 50 kW [111].

Tabelle 4.3.: Emissionsgrenzwerte und Abgasverluste von Feuerungsanlagen im Betrieb für standardisierte feste Brennstoffe [111].

Parameter	händisch beschickt	automatisch beschickt
Abgasverlust [%]	20	19
CO [mg/m ³]	3500	1500

Der Grenzwert für CO ist für biogene Brennstoffe auf einen Sauerstoffgehalt von 11%, für fossile Brennstoffe auf einen Sauerstoffgehalt von 6% bezogen.

Alle bisher angeführten Angaben und Grenzwerte gelten für standardisierte, d. h. in einer Norm angeführte und charakterisierte Brennstoffe. Die Emissionsgrenzwerte in Tabelle 4.4 betreffen jedoch die erstmalige Überprüfung der Feuerungsanlage bei Betrieb mit nicht standardisierten biogenen Brennstoffen [111].

Tabelle 4.4.: Emissionsgrenzwerte für die erstmalige Überprüfung mit nicht standardisierten festen biogenen Brennstoffen [111].

Parameter	händisch beschickt
Abgasverlust [%]	19
Staub [mg/m ³]	150
CO [mg/m ³]	800*
OGC [mg/m ³]	50
NO _x [mg/m ³]	500

Die Grenzwerte für CO, NO_x, OGC und Staub sind auf einen Sauerstoffgehalt von 11 % bezogen.

*Bei Teillastbetrieb kleiner 50 % der Nennwärmeleistung darf der Grenzwert um bis zu 50 % überschritten werden.

4.1.4. Prüfbedingungen für die Emissionsgrenzwerte

Die entsprechende Prüfung von Kleinf Feuerungen muss nach den Regeln der Technik (ÖNORMEN oder gleichwertige technische Richtlinien) durchgeführt werden. Die Emissionsgrenzwerte müssen für feste Brennstoffe bei Nennlast und der vom Hersteller kleinsten angegebenen Teillast des Wärmeleistungsbereiches nachgewiesen werden [111].

4.1.5. Zulässige Brennstoffe

Brennstoffe, die in Feuerungsanlagen verfeuert werden dürfen, müssen die Anforderungen laut Tabelle in Abschnitt V, Artikel 16 der Vereinbarung gemäß Art. 15a B-VG erfüllen. Dies sind beispielsweise für Holz- und Rindenpellets die ÖNORM M 7135 (Presslinge aus naturbelassenem Holz oder naturbelassener Rinde - Pellets und Briketts, Anforderungen und Prüfbedingungen) [33]. Sonstige Brennstoffe zum Beispiel, standardisiert oder nicht standardisiert, dürfen einen Gesamtchlorgehalt von 1500 mg/kg Trockenmasse nicht überschreiten (siehe dazu Tab. 4.5).

Tabelle 4.5.: Brennstofftechnische Anforderungen Presslinge aus Biomasse-Brennstoffen und Energiekorn laut ÖNORM (Auszug aus [33] und [114])

Eigenschaft	Einheit	Holzpellets HP1	Rindenpellets RP2	Energiekorn
Durchmesser D	mm	$4 \leq D \leq 10$	$4 \leq D \leq 10$	-
Wassergehalt W	[Gew% OS]	$\leq 10,0$	$\leq 18,0$	$\leq 15,0$
Aschegehalt A	[Gew% TM]	$\leq 0,50$	$\leq 6,0$	$\leq 3,0/5,0^1$
Heizwert H _u	[MJ/kg TM]	$\geq 18,0$	$\geq 18,0$	$\geq 16,5$
Stickstoff N	[Gew% TM]	$\leq 0,30$	$\leq 0,60$	$\leq 1,5/2,0$
Schwefel S	[Gew% TM]	$\leq 0,04$	$\leq 0,08$	$\leq 0,15$
Chlor Cl	[Gew% TM]	$\leq 0,02$	$\leq 0,04$	$\leq 0,15$
Abrieb	[Gew% OS]	$\leq 2,3$	$\leq 2,3$	-
Ascheerweichungstemperatur	[°C]	-	-	$> 800^1$

¹einschließlich Additive

Kann durch den Einsatz von Abgasreinigungsanlagen der Grenzwert von Chlorwasserstoff (HCl) von 30 mg/Nm³ (11 % O₂) eingehalten werden, sind auch Brennstoffe mit einem höheren Chlorgehalt zulässig. Dasselbe gilt auch für die praktische Erprobung von diversen biogenen Materialien in Versuchsanlagen [111]. Aufgrund dieser Bestimmung ist es meist nicht möglich Stroh oder Miscanthus, die beide einen erheblich höheren Chlorgehalt aufweisen, in einer Kleinf Feuerung ohne

Abgasreinigungsanlage zu verbrennen.

4.2. Normative Vorgaben zur Heizkesselprüfung

Heizkessel für die Verfeuerung von festen Brennstoffen werden bis zu einer Nenn-Wärmeleistung von 300 kW, max. 100 °C Wärmeträgertemperatur und höchstens 6 bar Betriebsdruck nach ÖNORM EN 303-5 [115] geprüft. Als zulässige Brennstoffe sind in dieser Norm, neben den fossilen, nur standardisierte biogene Holzbrennstoffe aufgelistet. Aufgrund der in letzter Zeit neu herausgegebenen Normen für andere biogenen Brennstoffe, wie beispielsweise ÖNORM EN 14961-1 [26] oder ÖNORM C 4002 [40] können auch biogenen Brennstoffe wie Weizenstroh oder Miscanthus in Anlehnung an ÖNORM EN 303-5 geprüft werden.

Im folgenden sollen nur die wichtigsten Parameter der Heizkesselprüfung erläutert werden.

4.2.1. Bauanforderungen

Diese Anforderungen betreffen die verwendeten Werkstoffe, Materialstärken oder das Ausführen von Schweißnähten. Weiters sind die Sicherheits- und Ausführungsanforderungen bezüglich Entlüftbarkeit, Wärmedämmung, wasserseitiger Widerstand, heizgasseitige Dichtigkeit, Sicherheitstemperaturbegrenzung, Beschickungseinrichtung etc. genau festgelegt [115].

4.2.2. Heiztechnische Anforderungen

Die heiztechnischen Anforderungen betreffen Kesselwirkungsgrad (siehe auch Unterabschnitt 3.1.3), Abgastemperatur (max. 160 K über Raumtemperatur), Förderdruck (aus Diagramm), Brenndauer (mind. 6 h), kleinste Wärmeleistung (höchstens 30 % der Nenn-Wärmeleistung), Emissionsgrenzwerte und zulässige Oberflächentemperaturen [115].

4.2.3. Betriebsvorschriften der heiztechnischen Prüfung

Während der Heizkessel im angegebenen Wärmeleistungsbereich betrieben wird, erfolgt die Messung von Wärmeleistung, Kesselwirkungsgrad, Brenndauer, Verbrennungsgaszusammensetzung, Abgastemperatur, Förderdruck und Emissionsverhalten. Dabei muss der Heizkessel so betrieben werden, dass ein durchgehender Betrieb (ohne Abschaltung durch den Thermostat) bei Nenn-Wärmeleistung gewährleistet ist. Vor Beginn der Messperiode muss der Heizkessel auf Betriebstemperatur gebracht werden und die Temperatur der Umgebungsluft muss zwischen 15 und 30 °C liegen. Bei einer kontinuierlichen Messung sind Wärmeleistung, Vor- und Rücklauftemperatur, Eintrittstemperatur des Kaltwassers, Umgebungstemperatur, Abgastemperatur, Förderdruck, O₂ bzw. CO₂, CO, OGC, NO_x und Staub (diskontinuierlich) zu messen. Aus den aufgezeichneten Mittelwerten mit einem maximalen Aufzeichnungsintervall von 1 Minute werden die Mittelwerte für die Versuchsdauer gebildet. Bei Heizkessel mit automatischer Beschickung muss die Versuchsdauer bei Nenn- als auch kleinster Wärmeleistung mindestens 6 Stunden betragen [115].

4.2.4. Bestimmung der Wärmeleistung und des Kesselwirkungsgrades

Die Wärmeleistung, welche nutzbar an einen Wärmeträger abgegeben wird, kann unmittelbar am Heizkessel oder mittelbar an einem Wärmeübertrager gemessen werden. Bei der unmittelbaren Messung wird die Leistung aufgrund des Wasser-Massenstromes und den Temperaturen an Kesselein- und Kesselaustritt bestimmt.

Bei der Ermittlung des Wirkungsgrades wird dieser auf den Heizwert H_u bezogen. Dabei muss die direkte Methode zur Messung der Wärmeleistung angewandt werden [115].

Die in ÖNORM EN 303-5 geforderdeten Wirkungsgrade sind aufgrund des Alters der Norm deutlich geringer als die in Art. 15a B-VG [111] geforderten Werte, die schlussendlich jedoch bindend sind.

4.2.5. Bestimmung der Emissionswerte

Wie bereits erwähnt müssen bei Heizkessel mit automatischer Beschickung die Gehalte von Sauerstoff O_2 bzw. Kohlenstoffdioxid CO_2 , Kohlenstoffmonoxid CO , organisch gebundener Kohlenstoff OGC, Stickoxide NO_x (ausgewiesen als NO_2) und Staub (diskontinuierlich) gemessen werden. Außer bei Staub wird während der Zeit der gesamten Versuchsdauer gemessen. Bei der Ermittlung des Staubgehaltes erfolgt die Messung in mindestens 4, über die Versuchsdauer verteilte, gleiche Zeitabschnitte mit einer Dauer von maximal je 30 Minuten [115].

Wie bereits beim Kesselwirkungsgrad weichen auch die Emissionsgrenzwerte in der Norm ÖNORM EN 303-5 von jenen in Art. 15a B-VG [111] ab. Es gelten die strengeren gemäß Art. 15a B-VG.

5. Stand der Technik / Technologieüberblick bei Halmgutfeuerungen

Dieses Kapitel ist in drei Abschnitte gegliedert: Im ersten Abschnitt erfolgt die Darstellung von Aggregaten, die vom Hersteller für die Verbrennung von Halmgutbrennstoffen freigegeben bzw. speziell dafür entwickelt oder bei externen Tests dafür empfohlen wurden. Im zweiten Abschnitt werden Aggregate vorgestellt, die in mindestens zwei Quellen für die Verbrennung von Halmgutbrennstoffen als geeignet beschrieben werden, für die jedoch in der Literatur nur mangelhafte bis keine Beschreibungen der Feuerungsprinzipien zu finden sind. Und schließlich sind im dritten Abschnitt jene Anlagen angeführt, welche nur in Listen oder Aufzählungen als für die Verbrennung von Halmgutbrennstoffen geeignet ausgewiesen werden. Darüber hinaus gibt es für diese keine eindeutigen Beweise bzw. Berichte für einen problemlosen Betrieb.

5.1. Geeignete Aggregate mit Beschreibung des Feuerungsprinzips

Bei diesen Aggregaten gibt es zum einen vom Hersteller bzw. Vertreiber eine Empfehlung für die Verbrennung von halmgutartigen bzw. nicht holzartigen Brennstoffen, zum anderen werden diese Aggregate in Listen oder Aufzählungen für diese Brennstoffe empfohlen, oder es gibt Berichte oder Beschreibungen vom erfolgreichen Betrieb. Des weiteren ist eine weitgehend genaue und vollständige, oder beinahe vollständige Beschreibungen des Feuerungssystems vorhanden. Dies umfasst vor allem Brennstoffzufuhr zum Brenner, Feuerungsprinzip, Entaschungssystem, Luftführung und Regelung.

5.1.1. Guntamatic Powercorn und Powerchip

Der österreichische Hersteller GUNTAMATIC HEIZTECHNIK GMBH hat zwei Produktserien, POWERCORN und POWERCHIP, in seinem Programm, die ausdrücklich auch für die Verbrennung von nicht holzartiger Biomasse geeignet sind. Die Reihe der Energiekornfeuerung POWERCORN hat mit den Typen POWERCORN 7-30, POWERCORN 12-50 und POWERCORN 22-75 Nennwärmeleistungen für Holz (Getreide) von je 7 - 30 kW (7 - 25 kW), 12 - 50 kW (12 - 40 kW) und 22 - 75 kW (21 - 70 kW) zur Auswahl, wobei vom Hersteller nur Holzpelletes und Energiegetreide empfohlen wird. Die Reihe der Hackgutfeuerung POWERCHIP bietet mit den Typen POWERCHIP 20/40, POWERCHIP 40/50, POWERCHIP 75 und POWERCHIP 100 Nennwärmeleistungen für Holz (Getreide) von 7 - 30 kW (7 - 25 kW), 12 - 50 kW (max. 25 kW), 22 - 75 kW (21 - 70 kW) und 22 - 100 kW (21 - 70 kW) an, wobei der Hersteller die Brennstoffe Holzpellets, Hackgut G30/W30¹, Energiekorn und Miscanthus für geeignet spezifiziert. Daneben gibt es noch die Type POWERCORN 50 SONDER mit einer Nennwärmeleistung von 12 - 50 kW (12 - 40 kW), wobei hier Merkmale des Kessels der Serie POWERCORN mit solchen der Brennstoffzuförderung der Serie POWERCHIP vereint sind. Beiden Typen gemeinsam ist das unten erläuterte Verbrennungsprinzip.

¹G30: Holzhackgut mit einer Nennlänge von 30 mm. Der Rückstand auf dem Grobsieb mit der Nenn-Maschenweite von 16 mm und der Durchgang durch das Mittelsieb mit der Nenn-Maschenweite von 2,8 mm darf höchstens je 20 % der Gesamtmasse betragen. Die max. Länge darf höchstens 8,5 cm betragen. W30: Wassergehalt 20 % < w ≤ 30 % (lagerbeständiges Holzhackgut) [116].

Die beiden Serien unterscheiden sich dadurch, dass beim POWERCORN ein Vorlagebehälter am Kessel integriert ist, der mittels Saugsystem befüllt werden kann, dagegen beim POWERCHIP kein Vorlagebehälter existiert und die Stokereinheit mit integrierter Rückbrandsicherung mittels Raumaustragungsschnecke mit Brennstoff versorgt wird. Weiters verfügt die Serie POWERCORN über eine nicht näher definierte spezielle Auskleidung als Korrosionsschutz im Reaktionsrohr im oberen Bereich des Kessels, die bei der Serie POWERCHIP bei Verwendung von Energiegetreide oder Miscanthus nachgerüstet werden muss.

Der Brennstoff wird mittels Stokerschnecke auf den Treppenrost im feuerfest ausgekleideten Brennraum transportiert. Die Zündung erfolgt durch ein Heissluftgebläse. Die einzelnen, gegenläufig beweglichen Rostelemente sorgen für den Weitertransport des Brennstoffbettes (Abb. 5.1, Vorschubrostfeuerung laut [117]).



Abbildung 5.1.: Guntamatic Energiekornfeuerung Powercorn im Schnitt (links) [118], Treppenrost mit Primärluftschlitzen (rechts oben) und Flambild mit Energiekorn (rechts unten) [119].

Die ständige Bewegung und Glutbetttemperaturen von ca. 650 °C sollen die Schlackebildung von Energiegetreide oder Miscanthus vermeiden. Der Hersteller empfiehlt bei diesen Brennstoffen gelöschten pulvrigen Kalk beizumischen². Andere Literaturstellen wie [121] sprechen davon, dass die Kalkzugabe durch diese Rostkonstruktion entfallen kann, bzw. es wurden wie bei HARTMANN [100] beide Varianten erfolgreich getestet. Die Primärluft strömt durch Schlitze im Treppenrost ins Brennstoffbett und sorgt dadurch auf für die permanente Kühlung der Rostelemente. Stege an der Unterseite der Rostelemente greifen in die Rostschlitze ein und reinigen diese während der Rostbewegung. Am Ende des Rostes fällt die Asche auf eine langsam drehende Ascheschnecke, die für den Abtransport und die Zerkleinerung von Asche- bzw. Schlackebestandteilen sorgt. Oberhalb

²Laut Hersteller ist es empfehlenswert dem Getreide vor der Verbrennung ca. 0,3 - 0,5 Gewichtsprozent bis 50 kW Kesselleistung und über 50 kW 0,5 - 0,8 Gewichtsprozent Weißkalkhydrat $\text{Ca}(\text{CO})_2$, gelöschten pulvrigen Kalk, beizumischen [118, 120].

des Rostes wird in einer düsenartigen Verengung die Sekundärluft radial eingeblasen und sorgt danach in der Ausbrandzone für den Gasausbrand. Die Anlage verfügt über eine elektronische Regelung mittels Lambdasonde, ein drehzahlgeregeltes Druckgebläse sorgt für die Verbrennungsluftzufuhr, ein Saugzuggebläse leitet die Verbrennungsgase in den Kamin und hält den Kaminzug konstant [118, 120, 122, 123, 121].

5.1.2. Heizomat

Der deutsche Hersteller HEIZOMAT hat mit den Modellen RHK-AK und HSK-RA zwei Biomassekessel im Programm, welche für die Verwertung von sonstiger Biomasse bzw. landwirtschaftlichen Reststoffen geeignet sind.

Die Modellpalette der HEIZOMAT Spezialheizkessel RHK-AK (Abb. 5.2) umfasst im Leistungsbereich bis 100 kW die Modelle RHK-AK 30, RHK-AK 50, RHK-AK 60, RHK-AK 75 und RHK-AK 100 mit den Nennwärmeleistungen von jeweils 36 kW, 50 kW, 60 kW, 75 kW und 101 kW für den Brennstoff Holz. Laut Hersteller eignet es sich für die verschiedensten Brennstoffe wie Hack-schnitzel, Holzpellets, Sägemehl, Rindenschnitzel bzw. sonstige Biomasse [124].



Abbildung 5.2.: Schema des HEIZOMAT RHK [125].

Der Brennstoff wird über eine Förderschnecke in die aus Feuerfestmaterial ausgekleidete runde Zyklonbrennkammer mit gegenläufiger Turbinenluftzuführung (Rotaionsverbrennung) eingebracht. Den Boden der Brennkammer bildet ein luftgekühlter, starrer Schrägrost, auf dem der Brennstoff langsam mittels patentierter Kettenentäschung (*Ketten-Riegel-Entäschung* laut [117]) über den Kesselboden zum Entäschungsschacht befördert wird (Abb. 5.3). Dadurch können träge vergasende bzw. verbrennende Brennstoffe gut ausgebrannt werden. Schlackehaltige Verbrennungsrückstände und Fremdkörper werden dadurch ebenfalls entfernt. Die Zufuhr der Verbrennungsluft erfolgt mittels eines drehzahlgeregelten Gebläses, wobei die Primärluftzufuhr seitlich über Hochtemperatur-Gussblöcke und die Sekundärluftzufuhr beidseitig über der Flamme in die Brennkammer bewerkstelligt wird. Der Brennstoff wird mittels Glühstab automatisch gezündet,

über eine Lambdasonde erfolgt die elektronische Regelung der Anlage. Die Wärmeübertrager werden ebenfalls automatisch während der Entaschung gereinigt [125, 100].



Abbildung 5.3.: HEIZOMAT RHK-AK Brennraum mit Ketten-Entaschung (links) [126] und Ascheaustragung (rechts) [125].

Die Modellpalette der HEIZOMAT Spezialheizkessel HSK-RA umfasst im Leistungsbereich bis 100 kW die Modelle HSK-RA 30, HSK-RA 50, HSK-RA 60, HSK-RA 75 und HSK-RA 100 mit den Nennwärmeleistungen von jeweils 33 kW, 44,5 kW, 60 kW, 75 kW und 96 kW für den Brennstoff Holz [124]. Laut Hersteller eignet es sich für die verschiedensten Brennstoffe wie Hackschnitzel, Hobelspäne, Sägemehl, Rindenschnitzel, Stohpellets usw.

Der ausgemauerte Feuerraum, welcher wassergekühlt ist, besitzt einen starren Rost (Abb. 5.4). Ein Ascheräumer sorgt für die Zerkleinerung Aschebrocken und den Transport der Asche durch den Rost in den Aschebehälter. Die Verbrennungsluft wird vom Verbrennungsluftgebläse als Primärluft durch den Rost und als Sekundärluft oberhalb des Brennstoffbettes in den Brennraum gedrückt. Die Verbrennungsgase passieren auf dem Weg zum Wärmeübertrager die Ascheberuhigungskammer, in der sich die schwerere Flugasche absetzen kann und direkt in die Ascheaustragsschnecke gelangt. Der Brennstoff wird mittels Glühstab automatisch gezündet, die elektronische Regelung der Anlage erfolgt über eine Lambdasonde [125].



Abbildung 5.4.: Brennraum des HEIZOMAT HSK-RA (links) und Rost mit Ascheräumer (rechts) [125].

5.1.3. Ökotherm

Der deutsche Hersteller A.P. BIOENERGIETECHNIK GMBH hat mit seinen Anlagen ÖKOTHERM COMPACT eine Modellreihe am Markt, die neben der Verbrennung von Holzpellets und Holzhack-schnitzel besonders für Stroh- und Heupellets, Miscanthus, Getreidekörner, Spelzen, Pressrückstände, Trester, Raps, Rapskuchen etc. konzipiert wurde. Im Leistungsbereich bis 100 W stehen die Modelle ÖKOTHERM COMPACT TYP CS (30 kW), Typ C0 (49 kW) und Typ C1 (88 kW) mit einem patentierten Verbrennungssystem zur Verfügung.

Der Brennstoff wird mittels Förderschnecke in den Feuerraum transportiert (Quereinschub laut [100]). Dieser ist wassergekühlt und hat eine Brennmulde (Vorofen bzw. Muldenfeuerung laut [127]), wobei auf dem Feuerraumboden ein Ascheschieber angeordnet ist. Aufgrund der Kühlung der keramischen Feuerraumwände kann die Temperatur im Feuerraum in gewissen Grenzen gesenkt werden. Durch den Ascheschieber ist es möglich, die Verweilzeit der Asche im heißen Glutbereich vorzugeben, um bei Brennstoffen mit niedrigem Ascheschmelzpunkt die Gefahr der Schlackebildung im Feuerraum zu reduzieren. Für die Zufuhr der Verbrennungsluft sorgen zwei getrennte Gebläse, wobei das erstere für den Zuluftstrom über die rechte Seitenwand zuständig ist. Der zweite Zuluftstrom erfolgt über die linke Seitenwand der Brennmulde, wobei diese Bohrungen etwas höher als jene an der anderen Seite angeordnet sind, um einen Drall im Feuerraum zu erzeugen. Zusätzlich ist ein Saugzuggebläse am Kesselausgang positioniert. Die Entaschung erfolgt vollautomatisch in einen Aschecontainer. Weiters soll durch die gekühlten Feuerraumwände ein Anbacken der Schlacke und dadurch ein Verstopfen der Verbrennungsluftöffnungen in den Seitenwänden vermieden werden. Dadurch ist diese Feuerungsanlage nicht nur für die Verbrennung von Holzbrennstoffen, sondern auch für Biomassebrennstoffe mit niedrigem Ascheschmelzpunkt geeignet. Die Zündung des Brennstoffs erfolgt automatisch mittels Heissluft, die Anlage wird mit Hilfe von Lambdasonde und Abgastemperatur geregelt [128, 39].

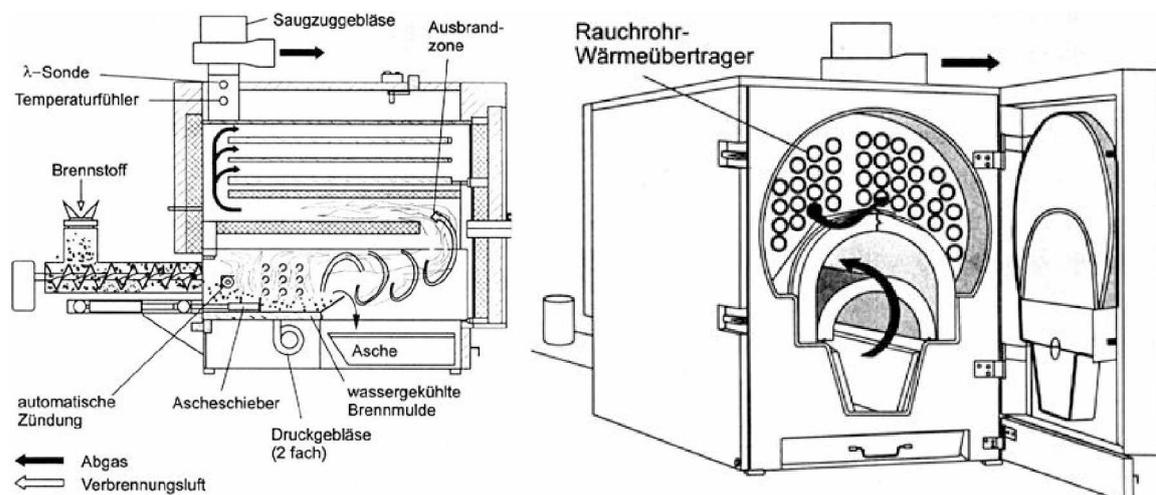


Abbildung 5.5.: Schema der ÖKOTHERM COMPACT-Anlage C0 [129].

5.1.4. Biokompakt Gerlinger

Der österreichische Hersteller BOKOMPAKT HEIZTECHNIK GMBH entwickelte den Spezialkessel BOKOMPAKT AWK (Abb. 5.6) zur Verbrennung von Hack-schnitzel, Holzpellets, Stroh- und Ganzpflanzenpellets, sowie Getreide und verschiedenste Kerne wie Kirschen- und Olivenkerne, Raps-pellets, Nussschalen und ähnliches. Dabei stehen für den Leistungsbereich bis 100 kW die Typen

AWK 20, AWK 50, AWK 80, und AWK 90 mit einer Nennwärmeleistung für Holzbrennstoffe von 25 kW, 48 kW, 78 kW und 98 kW zur Verfügung.

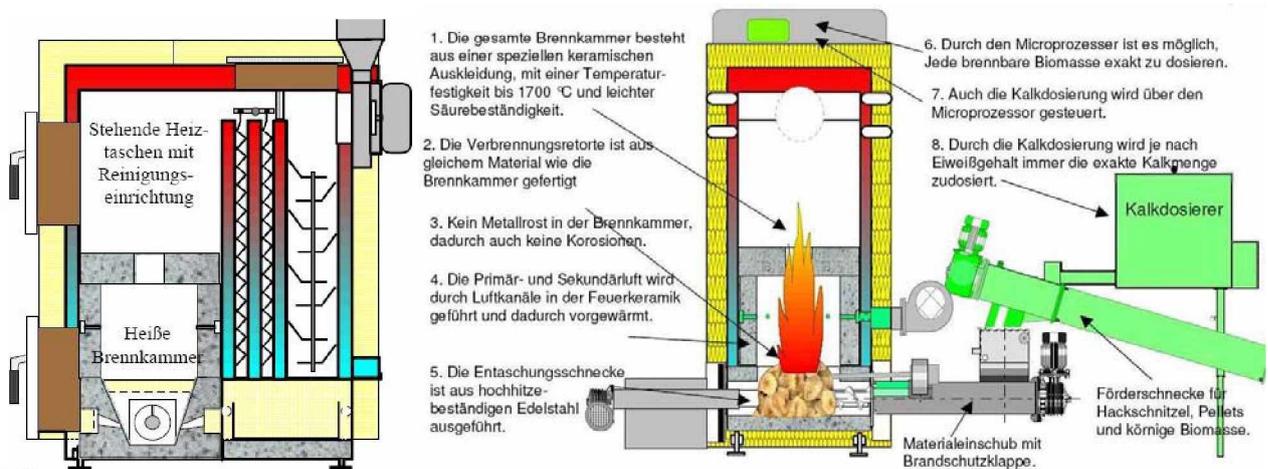


Abbildung 5.6.: Biokompakt Kessel im Schnitt durch Brennkammer und Wärmetauscher (links) [130] und Schnitt 90° dazu durch die Brennkammer (rechts) [131].

Über eine Förderschnecke wird der Brennstoff in eine wannenförmige Retortenmulde der Brennkammer gefördert (bei [127] und [117] als Unterschubfeuerung bezeichnet). Der Biokompakt-Kessel arbeitet mit einer gestuften Verbrennung d.h. in dieser wannenförmigen Retortenmulde wird der Brennstoff zunächst vergast, wobei die durch die Schamotte vorgewärmte Vergasungsluft von einem geregelten Primärlüfter über Bohrungen seitlich der Retortenmulde dem Brennstoff zugeführt wird (siehe Abb. 5.7). Die Zündung erfolgt automatisch. Über dem Vergasungsteil ist die ebenfalls voll schamottierte Hochtemperatur-Wirbelkammer angeordnet in der über speziell angeordnete Sekundärluftdüsen die ebenfalls vorgewärmte Sekundärluft über den geregelten Sekundärlüfter eingeblasen wird. Durch die Verwirbelung der Sekundärluft mit den Schwelgasen soll eine optimale Verbrennung ermöglicht werden. Durch eine runde Öffnung oberhalb der Brennkammer kann die Flamme in die darüber liegende große Ausbrandzone austreten (siehe Abb. 5.7 rechts).



Abbildung 5.7.: Brennkammer des BIOKOMPAKT AWK mit wannenförmiger Retorte aus Schamotte mit Primärluftauslässen (links) und Flamme beim Austritt aus der schamottierten Wirbelkammer in die Ausbrandzone, Versuch mit Roggen bei Volllast, 45 kW [132].

In dieser Ausbrandzone ist es auch möglich einen Notbetrieb mit Stückholz durchzuführen. Nach dem Passieren des Wärmeübertragers werden die Verbrennungsgase über einen geregelten Abgaslüfter, welcher zur Zugstabilisierung dient, in den Kamin gedrückt.

Durch das Nachschieben des zugeführten Brennstoffes wird das Brennstoffbett weiter bewegt, wobei am Ende der wannenförmigen Retorte eine Ascheaustragsschnecke die Asche periodisch in den Aschebehälter fördert. Um eine nachteilige Schlackebildung in der Brennkammer bei ca. 1150 °C als auch Korrosion zu vermeiden wird dem Brennstoff Getreide ca. 2% eines kalkhaltigen „Indikator“ dazugemischt. Diese Kalkdosierung erfolgt bei der Brennstoffzufuhr automatisch durch einen Kalkdosierer. Durch eine neu entwickelte, integrierte Dosieranlage soll eine Reduktion der Stickoxide bei halmgutartigen Biomassebrennstoffen im Abgas möglich sein. Diese sollen dann im Bereich jener von holzartigen Brennstoffen liegen. Welches Reduktionsmittel hier verwendet wird, wo genau es zudosiert wird, als auch die Menge ist aus der Literatur nicht zu ersehen. Eine Lambdasonde sorgt für einen geregelten Verbrennungsablauf [132, 133].

5.1.5. Reka

Die Firma REKA A/S ist ein dänisches Unternehmen, das seit 1979 Heizkessel für private und gewerbliche Anwender herstellt. Ausgehend vom Bau von Industrieanlagen wird diese verwendete Technik auch bei Hausanlagen umgesetzt, wobei auf massive, möglichst einfache Ausführung und Verzicht auch optische Raffinessen auf Kosten von guter Zugänglichkeit Wert gelegt wird. Die Brennstoffauswahl der Modellreihe HKRST (10 kW, 20 kW, 30 kW und 60 kW) reicht von Hackschnitzel, Pellets über Getreide, Getreideabfällen und Stroh bis zu Miscanthus oder Pressrückständen (Abb. 5.8 links).

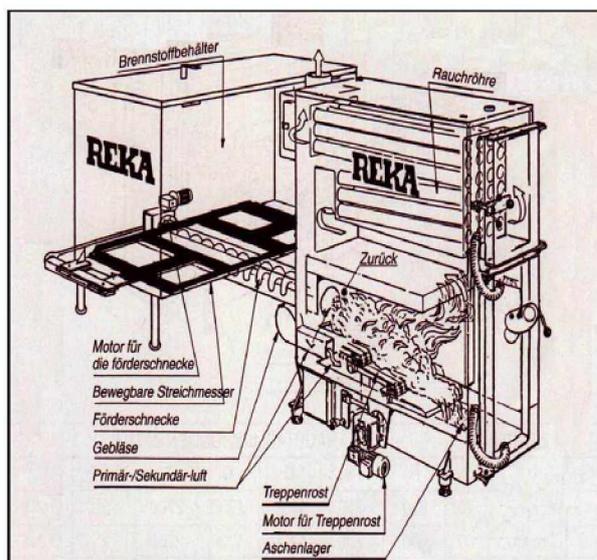


Abbildung 5.8.: REKA Biomassekessel HKRST-FSK 20 im Schnittbild (links) [134] und Ansicht des Brenners (rechts) [135].

Über eine Stokerschnecke wird der Brennstoff dem Brennraum zugeführt, welcher mit einem bewegten Stufen- oder Vorschubrost ausgestattet ist (Abb. 5.8 rechts). Die Vorschubgeschwindigkeit, welche von der Schlackenneigung und dem Ascheanteil des Brennstoffes abhängig ist, wird über die Taktung des Stufenrosts eingestellt. Eine Ascheschnecke befördert die Asche aus dem Kessel. Seitenwände, Türe und Decke des Kesselfundaments sind wassergekühlt [135, 136]. Über den

Treppenrost wird die erforderliche Verbrennungsluft über ein modulierendes Gebläse, gestuft als Primär- und Sekundärluft, zugeführt.[134]

Während die Baureihe HKRST für Brennstoffe bis zu einem maximalen Wasserhgehalt von 30 %³ geeignet sind, wurde die Baureihe HKRSV (20 kW, 30 kW, 60 kW) für Brennstoffe mit einem Wassergehalt zwischen 30 und 50 % entwickelt. Damit ist es auch möglich frische Waldhackschnitzel, Pflegeschnitt, Pferdemit und andere vergleichbare Frischbrennstoffe zu verfeuern. Die Kessel der Modellreihe HKRSV nutzt die selbe Technologie wie jene von HKRST, jedoch wird der Brennstoff bei mit einer höheren Verbrennungstemperatur umgesetzt. In der Literatur ist jedoch nicht beschrieben, wie dies verfahrenstechnisch verwirklicht wird [137, 135].

5.1.6. Ferro

Der deutsche Hersteller FERRO WÄRMETECHNIK GMBH hat drei Modelle von Biomasse Heizsystemem in seinem Programm, die auch in der Lage sind halmgutartige Biomasse zu verbrennen.

Die Anlagen der Reihe FERRO BIOMAT (Abb. 5.9) mit den Modelltypen FBR 15, FBR 25, FBR 40, FBR 60, FBR 90 weisen Nennwärmeleistungen für Holzpellets von 14,9 kW, 25 kW, 45 kW, 60 kW und 90 kW auf. Ein Stokersystem mit Schnecke fördert den Brennstoff, wie Holz- oder Strohpellets, Hackgut, Energiegetreidekörner, Kerne, Schalen etc. in den mit einem Gussverbrennungsschubrost ausgestattetem Brenner. Im Brennraum sind korrosionsgefährdete Bauteile aus Guss, Schamotte oder Edelstahl ausgeführt. Der Schubrost, bei [100] als Stufenrost bezeichnet, fördert das Brennstoffbett weiter, sodass an dessen Ende die Asche abgeworfen werden kann (Abb. 5.9).

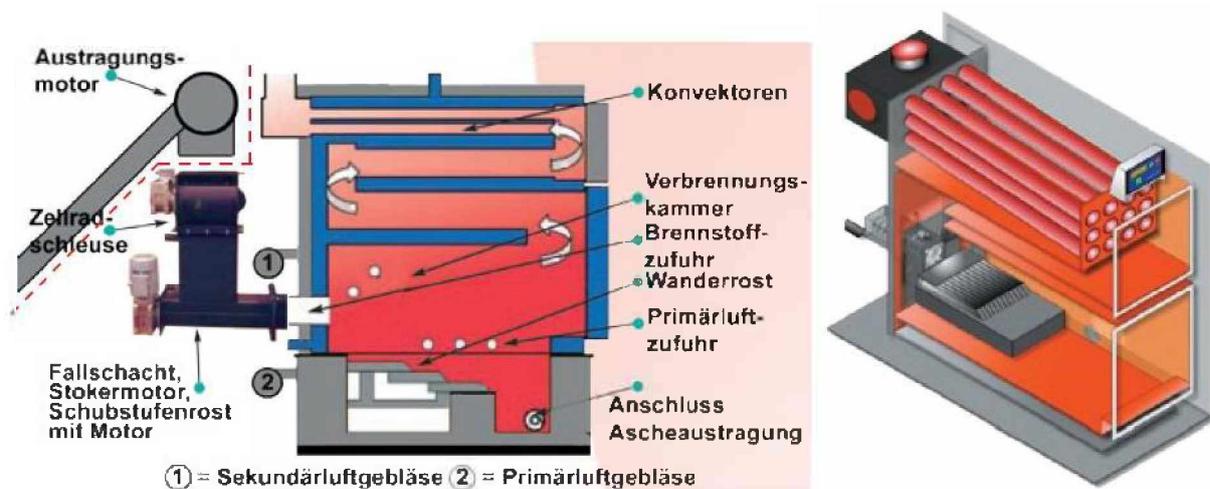


Abbildung 5.9.: Schema des FERRO BIOMAT (links) und isometrische Ansicht mit Schubrost (rechts) [138].

Ein Ascheaustragssystem in Form einer Schnecke bewerkstelligt den automatischen Abtransport der Asche. Drehzahlgeregelte Primär- und Sekundärgebläse, ab FBR 40 als Doppelgebläse ausgeführt, sorgen für die Verbrennungsluftzufuhr, wobei die Primärluft direkt durch seitlich angeordnete Düsen in das Glutbett geblasen wird, die Sekundärluft wird von der Rückseite des Brennraumes

³Die englische Quelle spricht von „moisture“, jedoch verwendet die deutschsprachigen Quelle das Wort „Feuchtegehalt“. Ich gehe davon aus, dass „moisture“ falsch übersetzt wurde und in Wirklichkeit der Wassergehalt gemeint ist. Frische Biobrennstoffe wie waldfisches Holz können Wassergehalte von bis zu 60 % aufweisen. 60 % Wassergehalt entspricht einer Brennstofffeuchte von 150 %.

zugeführt. Der Kessel zündet automatisch mit bis zu 2 Zündversuchen, eine Lambdasonde regelt die entsprechende Verbrennungsluftzufuhr [138, 139].

Der Pelletkessel vom Typ FERRO TURBO (FH-D 30PU, 45 PU, 45-60 PU mit je 30 kW, 45 kW und 60 kW für DIN oder Ö-Norm-Holzpellets) mit dem FERRO TURBO MEHRSTOFF-PELLET-GEBLÄSEBRENNER (FPR 30-64 und FPR 40-150 mit je 20 - 64 und 40 - 150 kW Nennwärmeleistung für Holzpellets) (Abb. 5.10) ist ebenfalls in der Lage neben Holz- auch Stroh-, Torf- und Miscanthuspellets etc. zu verbrennen. Der mit elektrischer Zündung ausgestattete Pelletbrenner ist links- oder rechtsseitig am Kessel anflanschbar und hat einen aus temperaturbeständigem Stahl gefertigten rotierenden Brennerkopf mit Selbstreinigungseffekt. Bezüglich der genauen Funktion des Selbstreinigungseffektes als auch eines erwähnten Luft-Rezirkulationsringspaltes oder der Luftzufuhr ist in der Literatur nichts zu finden. Der Brennraum des Heizkessels ist mit temperaturbeständigen Steinen ausgekleidet. Durch Umstellung ist es möglich im Notbetrieb Scheitholz im oberen Abbrand zu verbrennen [138].

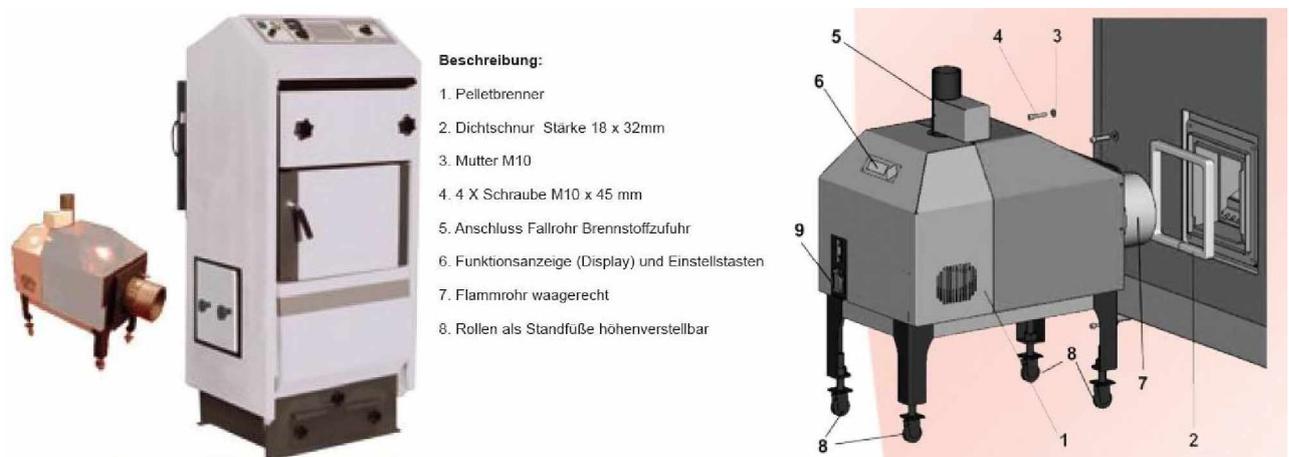


Abbildung 5.10.: Pelletkessel vom Typ FERRO TURBO (links) mit Mehrstoff-Pelletbrenner (rechts) [138].

Ein weiteres Modell dieses Herstellers, FERRO BIOMAT mit Retortenbrenner (Typ FBU 40, FBU 60 und FBU 100 mit je 40 kW, 60 kW und 99 kW Nennwärmeleistung für Holzpellets) ist neben Holzpellets, Spänen und Sägemehl auch zur Verbrennung von Kernen und Schalen geeignet. Die Zuführung des Brennstoffes in den Gussretortenbrenner mit schamottiertem Brennraum erfolgt durch ein Stokersystem mit Schnecke. Der Brenner verfügt auch über eine automatische Zündeinrichtung [138].

Der bei VETTER ET. AL. [134] beschriebene Ferro Biomat FB 23L, welcher auch bei PEISKER [127] als baugleich mit Passat (Einschub- bzw. Muldenfeuerung) beschrieben wurde, ist nicht in den aktuellen Firmenunterlagen [138] zu finden.

5.1.7. Hargassner

Der Pellets Heizkessel AGROFIRE 25 - 40 kW der österreichischen Firma HARGASSNER GMBH (Abbildung 5.11) ist in der Lage Hackgut, Pellets, Elefantengras (lose, brikettiert oder pelletiert), Strohpellets oder Energiekorn zu verbrennen. Die Nennwärmeleistung beträgt für Holzpellets und Hackgut 40 kW, für Agrarbrennstoffe zwischen 25 kW und 35 kW. Der Brennstoff wird von einer Schnecke durch den Schneckenkanal, beides gefertigt aus NIROSTA-Material, in den schamottierten Brennraum (Mustergeschützt) auf einen beweglichen Doppelschieberost gefördert. Bei HARTMANN [100] wird dieser Rost als Stufenrost bezeichnet.

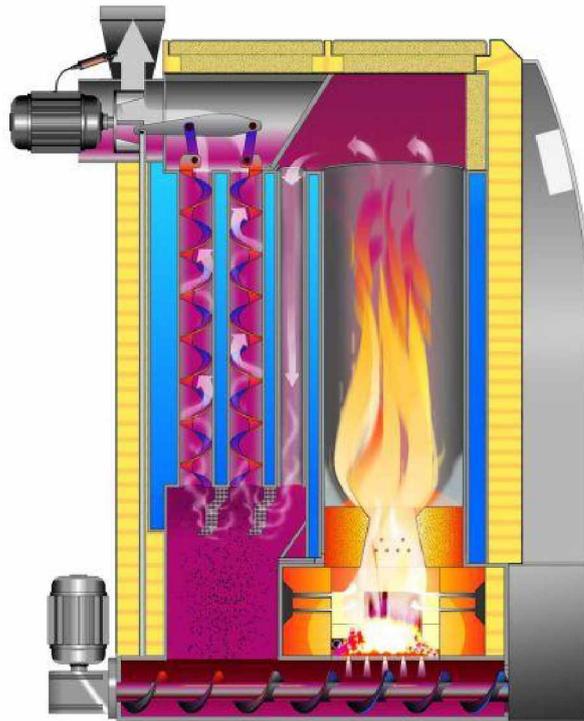


Abbildung 5.11.: Schnittbild des Hargassner AGROFIRE 25-40 kW [140].

Die Zündung erfolgt durch ein elektrisches Zündgebläse. Das Brennstoffbett wird durch Vor- und Rückwärts, Auf- und Ab-Bewegung gleichmäßig auf dem Rost verteilt und kontinuierlich weiterbewegt, wobei durch die ständige Bewegung des Brennstoffgutes ein Verschlacken unterbunden werden soll. Die Verbrennungsrückstände fallen am Ende des Rostes in den mit einer Ascheaus-tragsschnecke versehenen Aschekanal. Diese transportiert sowohl die Flug- als auch die Rostasche in die außenliegende Aschebox. Beim Transport wird die Asche zerkleinert und in der Aschebox auf ein Viertel des ursprünglichen Volumens verdichtet. Über ein drehzahlgeregeltes Saugzuggebläse, das über eine Lambdasonde gesteuert wird, erfolgt die Versorgung des Verbrennungsprozesses mit Verbrennungsluft. Die Primärluft wird von unten durch Bohrungen in den Rostelementen dem Brennstoff zugeführt, die Sekundärluft strömt durch radiale Öffnungen am Brennraumaustritt („Turbobündelstein“) zu den Verbrennungsgasen. Bevor die Sekundärluft in den Brennraum eintritt, wird diese außen an der Brennkammer vorbeigeleitet und dadurch vorgewärmt. Oberhalb der schamottierten Brennkammer befindet sich der Drei-Zug-Wärmeübertrager, wobei die Flamme mit dem ersten Zug eine hohe, freie Ausbrandzone erhält. Der dritte Zug ist mit einer automatischen Reinigungseinrichtung in Form von Schnecken-turbulatoren versehen. Flugascherückstände fallen von hier direkt in den Aschekanal. Für den Betrieb mit Energiekorn und ähnlichen Brennstoffen sind die ersten beiden Züge mit eingesetzten Rohren aus Edelstahl ausgeführt. Durch Einlegen eines mitgelieferten Rostes kann im Notbetrieb auch Stückgut verfeuert werden [141, 142, 143].

5.1.8. C.S. Thermos

C.S. THERMOS S.R.L. ist ein italienischer Hersteller von Kaminöfen und Zentralheizungskessel, der ein neuartiges, zum Patent angemeldetes Feuerungsprinzip [144] verwendet. Mit diesem Feuerungsprinzip, das im Brenner ECOFUOCO bzw. der Pelletsfeuerung CALDAIA CST35 und in einige Kaminöfen angewendet wird (Abb. 5.12), ist es möglich neben Holzpellets auch Stohpellets, Heupellets, Pellets aus Traubenkernen, Schalen von Nüssen, Oliventrester, Kirschkerne, Mais etc. zu

verbrennen [145].



Abbildung 5.12.: Pelletsfeuerung CALDAIA CST35 (links), Brenner ECOFUOCO (mitte), Kaminofen FENICE (rechts)[146].

Das Herzstück des Brenners ist ein als Drehrohr ausgeführter Rost (siehe Abb. 5.13, 21), welcher in der zylindrischen Wand zahlreiche Ausnehmungen aufweist, ähnlich eines Korbes oder der Wäschetrommel einer Waschmaschine. Die Länge des Rostes ist von der Leistung des Brenners abhängig - Kaminöfen mit geringer Nennwärmeleistung haben ein kurzes Drehrohr, der Brenner ECOFUOCO mit einer größeren Leistung ein längeres. Der Brennstoff wird mittels Stokerschnecke (23) über die Eintragsöffnung (29) dem Rost zugeführt und mittels elektrischem Zünder gezündet. Der Rost, welcher auf einer horizontal liegenden Achse (27) gelagert ist, wird in regelmäßigen Abständen um einen definierten Winkel weitergedreht.

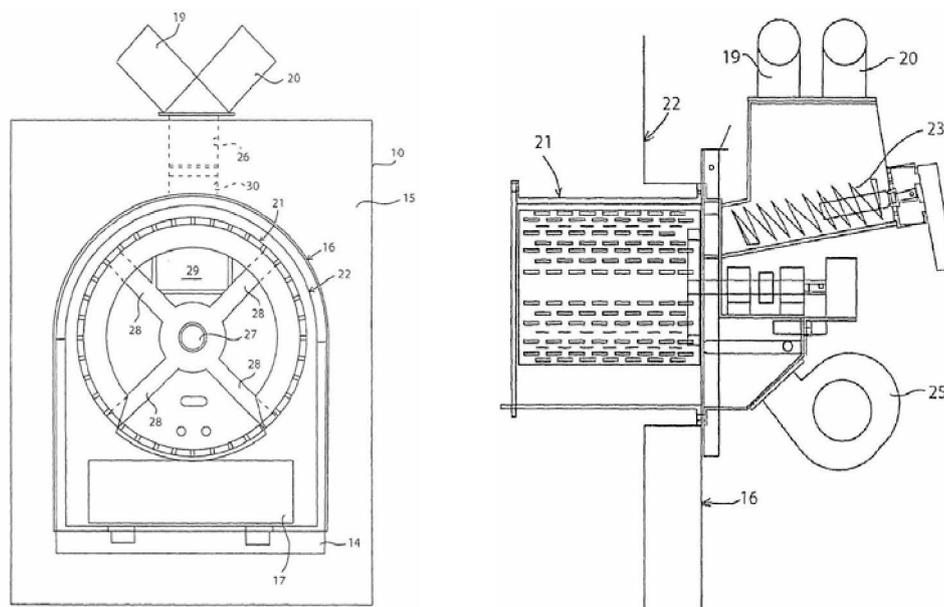


Abbildung 5.13.: Brenner des ECOFUOCO in Vorder- (links) und Seitenansicht (rechts) [144].

Diese Intervalle und der Winkel sind vom Brennstoff abhängig. Ein elektrischer Geber gewährleistet, dass die radial angeordneten Arme, welche den zylindrischen Rost mit der Achse verbinden,

nicht direkt vor der Eintragsöffnung des Brennstoffs verweilen und so den Eintrag beeinträchtigen können. Durch das Drehen des Rostes wird der Brennstoff bewegt und durchmischt, sodass dieser aufgelockert wird und mit der Verbrennungsluft gut reagieren kann. Außerdem soll dadurch das Festkleben des Brennstoffs am Rost selbst oder die Bildung von oberflächlichen Verschlackungen verhindert werden. Was in Abbildung 5.13 nicht zu sehen ist, ist eine Art feststehender Räumler, der in die Innenseite des zylindrischen Rostes hineinragt und etwaige Anbackungen entfernen soll aber auch die Förderung des Brennstoffs von der Eintragsseite zur Austragsseite hin begünstigt. Die Asche bzw. Schlacke fällt einerseits durch die zahlreichen Öffnungen des Rostes, andererseits wird diese an der Austragsseite in eine Aschelade abgeworfen. Die Verbrennungsluft wird in Form von Primär- und Sekundärluft (Sekundärluftgebläse, 25) dem Brennstoff zugeführt, wobei aber keine detaillierte Information über den Ort der Zuführung zum Brennstoff gefunden werden konnten. Die Feuerungsanlage ist mit 2 Lagerbehältern verbunden, sodass nicht holzartiger Brennstoff mit Holzpellets gemischt verbrannt werden können. Außerdem können Holzpellets zum Starten und Hochfahren der Anlage verwendet werden, da eine Vielzahl der nicht holzartigen Biomasse schwer entzündlich ist und es außerdem im Hochfahrbetrieb zu Geruchsbelästigungen bzw. extrem hohen Schadstoffkonzentrationen kommen kann. Der Brenner ist über 2 flexible Kunststoffschläuche mit den Lagerbehältern verbunden. Der Brennstoff wird nach Förderung mittels Austragsschnecken aus den Lagerbehältern über die Kunststoffschläuche durch Schwerkraft dem Brenner bzw. der Vorkammer bzw. Stokerschnecke zugeführt. Die Kunststoffschläuche dienen gleichzeitig als Rückbrandschutz, da diese im Falle des Zurückbrennens abschmelzen sollen und somit die Lagerbehälter abgekoppelt werden [144].

Bei einem Besuch im Werk in Italien im Juni 2009 konnte ein Verbrennungsversuch mit Miscanthuspelletes erfolgreich durchgeführt werden.

5.1.9. Verner

Die Modelle A251G (Nennwärmeleistung von 25 kW für Holzpellets) und A501G (48 kW) des tschechischen Herstellers VERNER sind für die Verbrennung vieler aus landwirtschaftlicher Produktion stammenden biogenen Brennstoffen wie Holz-, Getreide-, Stohpellets, Weizen, Hafer, Roggen, Triticale, Gerste, Mais und Senf geeignet (Abb. 5.14).



Abbildung 5.14.: Blick in den Brenner (links), VERNER-Kessel (mitte) [147]; Brenner in der Ausbrandphase mit Weizenstrohpellets (rechts).

Der Brennstofftransport aus dem Vorratsbehälter in den Feuerraum erfolgt durch eine Förderschnecke (Quereinschub laut [100]). Der Brennstoff wird mit Heissluft, die direkt in den vorchargierten

Brennstoff geblasen wird, gezündet. Die Verbrennungsluft wird dem mit feuerfester Keramik ausgekleideten Brennraum über ein mehrstufiges Druckgebläse zugeführt. Dabei verteilt sich die zugeführte Verbrennungsluft auf die Spalten zwischen den Roststäben und auf Löcher in der Rückwand bzw. seitlich in der Keramik. Das Brennstoffbett wird mittels Schieberrost (Schieberostfeuerung laut [148]), wobei hier bewegliche Roststäbe eine Vor- und Rückwärtsbewegung bzw. Auf- und Abbewegung durchführen (Abb. 5.14), weitertransportiert.

Am Ende des Rostes wird die Asche vom Rost in eine Ascherinne abgeworfen, evtl. entstandene Verschlackungen mittels einer Schnecke zerkleinert und in den Aschebehälter gefördert. In einem zusätzlich einschiebbaren kleineren Behälter kann zusätzlicher Zündbrennstoff gelagert werden, welcher bei schwer entzündlichen Brennstoffen zum Starten der Anlage verwendet werden kann [149].

Auch am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik der Montanuniversität wurde dieses Fabrikat erfolgreich mit Weizen- und Gerstenpellets getestet.

5.1.10. Benekov

Die Modelle R15, R25 und R50 des tschechischen Herstellers BENEKOV sind für die Verfeuerung von Holzpellets, Pellets mit hohem Rindengehalt, preiswerten Industriepellets sowie Getreide geeignet. Als Nennwärmeleistung wird für Holzpellets bzw. Getreide für die Type R15 13 kW bzw. 17 kW, für den R25 24 kW bzw. 21 kW und für den R50 44 kW bzw. 43 kW angegeben. Die Anlagen sind gemäß systematischer Einteilung der Feuerungsprinzipien nach HARTMANN [104] mit einer Unterschubfeuerung (Retortenbrenner) ausgestattet, welche patentgeschützt wurde. Durch Austausch des Brenners kann eine Anpassung an den Brennstoff erfolgen. Wie in Abbildung 5.15 zu sehen ist, wird der Brennstoff zentrisch von unten auf den Brennteller gefördert.



Abbildung 5.15.: Brenner des BENEKOV-Heizkessels: seitliche Ansicht (links), Sekundärluftdüsen (mitte) [150], Brennteller bei Betrieb (rechts)[151].

Rund um diesen Förderkanal sind im Brennteller Löcher für die Primärluftzufuhr angebracht. Die Asche des ausgebrannten Brennstoffes wird seitlich am Brennteller in den Aschebehälter abgeworfen. Mit einem deutlichen Abstand über dem Brennteller ist ein Zylinder angeordnet, in dessen Inneren Sekundärluftdüsen für den vollständigen Gasausbrand angeordnet sind [151, 152]. Laut [148] ist auch ein Kalkdosierer zur Vermeidung der Schlackebildung integriert.

5.1.11. Baxi

Die dänische Firma BAXI A/S hat mit den beiden Modellen MULTI HEAT 2,5 (Nennwärmeleistung von 25 kW bei Holzpellets) und MULTI HEAT 4,0 (40 kW) zwei Anlagen, die für die Verfeuerung von Holzpellets, Getreide, Raps und Holzschnitzel (Größe 5 - 50 mm, Wassergehalt max. 25 %) geeignet sind (Abb. 5.16). Als besonders geeignete Getreidearten werden vom Hersteller Weizen und Gerste mit einem Wassergehalt von 15 % empfohlen [153].

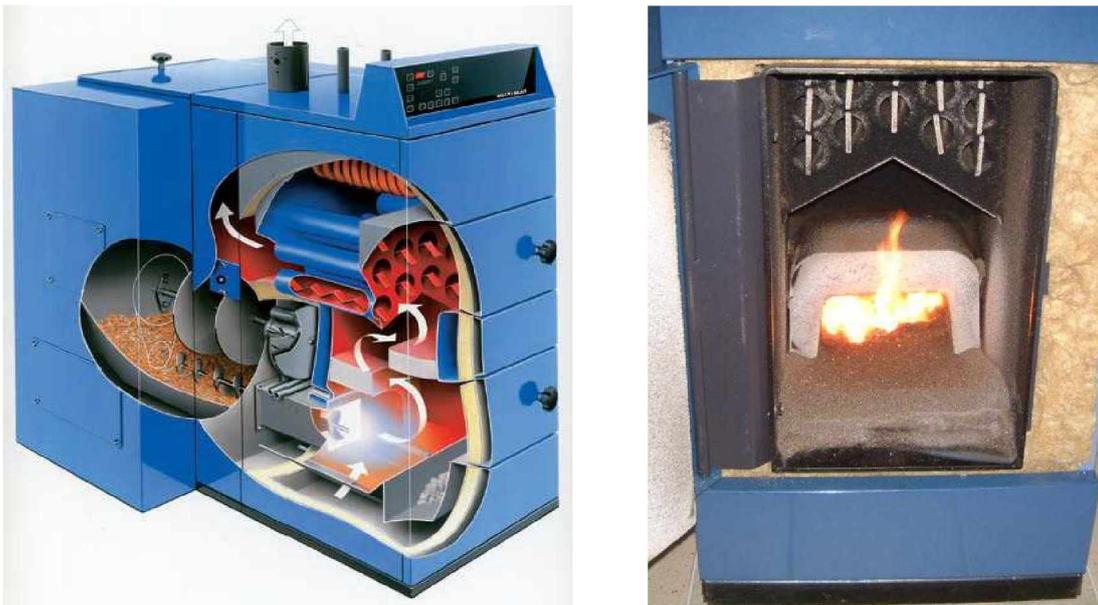


Abbildung 5.16.: BAXI MULTI HEAT Biomassekessel im Schnitt (links)[154], Brenner in Betrieb (rechts) [155].

Eine Förderschnecke transportiert den Brennstoff in den Brennraum (Quereinschub laut [100]), wobei für den Einsatz von Getreide vom Hersteller der Einsatz der Schneckenverlängerung der Brennstoffzuführschnecke empfohlen wird. Dies soll Problemen durch Schlackebildung in der Brennkammer entgegenwirken. Werden Holzschnitzel verbrannt, so muss im Brennstoffbehälter ein Rührwerk installiert werden, um Brückenbildung hintanzuhalten. Die Brennkammer besteht aus säurebeständigem Edelstahl, die Muldenfeuerung (laut [127] eine Einschub- bzw. Muldenfeuerung) selbst ist seitlich und oben mit Feuerfestmaterial ausgeführt. Der Brennstoff wird durch Nachschieben des zugeführten Brennstoffs durch den Brennraum transportiert, die Asche fällt am Ende der Brennkammer in den Aschebehälter. Die Zufuhr von Primär- und Sekundärluft erfolgt durch ein Gebläse, wobei in der Literatur keine Angaben über die Positionierung der Zuluftdüsen im Brennraum zu finden sind. Als Standardausführung verfügt die Anlage über keine automatische Zündeinrichtung und daher muss die Zündung des Brennstoffes per Hand durchgeführt werden [153, 134].

5.1.12. Passat

Der im dänischen Tjele beheimatete Betrieb PASSAT ENERGI A/S stellt seit Anfang der 70er Jahre mit Biomasse befeuerte Heizkessel her. Die Biomassekessel mit den Typenbezeichnungen COMPACT C1, C2, C4, C6 und C8 (Nennwärmeleistungen von je 11 kW, 23 kW, 42 kW, 80 kW und 93 kW, jeweils für Holzpellets) sind für die Brennstoffe Holzpellets, Getreide, Hackschnitzel und andere Biobrennstoffe spezifiziert (Abb. 5.17).



Abbildung 5.17.: Schnittbild des Biomassekessels PASSAT COMPACT (links) [156], Blick in den Brenner (rechts) [155].

Eine verstellbare Schiebeeinrichtung sorgt dafür, dass der Brennstoff über einen mechanischen Schubboden aus dem Vorratsbehälter in die Brennkammer geschoben wird (Einschub- bzw. Muldenfeuerung laut [134], Quereinschub laut [100]). Durch das Nachschieben des Brennstoffes wird das Brennstoffbett weiter gefördert und die Asche automatisch in die Aschelade transportiert. Details über dieses System sind in der Literatur nicht zu erfahren. Die aus Edelstahl gefertigte Brennkammer ist oberhalb mit einem hitzebeständigen Schamottstein abgedeckt. Die Verbrennungsluft wird über ein geregeltes Gebläse in den Brennraum eingebracht, wobei in der Literatur lediglich festgehalten wird, dass diese von oben und unten zugeführt wird [156, 157]. Der österreichische Vertreter BECOFLAMM BACHKEG empfiehlt ab einem Proteingehalt von mehr als 11 % die Beimischung von 1 bis 2 % granuliertem Branntkalt oder 25 % Pellet bzw. Hackgut, um eine Verklumpung von Getreide zu vermeiden [158].

5.2. Geeignete Aggregate, mangelhafte bis keine Beschreibung des Feuerungsprinzips

Bei diesen Aggregaten gibt es durch mindestens zwei Quellen - Aufzählungen, Berichte oder Listen - oder durch den Hersteller bzw. Vertreter eine Empfehlung für die Verbrennung von halmgutartigen Brennstoffen. Es ist in der Literatur jedoch nur eine mangelhafte bis keine Beschreibung des Feuerungsprinzips zu finden.

5.2.1. Agroflamm AGRO 40

Der Kessel AGRO 40 wurde vom deutschen Hersteller AGOFLAMM FEUERUNGSTECHNIK GMBH speziell für Getreidekörner bzw. Halmgutpellets entwickelt und basiert auf einer Unterschubfeuerung [127]. Die Nennwärmeleistung beträgt für Holzpellets 50 kW bzw. 40 kW für Getreide. Die Umsetzung des Brennstoffes basiert auf einem zweistufigen Verbrennungsprinzip (Abb. 5.18), wobei in der ersten Stufe Trockung, Vergasung als auch die Verbrennung der gasförmigen Bestandteile erfolgt.

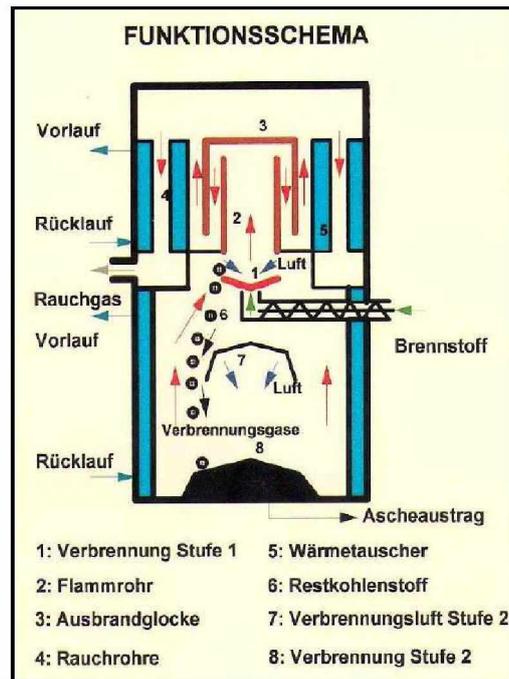


Abbildung 5.18.: Funktionsschema der Feuerungsanlage AGRO 40 der Fa. AGROFLAMM [134]

In der zeitlich und räumlich von der ersten Stufe getrennten zweiten Stufe wird dann das Kohlenstoffgerüst des jeweiligen Brennstoffes verbrannt. Der AGRO 40 ist neben einer automatischen Brennstoffzufuhr und einem automatischen Zündsystem auch mit einer automatischen Ascheaustragung ausgestattet [134].

5.2.2. P&H Energy

Die Modelle PH23, PH47 und PH97 des dänischen Herstellers P&H ENERGY (Primdal & Hauge) sind in der Lage neben Holzpellets, Hackschnitzel und Sägemehl auch Getreide zu verbrennen. Die Nennwärmeleistung wird bei Betrieb mit Getreide für die einzelnen Modelle PH23, PH47 und PH97 mit 15 kW, 30 kW bzw. 70 kW angegeben. Eine Schnecke transportiert den Brennstoff von einem Vorratsraum bzw. externen Füllraum seitlich in den tunnelförmigen Brenner (Quereinschub laut [100], Einschub- bzw. Muldenfeuerung laut [127]), wo die Umsetzung des Brennstoffs bei Zufuhr von Primär- und Sekundärluft erfolgt (Abb. 5.19).

Der Transport des Brennstoffs im Brenner erfolgt durch den nachdrückenden neu zugeführten Brennstoff. Es wird erwähnt, dass die Anlagen auch mit einem Rührgerät erhältlich sind, welches für schwierigere Brennstoffe wie Hackschnitzel, Getreide etc. notwendig ist. Dabei ist aus der Literatur nicht ersichtlich, wie dieses Rührgerät genau funktioniert. Der geschweißte Stahlblechkessel bestehend aus einem Konvektionsteil mit senkrechten Kesselrohren und je nach Modell mit oder ohne Turbulatoren. Eine automatische Sprinkleranlage und der Fallschacht mit Verschlussklappe dienen als Rückbrandsicherung [159, 160].

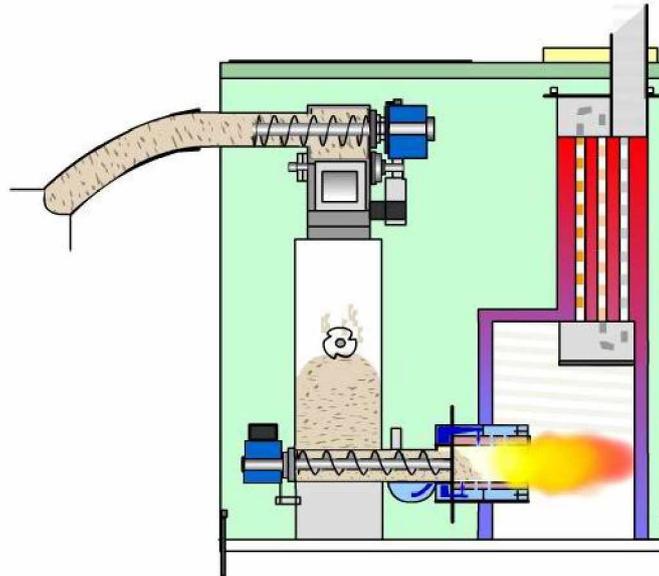


Abbildung 5.19.: Schnittbild der Anlage von P&H ENERGY [159].

5.2.3. UltraHeat

Der Biomasse Heizkessel des polnischen Herstellers ULTRAHEAT ist für die Verfeuerung von Getreide, Raps- und Stohpellets bzw. anderer pflanzlicher Pellets, sowie für Obstkerne und Miscanthus bis zu einer Länge von 30 mm geeignet. Der Brennstoff wird dabei mittels einer Stokerschnecke auf eine wannenförmige Brennmulde (Retorte) gefördert (Quereinschub laut [100]), in welcher der Abbrand stattfindet (Abb. 5.20). Auf Abbildung 5.20, links) sind Bohrungen in der Brennmulde für die Luftzufuhr erkennbar.

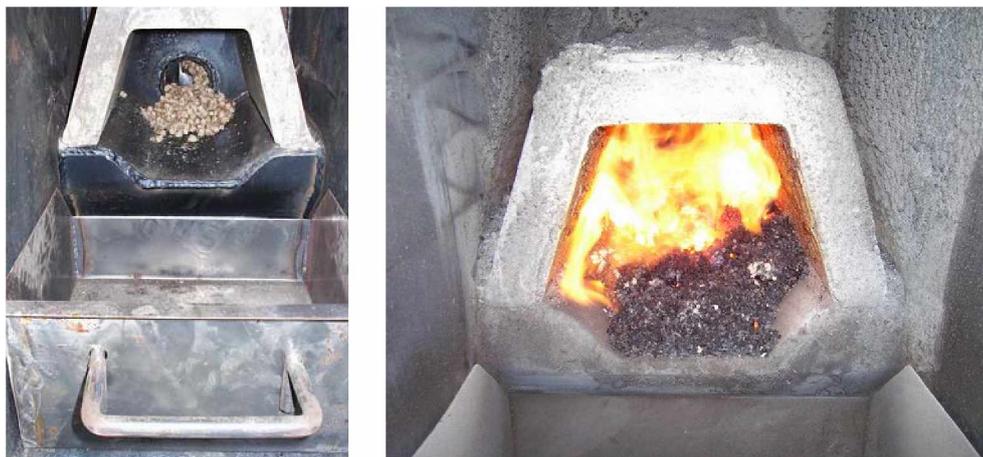


Abbildung 5.20.: Brennraum des Biomasse Heizkessels ULTRAHEAT bei Erstbeschickung mit Brennstoff (links) und in Betrieb (rechts) [155].

Die Förderung des brennenden Materials durch den aus Brennmulde und Feuerfest gebildeten Tunnel (Tunnelbrenner) erfolgt durch den nachdrückenden neu zugeführten Brennstoff. Am Ende der Brennmmulde fällt die ausgebrannte Asche in den Aschebehälter.

Der ULTRAHEAT Biomasse Heizkessel kann in den Modis „automatische Zündung“ mittels zweier im Kessel integrierter Zündstäbe und „Gluterhaltung“ betrieben werden [161].

5.2.4. Twin Heat

TWINHEAT ist eine in Gedsted, Dänemark beheimatete Firma, die seit 1979 ausschließlich Feuerungsanlagen und vollautomatische Silosysteme produziert. Alle Anlagen (Nennwärmeleistung für Holzpellets von 12 kW, 29 kW, 48 kW und 80 kW) sind für die Verbrennung von Holzpellets, Hackschnitzel und Getreide sowie für eine Reihe anderer, in Deutschland noch nicht zugelassener Brennstoffe wie Strohpellets, Olivenkerne etc. geeignet (Abb. 5.21). Zusätzlich kann auch Stückholz im Notbetrieb verfeuert werden. Über eine Stokereinheit mit Zellenradschleuse wird der Brennstoff dem Brennrrohr zugeführt.



Abbildung 5.21.: TWINHEAT CP112 mit 12 kW (links) und TWINHEAT FARMERFIRE COMPACT mit 29 kW (rechts)[162].

Bei [127] wird das Feuerungsprinzip als Einschub- bzw. Muldenfeuerung bezeichnet. Die vorgewärmte Verbrennungsluft wird in einem Winkel von 90° zur Strömungsrichtung der Verbrennungsgase um den Brennstoff herum in den wassergekühlten Brennkopf eingeblassen. Leider ist aus der Literatur nicht ersichtlich, in welcher Position die Verbrennungsluft ins Brennrrohr eingedüst wird. Des Weiteren kann auch keine Aussage über den Brennstofftransport innerhalb des Brennröhres gemacht werden. Durch einen manuellen Bypass kann die Rauchgastemperatur eingestellt werden, um bei geringerer Last Abgastemperaturen von $150\text{--}180^\circ\text{C}$ einzuhalten und Abgaskondensation zu vermeiden [163, 164].

5.2.5. Agriserve

Die deutsche Firma AGRISERVE GMBH hat Pelletsanlagen in ihrem Programm, die neben standardmäßigen Holzpellets mittels Umbausatz auch Feinhackschnitzel, Getreideabfall, Getreidekörner und andere kleinstückige Brennstoffe verbrennen kann. Der Brenner basiert in der Standardausführung für Holzpellets auf dem Prinzip der Unterschubfeuerung (Abb. 5.22).

Inwieweit die Funktion nach dem Umbau für halmgutartige Brennstoffe verändert wird, ist aus der Literatur nicht zu erkennen. Die kleinere Anlage AS25 hat eine Dauerleistung von 8 bis 25 kW, die Type AS42 bringt 15 bis 42 kW. Der Hersteller erwähnt auch, dass er noch weitere Heizanlagen speziell für Getreide, Stroh, Pferdemist, Traubentrester, Maisabfall etc. im Programm hat, diese aber nur auf Anfrage angeboten werden [165].

Weiters verweisen in der Literatur auch HARTMANN [100] und PEISKER [127] auf diesen Hersteller.



Abbildung 5.22.: AGRISERVE Pelletsessel in Vorderansicht (links) und Brenner mit Unterschubfeuerung (rechts) [165].

5.2.6. Refo

Dieser Kessel wird vom dänischen Hersteller bzw. von einem deutschen Vertreter (BRUSBERG GMBH) [166] neben Hackschnitzel, Pellets, Hobel- und Sägespänen auch ausdrücklich für die Verbrennung von Getreide, Stroh, Kirschkernen etc. empfohlen (Abb. 5.23).

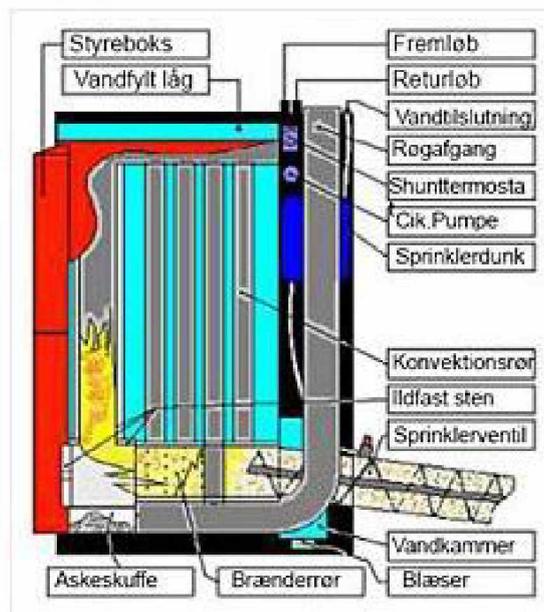


Abbildung 5.23.: Schnitt des REFO Biomassekessels [167].

Auch HARTMANN [100] und PEISKER [127] haben in einer tabellarischen Aufstellung von Feuerungsanlagen für Getreidebrennstoffen dieses Fabrikat erwähnt, wobei die Anlage von PEISKER als Einschub- bzw. Muldenfeuerung klassifiziert wird. Im Leistungsbereich bis 100 kW sind von diesem zylinderförmig ausgeführten Heizkessel die Typen REFO 30, REFO 40, REFO 50 und REFO 80 mit jeweils 30 kW, 40 kW, 48 kW und 85 kW erhältlich.

Der Brennstoff wird über eine Stokerschnecke in die mit keramischem Steinmaterial ausgeführte Brennkammer gefördert und fällt nach dem Ausbrennen in der Mulde in die Ascheschublade, in

der auch ein automatischer Ascheaustrag installiert werden kann.

Wird Getreide oder Stroh verfeuert, so kann in der Brennkammer ein Schleifsystem zum automatischen Abschleifen der anbackenden Schlacke installiert werden. Genauer zu diesem Schleifsystem konnte in den Literaturrecherchen nicht gefunden werden. In einem aus säure- und wärmebeständigem Edelstahl hergestellten Gasbrennrohr erfolgt der vollständige Ausbrand der Holzgase [166].

5.2.7. Ala Talkkari

Laut der Liste von C.A.R.M.E.N.E.V. [148] ist der Hackgut- und Pellets-Heizkessel VETO CHIPMAT (im kleinen Leistungsbereich mit den Nennwärmeleistungen für Holz mit 30, 60, 75, 80 und 100 kW) des finnischen Herstellers ALA-TALKKARI OY für die Verbrennung von aschereichen Brennstoffen geeignet. Ein Schema der Anlage ist in Abbildung 5.24 zu sehen.

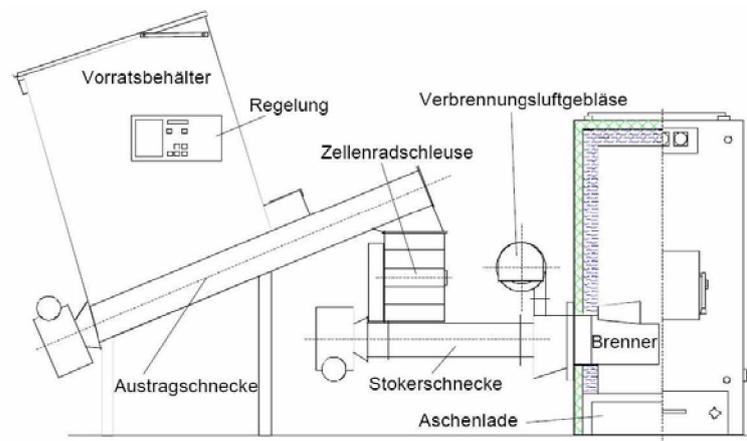


Abbildung 5.24.: Schnitt der Anlage VETO CHIPMAT von ALA-TALKKARI mit einer Nennwärmeleistung von 43 kW [168].

Als Feuerungsprinzip wird hier eine Muldenfeuerung angegeben. Bei BRÖKELAND [169] wird dieses Aggregat zur Verbrennung von Getreide aufgelistet. In einem Prüfbericht des BLT Wieselburg [168] wird beschrieben, dass der Brennstoff mittels einer Stokerschnecke auf den Brennerkopf geschoben wird. Dabei wird die Verbrennungsluft über Primärluftöffnungen dem Brennerkopf zugeführt, die Sekundärluft wird dem Brenngas zugemischt. Zum Starten des Verbrennungsvorganges muss nach dem Chargieren des Brennstoffs in den Brennraum dieser per Hand entzündet werden.

5.2.8. Dan Trim

In einer Liste des TFZ [170] wird die dänische DAN TRIM ENERGI APS als Hersteller von Feuerungsanlagen für Halmgut in Form von Häckselgut, Pellets oder Getreide genannt. Als Feuerungsart wird dabei eine Vorofenfeuerung angegeben. Laut der nur auf dänisch verfassten Firmenhomepage des Unternehmens [171] sind 3 Typen von Biomassefeuerungen im kleineren Leistungsbereich verfügbar. Für die Type VILLAMATIC ist eine Nennwärmeleistung von 25 kW angegeben, jedoch wird kein Brennstoff oder das Feuerungsprinzip genannt. Für die Type MINIMATIC werden mehrere Modelle mit Nennwärmeleistungen von 24 bis 150 kW angegeben, wobei hier auch andere Brennstoffe als Holz wie z.B. Getreide, Reisschalen oder Olivenkerne aufgelistet werden. Es gibt keine Nennung des Feuerungsprinzips, jedoch ist in einer Abbildung eine wannenförmige Retorte mit Quereinschub zu sehen (Abb. 5.25).



Abbildung 5.25.: Feuerung MINIMATIC (links) und INDUMATIC (rechts) des Herstellers DAN TRIM ENERGI APS [171].

Für die Type INDUMATIC (Abb. 5.25) werden ebenfalls mehrere Modelle mit Nennwärmeleistungen von 75 bis 400 kW angegeben. Neben den Holzbrennstoffen wie Pellets, Hackschnitzel oder Sägemehl werden auch halmgutartige Brennstoffe wie Getreide, Reisschalen und Olivenkerne als geeigneter Brennstoff genannt.

5.2.9. Gejs

Die Heizkessel des dänischen Hersteller GEJS STOKER OG SOLVARME sind laut Produkthomepage des deutschen Vertreibers BMHT [172] für die Verbrennung von Holzpellets, Hackschnitzel, Stückholz, Getreide, Olivenkerne, Nusschalen, Kirschkern, Strohpellets, Miscanthus, Dinkelpelzen, Olivenkernen etc. geeignet. Es ist jedoch nichts über das Feuerungsprinzip zu erfahren, auch nicht auf der dänischen Produkthomepage des Herstellers [173] selbst. In Abbildung 5.26 ist diese Heizanlage zu sehen. Bei HARTMANN [100] wird in einer Übersicht von Feuerungsanlage für Getreidebrennstoffen dieses Aggregat ebenfalls erwähnt.



Abbildung 5.26.: GEJS 400L Heizkessel mit einer Nennleistung von 37 kW mit Holz [172].

5.2.10. FUMO

Der Heizkessel des dänischen Herstellers FUMO APS ist laut Produkthomepage des deutschen Vertreibers BMHT [172] für die Verbrennung von Holzpellets, Hackschnitzel und Getreide geeignet. Diese Anlage gibt es für Nennwärmeleistungen beim Betrieb mit Holzpellets von 12 kW, 25 kW, 45 kW, 60 kW und 90 kW im Leistungsbereich bis 100 kW. Die Kessel haben eine automatische Zündung und werden mittels Lamdasonde geregelt. Sowohl auf der Produktseite des Hersteller FUMO selbst [174] noch auf jener des deutschen Vertreibers BMHT gibt es Informationen zur Feuerungstechnik dieser Anlage. In Abbildung 5.27 ist leider auch nicht erkennbar, nach welchem Prinzip der Brennstoff umgesetzt wird.



Abbildung 5.27.: FUMO 25 mit einer Nennwärmeleistung für Holzpellets von 25 kW [174].

5.2.11. CN Maskinfabrik A/S

Bei PEISKER [127] wird in einer Liste für Getreidefeuerungsanlagen auch der dänische Hersteller CN MASKINFABRIK A/S aufgelistet, wobei als Feuerungsprinzip eine Vorofenfeuerung, wie auch in der Liste des TFZ [170], angegeben wird. In der Liste der Verbrennungsanlagen für aschereiche Brennstoffe von C.A.R.M.E.N.E.N. [148] wird jedoch als Feuerungsprinzip ein Stufenrost aufgelistet. Auf der Firmenhomepage des deutschen Vertriebs BMHT [172] sind als empfohlene Brennstoffe Hackschnitzel, Holzpelletes, Rapspellets, Getreidpellets, Strohpellets, Getreide, Trester etc. bis hin zu Stückholz aufgelistet. Als Leistungsklassen sind hier Anlagen mit 15 kW, 25 kW, 40 kW und 80 kW im Leistungsbereich bis 100 kW angeführt. Über das Feuerungsprinzip oder genaueres wie Luftführung etc. gibt es hier jedoch keine Information.

5.2.12. ETA

Laut HIENDLMEIER [117] und einer Kessel-Auflistung des TFZ [170] ist der Hackgutkessel ETA HACK (20 bis 200 kW) des österreichischen Herstllers ETA HEIZTECHNIK GMBH neben Hackgut aus Holz auch für Miscanthus Häckselgut geeignet.

Der Brennstoff wird in den schamottierten Brennraum mittels Stokerschnecke eingebracht und dabei seitlich auf einen Kipprost aufgeschoben. In leistungsabhängigen Zeitintervallen wird der Rost um 90° gekippt, um Asche und Fremdkörper zu entfernen, wobei diese anschließend mittels Ascheaustragsschnecke aus dem Kessel gefördert werden. Ein Schnittschema ist in Abbildung 5.28 zu sehen [175].

Auf der Produkthomepage der Firma ETA HEIZTECHNIK GMBH [176] wird der ETA HACK allerdings ausschließlich für Holzhackschnitzel geeignet ausgewiesen und es wurde auch sonst in keiner Literatur eine Verbrennung von halmgutartigen Brennstoffen erwähnt.

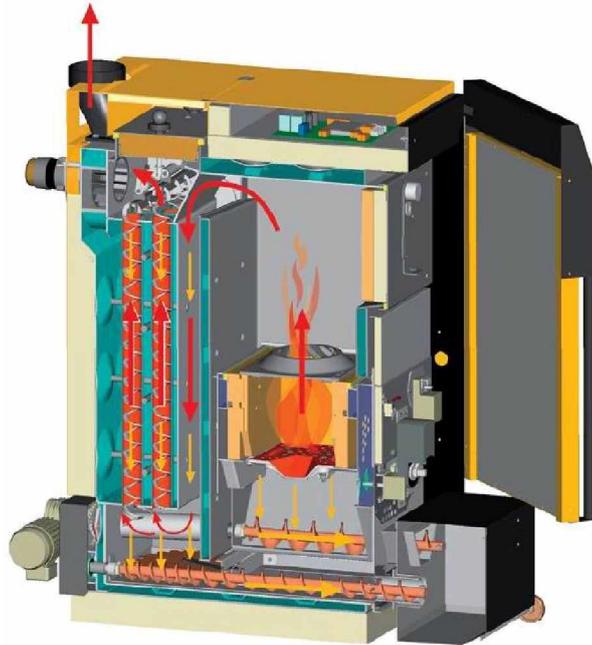


Abbildung 5.28.: Schnitt durch den Heizkessel ETA HACK [175].

5.2.13. Fröling

Laut HIENDLMEIER [117] und einer Kessel-Auflistung des TFZ [170] ist der Hackgut- und Pellets-kessel TURBOMATIC (Abb. 5.29) des österreichischen Herstellers FRÖLING neben Hackgut, Spänen und Pellets aus Holz auch für Miscanthus Häckselgut geeignet. Daneben ist auch ein Scheitholz-notbetrieb durch Einlegen eines Spezialrostes möglich. Die Verbrennung findet auf einem Kipprost statt, wobei die verschiedenen Anlagengrößen einen Leistungsbereich von 28 kW bis 100 kW aufweisen [177].



Abbildung 5.29.: Hackgut- und Pelletsfeuerung TURBOMATIC der Firma FRÖLING [177].

5.3. Nicht bestätigte Aggregate, wenig bzw. keine Beschreibung des Feuerungsprinzips

Diese Aggregate wurden nur in Listen oder in Aufzählungen publiziert, gibt es keine Erwähnung oder Empfehlung des Herstellers bzw. Vertreibers für die Verbrennung von halmgutartigen oder nicht holzartigen Brennstoffen. Es gibt auch keine eindeutigen Hinweise bzw. Berichte für einen problemlosen Betrieb mit den vor genannten Brennstoffen.

5.3.1. KWB

In der Arbeit von WOPIENKA [178], in der das Verbrennungsverhalten von Strohpellets in Kleinfeuerungsanlagen im Hinblick auf Korrosionsverhalten und Emissionen untersucht wurde, kamen 2 Anlagen-Typen vom österreichischen Kesselhersteller KWB zur Anwendung. Die kleinere Anlage, eine 15 kW Prototyp-Feuerung, hatte als Verbrennungseinheit ein drehbares Rohr, das auf der Stirnfläche mit Pellets beschickt wurde. Dabei wird der Brennstoff beim Fördern durch das Rohr verbrannt und an der gegenüberliegenden Stirnfläche des Rohres wieder ausgetragen. Über einen Saugzug und ein zusätzliches Gebläse bei der Brennstoffzufuhr wird die Verbrennungsluft dem Rohr zugeführt, wobei die Regelung über eine Lambda-Sonde erfolgt.

Für die Untersuchung von Primärmaßnahmen und weitere Korrosionsuntersuchungen wurde der TDS POWERFIRE der Firma KWB mit einer Nennwärmeleistung von 150 kW für Holz eingesetzt. Beim Betrieb mit Stohpellets wurde allerdings die Brennstoffzufuhr auf 80 bis 90 kW beschränkt, um die Störanfälligkeit bezüglich Verschlackungen zu reduzieren. Der Brennstoff wird hier über eine Stokerschnecke seitlich in den mit Feuerfestmaterial ausgekleideten Brennraum und die Vorbrennkammer gefördert. Anschließend fällt das Material auf einen patentierten ringförmigen Drehrost, welcher aus konzentrisch um die Drehachse angeordneten Ringrostelementen besteht (Abb. 5.30).



Abbildung 5.30.: Drehtrost des TDS POWERFIRE der Firma KWB mit Einschubschnecke und Vorbrennkammer [179].

Die erforderliche Luftmenge wird dem Brennstoff über ein Luftverteilungssystem zugeführt. Die Sekundärluft wird über eine tangential einmündende, speziell geformte Düse in die Nachverbrennungskammer, welche in Form einer stehenden Zyklonbrennkammer ausgeführt ist, eingebracht. Des weiteren ist die Installation einer Rauchgasrezirkulation möglich, die für Brennstoffen mit einem Wassergehalt von unter 20 % empfohlen wird. Die Zündung des Brennstoffs erfolgt mittels automatischer Heißluftzündung [178, 180].

Auf der Produkthomepage der Firma KWB [179] wird der TDS POWERFIRE allerdings ausschließlich für Holzbrennstoffe als geeignet ausgewiesen und es wurde auch sonst in keiner Literatur eine Verbrennung von halmgutartigen Brennstoffen erwähnt.

5.3.2. Heftberger

In einem Bericht von MEISL [181] wird erwähnt, dass in der Landwirtschaftlichen Fachschule Tulln eine Feuerungsanlage mit der Nennwärmeleistung von 40 kW der österreichischen Firma ENERGIESYSTEME HEFTBERGER erfolgreich einer TÜV-Prüfung unterzogen wurde. Als Brennstoff wurde bespelztes Energiegetreide verwendet. Um welche Anlage es sich im Detail handelte, wird in diesem Bereich näher erläutert.

Auf der Homepage des BLT Wieselburg [182] sind von der Firma ENERGIESYSTEME HEFTBERGER drei positiv geprüfte Feuerungen zu finden. Je eine Vorofenfeuerung mit Kipprost für Pellets (PV 80 mit 80 kW) bzw. Hackgut (HVR I-S mit 49 kW), sowie eine nicht näher beschriebene Vorofenfeuerung mit 50 kW. Als Kessel wird dann ein passendes Produkt eines anderen Herstellers verwendet, wobei bei der Typenprüfung die Feuerung mit dem Stückholzkessel SH 60 der Firma ETA HEIZTECHNIK GMBH kombiniert wurde [183]. Inwiefern eine dieser Anlagen für die Verbrennung halmgutartiger Brennstoffe geeignet ist, kann hier nicht beurteilt werden.

5.3.3. LawaMAT

In der Liste „Kesselhersteller für die Verbrennung aschereicher Biomasse im kleinen Leistungsbereich“ von C.A.R.M.E.N.e.v. [148] ist die Firma LAUSITZ WÄRME GESELLSCHAFT LAWAG MBH

als Kesselhersteller angeführt. Auf der Produkthomepage gibt es keine Beschreibung oder ein detailliertes Bild bzw. eine Skizze der Anlage sondern lediglich eine Aufzählung der möglichen Anlagengrößen mit LawaMAT 15 kW, LawaMAT 30 kW, LawaMAT 90 kW und LawaMAT 150 kW. Auch gibt es keine Erwähnung bezüglich der möglichen Brennstoffe für diese Anlagen. Lediglich das Portfolio der angebotenen Brennstoffe enthält neben Holzpellets auch Miscanthuspelletes, Strohpellets als auch sogenannte „LAWAG-Pellets“, einer Mischung auf der Basis von Braunkohle und Holz.[184]

5.3.4. Pelletheiztechnik

Bei PEISKER [127] ist in einem Überblick der Hersteller von Getreidefeuerungsanlagen die österreichische Firma PELLITO HEIZTECHNIK GMBH mit Anlagen im Leistungsbereich von 14 bis 40 kW, ausgeführt als Unterschubfeuerung, angeführt. Jedoch finden sich auf der Produkthomepage des Herstellers nur Pellets- und Festbrennstoffkessel für Holzbrennstoffe. Beim Pelletskessel wird ein beweglicher Feuerrost erwähnt, welcher die automatische Reinigung der Brennerschale ermöglicht. [185]

5.3.5. KSM-Stoker

Der dänische Hersteller KSM-STOKER A/S hat einen, laut einer Liste von C.A.R.M.E.N.E.V. [148], für aschereiche Brennstoffe geeignete Heizkessel in seinem Programm. Als Feuerungsprinzip wird in dieser Liste ein wassergekühlter Brennerkopf mit beweglichem Brennerboden und Ascheschieber angegeben, wobei eine Kalkzugabe empfohlen wird. Weitere Informationen sind weder auf der Produkthomepage des Herstellers KSM-STOKER A/S [186] selbst, noch auf jener des deutschen Generalimporteurs BIOMEX GMBH & Co. KG [187] zu entnehmen.

5.3.6. WVT - Bioflamm

In einer Liste des TFZ [170] wird die deutsche WVT - WIRTSCHAFTLICHE VERBRENNUNGSTECHNIK GMBH als Hersteller von Feuerungsanlagen für Halmgut in Form von Häckselgut, Pellets oder Getreide genannt. Es wird hier ein Leistungsbereich von 30 kW bis 100 kW angegeben. Auf der Produktseite des Herstellers WVT [188] ist jedoch eine Vorschubrost-Feuerung ab 100 kW dargestellt und als mögliche Brennstoffe sind lediglich Holzartige Biomassen mit einem max. Wassergehalt von 35 % angegeben.

5.3.7. Olymp

In einer Liste des TFZ [170] wird die österreichische OLYMP WERK GMBH als Hersteller von Feuerungsanlagen für Halmgut in Form von Pellets oder Getreide genannt. Weitere Informationen sind auch auf der Produktseite des Herstellers OLYMP WERK GMBH [189] nicht zu entnehmen.

5.3.8. Biogen Heiztechnik

In einer Liste des TFZ [170] wird BIOGEN HEIZTECHNIK GMBH als Hersteller von Feuerungsanlagen für Halmgut in Form von Ballen oder Pellets und Getreide genannt. Weitere Informationen sind auch auf der Produktseite des Firmeninhabers BIOMASS CONSULTING LIST [190] nicht zu entnehmen.

5.3.9. Blacksmith

Laut der Produkthomepage des deutschen Vertreibers BMHT [172] sind die Typen CLASSIC und COMBI des dänischen Herstellers BLACKSMITH KLEINSMEDIE für die Verbrennung von Hackschnitzel, Miscanthus, Getreide, Holz-, Raps- und Strohpellets geeignet. Es gibt jedoch keine Hinweise auf das Feuerungsprinzip. Auch der Produktseite des Hersteller [191] selbst kann diesbezüglich keine Information entnommen werden.

5.3.10. Endreß

In einer Liste des TFZ [170] wird die deutsche ENDRESS HOLZFEUERUNGSANLAGEN GMBH als Hersteller von Feuerungsanlagen für Halmgut in Form von Pellets oder Getreide genannt. Als Feuerungsart wird dabei eine Vorofenfeuerung genannt. Auf der Produktseite des Herstellers Endreß [192], auf der Unterschub-, Vorschub- und Vorofenfeuerungen angeboten werden, ist jedoch kein Hinweis auf eine Empfehlung zur Verbrennung halmgutartiger Brennstoffe finden.

5.3.11. Pilevang

Bei PEISKER [127] wird in einer Liste für Getreidefeuerungsanlagen auch der dänische Hersteller PILEVANG aufgelistet, wobei als Feuerungsprinzip eine Einschub- und Muldenfeuerung angegeben wird. Ansonsten gibt es von diesem Hersteller keine weiteren Informationen, auch konnte keine Firmenhomepage gefunden werden.

5.3.12. Cormall

In einer Liste des TFZ [170] wird die dänische Firma CORMALL A/S als Hersteller von Feuerungsanlagen für Halmgut in Form von Häckselgut, Ballen, Pellets oder Getreide genannt. Ansonsten konnten weder auf der Firmenseite des Unternehmens CORMALL A/S [193] selbst, noch anderswo Informationen über Feuerungsanlagen gefunden werden.

6. Versuchs- und Messaufbau

In diesem Kapitel erfolgt die Darstellung und Beschreibung des Anlagenschemas in Form des letzten Entwicklungsstandes. Alle vorherigen Entwicklungsphasen, als auch die Beschreibung des als Ausgangsprodukt verwendeten handelsüblichen Pelletsofens erfolgt in Kapitel 8. Des weiteren entspricht auch die Anordnung der hier beschriebenen Messtechnik dem letzten Entwicklungsstand. Abweichungen während des Verlaufs der Entwicklung werden ebenfalls, wie bereits oben erwähnt, in der jeweiligen Entwicklungsstufe in Kapitel 8 dargestellt und erläutert.

6.1. Anlagenschema

Wie in Abbildung 6.1 dargestellt, werden die im Pelletsbehälter gelagerten Strohpellets über eine Austragsschnecke aus dem auf einer Waage stehenden Tagesbehälter gefördert und über ein Fallrohr zu einer kleinen Vorlage am Beginn der Stokerschnecke transportiert. Dabei wird eine Brandschutzklappe (BSK) passiert, die ein Rückbrennen in den Tagesbehälter verhindern soll.

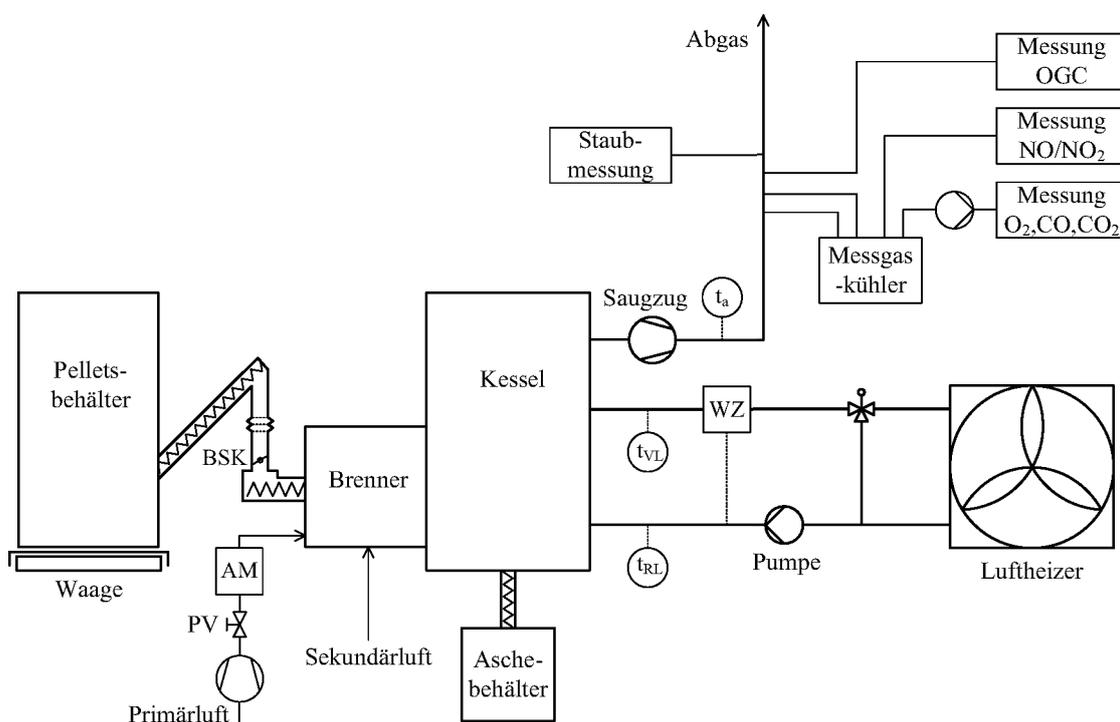


Abbildung 6.1.: Schema des Versuchsaufbaues - letzter Entwicklungsstand; AM...Flügelradanemometer, BSK...Brandschutzklappe, PV...Primärluftventil, t_a ... Abgastemperatur, WZ... Wärmezähler, t_{VL} ... Vorlauftemperatur Kesselkreis, t_{RL} ... Rücklauftemperatur Kesselkreis

Das Fallrohr besteht aus zwei Teilen und wird durch eine schlauchförmige Kunststoffolie verbunden, um eine mechanische Entkopplung von Tagesbehälter und Feuerungsanlage zu gewährleisten.

Dies ermöglicht eine unbeeinflusste Wägung des Pelletsbehälters. Ein kapazitiver Füllstandssensor in der Vorlage registriert die Füllhöhe. Bei Bedarf wird die Brandschutzklappe geöffnet und die Austragsschnecke in Gang gesetzt. Liegen genug Pellets in der Vorlage, wird die Austragsschnecke gestoppt und die Brandschutzklappe geschlossen. Die Pellets werden weiters über eine Stokerschnecke in den Brenner bzw. auf den Rost chargiert.

Beim Starten der Feuerungsanlage werden die Pellets mittels keramischem Glühzünder gezündet. Die Primärluftzufuhr erfolgt über ein von der Regelung angesteuertes Zuluftgebläse. Um Änderungen der Primärluftzufuhr einfacher durchführen zu können, ist direkt vor der Messstelle der Primärluftgeschwindigkeit (AM - Flügelradanemometer) ein von Hand zu regelndes Primärluftventil angebracht.

Aufgrund des im Kessel herrschenden Unterdruckes wird die Sekundärluft seitlich am Brenner angesaugt, über einen Zwischenmantel um den Brenner und durch eine geregelte Klappe (Sekundärluftklappe...SK) in einen, um die Brennkammer liegenden geschlossenen Kanal geführt, um eine Vorwärmung zu erreichen. Die Sekundärluft tritt am Ende des Rostes über Bohrungen aus diesem Kanal aus und wird dem Brenngas zur Erreichung eines vollständigen Ausbrandes vor dem Eintritt in die Nachbrennkammer beigemischt. Die Klappenstellung der Sekundärluftklappe ist vom Restsauerstoffwert im Abgas abhängig und wird von einer im Abgasrohr angeordneten Lambdasonde gemessen.

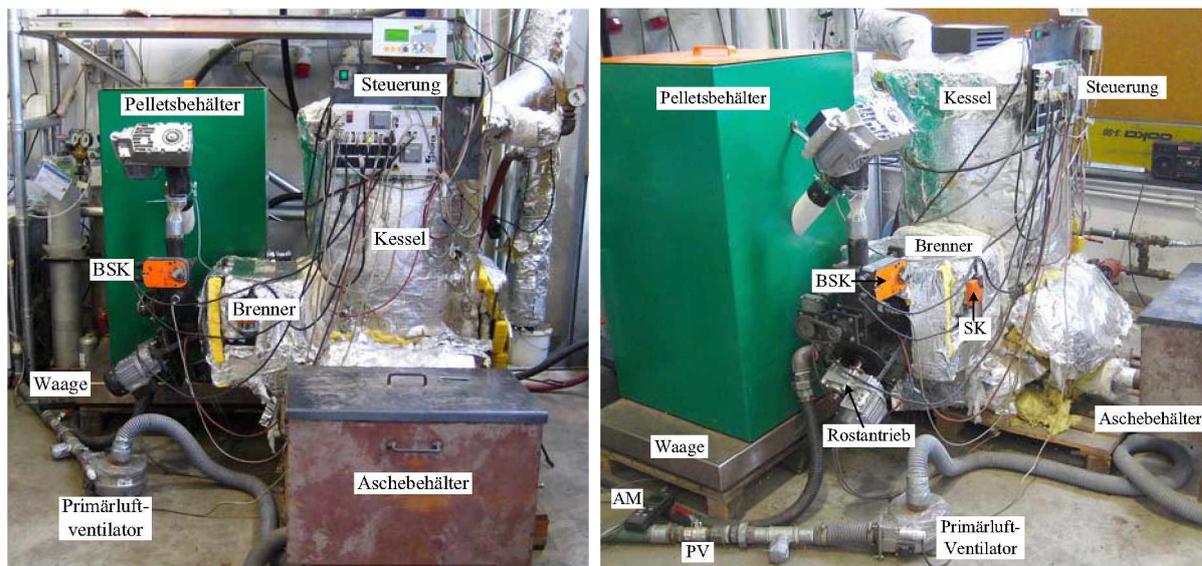


Abbildung 6.2.: Versuchsstand (letzter Entwicklungsstand) von vorne und seitlich von links. PV...Primärluftventil, AM...Flügelradanemometer, BSK...Brandschutzklappe, SK...Sekundärluftklappe.

Die am Rost verbleibende Asche bzw. Schlacke wird durch den Vorschubrost weiter bewegt, am Ende des Rostes abgeworfen und mittels einer Austragsschnecke, die von einem Intervallgesteuerten Motor angetrieben wird, in den Aschebehälter gefördert.

Das heiße Abgas passiert den unmittelbar über der Nachbrennkammer angeordneten Wärmeübertrager, in welchem die fühlbare Wärme an einen Wasserkreislauf abgegeben wird und verlässt den Kessel über einen Saugzugventilator in den Kamin. Der Saugzugventilator sorgt auch für den nötigen Unterdruck in der Anlage (Sollwert 60 Pa), sodass keine Rauchgase austreten können bzw. die Sekundärluft angesaugt wird. Nach dem Wärmeübertrager ist auch die λ -Sonde situiert, um den Restsauerstoffgehalt für die Regelung der Sekundärluftklappe zu messen.

Der Rauchrohrkessel ist mit einer automatischen Reinigungsvorrichtung ausgestattet, welche durch

Hochheben und Fallenlassen von Reinigungsspiralen (Turbulatoren) die röhrenförmigen Wärmeübertragerflächen säubert. Außerdem sorgen die Turbulatoren für eine turbulente Strömung und somit für einen besseren Wärmeübergang. An der, dem Brenner gegenüber liegenden Seite ist am Kessel ein Schauloch mit einem Quarzglas angeordnet, sodass durch die Nachbrennkammer hindurch das Brennstoffbett beobachtet werden kann. Mit einem Hebel kann dabei eine innen liegende Klappe betätigt werden, die das Glas vor Verschmutzung schützt und einen Wärmeverlust verhindert.

Die Wärme wird über den von der Kesselkreispumpe (Grundfos Type UPS 25-40) angetriebenen Kesselkreislauf abgeführt und über einen Luftheizer (Abb. 6.3) an die Umgebung abgegeben. Ein 3-Wege-Ventil im Vorlauf sorgt für die Rücklaufenhebung und Feineinstellung der Kesselvorlauftemperatur. Weiters sind im Kesselkreislauf 2 Temperaturmessstellen für Vor- (t_{VL}) und Rücklauf- (t_{RL}), sowie ein Wärmezähler (WZ) eingebaut. In Abbildung 6.2 sind Bilder des Versuchsstandes zu sehen (letzter Entwicklungsstand).

Luftheizer LH 100/3: Das Gehäuse des Luftheizers besteht aus einer tragenden Profilrahmenkonstruktion mit verzinktem Stahlblech (siehe Abb. 6.3). Das innen liegende Pumpenwarmwasser-Heizregister besteht aus Kupferrohren mit Aluminium-Lamellen und wird vom heißen Vorlauf (Wassermenge von 0,5 bis 100 m³/h) aus dem Heizkessel durchflossen. Ein Axialventilator mit einem zweistufigen Antriebsmotor (0,15 bzw. 0,45 kW; 700 bzw. 900 min⁻¹) saugt die Luft (6000 bzw. 8300 m³/h) über ein Schutzgitter an und bläst diese über das Heizregister auf der anderen Seite wieder aus dem Gerät. Die Heizleistungen betragen bei beispielsweise +10 °C Lufttemperatur und Vor- und Rücklauf-temperaturen von 80 bzw. 60 °C je nach Ventilatorstufe 77,3 bzw. 96,4 kW [194].

6.2. Messtechnik

Zur Messung der Emissionen (CO, CO₂, NO, O₂) werden Teilströme des Abgases über einen keramischen Filter aus dem Kamin abgesaugt (siehe Abb. 6.1) und über zwei Kunststoffleitungen in den Messgaskühler geleitet. Das trockene Abgas wird dann in 2 kalibrierten Messgeräten (HARTMANN & BRAUN, RADAS 1G für NO, URAS 10E für O₂, CO, CO₂, Abb. 6.3) analysiert. Die Absaugleitung zum Flammenionisationsdetektor (RATFISH R55 zur Bestimmung des organischen Gesamtkohlenstoffes OGC) wird beheizt und führt von einem zweiten Keramikfilter am Kamin direkt in das Messgerät. Die Abgastemperatur t_A wird über ein Thermoelement erfasst, ebenso die Temperaturen von Vorlauf t_{VL} und Rücklauf t_{RL} und jene am bzw. über dem Rost.

Waage für Messung des Brennstoffeintrages: Um den Brennstoffeintrag über einen Messzeitraum bestimmen zu können, wird der Pelletsbehälter auf eine Wägeplattform aus Edelstahl mit den Abmessungen von 60 x 80 cm und einer Höhe von 12 cm gestellt. Die Ablesung erfolgt über ein Anzeigemodul Holbright HB-8210 mit einer Anzeigaauflösung von 0,1 kg und einem maximalen Wert von 300 kg.

Anemometer zur Zuluftmessung: Die Erfassung der dem Feuerraum zugeführten Primärluft wird mit einem Flügelradanemometer der Firma HÖNTZSCH INSTRUMENTS bewerkstelligt, das nach Zuluftgebläse und Einstellhahn installiert ist.

Wärmezähler: Die aus dem Kessel abgeführte Wärme wird mittels Mehrstrahl-Flügelradzähler (Typ MTW3 der Firma GWF MESSSYSTEME AG), der in den Rücklauf eingebaut wird, bestimmt. Der Nenndurchfluss beträgt 10 m³/h wobei der zulässige Messbereich zwischen 0,2 und

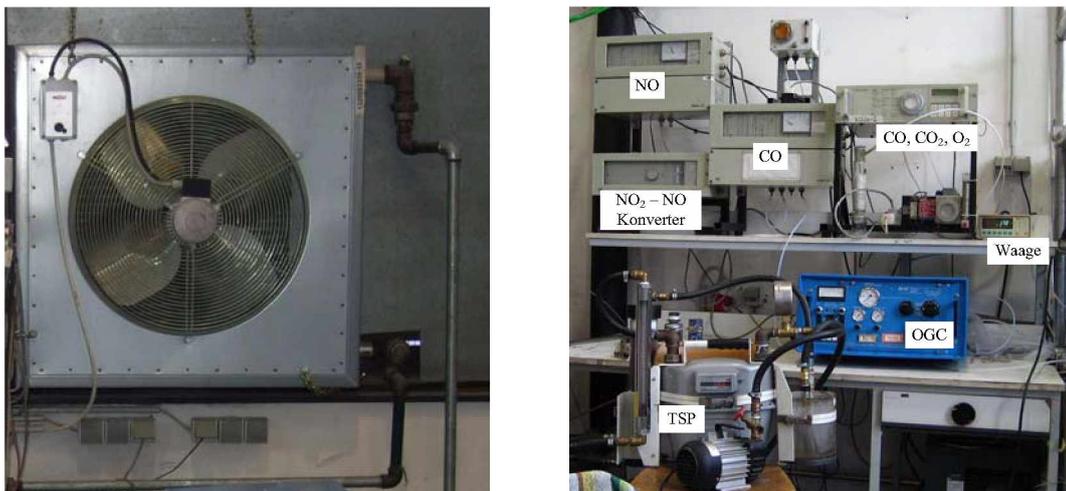


Abbildung 6.3.: Luftheizer (links), Emissionsmesstechnik (rechts)

20 m³/h liegt. Das Rechenwerk SENSOSTAR, welches mit Volumenstrommessteil und zwei, jeweils in Vor- und Rücklauf eingebauten Thermoelementen verbunden ist, zeigt die kumulierte abgeführte Wärmemenge an.

Temperaturmessung mit Thermoelementen: Die Messungen der Temperaturen im Feuerraum als auch die Abgas- und Wassertemperaturen werden mit Mantel-Thermoelementen (SENSOTEC Mess- und Regeltechnik GmbH) der Type K durchgeführt. Bei diesem Typ handelt es sich bei den Thermopaaren um NiCr-Ni Legierungen, die für Temperaturen bis 1000 °C bzw. kurzzeitig bis 1300 °C eingesetzt werden können. Der Mantel besteht aus dem Material INCONEL 600, einer Nickel-Basis-Legierung. Der Durchmesser der überwiegend eingesetzten Thermoelemente beträgt 3 mm, für die Messungen im Feuerraum der letzten Entwicklungsstufe werden aufgrund des begrenzten Raumes jedoch Mantel-Thermoelemente mit einem Durchmesser von 1 mm eingesetzt.

Über zum Typ K passende Ausgleichsleitungen wird die generierte Thermospannung dem Datenlogger übertragen.

Keithley Datenlogger: Die analogen Ausgangssignale der Messgeräte (0 bis 20 mA) werden dem Datenlogger KEITHLEY Modell 2700 Multimeter (80 Kanäle) zugeführt. Zur Anpassung an das geforderte Eingangssignal von 0 bis 200 mV wird ein ohmscher Widerstand mit einer Größe von 10 Ohm parallel zu den jeweiligen Eingängen geschaltet. Die digitalen Ausgangssignale werden dann über eine USB-Schnittstelle dem PC zugeführt.

Programm DasyLab zur Datenaufzeichnung: Die Messwerte der Emissionsmessung und die Temperaturwerte werden vom Programm DASY LAB Version 8.00.04 automatisch erfasst und gespeichert.

6.2.1. Gasförmige Emissionen

Messgaskühler Kühlereinheit Advance SCC von Hartmann & Braun. In dieser Kühleinheit erfolgt die Abkühlung und Entfeuchtung des Messgases, um an keiner nachfolgenden Stelle des Analysensystems den Taupunkt zu unterschreiten bzw. um Kondensatbildung in einem nachgeschalteten Messgerät zu vermeiden. Die in der Kühleinheit integrierten zwei Wärmeübertrager kühlen das Messgas (zwei Messgasströme) auf eine Temperatur von ca. +3 °C ab (Betriebsdaten

siehe Tab. 6.1) . Abgeschiedenes Kondensat wird über einen Kondensatablass automatisch entfernt [195].

Tabelle 6.1.: Betriebsdaten der Kühleinheit ADVANCE SCC [195].

Messgasaustrittstemperatur	+ 1 ... + 7 °C (werksseitig eingestellt auf + 3 °C) Abweichung $\pm 0,3$ °C bei 250 l/h
Kühlleistung	433 kJ/h
Vorlaufzeit	ca. 60 min
Druckverlust Wärmeübertrager	ca. 25 hPa (mbar) bei 250 l/h
Totvolumen Wärmeübertrager	ca. 137 cm ³ ohne Kondensatbehälter ca. 460 cm ³ mit Kondensatbehälter
Gasdichtigkeit	5×10^{-6} hPa l/s

NDIR-Betriebsphotometer Uras 10 E von Hartmann & Braun: Das NDIR-Betriebsphotometer URAS 10 E dient zur Messung der Gaskomponenten CO₂, CO und O₂. In Tab. 6.2 sind die Messbereiche, Einheiten und Messprinzipien dargestellt.

Tabelle 6.2.: Messkomponenten mit Messbereichen, Einheiten und Messprinzip des URAS 10 E [196].

Messkomponente	Messbereiche	Einheit	Messprinzip
CO ₂	0 - 10	Vol-%	NDIR
	0 - 20		
CO	0 - 500	ppm	NDIR
	0 - 1000		
O ₂	0 - 10	Vol-%	Sauerstoffsensor
	0 - 25		

Das Messverfahren für Kohlenstoffdioxid CO₂ und Kohlenstoffmonoxid CO beruht auf der Eigenschaft heteroatomiger Gase, infrarote Strahlung im Wellenlängenbereich $\lambda = 2 \dots 8 \mu\text{m}$ zu absorbieren (NDIR-Verfahren = **N**icht**D**ispersive **I**nfrar**R**ot-Analyse). Das Abgas mit der zu messenden Komponente wird durch eine Messküvette geführt und dabei die Abschwächung der IR-Strahlung gemessen. Zwischen der Konzentration und der gemessenen Absorption besteht dabei ein exponentieller Zusammenhang (LAMBERT-BEERSCHES Gesetz), der durch die Verarbeitungselektronik in ein linearisiertes Gleichstromausgangssignal umgewandelt wird. Einflusseffekte wie Umgebungstemperatur, Luftdruck und Begleitgaskomponenten werden durch geeignete Maßnahmen kompensiert. Die Messung des Sauerstoffs erfolgt durch einen elektrochemischen Sauerstoffsensor. Eine integrierte Messgaspumpe sorgt für den Durchfluss (0 bis 160 l/h) des Messgases durch die Messküvetten bzw. zum Sauerstoffsensor. Die Kalibrierung erfolgt entweder automatisch über integrierte Kalibrierküvetten oder mit manueller Kalibrierung durch externes Kalibriergas [196]. Die Größe des analogen Ausgangssignals beträgt 0 bis 20 mA.

Konverter NO - NO₂ CGO-K von Hartmann & Braun: Da im Abgas auch Stickstoffdioxid NO₂ vorhanden ist und dieses nicht vom Betriebsphotometer für NO erfasst werden kann, wird in einem vorgeschalteten Konverter das bereits gebildete NO₂ zu NO reduziert. Dies geschieht an heißen Metallen wie Molybdän [81]. Die Zuführung des Abgases erfolgt über eine externe Membranpumpe von HARTMANN & BRAUN mit einem Volumenstrom von 7 bis 70 l/h. Das Abgas mit dem konvertierten NO wird nach dem Konverter unmittelbar dem Betriebsphotometer zur NO-Bestimmung weitergeleitet.

Radas 1 G Betriebsphotometer im Aufbauehäuse von Hartmann & Braun: Das Betriebsphotometer RADAS 1 G dient zur Messung von Stickstoffmonoxid NO in den Messbereichen 0-500 mg/m³_N und 0-2500 mg/m³_N. Das Messverfahren beruht auf der sogenannten Resonanzabsorption. Eine mit Stickstoff und Sauerstoff unter reduziertem Druck gefüllte Hohlkathodenlampe emittiert NO-spezifische Spektrallinien von angeregten NO-Molekülen im ultravioletten Strahlungsbereich, welche in der Messküvette von der Messkomponente absorbiert werden und im Messphotoempfänger detektiert werden. Durch abwechselnde Durchleitung von „heißen“ und „kalten“ Emissionslinien durch die Messküvette kann dabei eine sehr hohe Selektivität und Sensitivität erreicht werden [197]. Die Größe des analogen Ausgangssignals beträgt 0 bis 20 mA. Da NO in der Atmosphäre zu NO₂ oxidiert, muss nach gesetzlicher Vorgabe das gemessene NO als NO₂ angegeben werden.

Flammenionisationsdetektor Ratfish R 55: Der Flammenionisationsdetektor RATFISCH R 55 dient zur Messung des organischen Gesamtkohlenstoffs (OGC) in vier Messbereichen von 0 bis 10, 100, 1000 bzw. 10000 ppm. Das Messprinzip beruht auf der Ionisierung organischer Moleküle in einer Wasserstoffflamme (Flammen-Ionisation), wobei diese aus einer Metalldüse austritt und das Messgas kurz vor der Düse zugemischt wird [81]. Die Größe der Spannung zwischen der Metalldüse und einem über der Flamme angeordnetem Metallring gibt Aufschluss über die Konzentration des organischen Kohlenstoffs im Messgas. Um Verfälschungen durch verunreinigte Umgebungsluft zu vermeiden, wird als Oxidationsmittel kohlenwasserstofffreie, synthetische Luft mit einer Zusammensetzung von 20 % O₂ und 80 % N₂ verwendet. Der Wasserstoff H₂ 5.0 hat eine Reinheit von 99.999 Vol.-% (Nebenbestandteile in vpm: O₂ ≤ 2, N₂ ≤ 3, H₂O ≤ 5, C_nH_m ≤ 0,5). Die Größe des analogen Ausgangssignals beträgt 0 bis 20 mA.

Kalibriergase: Als Kalibriergas wird ein Gemisch aus den notwendigen Kalibriergasen mit Stickstoff verwendet, dessen jeweilige Anteile der etwaigen Größenordnung der zu erwarteten Messwerte entsprechen (siehe Tabelle 6.3).

Tabelle 6.3.: Prüfgaszusammensetzung laut Analysenzertifikat der Firma Linde für Prüfklasse 1 nach DIN ISO 6141

Beimengung	Sollwert	Istwert	rel. Messunsicherheit in % ¹
Propan	100 ppm	100 ppm	± 2
Kohlenmonoxid	500 ppm	500 ppm	± 2
Stickstoffmonoxid	400 mg/m ³	441 mg/m ³	± 2
Kohlendioxid	9,00 %	9,06 %	± 1
Stickstoff	Rest		

¹%- und ppm-Angaben sind als ideale Volumenanteile (=Molanteile) zu verstehen. Alle Volumenangaben sind auf den Normzustand bezogen (1013 mbar; 273,15 K).

Zur Kalibrierung des Nullpunktes wird Stickstoff N₂ als Nullgas mit einer Qualität von 5.0 verwendet.

6.2.2. Gesamtstaubmessung

Die Messung des Gesamtstaubes (TSP... total suspended particles) im Abgas erfolgt mit einer Messanordnung der Firma GSM (GESELLSCHAFT FÜR SCHADSTOFFMESSTECHNIK GMBH, 41469 Neuss-Neudorf). Dabei wird ein Teilstrom des Abgases möglichst isokinetische über eine Düse entnommen und der darin enthaltene Staub in der darauffolgenden Filterhülse abgeschieden. Das

staubfreie Abgas gelangt anschließend in den Kondensatabscheider zur Entfernung der auskondensierten Feuchtigkeit, anschließend zur vollständigen Gastrocknung in eine Silicagel-Packung und weiter über ein Rotameter (ABB Modell D10A11, 100 % $\hat{=} 4,100 \text{ m}^3/\text{h}$) in den Gaszähler ($\dot{Q}_{max} = 10 \text{ m}^3/\text{h}$, $\dot{Q}_{min} = 0,06 \text{ m}^3/\text{h}$, Ablesegenauigkeit $0,001 \text{ m}^3$). Eine angeschlossene Vakuumpumpe (Trockenläufer-Vakuumpumpe von RIETSCHLE MASCHINEN- UND APPARATEBAU GMBH, Saugvermögen $6 \text{ m}^3/\text{h}$, absoluter Enddruck 150 mbar , Motor $0,25 \text{ kW}$) sorgt für den nötigen Unterdruck, wobei eine Volumenstromregelung mit dem vorgeschalteten Bypass-Ventil erfolgt (siehe dazu Abbildung 6.4 und 6.5).

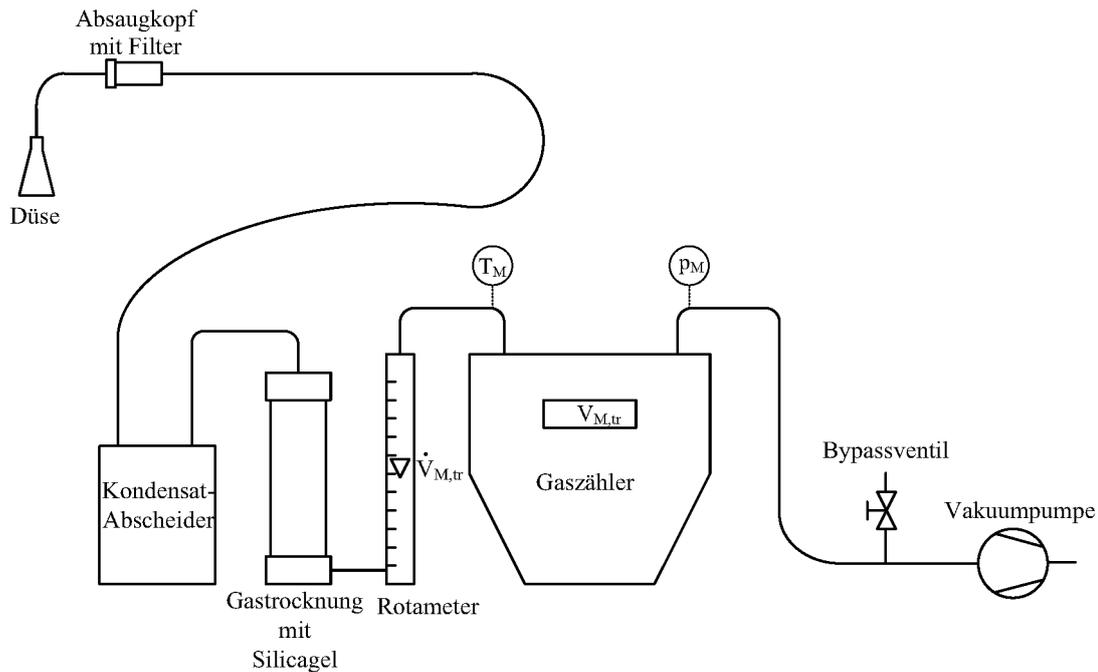


Abbildung 6.4.: Schema der Gesamtstaubmessung

Die Auswertung erfolgt gravimetrisch: Die Massendifferenz der Staubhülse wird auf die abgesaugte Gasmenge bezogen. Als Filtermaterial in der Staubhülse wird Glaswolle verwendet. Diese wird in destilliertem Wasser geschwenkt und in 7 Lagen nicht zu fest in die Staubhülse gestopft. Anschließend erfolgt die Trocknung im Vakuum-Trockenofen und die Auskühlung und Lagerung bis zur Verwendung im Exsikkator. Die staubbeladene Filterhülse wird ebenfalls im Vakuum-Trockenofen getrocknet und im Exsikkator ausgekühlt (äquilibriert) bevor die Wägung vorgenommen werden kann.

Die austauschbare Düse erleichtert die Anpassung der Absauggeschwindigkeit an die Abgasgeschwindigkeit. Bei der Einstellung des Absaug-Volumenstromes an der Düse \dot{V}_D muss noch beachtet werden, dass im Rotameter der trockene Absaug-Volumestrom $\dot{V}_{M,tr}$ abgelesen wird und daher der Anteil des Wassers \dot{V}_W abgezogen werden muss. Der Zusammenhang ist in der Gleichung

$$\frac{\dot{V}_D \cdot p_K}{T_K} = \frac{(\dot{V}_{M,tr} + \dot{V}_W) \cdot p_M}{T_M} \quad (6.1)$$

dargestellt. Dabei sind T_K und T_M die Temperaturen im Kamin bzw. im Messgerät, p_K und p_M die Drücke im Kamin bzw. im Messgerät. Aufgrund der genauen Kenntnis des Verbrennungsvorganges wird hier, abweichend von der Norm VDI 2066 Bl.1 [198], der Wasseranteil im Abgas über die Verbrennungsrechnung ermittelt und der Druck im Kamin wird dem Umgebungsdruck gleichgesetzt.

Da das Rotameter für Luft bei 20 °C und Normaldruck (1013 mbar) kalibriert ist, muss eine Umrechnung des angezeigten Wertes \dot{V}_0 für das Medium Abgas bzw. die Bedingungen im TSP-Messgerät erfolgen. Der Zusammenhang ist in der Formel

$$\dot{V} = \dot{V}_0 \cdot \sqrt{\frac{r_1 \cdot T_1 \cdot p_2}{r_2 \cdot T_2 \cdot p_1}} \quad (6.2)$$

dargestellt [199]. Dabei repräsentieren r_1 und r_2 die Dichten der verschiedenen Medien bei kalibrierten bzw. geänderten Bedingungen.

Die Umrechnung der im Gaszähler bei Messbedingungen ermittelten Abgasmenge $V_{M,tr}$ auf Normbedingungen (Indizes N) erfolgt mit Gleichung 6.3:

$$V_N = \frac{T_N \cdot V_{M,tr} \cdot p_M}{p_N \cdot T_M} \quad (6.3)$$

Eine Umrechnung der ermittelten Emissionskonzentration auf einen Bezugssauerstoffwert erfolgt gemäß der Gleichungen 3.41 und 3.42.

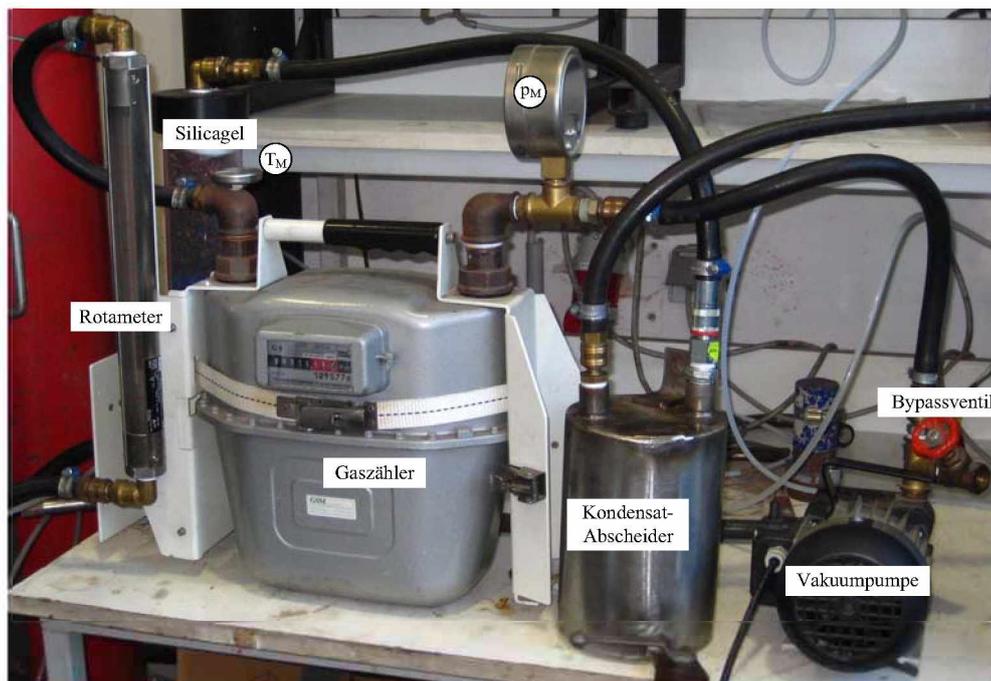


Abbildung 6.5.: Messaufbau für die Gesamtstaubmessung TSP

6.2.3. Feinstaubmessung mit dem Kaskadenimpaktor

Kaskadenimpaktoren sind Messgeräte zur Erfassung der Partikelmasse für die verschiedenen Partikelgrößen - Fraktionen. Dabei bestehen diese Niederdruck-Kaskadenimpaktoren aus kaskadenartig übereinander angeordneten Lochblechen mit jeweils darunter liegenden Prallplatten (Abb. 6.6 und 6.7). Der Gasstrom wird dabei durch eine Lochplatte geleitet und nach Passieren der Löcher (Düsen) rasch umgelenkt. Größere Partikel, die aufgrund ihrer Massenträgheit diese schnelle Richtungsänderung nicht mehr vollziehen können, werden auf der mit einer Aluminiumfolie belegten

Prallplatte impaktiert (Abb. 6.6). Die wichtigsten Abmessungen für die Berechnung der abgetrennten Partikelgrößen sind die Düsenweite D , die Düsenlänge L und der Abstand zwischen Prallplatte und Düse S (siehe Abb. 6.6)[200].

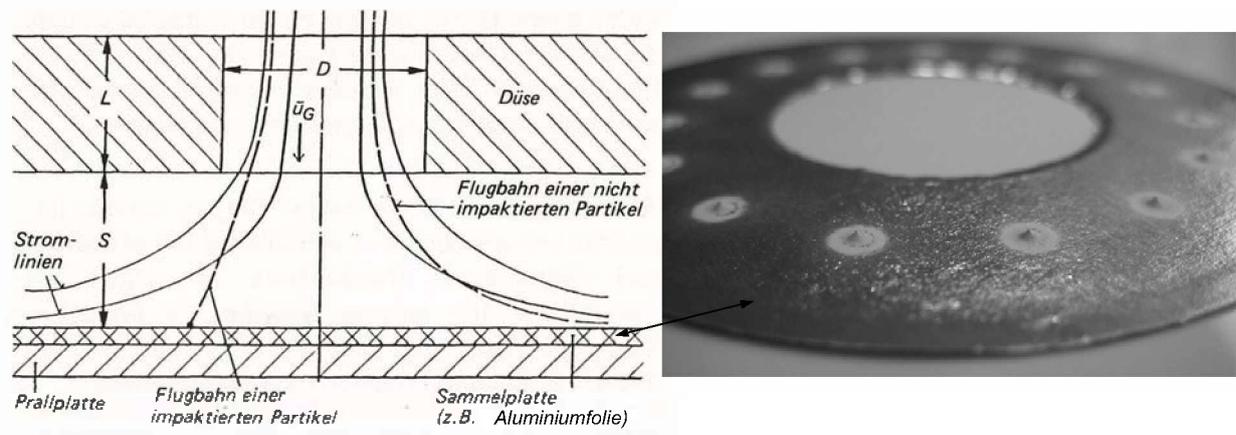


Abbildung 6.6.: Prinzip der Impaktion von Partikeln [200] (links), Sammelfolie aus Aluminium (Stärke ca. $10\ \mu\text{m}$) mit impaktierten Partikeln [201] (rechts)

Die Löcher der Lochbleche werden von Stufe zu Stufe kleiner, ebenso der Abstand zwischen Lochplatte und Prallplatte. Durch diesen Umstand als auch durch den daraus resultierenden geringer werdenden Druck in den einzelnen Stufen wird die Geschwindigkeit erhöht und durch stärkere Umlenkkräfte sukzessive kleinere Partikel auf der Sammelfolie abgetrennt.

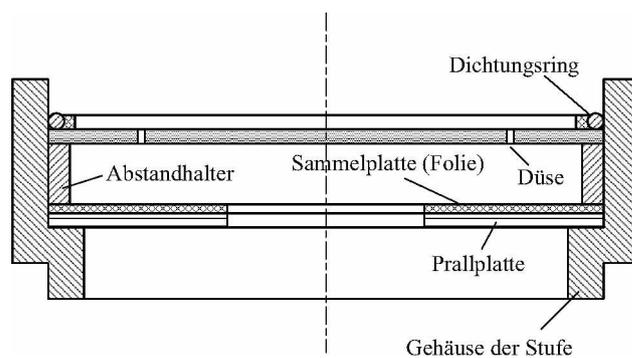


Abbildung 6.7.: Schnitt durch eine Stufe des BLPI (links), Stufen des BLPI mit Sicht auf die Düsenplatte der Stufe 9 (rechts)

Theorie des LPI [200]:

Der Abscheidewirkungsgrad definiert die Wahrscheinlichkeit, mit der eine bestimmte Partikelgröße auf der Prallplatte impaktiert wird und dort haften bleibt. Diese Abscheidewirkungsgrade sind relevant für die Angabe der je Stufe abgetrennten Fraktionen in Abhängigkeit der Partikelgröße.

Es besteht eine Abhängigkeit des Impaktionswirkungsgrades vom Strömungsfeld und vor allem von der Beweglichkeit der Partikel. Dabei ist das Strömungsfeld hauptsächlich vom Verhältnis S/D und der Reynolds-Zahl

$$Re = \frac{\bar{u}_G \cdot D \cdot \rho_G}{\mu_G} \quad (6.4)$$

abhängig.

\bar{u}_G ...mittlere Gasgeschwindigkeit im Düsenaustrittsquerschnitt; D ...Düsenweite; ρ_G ... Dichte des Gases; μ_G ...dynamische Viskosität des Gases

Die dimensionslose Stokes-Zahl (St) beschreibt die Bewegung der Partikel in der Strömung.

$$St = \frac{\rho_P \cdot d_P^2 \cdot C(d_P) \cdot \bar{u}_G}{9 \cdot \mu_G \cdot D} \quad (6.5)$$

ρ_P ...Partikeldichte; d_P ...Partikeldurchmesser; $C(d_P)$...Cunningham-Faktor

Der in Gleichung 6.5 verwendete Cunningham-Faktor $C(d_P)$ wird wie folgt ermittelt:

$$C(d_P) = 1 + \frac{2 \cdot \lambda}{d_P} \cdot \left[A + B \cdot \exp\left(-b \cdot \frac{d_P}{2 \cdot \lambda}\right) \right] \quad (6.6)$$

λ ...mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle; A , B , b ...Konstanten. Diese sind von der Partikel/Gas-Kombination abhängig, wobei in der Praxis die Werte $A = 1,23$, $B = 0,41$, $b = 0,88$ verwendet werden.

Die mittlerer freie Weglänge λ definiert sich folgendermaßen:

$$\lambda = 2 \cdot \frac{\mu_G}{p} \cdot \left(\frac{\pi \cdot R_m \cdot T}{8 \cdot M_M} \right)^{1/2} \quad (6.7)$$

p ...Druck des Gases, T ...Temperatur des Gases, R_m ...allgemeine Gaskonstante, M_M ...Molare Masse des Gases.

Nach Berechnungen von [202] ist der Impaktionswirkungsgrad in guter Annäherung für $L/D \leq 0,25$, $0,5 \leq S/D \leq 5,0$ und $100 \leq Re \leq 3000$ allein von der Stokes-Zahl abhängig. Aufgrund des steilen Anstiegs des Impaktorwirkungsgrades über die Stokes-Zahl ergibt sich ein Zusammenhang, der annähernd mit einer Sprungfunktion verglichen werden kann. Der Medianwert, welcher der Sprungstelle zugeordnet werden kann, gibt die Trennung in zwei Fraktionen beim aerodynamischen Durchmesser $d_{ae\ 50\%}$

$$d_{ae\ 50\%} = \left(\frac{St_{50} \cdot 9 \cdot \mu_G \cdot D}{C(d_{ae\ 50\%}) \cdot \rho_0 \cdot \bar{u}_G} \right)^{1/2} \quad (6.8)$$

an (ρ_0 wird definitionsgemäß mit 1000 kg/m^3 eingesetzt).

Ermittlung des mittleren Durchmessers (Mean Diameter):

Bei realen Impaktoren haben die einzelnen Stufen keine Idealtrennlinien sondern jeder Stufe wird ein Partikeldurchmesser zugeordnet, dessen Abscheidewahrscheinlichkeit 50% entspricht (Cut-Diameter) [81]. Wie in Abbildung 6.8 zu sehen ist, werden auch Partikel kleiner des Cut-Diameters

abgeschieden und größere Partikel gehen durch. Die Bestimmung der Cut-Diameter erfolgt experimentell durch den Hersteller.

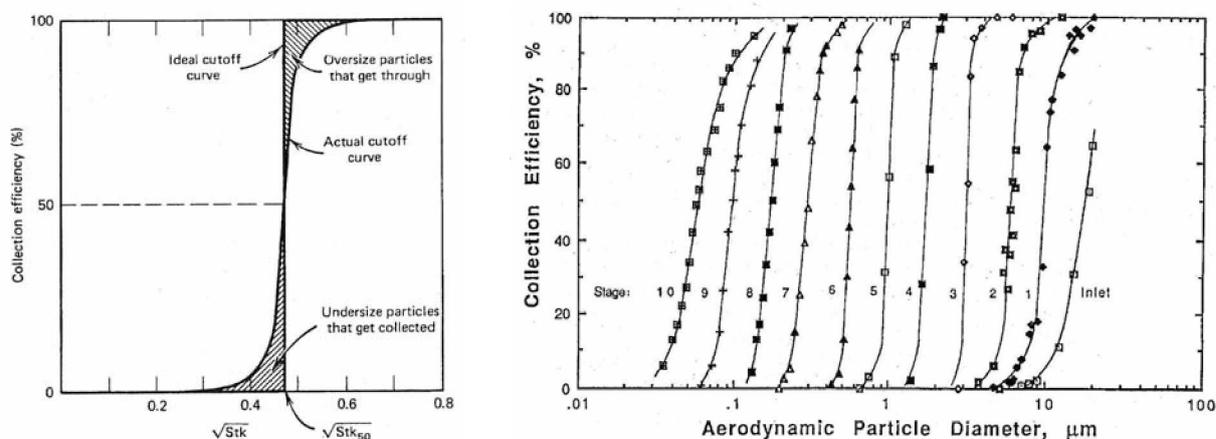


Abbildung 6.8.: Ideale und reale Trennlinien einer Impaktorstufe (links) [203] und reale Trennlinien der einzelnen Stufen eines Micro-Orifice Uniform Deposit Cascade Impactor (rechts) [204]

Beispielsweise werden bei einem idealen Impaktor auf der ersten Stufe alle Partikel größer des Cut-diameters $d_{p50\%,i}$ abgeschieden. Auf der nächsten Stufe $d_{p50\%,i-1}$ werden Partikelgrößen zwischen dem Cut-Diameter der ersten und zweiten Stufe gesammelt, und so weiter [203].

Der mittlere Durchmesser (mean diameter \bar{d}_p) der Partikel einer betreffenden Stufe wird wie folgt ermittelt [205]:

$$\bar{d}_p = \frac{d_{p50\%,i} + d_{p50\%,i-1}}{2} \quad (6.9)$$

Aufgrund der logarithmischen Stufenverteilung des Kaskadenimpaktors wird der mittlere Durchmesser (mean diameter) logarithmisch bestimmt :

$$\bar{d}_p = \exp((\ln d_{p50\%,i} + \ln d_{p50\%,i-1})/2) \quad (6.10)$$

$$\bar{d}_p = \sqrt{d_{p50\%,i} \cdot d_{p50\%,i-1}} \quad (6.11)$$

Versuchsaufbau und -Durchführung:

Für die Messung des Feinstaubes an der Pelletsanlage wird ein „Berner Low Pressure Cascade Impactor“ (BLPI, Modell LPI 25,5/0,009/2; Material 1.4305) der Firma Hauke GmbH & Co KG verwendet. Die 11 auswertbaren Stufen umfassen einen Partikelbereich mit einem mittleren aerodynamischen Durchmesser von 10,9 bis 0,0093 μm . Ein mit Partikeln beladener Abgas-Teilstrom wird über eine Absauglanze aus dem Kamin isokinetisch abgesaugt (Abb. 6.9).

Dieser abgesaugte Teilstrom gelangt weiter über einen als Vorabscheider dienenden Zyklon (Trennschnitt 10 μm) in den BLPI, wo die fraktionierte Abscheidung stattfindet. Diese Messanordnung ist in einer beheizten Box untergebracht, um Kondensation hintanzuhalten. Zusätzlich wird der Impaktor unmittelbar vor der Messung im Trockenschrank auf knapp über Abgastemperatur aufgeheizt und die Absauglanze während des Messvorganges isoliert. Dem BLPI nachgeschaltet ist

eine starke Vakuumpumpe (pump capacity: $74 \text{ m}^3/\text{h}$ at exhaust pressure of 22 mbar - downstream of nozzle), welche den für die Absaugung nötigen Unterdruck erzeugt.

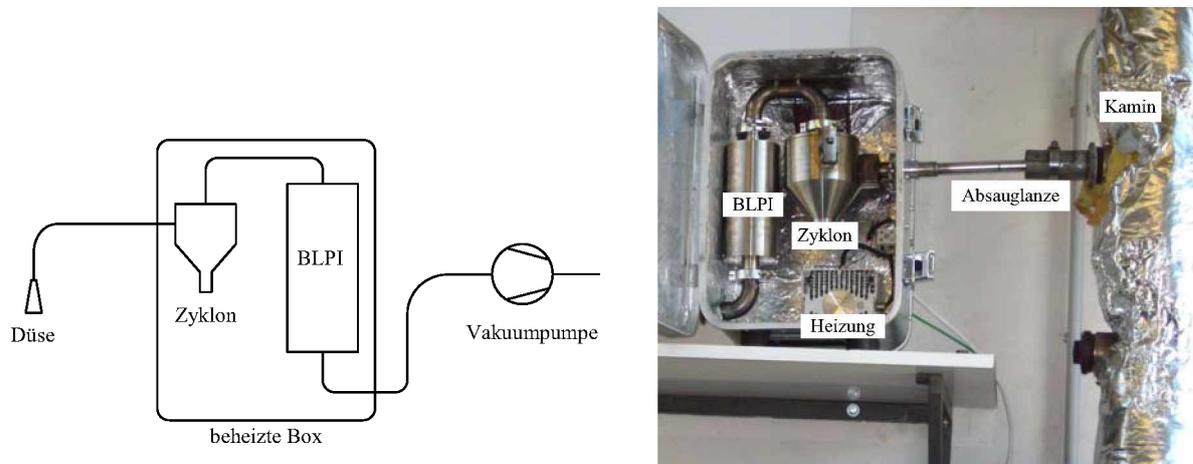


Abbildung 6.9.: Schema der Feinstaubmessung mit dem BLPI (links), Messanordnung bei der Versuchsdurchführung bei geöffneter Box (rechts)

Der Volumenstrom (volumetric flow rate $\dot{V}_0 = 26,6 \text{ l/min}$ at $T_0 = 20^\circ\text{C}$ and atmospheric pressure) durch den BLPI wird durch eine kritische Düse (Durchmesser 8,8 mm), welche sich am Ausgang des Messgerätes (BLPI) befindet und in der maximal Schallgeschwindigkeit erreicht werden kann, bestimmt. Aufgrund der zur Kalibrierung unterschiedlichen Abgastemperatur T_a , muss noch der bei Messbedingungen tatsächlich abgesaugte Volumenstrom \dot{V}_a durch die Gleichung

$$\dot{V}_a = \dot{V}_0 \cdot \sqrt{\frac{T_a}{T_0}} \quad (6.12)$$

bestimmt werden.

Geänderte Temperaturbedingungen haben erst bei einem Cut-Durchmesser kleiner $0,2 \mu\text{m}$ einen Einfluss, der sich bis 120°C kaum auswirkt. Bei geänderten Drücken verhält es sich ähnlich (siehe dazu Abbildung 6.10) [206],[207],[208]. Gemäß Betriebsanleitung der Fa. HAUKE GMBH haben Druckeinflüsse keinen Einfluss auf den Cut-Durchmesser [209]. Aus diesem Grund erfolgt auch keine Korrektur der für 20°C und Normaldruck angegebenen Impaktordaten (Tabelle 6.4).

Die Ermittlung der abgesaugten Abgasmenge erfolgt über die gemessene Absaugzeit.

Die Bestimmung der abgelagerten Partikel erfolgt gravimetrisch mittels einer sehr genauen Waage mit einer Auflösung von 1 ng. Die Massendifferenz der den Trennstufen (Tab. 6.4) zugehörigen Folien (Aluminiumfolie, $70 \times 30 \text{ mm}$) ergibt die Masse der impaktierten Partikel. Die Konzentrationen errechnen sich aus dem Quotienten von Partikelmasse und dem durchgesaugten Abgasvolumen. Durch Bestimmung von Sauerstoff- und Feuchtegehalt im Abgas sowie der Abgastemperatur kann auf Bezugsbedingungen umgerechnet werden. Auf einen Endfilter zur Bestimmung von Partikel kleiner als 9 nm wird aufgrund der bereits sehr kleinen Partikelklasse auf der ersten Stufe verzichtet.

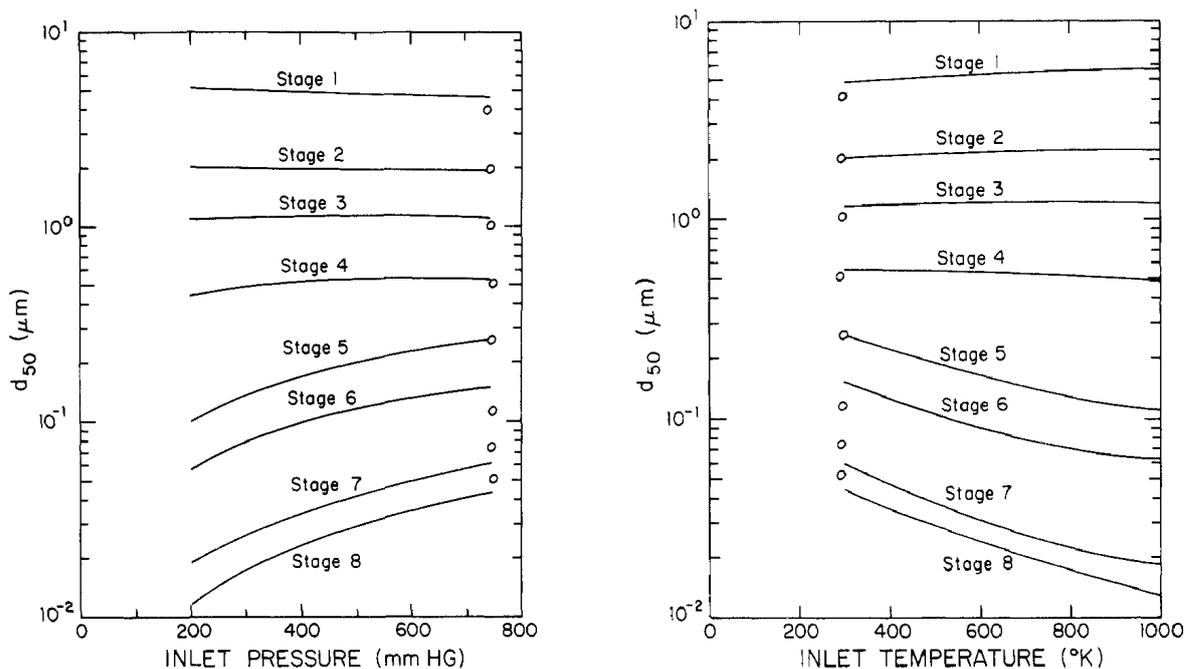


Abbildung 6.10.: Änderung des Cut-Durchmessers in Abhängigkeit des Eingangsdruckes (links) und der Eingangstemperatur (rechts) [206]

Tabelle 6.4.: Daten der BLPI-Stufen [209]

Stage #	Cut Diameter (μm)	Mean Diameter (μm)	Pressure in the Stage (mbar)
12	15,5	-	1013,2
11	7,7	10,9	1013,1
10	3,8	5,4	1012,8
9	1,9	2,7	1010,8
8	0,91	1,3	1003,3
7	0,476	0,66	929
6	0,24	0,34	711
5	0,116	0,17	472
4	0,0530	0,078	303
3	0,025	0,036	169
2	0,012	0,017	93
1	0,0072	0,0093	45

Um Temperatur- und Feuchtigkeitseinflüsse zu minimieren werden die Aluminiumfolien vor der jeweiligen Wägung einem aufwändigen Prozedere unterworfen: Die unbelegten Folien werden im Trockenschrank offen in, den Stufen entsprechenden, gekennzeichneten Petrischalen getrocknet und anschließend im Exsikkator abgekühlt bzw. gelagert. Danach erfolgt die Wägung. Die gewogenen Folien können nun in den BLPI eingebaut oder weiter z.B. als Vorrat in den Petrischalen gelagert werden.

Nach der Messung wird der Impaktor zerlegt und die mit den Partikeln belegten Aluminiumfolien vorsichtig in die gekennzeichneten Petrischalen gelegt. Anschließend erfolgt wieder eine Trocknung und anschließende Abkühlung im Exsikkator, bevor die Rückwägung vorgenommen werden kann.

7. Beschreibung und Charakterisierung der verwendeten Brennstoffe

In diesem Kapitel werden die bei den Versuchen verwendeten Brennstoffe erläutert und charakterisiert. Dazu gehören Herkunft, Herstellungsart, Elementarzusammensetzung und Verbrennungstechnische Kenndaten wie Wasser- und Aschegehalt, flüchtige Bestandteile, Heiz- bzw. Brennwert und das Ascheschmelzverhalten. Des Weiteren werden Verbrennungsdreiecke für die verwendeten Brennstoffe Weizenstroh- und Miscanthuspellets erstellt.

7.1. Art, Herkunft und physikalische Charakterisierung der verwendeten Brennstoffe

Im Zuge der Entwicklung einer Feuerungsanlage für halmgutartige Biomassepellets werden bei den Versuchen die Brennstoffe Weizenstrohpellets (WP), Miscanthuspellets (MP), Holzpellets (HP) und Miscanthus-Häckselgut (MH) verwendet. Die Weizenstrohpellets, Miscanthuspellets und das Miscanthus-Häckselgut stammen aus der Region Großnondorf (Gemeinde Guntersdorf) im Weinviertel, zwischen Hollabrunn und Retz und werden von der Firma JOSEF MEYER GES.M.B.H geliefert. Die Aufbereitung und Pelletierung der landwirtschaftlichen Produkte bzw. Reststoffe erfolgt ebenfalls durch die Firma JOSEF MEYER GES.M.B.H bzw. durch benachbarte landwirtschaftliche Betriebe. Es werden bei allen zur Verfügung gestellten Pellets weder Bindemittel zur Verbesserung der Hafteigenschaften verwendet, noch wird eine Konditionierung mit Dampf durchgeführt. Das Weizenstroh der Chargen 1 und 2 wird mit einer Hammermühle aufbereitet, jenes der Charge 3 (Ch3) und die beiden Miscanthus-Fraktionen mit einer Schneidemühle. Die Aufbereitung mit der Schneidemühle gewährleistet im Gegensatz zur Hammermühle eine eher gleichmäßige Korngröße mit geringerem Feinanteil. Beim Material, das mit der Schneidemühle aufbereitet wird (WP Ch3, MH, MP), erfolgt anschließend eine Absiebung des Feinstanteils, wobei aber der Trennkorn Durchmesser nicht bekannt ist. Mit diesem Aufbereitungsschritt sollen im Pellet durch Feinstanteil gebildete, extrem verdichtete Zonen verhindert und so die Gasdurchlässigkeit verbessert werden.

Die verwendeten Holzpellets sind handelsübliche, der Norm entsprechende Brennstoffe und werden von lokalen Anbietern bezogen. In Tabelle 7.1 ist eine Übersicht inklusive Erntejahre und Liefermengen zu sehen.

Um sich von der Pelletslängen-Verteilung der in den Brenner geförderten Weizenstrohpellets ein Bild machen zu können, wird eine händische Analyse der Pelletslängen durchgeführt. Dazu wird ein Sack Weizenstrohpellets der Charge 2 (Ch2, Aufbereitung mittels Hammermühle) mittels Probeentzug auf eine kleinere Teilmenge reduziert und anschließend in 4 verschiedene Fraktionen unterteilt: In Pellets mit einer geometrisch zylindrischen Form ab 3 mm Länge, in gebrochene Pellets ohne streng zylindrischer Form (nur eine runde Seite) mit einer Länge von 4 mm bis Pelletsdurchmesser (6 mm) und in zwei Feinanteilen mit 1 bis 4 mm und < 1 mm (siehe Abb. 7.1).

Die beiden ersteren Fraktionen werden zuerst händisch mittels Schiebelehre ermittelt, die verbleibende Feinfraktion (4 bis 1 mm und < 1 mm) mittels Siebanalyse analysiert. In Abbildung 7.2 ist die Verteilung der zylinderförmigen Weizenstrohpellets aus Charge 2 zu sehen.

Tabelle 7.1.: Bei den Versuchen zur Feuerungsanlagenentwicklung verwendete Brennstoffe

	Lieferdatum	Erntejahr	Liefermenge	Verpackung
WP Ch1	10.07.2007	2006	1 Palette	Sack zu à 15 kg
WP Ch2	11.01.1008	2006	2 Paletten	Sack zu à 15 kg
WP Ch3	29.10.2009	2009	10 Säcke	Sack zu à 17 - 23 kg
MH	16.04.2010	2010	8 Säcke	Sack zu à 5 kg
MP	11.05.2010	2010	9 Säcke	Sack zu à 17 kg
HP NATURPELLETS	Dez. 2009		3 Säcke	Sack zu à 15 kg
HP GENOL	März 2010		5 Säcke	Sack zu à 15 kg
HP SCHWEIGHOFER	April 2010		7 Säcke	Sack zu à 15 kg

WP...Weizenstrohpellets, Ch...Charge, HP...Holzpellets, MH...Miscanthus Häckselgut, MP...Miscanthuspellets



Abbildung 7.1.: Fraktionen des Brennstoffs WP Ch2 (von links nach rechts): Pellets mit einer geometrisch zylindrischen Form ab 3 mm Länge, gebrochene Pellets ohne streng zylindrischer Form mit einer Länge von 4 mm bis Pelletsdurchmesser (6 mm), Feinanteil mit 1 bis 4 mm und Feinanteil < 1 mm.

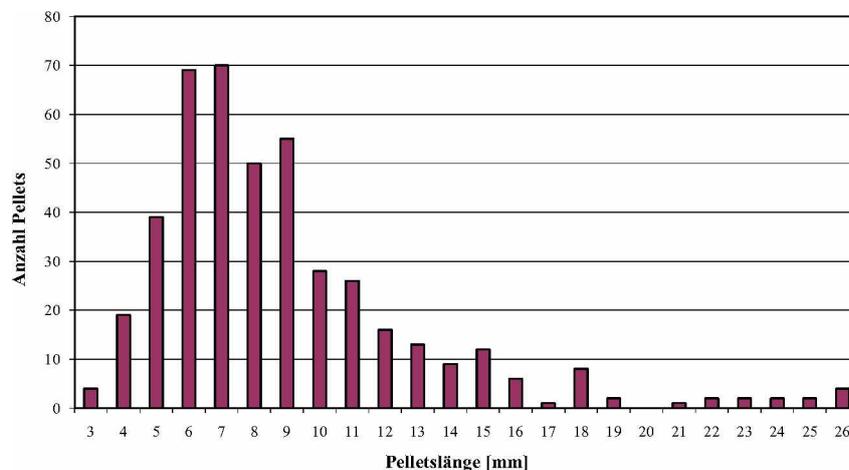


Abbildung 7.2.: Verteilung der Pelletslängen einer Teilmenge zylinderförmiger Weizenstrohpellets aus Charge 2 (WP Ch2) ab einer Pelletslänge von 3 mm.

Aus Abb. 7.2 ist auch deutlich zu sehen, dass der Großteil der Pellets nur geringfügig länger ist als ihr Durchmesser. Dabei liegt das arithmetische Mittel bei 8,9 mm, der Medianwert bei 8,0 mm. Dies lässt einerseits auf geringe Bindungskräfte in den Pellets bzw. auf eine nicht ausgereifte Pelletiertechnik schließen, zumal Weizenstroh viel schwieriger zu pelletieren ist als Holzspäne.

Die Aufteilung in die Fraktionen „zylindrische Form ab 3 mm Länge“, in „gebrochene Pellets ohne streng zylindrischer Form mit einer Korngröße von 4 mm bis Pelletsdurchmesser (6 mm)“, „Feinanteile von 1 bis 4 mm“ und „< 1 mm“ ist in Abbildung 7.3 zu sehen.

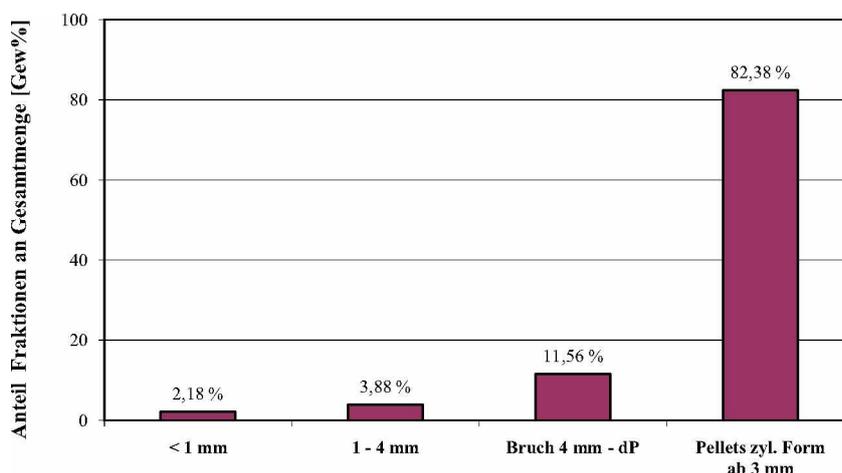


Abbildung 7.3.: Fraktionen einer Teilmenge zylinderförmiger Weizenstrohpellets aus Charge 2 (WP Ch2), dP...Pelletsdurchmesser.

Werden die Fraktionen < 1 mm und 1 - 4 mm als Feinanteil zusammengefasst, so ergibt sich ein Wert von etwa 6 Gew% respektive etwa 94 Gew% für den reinen Pelletsanteil an zylindrischen Pellets und Bruchstücken.

Als Vergleich erfolgen weitere Analysen eines ganzen Sackes und einer Teilmenge, die durch Förderung der Pellets durch den Stoker in eine Tasse im Brennraum erhalten werden. Hier wird aber nur (aufgrund der großen Menge) mittels 4 mm-Sieb eine Fraktionierung in Feinanteil und Pellets durchgeführt. Die dabei erhaltenen Ergebnisse sowie jene der oben dargestellten analysierten Teilmenge des Sackes sind in Abbildung 7.4 zu sehen.

Dabei ist zu sehen, dass die Größen der jeweiligen Feinanteile in einem relativ weiten Bereich von 3 bis über 9% gestreut sind. Es fällt jedoch auf, dass die Analysen direkt aus dem Sack - ob Teilmenge oder gesamter Sack - einen niedrigeren Feinanteil aufweisen als jene durch die Probenahme aus der Stokerförderung. Dies könnte ein Indiz dafür sein, dass durch den Fördervorgang mittels Schnecke, einmal aus dem Pelletsbehälter und ein zweites mal durch die Stokerschnecke, auch ein weiterer Abrieb des Brennstoffs passiert. Ein Absetzen des Feinanteiles im Pelletsbehälter kann dabei ausgeschlossen werden, da dieser schon über einen längeren Zeitraum nicht vollständig entleert worden ist und dadurch von einem stabilen Zustand ausgegangen werden kann. Um ein wirklich aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten müssten jedoch eine größere Anzahl solcher Versuche unternommen werden.

Dieser hier ermittelte Feinanteil ist jedoch nicht mit dem in ÖNORM M7135 [33] beschriebenen Abrieb (Feinanteil durch 3,15 mm-Sieb) von Pellets zu vergleichen, der mittels LIGNO-TESTER LT II (Firma BORREGARD LIGNOTECH) nach einer definierten Methode bestimmt wird und für die Einhaltung der normativen Anforderungen von Holz- und Rindenpellets durchzuführen ist. Der hier ermittelte Feinanteil wird durch Manipulationsvorgänge in der Produktion, beim Verpacken und Lagern sowie durch Erschütterungen beim Transport und Förderung in der Anlage verursacht.

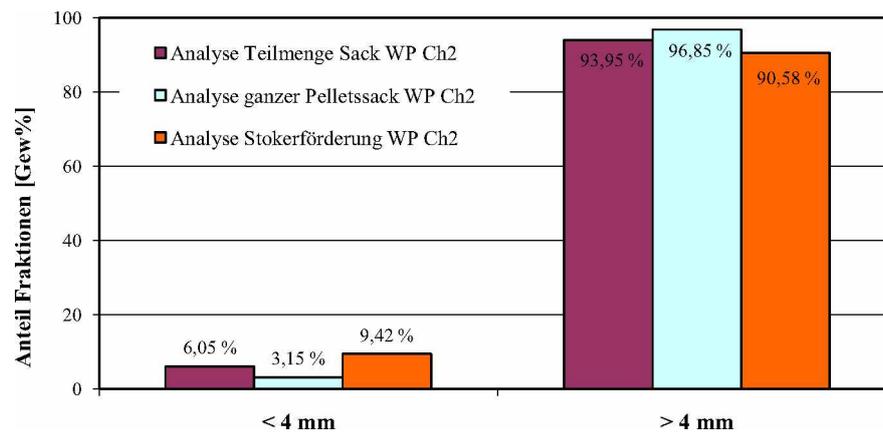


Abbildung 7.4.: Bestimmung des Feinanteiles < 4 mm mittels Siebanalyse bei verschiedenen Proben und Probennahmen bei den Weizenstrohpellets Charge 2.

7.2. Elementarzusammensetzung und verbrennungstechnische Kenndaten

In diesem Abschnitt werden die Elementarzusammensetzungen und verbrennungstechnischen Kenndaten der verwendeten Brennstoffe dargestellt und diskutiert. Die Bestimmung des Wassergehalts (w) erfolgt gemäß ÖNORM EN 14774-1 [52], des Aschegehalts (a) gemäß ÖNORM EN 14775 [54] und der Anteil der Flüchtigen gemäß ÖNORM EN 15148 [49]. Die Ermittlung des Brennwertes (H_o) wird mit dem Bobenkalorimeter der Firma IKA Typ C5000 durchgeführt und anschließend mit Kenntnis von Wassergehalt und Wasserstoffgehalt auf den Heizwertes (H_u) umgerechnet (gemäß ÖNORM EN 14918 [45]).

Die Elemente Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Stickstoff (N) werden mit dem Elementaranalysator LECO 1000 bestimmt. Dabei wird das bei 950 °C in einer Sauerstoffatmosphäre gebildete Abgas der Brennstoffprobe in einem Infrarotanalysator auf CO_2 und H_2O untersucht und anschließend auf den Gehalt von C und H zurückgerechnet. N_2 wird mittels Wärmeleitfähigkeitsdetektor gemessen, wobei bereits gebildetes NO_x vorher in einem Katalysator reduziert wird.

Der Gesamtschwefelgehalt (S) wird gemäß Norm DIN 51724-1 [210] ermittelt, der Chlorgehalt in Anlehnung an die Norm DIN 51727 [211].

Die Durchführung aller oben genannten Analysen erfolgt im lehrstuhleigenen Brennstofflabor.

Der Gehalt von Sauerstoff (O) ergibt sich aus der Differenz der Summe der Elemente C, H, N, S, Cl und Asche auf die Gesamtprobe.

Aufgrund der großen Anzahl der ermittelten Werte und den dargestellten Vergleichen mit Literatur- und Grenzwerten wird jeder Brennstoff hier in einem eigenen Unterabschnitt abgehandelt.

Als Zusammenfassung ist hier mit Abbildung 7.5 bereits ein graphischer Vergleich der Elementarzusammensetzungen und Heizwerte angeführt. Dabei ist sehr gut zu erkennen, dass sich diese Brennstoffe in den wesentlichen Hauptelementen Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O) sehr ähnlich sind und nur der Ascheanteil die Anteile der Hauptelemente proportional beeinflusst. Dasselbe gilt auch für die Heizwerte, wo beispielsweise der gegenüber von Weizenstrohpellets geringere Ascheanteil von Miscanthuspellets den Heizwert proportional steigen lässt. Eine genauere Betrachtung und Diskussion erfolgt jedoch in den folgenden Unterabschnitten.

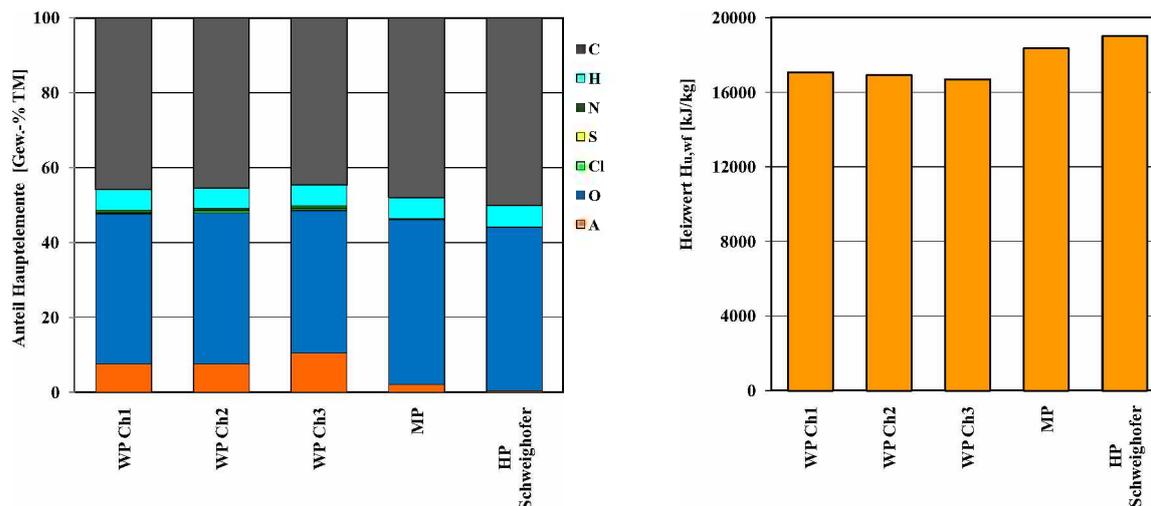


Abbildung 7.5.: Graphischer Vergleich der Elementarzusammensetzung (links) und der Heizwerte (rechts) von Weizenstroh-, Miscanthus- und Holzpellets der in den Versuchen verwendeten Chargen. WP...Weizenstohpellets, MP...Miscanthuspellets, HP...Holzpellets, Ch... Charge

7.2.1. Weizenstrohpellets

Beim Brennstoff Weizenstrohpellets (WP) werden insgesamt 4 verschiedene Proben (114-07, Charge 1 bis 3) analysiert, wobei von der Probe „114-07“ nur eine kleine Menge zu Analysezwecken erhalten und deshalb auch nicht im Versuchsaggregat eingesetzt wird. Wie bereits eingangs erwähnt sind die Charge 3 mittels Schneidemühle, alle anderen Chargen mit einer Hammermühle aufbereitet. In Verbindung mit einer Absiebung des Feinanteils soll bei der Charge 3 damit eine höhere Gasdurchlässigkeit im einzelnen Pellet erreicht werden. In Tabelle 7.2 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zusammen mit Literaturwerten als Vergleich aufgelistet.

Tabelle 7.2.: Gehalte an Hauptelementen und verbrennungstechnische Kenndaten der untersuchten bzw. verwendeten Weizenstrohpellets, Literaturdaten von HARTMANN [19] und der Datenbank BIOBIB [212] als Vergleich.

Parameter [Einheit]	WP 114-07 ¹	WP Ch 1 ¹	WP Ch 2 ^{1,3}	WP Ch 3 ^{2,3}	Weizenstroh nach [19]	Weizenstroh nach [212]
W [Gew% OS]	-	7,80	5,56	7,42	-	-
A [Gew% TM]	10,40	7,59	7,59	10,50	5,7	6,21
Fl [Gew% TM]	73,60	74,51	74,15	70,88	77,0	-
H _o [MJ/kg TM]	17,785	18,293	18,123	17,890	18,500	17,821
H _u [MJ/kg TM]	16,493	17,074	16,922 ⁴	16,685	17,200	16,534
H _u [MJ/kg OS]	15,025	15,552	15,839 ⁴	15,266	-	-
C [Gew% TM]	44,79	45,86	45,48	44,68	45,6	44,33
H [Gew% TM]	5,88	5,55	5,44	5,49	5,8	5,32
N [Gew% TM]	1,03	0,60	0,49	0,76	0,48	0,57
S [Gew% TM]	0,15	0,04	0,13	0,16	0,082	0,14
Cl [Gew% TM]	0,20	0,27	0,46	0,40	0,19	0,50
O [Gew% TM]	37,55	40,09	40,41	38,01	42,4	42,93 ⁵

aufbereitet mit: ¹Hammermühle, ²Schneidemühle; ³Mittelwert aus 2 Probenahmen; ⁴Mittelwerte aus 3 Probenahmen; ⁵rechnerisch aus Werten von [212].

Es fällt auf, dass die Aschegehalte der 2 Proben „WP 114-07“ und „WP Ch3“ im Vergleich zur Literatur fast doppelt so hoch sind. Weiters ist auffallend, dass die Probe „WP 114-07“ einen sehr hohen Stickstoffgehalt aufweist. Bezüglich Chlorgehalt liegen alle Werte, auch jene der Literatur über dem vom Art. 15a B-VG geforderten maximalen Wert von 1500 mg/kg Trockenmasse (entspricht 0,15 %) für standardisierte und nicht standardisierte sonstige Brennstoffe. Ansonsten liegen alle anderen Werte im Bereich der Literaturwerte, wenn auch alle gemessenen Flüchtigen kleiner als der Literaturwert sind. Eine Abweichung bezüglich der Aufbereitungsmethode mit Schneidemühle und anschließender Absiebung des Feinanteils ist bei den Flüchtigen zu erkennen: Der Anteil der Flüchtigen ist bei der Charge 3 mit 70,88 % deutlich geringer.

7.2.2. Miscanthuspellets

Beim Brennstoff Miscanthus werden 2 Proben - Pellets (MP) und Häckselgut (MH) - analysiert. Wie bereits erwähnt erfolgt die Aufbereitung mittels Schneidemühle und anschließender Absiebung des Feinanteils. In Tabelle 7.3 sind die Ergebnisse zusammen mit Literaturwerten als Vergleich aufgelistet.

Hier muss hervorgehoben werden, dass die Aschegehalte beider Proben - sowohl der Miscanthuspellets (MP), als auch des Miscanthus-Häckselguts (MH) - deutlich unter denen der drei vergleichenden Literaturwerte liegen. Es fällt auch weiters auf, dass die Stickstoff- und Chlorgehalte beider Proben ebenfalls deutlich unter denen der Literaturwerte liegen. Der in Art. 15a B-VG geforderte maximale Wert für Chlor von 1500 mg/kg Trockenmasse (entspricht 0,15 %) für standardisierte und nicht standardisierte sonstige Brennstoffe kann gerade noch eingehalten werden.

Tabelle 7.3.: Gehalte an Hauptelementen und verbrennungstechnische Kenndaten der verwendeten Miscanthuspellets (bzw. Häckselgut), Literaturdaten von HARTMANN [19] und der Datenbank BIOBIB [212] als Vergleich.

Parameter [Einheit]	MH (2010)	MP (2010)	Miscanthus nach [19]	Miscanthus 2-jährig nach [212]	Miscanthus 3-jährig nach [212]
W [Gew% OS]	10,01	7,68	-	-	-
A [Gew% TM]	1,94	2,16	3,9	4,69	3,46
Fl [Gew% TM]	80,69	80,96	77,6	-	-
H _o [MJ/kg TM]	19,576	19,578	19,100	19,063	19,165
H _u [MJ/kg TM]	18,451	18,359	17,600	17,856	17,970
H _u [MJ/kg OS]	16,360	16,761	-	-	-
C [Gew% TM]	48,40	48,00	47,5	47,67	48,49
H [Gew% TM]	5,12	5,55	6,2	5,46	5,42
N [Gew% TM]	0,18	0,22	0,73	0,49	0,56
S [Gew% TM]	0,05	0,04	0,15	0,06	0,05
Cl [Gew% TM]	0,14	0,12	0,22	0,25	0,21
O [Gew% TM]	44,17	43,91	41,3	41,38 ¹	41,81 ¹

¹rechnerisch aus Werten von [212].

7.2.3. Holzpellets

Beim Brennstoff Holzpellets werden insgesamt drei verschiedene handelsübliche Produkte verwendet: Holz-NATURPELLETES, bezogen von der Firma HORNBACH, Holzpellets GENOL und SCHWEIGHOFER, jeweils bezogen von der Firma LAGERHAUS. Die Analysenergebnisse bezüglich Elementarzusammensetzung und verbrennungstechnischer Kenndaten, sowie Vergleiche mit Literaturwerten

von OBERNBERGER [28] und den Grenzwerten gemäß ÖNORM M 7135 [33] sind in Tabelle 7.4 dargestellt.

Tabelle 7.4.: Gehalte an Hauptelementen und verbrennungstechnische Kenndaten der untersuchten bzw. verwendeten Holzpellets und Literaturdaten von [28] (Analysen von 21 Holzpelletsproben).

Parameter [Einheit]	Holz NATURPEL- LETS	Holzpellets GENOL	Holzpellets SCHWEIG- HOFER	Holzpellets nach [28]	Grenzwerte ÖNORM M 7135 [33]
W [Gew.-% OS]	5,38	7,03	7,24	7,7	≤10,0
A [Gew.-% TM]	0,43	0,58	0,36	0,51	≤0,50
Fl [Gew.-% TM]	84,93	84,39	84,31	-	-
H _o [MJ/kg TM]	20,497	20,236	20,261	20,3	-
H _u [MJ/kg TM]	19,165	18,915	19,011	19,0	≥18,0
H _u [MJ/kg OS]	18,003	17,414	17,457	-	-
C [Gew.-% TM]	50,63	50,85	50,13	50,3	-
H [Gew.-% TM]	6,07	6,01	5,69	5,7	-
N [Gew.-% TM]	k.A.	0,08	0,05	0,22	≤0,30
S [Gew.-% TM]	0,03	0,01	0,02	0,028	≤0,04
Cl [Gew.-% TM]	0,032	0,014	0,026	0,005	≤0,02
O [Gew.-% TM]	-	42,46	43,72	43,2 ¹	-

¹rechnerisch aus Werten von [28].

Überraschenderweise liegen der Aschegehalt der Holzpellets GENOL und die Chlorgehalte von 2 Proben (Holz NATURPELLETS, Holzpellets SCHWEIGHOFER) über den in der Norm geforderten Werten. Alle anderen Werte liegen im Bereich des Literaturwertes bzw. unter den Grenzwerten der ÖNORM M 7135.

7.3. Ascheschmelzverhalten von Weizenstroh-, Miscanthus- und Holzpellets

Das Ascheschmelzverhalten wird nach ÖNORM CEN/TS 15370-1 [57] mit dem lehrstuhleigenen Erhitzungsmikroskop durchgeführt und die dazu notwendige Asche gemäß ÖNORM EN 14775 [54] bei einer Temperatur von 550 °C aus dem Brennstoff hergestellt. Aufgrund eines nicht eindeutigen Schmelzpunktes müssen bei der Bestimmung des Ascheschmelzpunktes mehrere charakteristische Temperaturen wie Schrumpfungs-, Erweichungs-, Halbkugel und Fließtemperatur bestimmt werden (siehe dazu 2.3.6.5). Eine genauere Beschreibung der Anlage sowie der Arbeitsschritte sind bei POPPENWIMMER [60] zu finden.

Wie schon in Unterabschnitt 2.3.6.5 beschrieben, ist der Beginn der Schrumpfung (SST) definiert als eine Flächenreduktion auf unter 95 % der Ausgangsfläche bei 550 °C [16], wobei deren Bestimmung in der Norm CEN/TS 15370-1:2006 [57] lediglich als freiwillig beschrieben ist. Bei den durchgeführten Versuchen erfolgt diese Bestimmung manuell anhand der Flächenänderungs-Diagramme.

In Tabelle 7.5 sind die experimentell ermittelten Ergebnisse, als auch Literaturwerte als Vergleich, dargestellt.

Tabelle 7.5.: Ergebnisse des Ascheschmelzverhaltens der Erhitzungsmikroskopversuche und Vergleich mit der Literatur.

	SST [°C]	DT [°C]	HT [°C]	FT [°C]
Weizenstrohpellets Ch1 (n = 5)	676 - 736	992 - 1022	1249 - 1271	1292 - 1350
Weizenstrohpellets Ch2 (n = 3)	656 - 661	806 - 848	1062 - 1070	1182 - 1217
Weizenstrohpellets Ch2 gesiebt (n = 5)	643 - 656	792 - 844	1053 - 1071	1130 - 1342
Weizenstrohpellets Ch3 (n = 3)	667 - 680	824 - 847	1068 - 1110	1212 - 1223
Weizenstrohpellets Ch3 gesiebt (n = 4)	687 - 701	883 - 903	1138 - 1159	1235 - 1309
Miscanthus Häckselgut (n = 3)	649 - 665	820 - 851	1052 - 1061	1126 - 1167
Miscanthuspellets (n = 3)	664 - 668	844 - 863	1064 - 1069	1155 - 1169
Miscanthuspellets gesiebt (n = 3)	654 - 663	799 - 847	1053 - 1066	1162 - 1180
Holzpellets SCHWEIGHOFER (n = 4)	1124-1154	1424-1475	n.b.	n.b.
Weizenstroh Lit. Hartmann [16]	-	998	1246	1302
Weizenstroh BIOBIB [212]	848	956	1107	1241
Stroh (Winterweizen-A) [23]	800 - 860	860 - 900	1040 - 1130	1080 - 1120
Miscanthus Lit. Hartman [16]	-	973	1097	1170
Miscanthus (Gigantheus-A) [23]	820 - 980	820-1160	960 - 1290	1050 - 1270
Miscanthus 2-jährig BIOBIB [212]	894	1051	1127	1205
Miscanthus 3-jährig BIOBIB [212]	823	912	1079	1152
Holz (Fichte-A) [23]	1110-1340	1410-1640	1630 - >1700	> 1700
Holz Lit. Hartmann [16]	-	1426	-	1583

SST..Shrinkage Starting Temperature - Schrumpfungstemperatur, DT...Deformation Temperature - Erweichungs- temperatur, HT...Hemisphere Temperature - Halbkugeltemperatur, FT...Flow Temperature - Fließtemperatur.

Die anderen charakteristischen Temperaturen werden über eine optische Erfassung mittels interner Software automatisch bestimmt, wobei folgende Kriterien angewendet werden:

Die Erweichungstemperatur (Deformation Temperature DT) kennzeichnet den ersten Temperaturwert, bei welchem eine 1,5%ige Änderung des Formfaktors gegenüber dem ersten Bild und eine Vergrößerung eines festgelegten Eckwinkels um 10% erfolgt. Dabei ist der Formfaktor als Maß für die Abweichung des Schattenbildes der Probe von einem Halbkreis definiert. Die Halbkugeltemperatur (Hemisphere Temperature HT) wird bei einem Formfaktor größer oder gleich 0,985 und halber Probenkörperhöhe erreicht. Die Fließtemperatur kennzeichnet die halbe Höhe des Probenkörpers bei Halbkugeltemperatur [213].

Dabei geben die dargestellten Werte den Bereich der Ergebnisse aus drei bis fünf Einzelmessungen an. Die Angabe eines Bereiches anstatt eines Mittelwertes zeichnet dabei ein authentischeres Bild vom Brennstoff. Aufgrund der starken Neigung zum Aufblähen des Probenkörpers, was die Kriterien für Formfaktor und Winkel verfälscht, müssen immer wieder nicht plausible Einzelmesswerte für die Erweichungstemperatur DT ausgeschlossen werden. Solche Verfälschungen können durch die Kontrolle der Bilder des Probenkörpers erkannt werden. Eine Übersicht aller Einzelmesswerte ist im Anhang zu sehen.

In Abbildung 7.6 sind die in Tabelle 7.5 numerisch dargestellten Ergebnisse zur besseren Vergleichbarkeit in graphischer Form dargestellt. Dabei werden Einzelwerte zur besseren Lesbarkeit als Bereich von 10K veranschaulicht und überlappende Temperaturbereiche als angrenzend illustriert.

Bei Betrachtung der Ergebnisse für Weizenstroh und Miscanthus fällt auf, dass die Schrumpfungstemperaturen (SST) deutlich unter jenen der Literaturangaben liegen, was eigentlich nur mit

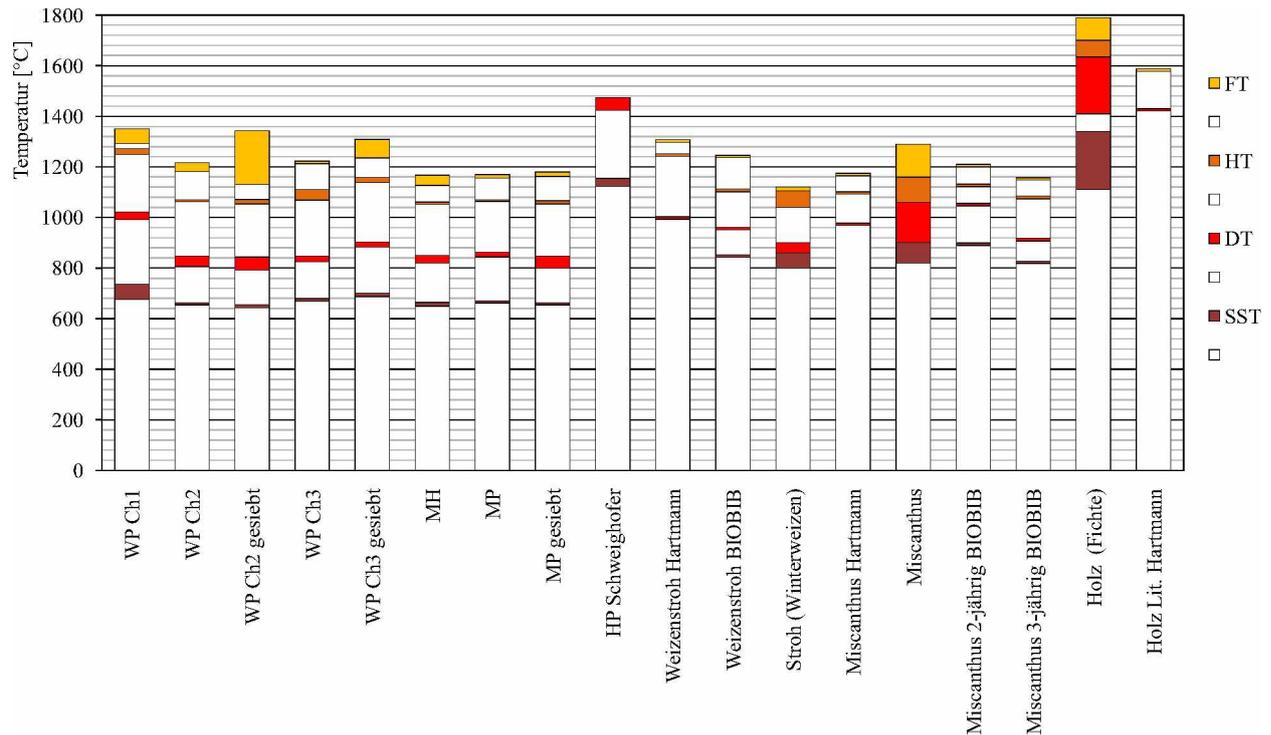


Abbildung 7.6.: Graphischer Vergleich der charakteristischen Temperaturen des Ascheschmelzverhaltens mit den Literaturwerten ([16], [212], [23])

der Zusammensetzung der Asche erklärt werden kann. Die Erweichungstemperaturen (DT) liegen im unteren Bereich der Literaturwerte, Halbkugel- (HT) und Fließtemperatur (FT) decken sich gut mit den Literaturangaben, welche ihrerseits einen sehr großen Bereich umfassen und die Variabilität von Biobrennstoffen unterstreichen.

In der Folge werden hier die bei den Versuchen am häufigsten eingesetzten Chargen, wie WP Ch2, WP Ch3 und MP mittels Diagrammen genauer betrachtet. Die weiteren Diagramme der Flächenänderung während der Analyse des Schmelzverhaltens sind im Anhang dargestellt.

Die SST für die Asche der Weizenstrohpellets Ch1 liegt mit dem Bereich von 676 - 736 °C deutlich unter dem Literaturwerten. Die Werte für DT, HT und FT liegen sehr gut im Bereich der Literaturdaten.

Für Weizenstrohpellets der Charge 2 (WP Ch2) ist für drei ausgewertete Proben die Flächenänderung im Laufe der Temperaturerhöhung in Abbildung 7.7 dargestellt.

Bis zu einer Temperatur von ca. 600 °C ist keine deutliche Flächenänderung der Aschekörper zu beobachten. Dann beginnt eine Schrumpfung, die bei 95 % der Ausgangsfläche die charakteristische Schrumpfungstemperatur SST und bei ca. 750 °C das Minimum erreicht. Danach beginnt sich der Aschekörper, wie bei Biomassen oft zu beobachten, durch Blasenbildung aufzublähen. Anschließend kommt es wiederum zu einer Reduktion der Fläche, in dessen Verlauf die Kriterien für die Halbkugel- und Fließtemperatur erfüllt werden. Für die drei gemessenen Proben der Weizenstrohpellets Charge 2 weisen die charakteristischen Temperaturen SST, HT und FT eine sehr geringe Streuung auf. Die DT hingegen weist eine größere Streuung auf, die jedoch durch das Blähverhalten zu erklären ist. Im Vergleich zu den Literaturwerten ist die SST deutlich geringer, die DT geringfügig niedriger und HT und FT passen gut mit den publizierten Werten überein.

Die Werte der fünf Proben gesiebter Weizenstrohpellets der Charge 2 (WP Ch2 gesiebt) sind bis auf wenige Grade Unterschied fast mit denen der ungesiebten Proben identisch (ausgenommen FT).

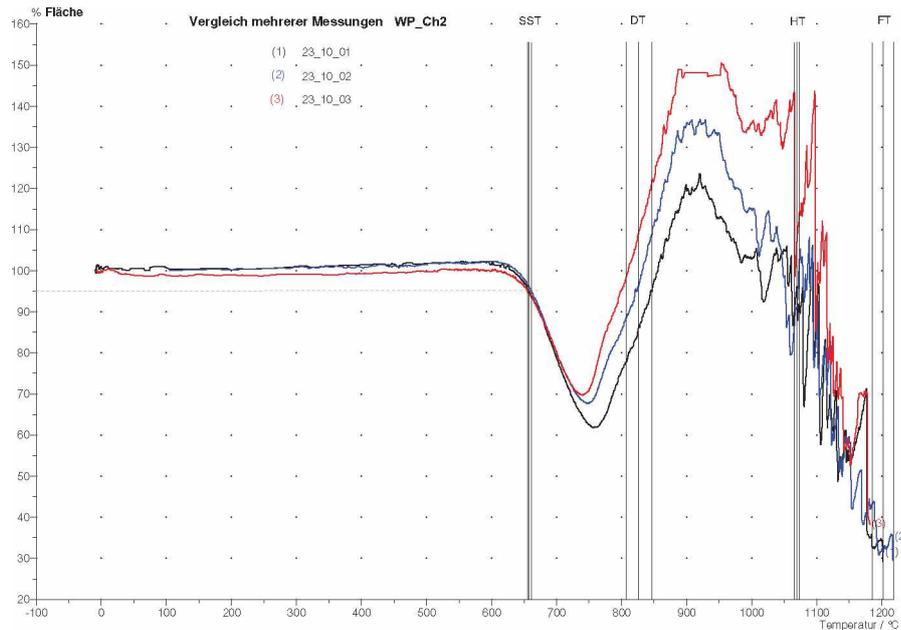


Abbildung 7.7.: Änderung der Fläche während der Analyse des Schmelzverhaltens von Weizenstrohpellets-Asche Ch2 für drei ausgewertete Proben mit Darstellung der einzelnen charakteristischen Temperaturen SST, DT, HT und FT.

Aufgrund des stark ausgeprägten Blähverhaltens und dadurch offensichtlich falscher Werte, werden zwei Einzelwerte der DT nicht berücksichtigt (siehe dazu Diagramm im Anhang). Die Siebung bei 4 mm erfolgt, um den Feinanteil abzusecheiden, der durch den Rost fällt und zu einer Blockade des Rostmechanismus führen kann. Für den Vergleich mit den Literaturwerten gilt dasselbe wie für WP Ch2.

Bei den drei Proben der Weizenstrohpellets Charge 3 (Abbildung 7.8) liegen die SST mit 667 - 680 °C sehr eng beisammen und etwas über den Werten von Charge 2, jedoch wiederum deutlich unter den Literaturwerten (vgl. Tabelle 7.5). Bei den Erweichungstemperatur DT wird, wie in Abbildung 7.8 an der gestrichelten Linie zu sehen ist, ein Einzelwert aufgrund falscher Programmauswertung nicht berücksichtigt. Die Temperaturen von DT, HT und FT liegen etwas über denen der Charge 2, aber im Bereich der Literaturwerte. Die vier gesiebten Proben liegen teilweise deutlich über denen der ungesiebten, was nicht plausibel erklärbar ist.

Abweichungen zwischen Charge 2 und 3 sind höchstwahrscheinlich mit den unterschiedlichen Erntejahren bzw. Anbauorten und somit anderer Aschezusammensetzung zu erklären.

Die Einzelwerte von Miscanthus Häckselgut, Pelletes und gesiebten Pellets weisen jeweils eine sehr geringe Streuung auf. Die Schrumpfungstemperaturen (SST) liegen wiederum deutlich unter den Literaturwerten, DT, HT und FT liegen im Bereich der publizierten Werte (vgl. Tabelle 7.5). In Abbildung 7.9 sind die Änderungen der Flächen von drei Miscanthuspellets-Einzelproben mit den eingezeichneten charakteristischen Temperaturen zu sehen.

Die Proben der Holzpellets Schweighofer zeigen für SST und DT Werte von 1124 - 1154 °C bzw. 1424 - 1475 °C, welche gut mit den Literaturwerten übereinstimmen. Es zeigt sich kein Blähverhalten wie bei den Stroh- und Miscanthusproben, jedoch kann das Auswertesystem für HT und FT keine Werte ermitteln. Es wird vermutet, dass durch das rasche Zusammenfallen des Probenkörpers das Auswertesystem die Kriterien für Halbkugel- und Fließtemperatur nicht erkennen kann.

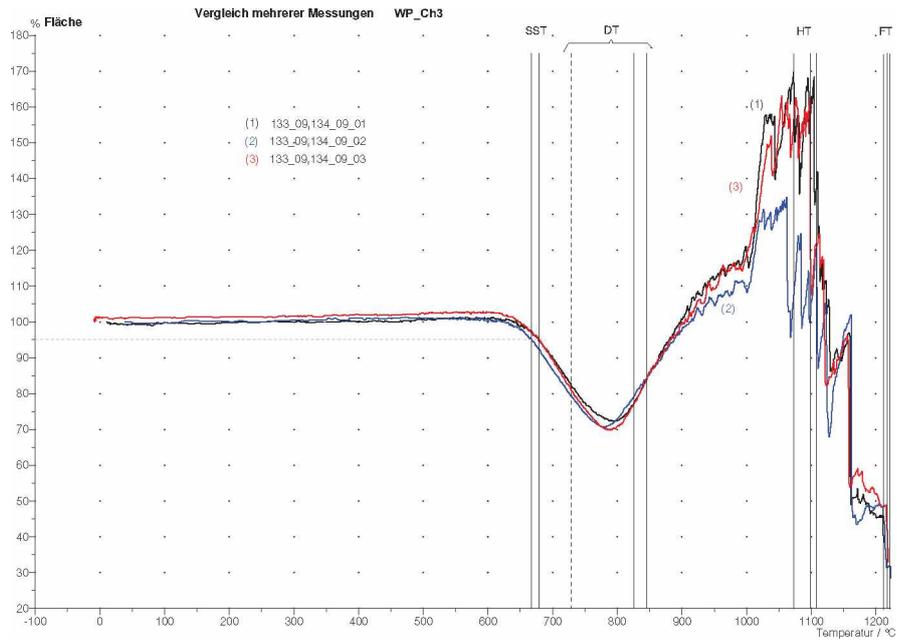


Abbildung 7.8.: Änderung der Fläche während des Schmelzverhaltens von Weizenstrohpellets-Asche Ch3 für drei ausgewertete Proben mit Darstellung der einzelnen charakteristischen Temperaturen SST, DT, HT und FT.

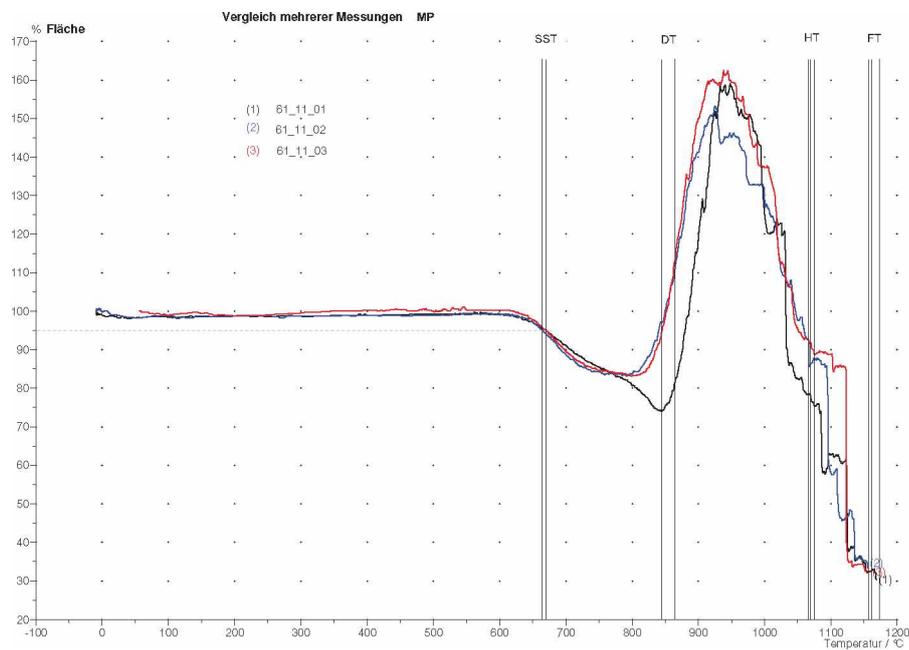


Abbildung 7.9.: Änderung der Fläche während des Schmelzverhaltens von Miscanthuspellets-Asche für drei ausgewertete Proben mit Darstellung der einzelnen charakteristischen Temperaturen SST, DT, HT und FT.

7.4. Bunte Dreiecke für Holzpellets, Weizenstroh und Miscanthus

Da in der recherchierten Literatur keine BUNTE-Dreiecke gefunden werden konnten, werden für die im Zuge dieser Arbeit verwendeten Brennstoffe Weizenstroh, Miscanthus und Holzpellets ebendiese erstellt. Die für die Berechnung verwendeten Elementarzusammensetzungen stammen dabei aus den Mittelwerten der hier untersuchten Brennstoffe.

In Tabelle 7.6 sind die für die Berechnung verwendeten Elementgehalte sowie die maximalen Kohlenstoffdioxidanteils $CO_{2,max}^a$ im Abgas dargestellt.

Tabelle 7.6.: Verwendete Elementarzusammensetzung für die Verbrennungsrechnung der Brennstoffe Weizenstroh-, Miscanthus- bzw. Holzpellets und theoretisch erreichbarer maximaler Kohlenstoffdioxidwert $CO_{2,max}^a$ im Abgas bei stöchiometrischer Verbrennung für die Konstruktion der BUNTE-Dreiecke.

Parameter	[Einheit]	Weizenstroh	Miscanthus	Holzpellets
C	[Gew.-% TM]	45,2	48,0	50,3
H	[Gew.-% TM]	5,6	5,35	5,9
O	[Gew.-% TM]	40,0	44,0	43,2
S	[Gew.-% TM]	0,14	0,05	0,02
N	[Gew.-% TM]	0,33	0,20	0,06
A	[Gew.-% TM]	8,73	2,40	0,52
$CO_{2,max}^a$	[Vol.-%]	20,3	21,1	20,5

Zum theoretisch erreichbaren maximaler Kohlenstoffdioxidwert $CO_{2,max}^a$ im Abgas ist zu sagen, dass der diesbezüglich höchste mögliche Wert für reinen Kohlenstoff von 20,9 Vol.-% von biogenen Brennstoffen übertroffen werden kann (Miscanthus in Tabelle 7.6). Biomasse hat zwar einen im Vergleich zu reinem Kohlenstoff bescheidenen Kohlenstoffgehalt, doch einen recht hohen Sauerstoffgehalt. Deshalb muss dem Verbrennungsprozess weniger Luft zugeführt werden, womit sich auch der Anteil des zugeführten Stickstoffs reduziert und sich dadurch der Anteil des Kohlenstoffdioxids $CO_{2,max}^a$ im Abgas erhöht. Theoretisch könnte sogar ein Wert von 100 Vol.-% erreicht werden.

Wie in Abbildung 7.10 zu sehen ist, liegen alle drei betrachteten Brennstoffe im Bereich des reinen Kohlenstoffs, wobei Weizenstroh und Holzpellets zwischen Braunkohle und reinem Kohlenstoff angesiedelt sind. Miscanthus liegt knapp über der Geraden von reinem Kohlenstoff.

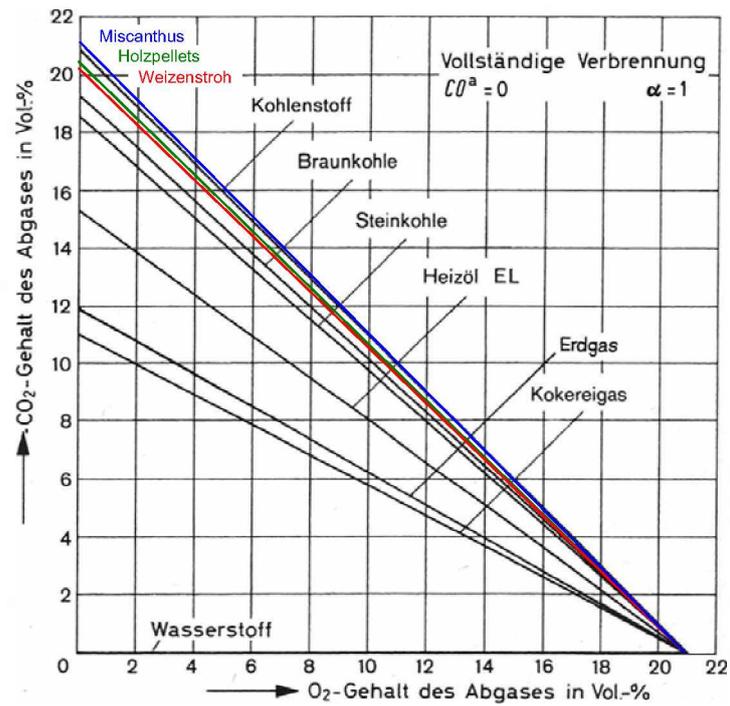


Abbildung 7.10.: BUNTE-Dreieck [76] erweitert um die Brennstoffe Holzpellets, Weizenstroh und Miscanthus. Dabei wird der gesamte Kohlenstoff vergast ($\alpha = 1$), d.h. kein unverbrannter ist mehr übrig und im Abgas befindet sich auch kein Kohlenstoffmonoxid CO.

8. Adaptierung eines herkömmlichen Pelletsofens für landwirtschaftliche Reststoffpellets

Als Ausgangspunkt dient eine herkömmliche handelsübliche Pelletsanlage der Type PK-V30 für Holzpellets der Firma PERHOFER GMBH mit einer Nennwärmeleistung von 30 kW. Der Brenner ist mit einem Kipprost ausgestattet, der die angefallene Asche vor jedem neuen Start durch eine Kippbewegung in die unterhalb liegende Aschelade des Brenners befördert. Die Abgase gelangen von der Brennkammer über einen horizontalen Kanal, an dessen Ende die Sekundärluft zugeführt wird, in die Nachbrennkammer unter dem Wärmeübertrager (siehe Abbildung 8.1). Ansonsten entspricht die Anlagenkonfiguration der in Abschnitt 6.1 beschriebenen Anordnung.

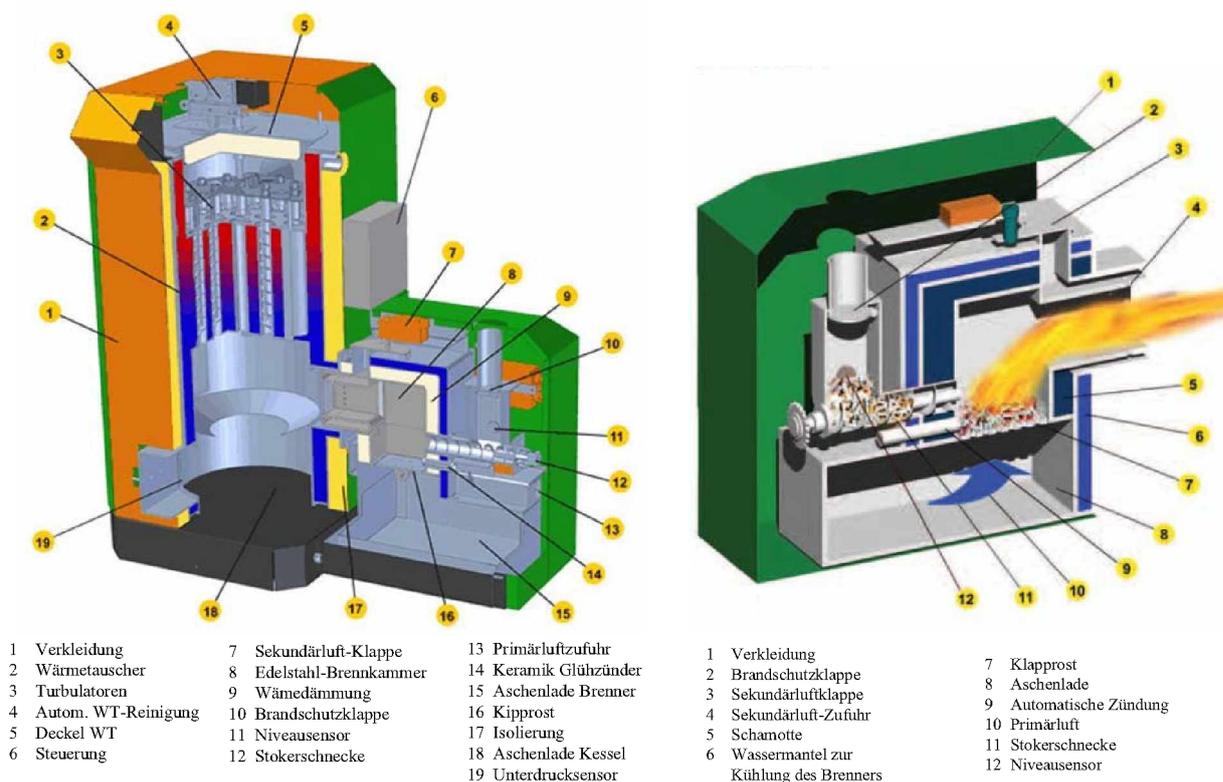


Abbildung 8.1.: Schnitt durch PK-V30 mit Brenner (links) und Brenner im Detail (rechts) [214].

8.1. Versuche mit Kipprost und Entwicklung eines Vorschubrostes

Die in mehreren Versuchen durchgeführte Inbetriebnahme der Kesselanlage erfolgt mit dem Brennstoff Holzpellets. Im Zuge dessen werden die Regelungsparameter eingestellt, sowie die Messtechnik in Betrieb genommen.

Die erste Adaption, die durchgeführt wird, ist der Einbau einer hitzebeständigen Quarzglasscheibe (Größe von 150 x 200 mm, Stärke 4 mm, Qualität Rob*5), um in der Nachbrennkammer und im horizontal liegenden Kanal das Flammenbild beurteilen zu können. Eine auf der Innenseite angebrachte und von außen mit einem Hebel zu betätigende Klappe soll die Scheibe vor allzu rascher Verschmutzung schützen.

8.1.1. Betrieb mit Holzpellets

Zur Verifizierung der Emissionswerte der Typenprüfung werden Emissionsmessungen beim Betrieb mit Holzpellets bei Volllast, Teillast und Schwachlast durchgeführt. Abbildung 8.2 zeigt ein Messdiagramm von CO, NO, OGC, CO₂ und O₂ für die Verbrennung von Holzpellets im Volllastbetrieb. Die Mittelwerte sind strichliert und die dazugehörigen Grenzwerte strichpunktiiert eingezeichnet.

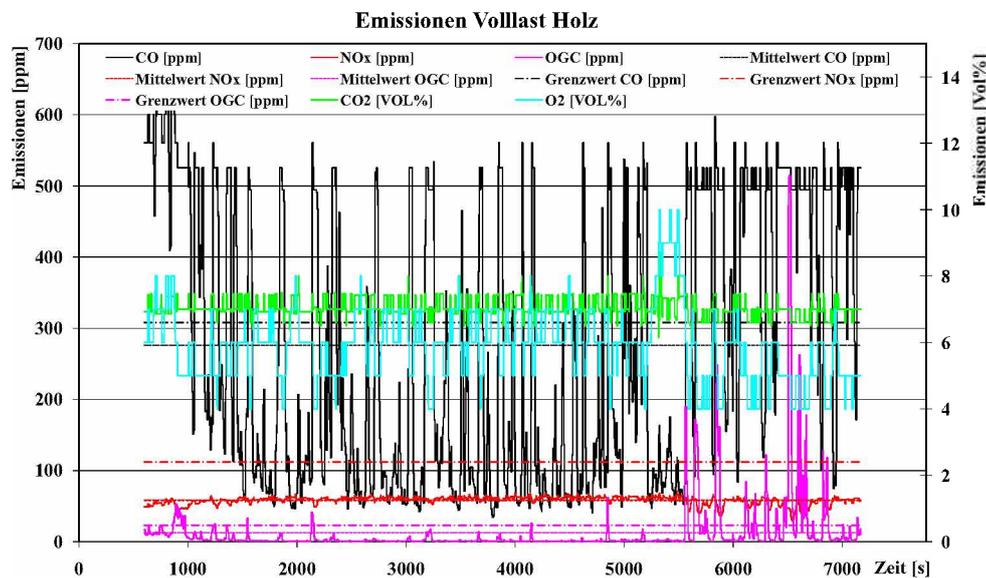


Abbildung 8.2.: Emissionsmessung von CO, NO_x, OGC, CO₂ und O₂ bei der Verbrennung von Holzpellets im Volllastbetrieb.

Die Werte der Typenprüfung können vor allem für CO nicht bestätigt werden. Wie in Tabelle 8.1 zu sehen ist, ist vor allem der Wert für Kohlenstoffmonoxid CO gegenüber dem Wert bei der Typenprüfung weit überhöht und erreicht beinahe den Grenzwert. Auch der Emissionswert für den organischen Gesamtkohlenstoff ist gegenüber der Typenprüfung sehr hoch. Eine Erklärung dafür sind die noch nicht optimal eingestellten Regelungsparameter der Sekundäuftklappe, die auf den Restsauerstoffwert im Abgas reagieren. Dadurch kommt es zu einer verzögerten Reaktion. Der dadurch zeitweise verursachte Sauerstoffmangel bzw. durch eine Abkühlung bei zu großem Luftüberschuss lässt die in Abbildung 8.2 zu abgebildeten Spitzen entstehen.

Der Emissionwert von Stickstoffmonoxid ist dagegen etwas niedriger als der Wert bei der Typenprüfung. Da hier kaum thermisch bedingtes NO gebildet wird, ist dieser Wert hauptsächlich vom Stickstoffgehalt des Brennstoffs abhängig.

Emissionsmessungen im Schwachlastbetrieb (ein Drittel der Nennleistung) ergeben für Kohlenstoffmonoxid eine geringere Konzentration von 211 ppm im Vergleich zum Wert von 310 ppm bei der Typenprüfung (Grenzwert 462 ppm). Für Stickstoffoxid NO_x wird eine Konzentration von 64 ppm im Vergleich zur Typenprüfung mit 59 ppm gemessen (Grenzwert von 112 ppm).

Tabelle 8.1.: Vergleich der Emissionswerte für die Verbrennung von Holzpellets bei Nennlast mit jenen der Typenprüfung und den Grenzwerten.

Komponente	Messwert	Typenprüfung [215]	Grenzwert [111]
CO	276	34	308
NO _x	58	68	112
OGC	13	1	23

mit $H_u = 17,4 \text{ MJ/kg}$, $v_a = 11,3 \text{ m}^3/\text{kg}$, bei 13 % O₂

8.1.2. Verbrennung von Weizenstrohpellets mit dem Standardbrenner (Kipprost)

In weiterer Folge wird der Brennstoff von Holzpellets auf Weizenstrohpellets umgestellt und bei mehreren Versuchen die Parameter Verbrennungsluftmenge, Primärluftmenge, Sekundärluftmenge, zugeführte Brennstoffmenge und Unterdruck im Kessel variiert, um eine optimale Verbrennung zu gewährleisten. Bei diesen Versuchen stellt sich heraus, dass die bei Weizenpellets anfallenden Aschenmengen mittels herkömmlichem Kipprost, welcher für Holzpellets gut geeignet ist, nicht ausgetragen werden können, es zu einer massiven Verstopfung des Brenners und in der Folge zum Erliegen des Brennerbetriebes kommt. Als Gründe sind einerseits die großen Aschemengen (ca. 10 % der Trockensubstanz) und andererseits Verschlackungserscheinungen aufgrund des tiefen Ascheschmelzpunktes (Sinterpunkt um etwa 700 °C) zu nennen. Abbildung 8.3 zeigt den mit Asche und verschlackter Asche verstopften, horizontal angeordneten Teil des Brenners, wo die Sekundärluftzufuhr erfolgt und die Verbrennungsgase in den Kesselteil gelangen bzw. die Verbrennungsrückstände mit verschlackten Bestandteilen und teilverbranntem Brennstoff.



Abbildung 8.3.: Mit Asche und verschlackter Asche verstopfter Brenner (links), Verbrennungsrückstand mit verschlackten Bestandteilen und teilverbranntem Brennstoff (rechts).

8.1.3. Verbrennung von Weizenstrohpellets mit einem Kessel der Fa. Verner

In der Folge wird das mit einem mechanischen Asche- bzw. Schlackeaustrag ausgestattete tschechische Heizkesselprodukt Modell A251G (25 kW) der Fa. Verner zu Versuchen herangezogen, um anhand dieser Anlage die Vorgänge bei der Verbrennung von Weizenstrohpellets durch Öffnen der

Fronttüre genau beobachten zu können. Die Beschreibung dieses Heizkessels ist in Unterabschnitt 5.1.9 nachzulesen. Beim Pelletskessels PK-V30 der Fa. Perhofer ist es aufgrund der Konstruktion nicht möglich, direkt auf das tiefer liegende Bett zu blicken, lediglich das Flammenbild kann durch die eingebaute Glasscheibe beobachtet werden.

Die in mehreren Versuchen gewonnene Erfahrung soll in die Weiterentwicklung des Pelletskessels PK-V30 einfließen. Die Abbildung 8.4 zeigt die Verbrennung von Weizenpellets am Rost des Heizkessels der Firma Verner.



Abbildung 8.4.: Verbrennung von Weizenpellets am Rost des Heizkessels der Firma Verner während der Betriebsphase (links) und nach dem Abstellen (rechts). In beiden Bildern ist deutlich die oberflächliche Verkrustung zu sehen.

Dabei ist deutlich die Bildung einer Kruste durch oberflächlich anschmelzende Weizenstrophpellets zu beobachten. Diese Kruste wird durch die Rostbewegung weiter bewegt wobei die über den Rost hinaushängenden Krustenteile abbrechen und in die darunter liegende Ascherinne fallen, wo diese von einer Schnecke in den Aschebehälter gefördert und gleichzeitig zerkleinert werden. Durch Verändern verschiedenster Einstellungen wie Rostgeschwindigkeit, Rostintervall, Brennstoffwärmeleistung, Stokerintervall der Brennstoffchargierung oder Luftmengen wird versucht die Auswirkungen auf die Verbrennung besser kennen zu lernen und die Vorgänge zu verstehen. Durch Änderungen bei der Verteilung der Primär- als auch Sekundärluftmengen als auch Änderungen der Luftführung selbst durch beispielsweise gezieltes Schließen von Zuluftöffnungen werden Einflüsse auf die Krustenbildung beobachtet. Auf konkrete Ergebnisse soll hier jedoch nicht eingegangen werden.

Insgesamt ist der Ausbrand des Brennstoffs als zufriedenstellend zu beurteilen und auch der Weitertransport des Brennstoffbettes funktioniert problemlos, da es bei den Versuchen nie zu Agglomerationen oder Blockaden kommt. Der Ausbrand der Abgase kann jedoch nicht als optimal klassifiziert werden, da sich die einzigen Sekundärluftöffnungen nur am Beginn des Rostes unmittelbar über dem Brennstoffbett befinden. Vergasungsprodukte aus der Mitte bzw. vom Ende des Brennstoffbettes werden nicht mehr gezielt mit Sekundärluft beaufschlagt.

8.1.4. Erste Version eines Vorschubrostes für die Verbrennung von Weizenstrophpellets

Um die Asche vom Rost wegfördern zu können, wird ein Vorschubrost konstruiert. Dieser besteht aus fünf starren Roststäben mit einem auf die Kante gestellten quadratischen Profil (rautenfö-

mig), um ein Haftenbleiben von Brennstoff zu verringern. Zwischen den festen Roststäben befinden sich vier bewegliche Roststäbe mit einer sägezahnartigen Oberfläche, die durch eine exzentrische Lagerung eine Kreisbahn beschreiben, um das Brennstoffbett zu heben und weiter vorne abzusetzen (Abbildung 8.5).

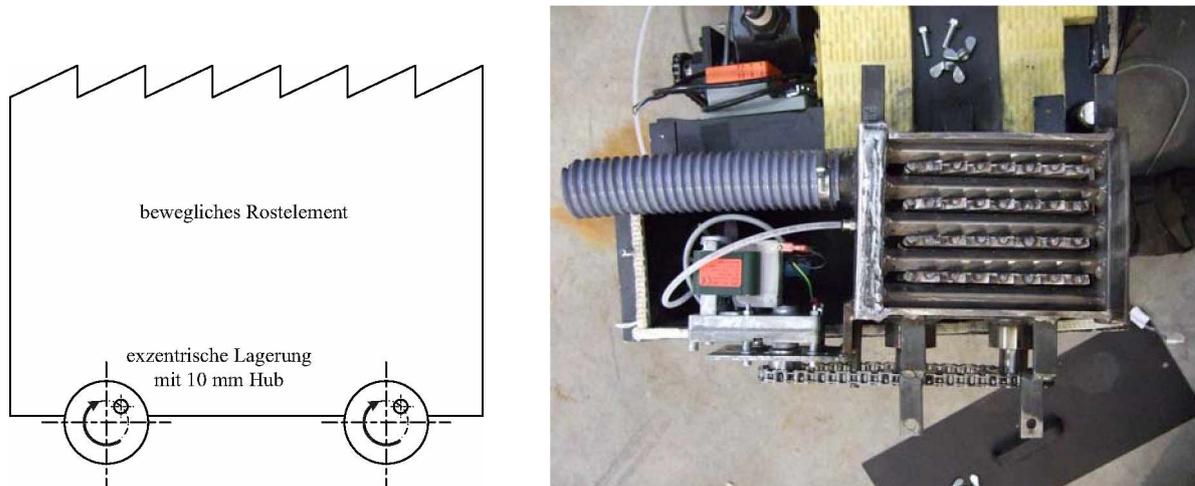


Abbildung 8.5.: Schema eines beweglichen Roststabes mit exzentrischer Lagerung der ersten Version des Vorschubrostes (links) und Ansicht von oben mit Primärluftzufuhr und Antriebseinheit (rechts).

Diese festen Roststäbe sind innen hohl und werden von der Primärluft durchströmt, die an 13 kleinen Bohrungen je Roststab (2 mm Durchmesser, insgesamt 49 Bohrungen) austreten kann. Damit wird eine bessere Verteilung der Primärluft und gleichzeitig eine Kühlung der Roststäbe von innen gewährleistet. Die Aufteilung der Primärluft in die Roststäbe erfolgt durch eine Verteilkammer, an die die Roststäbe unmittelbar anschließen. Die gesamte Rostfläche hat eine Länge von 21 cm und eine Breite von 14,5 cm und die einer hohen thermischen Belastung ausgesetzten Teile sind aus dem Material DIN/EN 1.4841 gefertigt.

Der Antrieb der beweglichen Roststäbe erfolgt durch einen Motor, der mit einer seitlich angeordneten Kette mit den Achsen des Rostes verbunden ist. Die gesamte Rosteinheit ist derart in die Aschelade des Brenners integriert, dass an Stelle des Kipprostes der neue Vorschubrost Platz findet. Die Asche kann durch eine Ausnehmung zwischen Rost und Brennerkammer in die Aschelade abgeworfen werden (siehe Abbildung 8.6 links).

Schon beim ersten Versuch zeigt sich, dass verschlackte Ascheteile an der Abwurfausnehmung hängen bleiben und der Abwurf der Asche vom Rost in den Aschebehälter dadurch nicht möglich ist. Als nach Kürzung des Rostes an der Vorderseite hier noch immer Probleme auftreten, wird die gegenüberliegende Kante im Brennraum versetzt, sodass ein freier Spalt von 24 mm entsteht. Auch trotz Veränderung der Verbrennungsparameter – vor allem Senkung der Temperatur am Bett durch Verringerung der Primärluftmenge – kann kein zufrieden stellendes Ergebnis erzielt werden: Die Asche wird nicht in den Aschebehälter abgeworfen, da es zwischen der Abwurfkante des Rostes und der gegenüberliegenden Wand weiterhin zu Brückenbildungen kommt. Außerdem verursachen die hohen Temperaturen an der im Inneren situierten Motoreinheit immer wieder Ausfälle.

Trotz dieser Schwierigkeiten werden weitere Versuche durchgeführt und auch die Temperaturen am Rost und im Brennstoffbett mit eingebauten Thermoelementen gemessen. Wie in Abbildung 8.6 (rechts) zu sehen ist, wird die Antriebseinheit, besonders in der Startphase, auch durch Teerlagerungen stark in Mitleidenschaft gezogen.

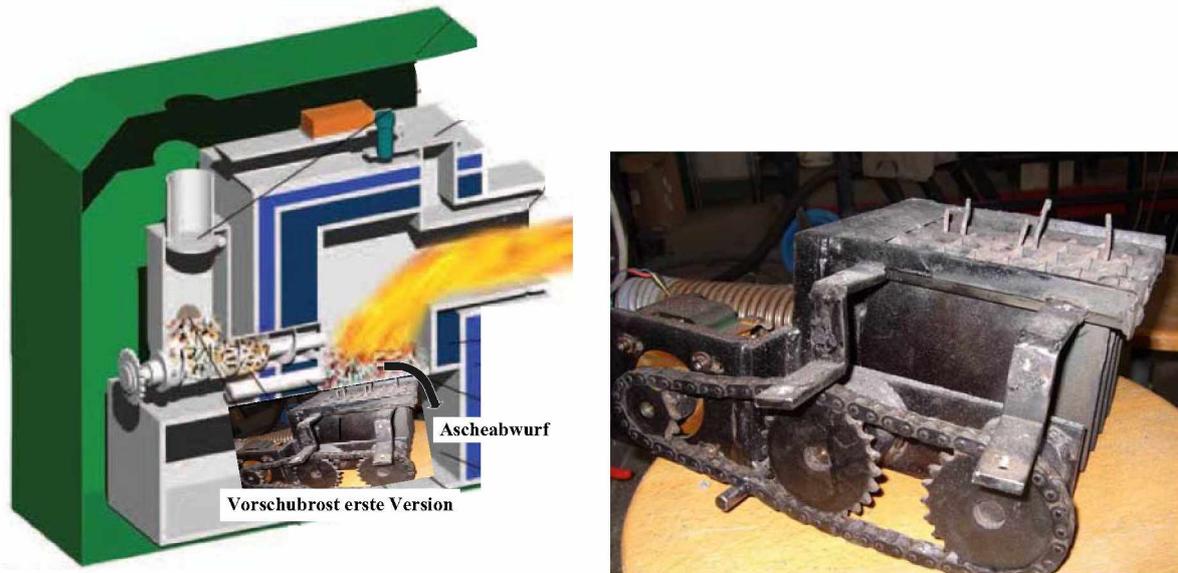


Abbildung 8.6.: Erste Version des Vorschubrostes mit Fotomontage in die Schnittdarstellung des Herstellers (links) [214] und Vorschubrost nach Durchführung der Versuchsreihen mit integrierten Thermoelementen zur Messung der Temperatur im Brennstoffbett (rechts).

8.1.5. Zweite, längere Version des Vorschubrostes

Aufgrund der gewonnenen Erfahrungen wird eine zweite Version, ein langer Vorschubrost mit demselben mechanischen Prinzip und wiederum fünf festen und vier beweglichen Roststäben entwickelt (Abbildung 8.7). Dabei wird der horizontal liegende Verbindungsteil zwischen Brennraum und Kessel nach unten erweitert, sodass die Rostfläche von der Brennkammer bis in den Kesselteil reicht und die Rostasche in den Flugaschenbehälter ausgetragen wird. Damit wird die Rostlänge mit 390 mm beinahe verdreifacht, um die Verweilzeit erhöhen zu können und damit einen vollständigeren Ausbrand zu erreichen. Außerdem kann jetzt das Brennstoffbett direkt von der im Kesselteil eingebauten Glasscheibe beobachtet werden.

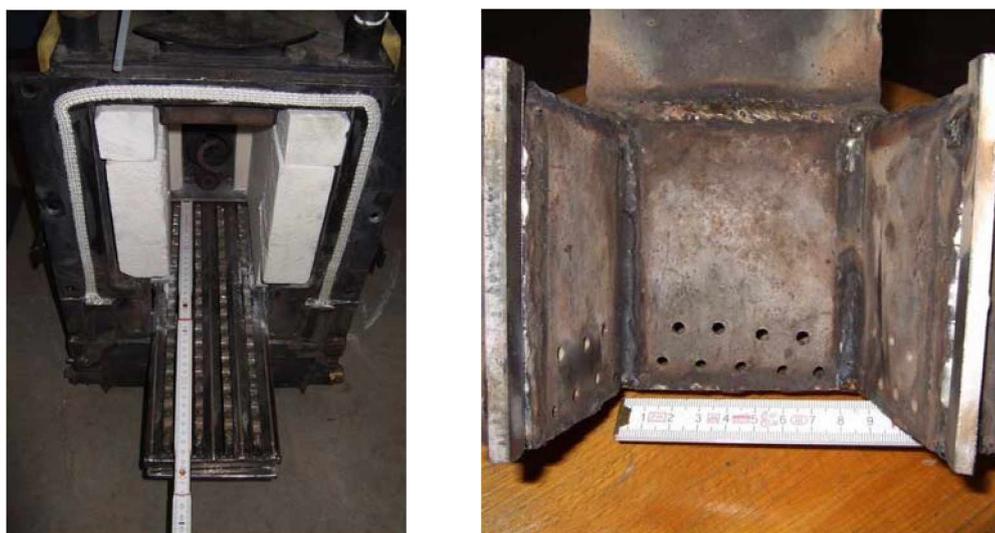


Abbildung 8.7.: Zweite Version mit langem Vorschubrostes (links) und Abdeckteil für verlängerten Rost mit Sekundärluftzufuhr (rechts).

Die Form und Profilgröße der beweglichen und festen Roststäbe bleibt unverändert und die Primärluft tritt durch insgesamt 128 Löchern aus dem Inneren der festen Roststäbe aus. Die Antriebseinheit ist wiederum im Inneren des Brenners unter dem Rost angeordnet wobei abermals ein Kettenantrieb die Kräfte überträgt. Um dem verlängerten Rost oberhalb einen definierten Brennraum zu geben wird ein Abdeckteil darüber gesetzt. Dieser fungiert zugleich als Sekundärluftkanal für Zufuhr, Vorwärmung und gezielter Luftzufuhr über Löcher im letzten Teil des Rostes (Abbildung 8.7, rechts). Die Sekundärluftklappe sitzt an der Außenseite des Brenners.

Für die Temperaturmessung werden in den festen Roststäben von unterhalb 5 Thermolemente mit verschiedenen Höhen eingebaut (wie bei der ersten Version in Abbildung 8.6 rechts).

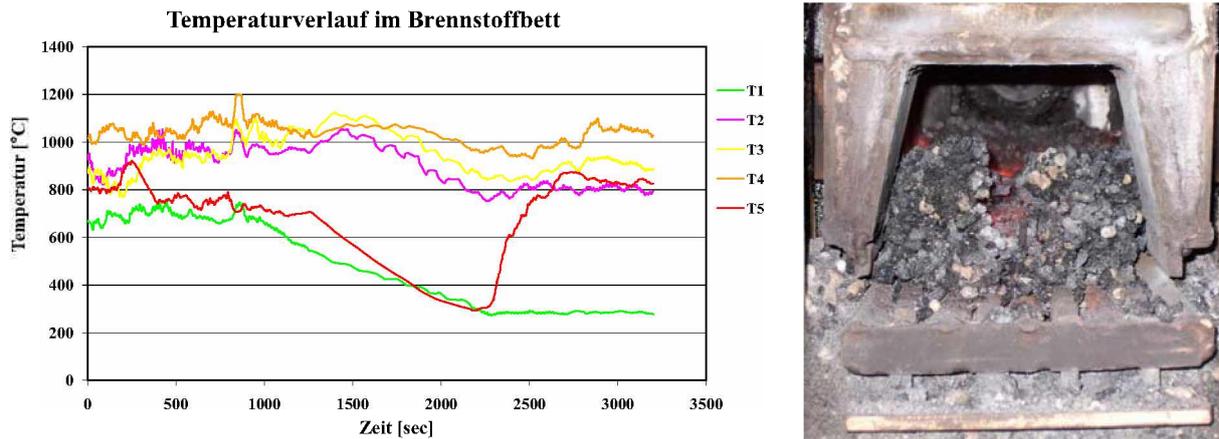


Abbildung 8.8.: Beispiel einer Temperaturmessung über bzw. im Bett. Thermoelement T1 ist bei der Brennstoffzufuhr, T5 im Bereich der Sekundärluftzufuhr am Rostende, T1 ist 1 cm und T2 bis T5 3 cm über dem Rost (links); Versinterungen und Anbackungen am letzten Teil des Rostes, Thermoelement T5 ist in der Mitte erkennbar, darüber der Aufbau für die Sekundärluftzuführung (rechts).

Da Thermoelement T1 am Beginn des Rostes in der Trockungszone und tiefer situiert ist, wird hier am Beginn der Messung die niedrigste Temperatur gemessen. Der deutliche Abfall im weiteren Verlauf ist auf Anhäufung von Brennstoff aufgrund von Brennstoffanbackungen zurückzuführen. Dasselbe gilt auch für das Thermoelement T5. Nach Entfernung der Anbackungen ist hier wieder ein deutlicher Anstieg der Temperatur zu beobachten. Bei den restlichen Thermoelementen sind Temperaturen um 1000 °C und sogar deutlich darüber zu beobachten, obwohl durch Reduzieren der Primärluftmenge versucht wird dies zu verhindern. Oberhalb von 1000 °C kommt es zu glasähnlichen Verschlackungserscheinungen und oberflächliches Sinter kann aufgrund des niedrigen Sintertemperatur von ca. 700 °C ohnehin kaum verhindert werden. Oberflächlich versinteres Bettmaterial lässt sich leicht zerbröseln, wogegen verschlacktes Material sehr hart ist und die mechanische Austragung blockieren kann.

Da diese Anordnung der Thermoelemente jedoch ein Hindernis für die Fortbewegung des Brennstoffbettes darstellt, werden dann die Thermoelemente durch das Rohr des Glühzünders eingeführt, sodass die Bettbewegungsrichtung der Axialrichtung der Thermoelemente entspricht.

In den Versuchsreihen wird der Vortrieb des Rostes soweit variiert, dass für die gewählte Brennstoffwärmeleistung die Bettstärke so gering wie möglich ist und ein möglichst vollständiger Ausbrand gewährleistet wird. Die Ermittlung des Restkohlenstoffes im Labor zeigen Werte um 10 %, was bezogen auf die Brennstoffzusammensetzung 1,1 % ergibt. Dabei wird eine Kesselausgangsleistung von 14 kW erreicht.

Bei einer durchgeführten Emissionsmessung bei der Verbrennung von Weizenstrophpellets der Charge 1 zeigt sich, dass die Grenzwerte für den organischen Gesamtkohlenstoff (23 ppm) und Koh-

lenstoffmonoxid (616 ppm) mit 11 ppm und 410 ppm eingehalten werden können. Lediglich die Stickoxide liegen mit einem Wert von 250 ppm leicht über dem Grenzwert von 225 ppm, was mit dem deutlich höheren Brennstoffstickstoff im Vergleich zu Holzbrennstoffen erklärbar ist (Abbildung 8.9).

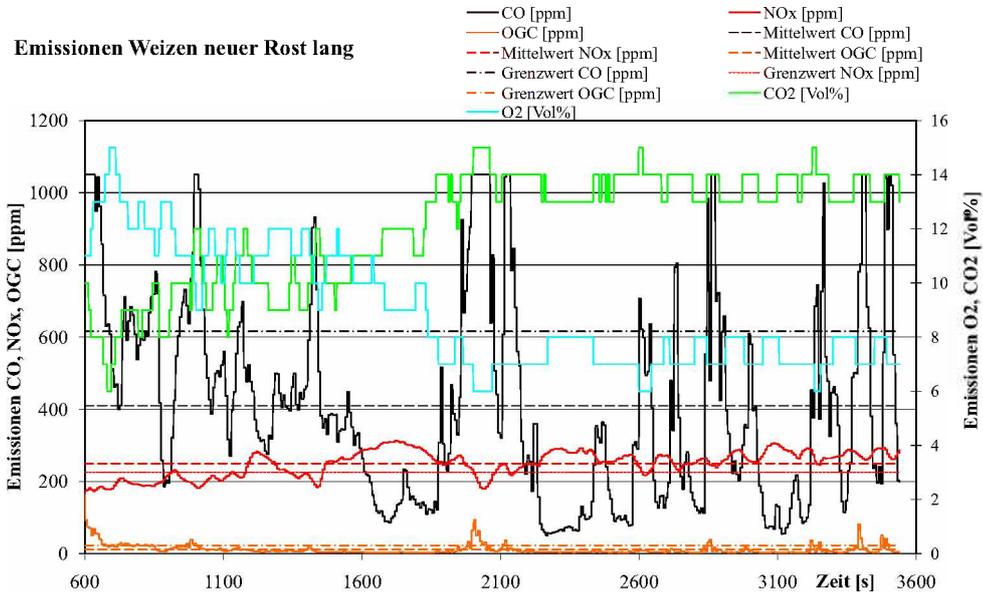


Abbildung 8.9.: Emissionsmessung am langen Vorschubrost mit Weizenstrohpellets der Charge 1 (mit $H_u = 15,6 \text{ MJ/kg}$, $v_a = 10,1 \text{ m}^3/\text{kg}$, bei 13 % O_2).

Zusammengefasst liegen die Probleme bei dieser Version bei den Anfälligkeiten des Rostmechanismus aufgrund der Situierung im Inneren, bei Anbackungen von Brennstoff mit den Wänden des Feuerraums (Keramikfasermaterial), Schlackeanlagerungen und Anbackungen an den Roststäben. Aufgrund der noch fehlenden Ascheaustragung aus dem Inneren des Kessels kann noch kein Langzeitversuch durchgeführt werden; manuelles Entfernen würde durch das Öffnen des Systems zu massiver Falschlufzufuhr und daher zur Verfälschung der Messungen führen.

8.1.6. Dritte Version des Vorschubrostes mit außen liegendem Motor und Schneckengetriebe

Bei dieser dritten Version des Vorschubrostes wird wiederum versucht, die bei der zweiten Version aufgetretenen Schwachstelle zu verbessern und neue Ideen umzusetzen.

Die Rostfläche hat nun eine Gesamtlänge von 295 mm und eine Breite von 135 mm. Durch den Einbau einer schrägen Platte, welche ein dauerhaftes Ablagern von Brennstoff im hinteren Eckbereich verhindern soll, verkürzt sich die effektive Rostlänge allerdings um 50 mm auf 245 mm. Die festen Roststäbe sind nicht mehr auf die Kante gestellt, sondern eine flache Seite ist an der Oberseite in horizontaler Lage angeordnet (Abbildung 8.10, links). Damit soll die Menge an Abriebmaterial des Brennstoffs und Asche, welche zwischen festen und bewegliche Roststäben durchfällt und unter dem Rost zu liegen kommt, verringert werden. Zu große Mengen solcher Ablagerungen führen nämlich zum Blockieren des Rostmechanismus.

Der Motor für den Rostantrieb sitzt diesmal nicht mehr im Inneren des Brenners, sondern an der Brennerrückwand. Über eine Antriebswelle und ein Schneckengetriebe wird das Drehmoment des Motors auf die beweglichen Roststäbe übertragen. Diese sind mit einem Schlitten fest verbunden, der über eine exzentrische Lagerung, wie schon bei der ersten und zweiten Version,

eine kreisende Bewegung vollzieht. In Versuchen zeigt sich, dass eine zur ersten und zweiten Version andere Anordnung des sägezahnartigen Profils der beweglichen Roststäbe, also mit der schrägen Seite nach vorne, einen besseren Vorwärtstransport des Brennstoffbettes ermöglicht.

Durch den Einbau eines Distanzrahmens (Abbildung 8.10, rechts) mit der Stärke von 100 mm wird erreicht, dass der Rost nicht mehr so weit in den Kessel bzw. die Nachverbrennungszone unter dem Wärmeübertrager hineinreicht.

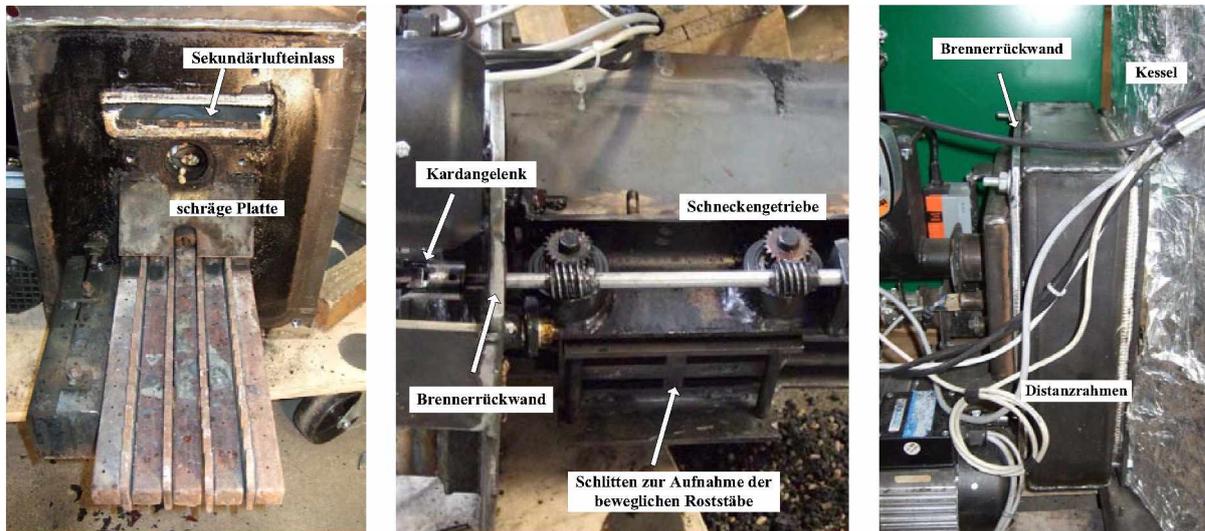


Abbildung 8.10.: Dritte Version des Vorschubrostes mit außenliegendem Motor (links), Wellenantrieb mit Schneckengetriebe (mitte) und Distanzrahmen zum Kessel (rechts).

Die starr ausgeführte Antriebswelle beginnt bei steigender thermischer Belasung an der Bohrung der Brennrückwand stark zu quietschen und bricht schließlich an der Kupplung zum Motor (Federstift) ab. Um diese durch starke Wärmedehnungen verursachte Defekte auszuschließen wird in die Welle vor Eintritt in den Brenner eine Kardangelenke eingebaut.

Die Sekundärluftklappe sitzt an der Brennrückwand, von wo aus die Sekundärluft über den in Abbildung 8.10 (links) zu sehende Sekundärlufteinlass in den über dem Brennstoffbett liegenden Sekundärluftkanal geleitet wird. Der Austritt der Sekundärluft erfolgt an der Stirnseite über zwei Reihen von Sekundärluftdüsen mit einem Durchmesser von 3 mm. Aufgrund der großen Luftgeschwindigkeit an den Sekundärluftdüsen werden zwei zusätzliche Lochreihen angeordnet und die Durchmesser von 3 auf 4 mm bzw. M5 vergrößert (Abbildung 8.11 mitte).

Durch die Gewinde ist es möglich diese Löcher mittels Wurmsschrauben wieder zu verschließen und somit verschiedene Luftkonzepte zu prüfen. Aufgrund der weiterhin zu hohen Luftgeschwindigkeit, deren Beurteilung durch die sich um den Luftstrahl (Freistrah) bildende Reaktionszone möglich ist, wird seitlich jeweils ein Hohlprofil mit 10 weiteren Löchern für die Sekundärluftzufuhr angebracht. Trotz dieser Maßnahme wird eine CO-Konzentration von über 3000 ppm erreicht. Mit weiteren Lochreihen im Stirnbereich als Tertiärluft (Abbildung 8.11 rechts) werden die CO-Konzentrationen in einen Bereich um 1000 ppm gesenkt. Erst ein Auskleiden der Nachverbrennungszone unter dem Wärmeübertrager mit Keramikfasermatten erhöht in diesem Bereich die Temperatur und senkt auf diesem Wege die CO-Konzentrationen in einen Bereich um 50 ppm.

Da der Ascheausbrand sehr unvollständig ist, wird die Anzahl der Primärluftlöcher in den festen Roststäben von 43 Stück auf 117 Stück erhöht (Durchmesser von je 2 mm). Eine ausschließliche Erhöhung der Primärluftgeschwindigkeit würde zu Verschmelzungen um die Löcher führen.

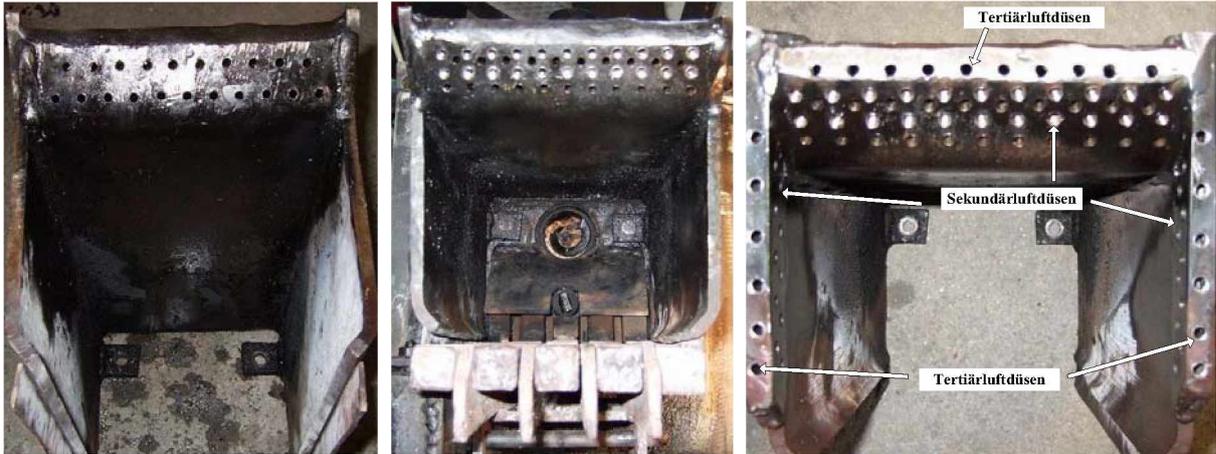


Abbildung 8.11.: Entwicklung der Sekundärluftzufuhr: 2 Reihen Sekundärluftdüsen oben (links), 4 Reihen Sekundärluftdüsen oben (mitte), Sekundärluft- und Tertiärluftdüsen oben und seitlich (rechts).

8.1.7. Vierte Version des Vorschubrostes

Aufgrund der ungünstigen Abnutzungserscheinungen wird anstatt des Schneckengetriebes wieder ein Kettenantrieb eingesetzt. Da der in der dritten Version bereits beschriebene Formrahmen von 100 mm auf 275 mm deutlich vergrößert wird, kann in diesem seitlichen Außenbereich auch der Antriebsmotor platziert werden, wobei das Drehmoment über eine Welle durch die Brennerwand hindurch zum Antrieb im Inneren übertragen wird. Dabei kann man nicht mehr von einem einfachen Formrahmen sprechen: Da dieser neben der Abstandsfunktion auch weitere Aufgaben wie Aufnahme der Sekundärluftklappe und Integration der gesamten Sekundärluftverteilung erfüllt und dreischichtig aufgebaut ist, kann hier der Ausdruck „Brenneraußenteil“ verwendet werden. Der Vorschubrost hat eine Gesamtlänge von 376 mm und eine Breite von 130 mm, wobei nach Abzug der schrägen Chargier-Platte die effektive Rostlänge 324 mm beträgt (Abbildung 8.12).

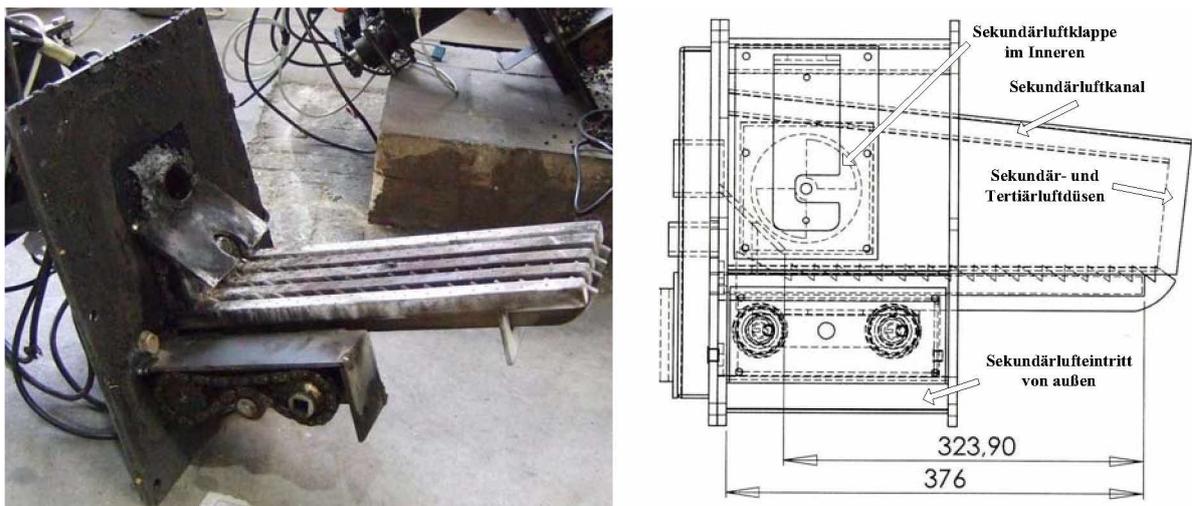


Abbildung 8.12.: Vierte Version des Vorschubrostes mit Kettenantrieb, bewegliche Roststäbe sind auf einer exzentrisch gelagerten Platte angebracht (links) und Konstruktionszeichnung des Rostes im Brenner (rechts).

Die Primärluft wird an der Brennerrückwand in eine Verteilkammer geleitet und über die hohlen

Roststäbe durch 145 Primärluftlöcher (Durchmesser von je 2 mm) in den Brennraum eingedüst.

Die Sekundärluft kommt anders als bei der dritten Version nicht mehr von der Rückseite des Brenners in den Sekundärluftkanal über dem Brennraum, sondern wird an der unteren Außenseite des Brenneraußenteiles angesaugt, einmal komplett um den Brenner geleitet und über die im Inneren angeordnete Sekundärluftklappe in den direkt über dem Brennraum liegenden Sekundärluftkanal (fest mit Brenneraußenteil verbunden) geleitet (Abbildung 8.12 rechts bzw. 9.2 links). Dabei erfolgt die Kühlung des Brenneraußenteiles bzw. Vorwärmung der Sekundärluft.

Mit dieser Version wird versucht die optimalen Einstellungen für Brennstoffwärmeleistung und zugehöriger Primärluftmenge zu eruieren, jedoch müssen zahlreiche Versuche wegen mechanischer Gebrechen aufgrund der hohen Temperaturbelastungen schon nach kurzer Zeit beendet werden. Erhöhte Reibung oder sogar Blockaden zwischen festen und beweglichen Roststäben aufgrund von Wärmespannungen führen zu wiederkehrenden Achsbrüchen (Abbildung 8.13 links) und Lager-schäden. Im Zuge der Reparatur eines Achsbruches wird die Exzentrik um weitere 5 mm vergrößert, sodass der Hub insgesamt 20 mm erreicht. Dadurch wird dieselbe Bettgeschwindigkeit mit weniger Hubbewegungen erreicht.

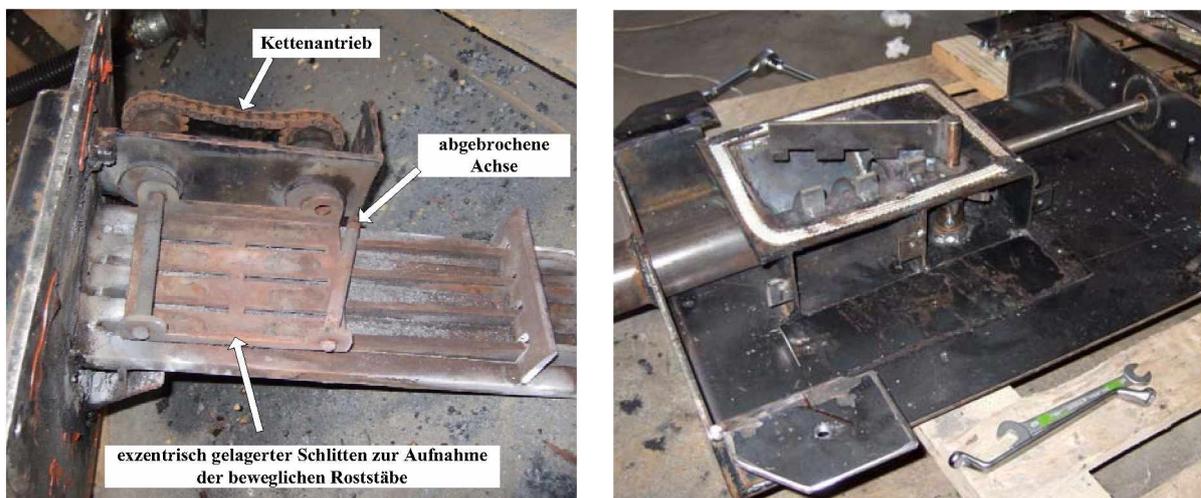


Abbildung 8.13.: abgebrochene Achse an der Brennerunterseite mit exzentrisch gelagertem Schlitten zur Aufnahme der bewegliche Roststäbe (links) und Ascheautrag mittels Austragsschnecke bzw. drehenden Räumers, nur Unterteil (rechts).

Erstmals ist auch eine automatische Ascheabtragung, die elektrisch mit der Rostbewegung gleichgeschaltet ist, im Kessel integriert. Dabei sammelt ein drehender Räumwerk die vom Rost abgeworfene Asche und streift diese in eine Vertiefung im Boden. Eine Austragsschnecke fördert die Asche von der Vertiefung in den externen Aschebehälter (Abbildung 8.13, rechts, 6.2). Im Laufe der Versuche kommt es immer wieder zum Blockieren des drehenden Räumers und Falschlufteintritt aufgrund von Wärmespannungen und den daraus resultierenden Verformungen des Austragsmechanismus und Verwerfungen der Bodenplatte. Weiters verursachen falsche Zahnabstände und verklemmte Schlackenpartikel ein Verklemmen des Räumers. Als Folge wird der drehende Räumwerk entfernt und der Bodenbereich mit Feuerfest-Vakuumpartien zur Vertiefung hin abfallend gestaltet, sodass die Asche durch Schwerkraft in die Vertiefung zur Austragsschnecke rutschen kann.

Durch Undichtigkeiten im Aschebehälter wird ebenfalls Falschlufteingesaugt und es kommt zu glühenden Hot Spots im Aschebehälter, da die weiterhin unvollständig ausgebrannte Asche noch Kohlenstoff enthält. Durch Installation einer Dichtung im Deckel kann dieses Problem behoben werden.

Nach wie vor lassen sich Verklebungen des Brennstoffbettes mit dem Rost oder den Seitenwänden nicht vermeiden oder größere agglomerierte Schollen können aufgrund des nach vorne geringer werdenden Querschnittes nicht weitertransportiert werden. Wie in Abbildung 8.12 rechts zu sehen ist, fällt der Sekundärluftkanal gegen den Abwurfbereich hin ab und verringert somit den Querschnitt. Aus diesem Grund werden die Roststäbe leicht nach unten gebogen um diese Engstelle zu entschärfen.

8.1.8. Fünfte Version des Vorschubrostes

Die fünfte Version des Vorschubrostes hat eine Gesamtlänge von 385 mm und eine Breite von 130 mm, wobei nach Abzug der schrägen Chargier-Platte die effektive Rostlänge 350 mm beträgt. Der Rost besteht wiederum aus fünf festen (144 Primärluftdüsen, Durchmesser von je 2 mm) bzw. vier beweglichen Roststägen und ist gegenüber der horizontalen Ebene um 5° nach unten geneigt, um die Vorwärtsbewegung des Brennstoffbettes zu unterstützen und den Querschnitt für sich bildende Verschlackungen zu vergrößern.

Die größte Änderung betrifft jedoch der Antriebsmechanismus für den Vorschubrost. Die beweglichen Roststäbe vollziehen nun nicht mehr die Kreisbewegung einer exzentrisch gelagerten Achse, sondern werden von einer Schubstange schräg nach vorne und hinten bewegt. Dabei sind diese nicht mehr gemeinsam fest fixiert, sondern auf einer gemeinsamen Asche beweglich gelagert. Auf diese Weise soll ein Verkleben durch Verformungen aufgrund Wärmespannungen vermieden werden. Der Antrieb der Schubstange erfolgt durch eine auf einer Welle schräg fixierten Antriebsscheibe, durch deren Torkelbewegung eine Bewegung über zwei Lager auf der Schubstange übertragen wird und diese nach vor und zurück bewegt (Abbildung 8.14). Diese Prinzip wird bereits beim Pelletskessel der Firma VERNER [149] angewendet. Der Glühzünder ist nach außen luftdicht abgeschlossen und durch eine Öffnung, welche nur zum Zünden automatisch freigegeben wird, kann während des Zündvorganges Luft angesaugt werden.

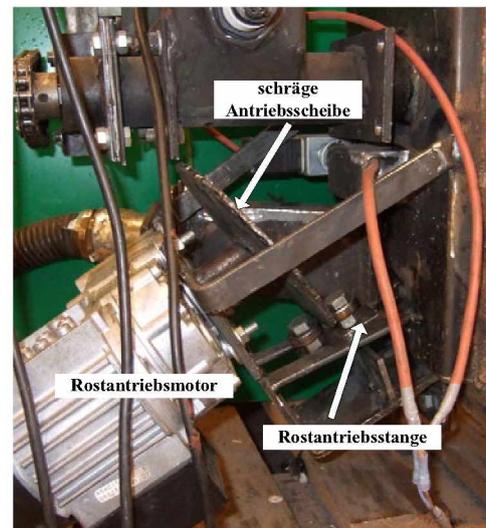
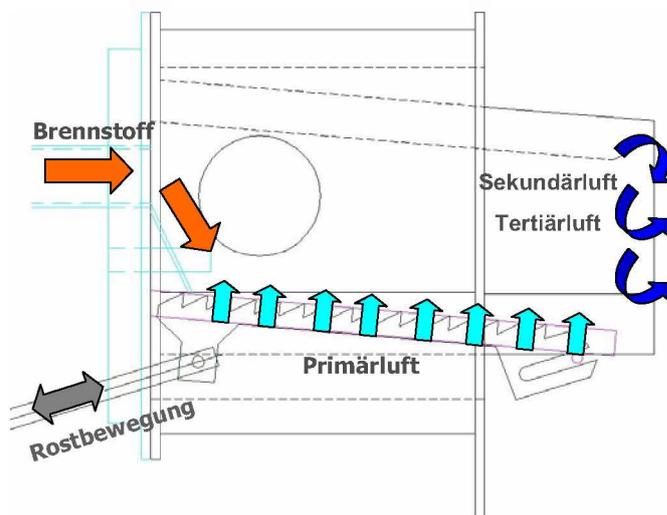


Abbildung 8.14.: Schema der fünften Version des Vorschubrostes (links) und Antrieb des Rostmechanismus (rechts).

Die Sekundärluftführung wird nicht verändert und basiert somit auf dem gleichen Prinzip wie bei der vierten Version. Der Austragsmechanismus für die Asche bleibt ebenfalls unverändert und wird wie oben beschrieben durch eine Austragsschnecke bewerkstelligt.

Erste Vorversuche zeigen, dass mit dieser Version erstmals längere Versuche durchgeführt werden können, in denen Parameter wie Rostgeschwindigkeit, Brennstoffwärmeleistung, Primärluftmenge

und Luftführung variiert und getestet werden können. Es sollen vor allem jenen Einstellungen eruiert werden die ein Optimum aus niedrigen Emissionen, gutem Ausbrand und geringer Verschlackung ergeben.

8.2. Optimierung der Einstellungen und Änderung der Luftführung für die Primärluft an der fünften Version des Vorschubrostes

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Untersuchungen werden während einer betreuten Diplomarbeit von KARNER [109] mit den Weizenstrohpellets der Charge 2 (WP Ch2) durchgeführt.

Ziel dieser Versuche ist die Anpassung verschiedener Parameter um eine Verbrennung möglichst ohne Eingreifen von außen zu ermöglichen und Ascheausbrand, Schlackenbildung und Emissionen zu optimieren. Dabei wird in mehreren Stufen vorgegangen und zunächst der Brennstoffeintrag angepasst, weiters der für diesen Brennstoff optimalen Vorschub des Rostes und die zugeführte Primärluftmenge ermittelt und schließlich die Luftführung für die Primärluft verändert. Schließlich werden für ausgewählte Einstellungen die Emissionen von Kohlenstoffmonoxid CO, Kohlenwasserstoffe OGC, Stickstoffoxide NO_x und Gesamtstaub TSP gemessen.

8.2.1. Anpassung des Brennstoffeintrages

Bei diesen Versuchen soll die, speziell für diesen Brenner, zugeführte optimale Brennstoffmenge ermittelt werden. Ziel dieser Versuche ist die Verringerung der Betthöhe, um eine geringere Wandreibung (Verklebungen mit der Wand, seitliche Verschlackungen) und somit eine bessere Förderung zu erzielen, aber doch noch eine für diese Kesselgröße angemessene Leistung zu erreichen. Des weiteren soll durch eine geringere Betthöhe auch ein besserer Ausbrand erzielt werden, da die oberste Schicht des Brennstoffbettes kaum zum Glühen gebracht werden kann. Bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit und gegebener Rostbreite ist die Betthöhe nur vom Brennstoffeintrag abhängig.

Beim serienmäßigen Standardaggregat PK-V30 wird, um hier einen Vergleich aufzuzeigen, mit dem Brennstoff Holzpellets und der Stokereinstellung von 6-6 eine Brennstoffwärmeleistung von ca. 30 kW erreicht. Dabei bedeutet 6-6, dass der Stoker 6 Sekunden fördert und 6 Sekunden still steht. Aufgrund der Erfahrung in Vorversuchen werden die Stokerintervalleinstellungen von 3-6 (ca. 1,34 g/s), 3-7 (ca. 1,16 g/s) und 3-8 (ca. 1,04 g/s) für die Versuche gewählt. Dies entspricht den Brennstoffwärmeleistungen von etwa 21,2 kW, 18,4 kW bzw. 16,4 kW. Bei allen Einstellungen wird eine Primärluftzufuhr von ca. 2,8 m/s (entspricht 1,881/s) und ein Rostvorschub von 2-8 (2 Sekunden fördern, 8 Sekunden Pause) eingestellt. Die Primärluftmengen entsprechen dabei 57 %, 65 % bzw. 73 % der spezifischen Verbrennungsluftmenge von 3,31/gOS bei 15 °C, wobei hier ein unverbrannter Anteil von ca. 19 %-Punkten an Kohlenstoff im Brennstoff (entspricht ca. 44 % des Brennstoff-Kohlenstoffs) bereits berücksichtigt wird.

In den Versuchen erweist sich die Stokereinstellung von 3-8 als Optimal. Trotzdem kann eine Schollenbildung nicht verhindert werden und nach kurzer Zeit kommt es zu einer vermehrter Brennstoffansammlung im Brenner und schließlich zum Erliegen der Verbrennung. Die sich oberflächlich bildenden Schollen haften an den Wänden des Brenners bzw. verkeilen sich zwischen den Brennerwänden und es bildet sich eine durchgehende Verkrustung an der Oberfläche. Die darunter liegenden beweglichen Roststäbe arbeiten dann im darunter liegenden Schüttungsbereich oder sogar im Hohlraum und haben dann keinen Angriffspunkt am Brennstoffbett mehr. Neu zugeführter Brennstoff wird über der Verkrustung abgelagert und kann aufgrund der unterhalb liegenden Barriere nicht mehr mit Primärluft versorgt werden [109].

8.2.2. Anpassung von Rostvorschub und Primärluftmenge

Rostvorschub: Bei Beibehaltung der oben ermittelten Stokereinstellung bzw. Brennstoffwärmeleistung (3-8, 1,04 g/s, 16,4 kW) soll zunächst der optimale Rostvorschub und darauffolgend die geeignete Primärluftmenge ermittelt werden.

Für die Testläufe zur Bestimmung der optimalen Rostgeschwindigkeiten wird die Primärluft auf 1,7 m/s (1,141/s) deutlich gesenkt, um massive Verschlackungen und daraus resultierende Verstopfungen des Brenners ausschließen zu können. Versuche mit den Rosttakteinstellungen 2-8, 2-7 und 2-6 zeigen, dass der schnellere Vorschub von 2-6 am geeignetsten ist (auch geringere Betthöhe), da es bei einer Verlangsamung wiederum zu Anhaftungen von Brennstoff im Brenner kommt.

Primärluftmenge: Die Versuche zur Ermittlung der optimalen Primärluftmenge werden bei den oben gefundenen Einstellung von Brennstoffzufuhr (Stoker 3-8) und Rostvorschub (2-6) durchgeführt. Ausgehend von einer Primärluftgeschwindigkeit von 1,7 m/s (1,141/s, 44% der stöchiometrischen Verbrennungsluftmenge) wird in separaten Versuchen mit Geschwindigkeiten von 1,5 m/s (1,011/s, 39%) und 1,9 m/s (1,291/s, 50%) gefahren.

Bei der Primärluftgeschwindigkeit von 1,7 m/s sind oberflächliche Verklumpungen (ca. 2 cm Breite, 10 - 20 cm Länge) hauptsächlich im Bereich der Brennerwände zu sehen, die jedoch vom Rostmechanismus und dem Ascheaustrag weggeführt werden können. Unerklärlicherweise bilden sich bei verminderter Primärluftmenge von 1,5 m/s größere, flächigere Verkrustungen an der Oberfläche des Brennstoffbettes, sodass ein manueller Eingriff zur Entfernung dieser erforderlich ist. Des Weiteren sind massive Teerbildungen im Bereich des Brennstoffeintrages (Abbildung 8.15, a) erkennbar. Bei der Primärluftgeschwindigkeit von 1,9 m/s kommt es zu massiver Brückenbildung und alsbald zu Agglomerationen an den Wandflächen, an den Roststäben und im Bereich des Brennstoffeinschubes (Abbildung 8.15, b, c und d), sodass die Anlage abgeschaltet werden muss [109].

Unabhängig von den Primärlufteinstellungen bilden sich auf den mittleren festen Roststäben, aus denen die Primärluft austritt, krustenartige Beläge, die auf die überhöhten Temperaturen im Bereich des Luftaustrittes zurückzuführen sind. Auffällig ist auch, dass sich die oberflächlichen Krusten bilden, obwohl kein Glühen dieser Schicht unmittelbar erkennbar ist, sondern nur im darunterliegenden Bereich. Diese oberflächliche Krustenbildung könnte mit den Erkalten von vorher aufgeschmolzenem Material aufgrund der niedrigen Wandtemperaturen im Brenner begründet werden oder dass aus den unteren Schichten aufsteigende Pyrolysegase an der kalten Oberfläche kondensieren und so die oberste Schicht verkleben. Die massive Teerbildung im Bereich der Brennstoffeinbringung ist ganz eindeutig auf die tiefen Wandtemperaturen der Brennerrückwand zurückzuführen, zumal in dieser die Verteilung der kalten Primärluft in einer direkt angrenzenden Kammer vonstatten geht [109].

8.2.3. Änderung der Luftführung im Feuerraum

In diesem Unterabschnitt werden die Änderungen aufgezeigt, um die vorher beschriebenen Probleme wie Versottung und Teerbildung, Verkleben der obersten Brennstoffschicht und Verkrustung der Roststäbe zu lösen. Dies sind vor allem Änderungen der Luftführung, wobei hier nur fertigungstechnisch einfache Umbauten durchgeführt werden, um für einen späteren aufwendigeren Umbau die experimentellen Grundlagen zu schaffen [109].

Eliminierung von Versottung und Teerbildung: Um eine Versottung und Teerbildung hintanzuhalten zu können, muss in diesem Bereich die Temperatur erhöht werden. Als erster Schritt wird

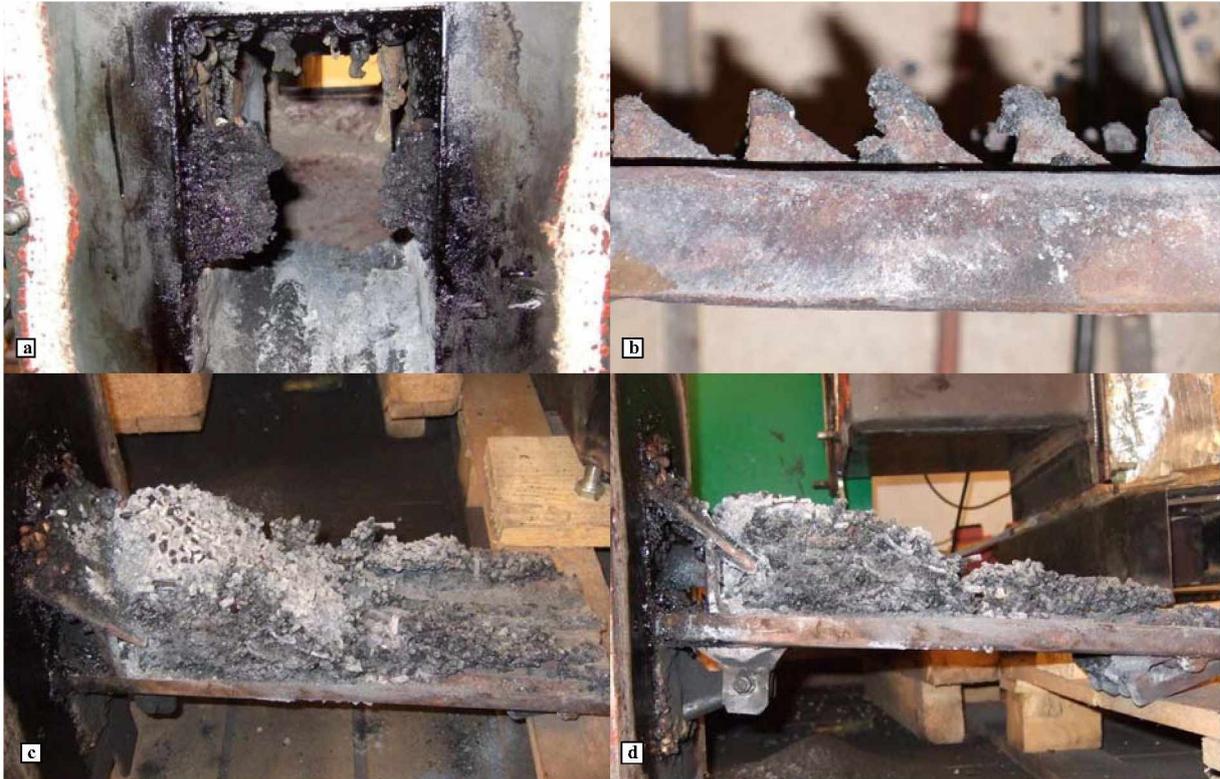


Abbildung 8.15.: Bilder vom Brennerkanal mit teerartigen Versottungen (a), Verkrustungen auf den Roststäben (b), Schlackebildung und Agglomerationen auf dem Rost (c, d).

mittels Feuerfest-Matten, die im betroffenen Teil an der Wand aufgebracht werden, versucht, dieses Problem zu lösen (Abbildung 8.16, links). Da dies jedoch keine Verbesserung zeigt, werden in mehreren Versuchen, beginnend mit 2 Löchern, zusätzliche Primärluftlöcher an der Brennerrückwand gebohrt (Abbildung 8.16, mitte). Durch die unmittelbar in der Brennerrückwand situierte Verteilkammer für die Primärluft ist dies eine sehr einfache fertigungstechnische Maßnahme.

Die Absicht dabei ist die vorzeitige Umsetzung der Brenngase (vor der eigentlichen Sekundärzone) mit zusätzlicher Luft, um in diesem Bereich die Temperatur zu erhöhen und Kondensation zu vermeiden.

Die Versuche werden mit den oben beschriebenen Parametern durchgeführt (Stoker 3-8, Vorschub 2-6, Primärluft $1,7\text{ m/s} \hat{=} 1,141/\text{s}$). Mit zwei neuen Bohrungen ist zwar noch keine Änderung im Flammenbild zu sehen, jedoch erscheint der versottete Bereich sauberer als vorher. Nachdem bei Hinzufügen von weiteren zwei Bohrungen (insgesamt vier) noch immer keine Änderung im Flammenbild zu erkennen ist, wird auch die Luftzufuhr über den Glühzünder geöffnet und so eine Flammenbildung im Bereich der Brennstoffeinbringung beobachtet. Als Folge ist die Versottung und Teerbildung deutlich reduziert und es sind keine Verkrustungen mehr auf den beweglichen Roststäben zu beobachten.

Die Verkrustungen auf den festen Roststäben können jedoch nicht gänzlich verhindert werden, auf den einzelnen Luftöffnungen im mittleren Rostbereich werden blasenförmige Verkrustungen festgestellt (Abbildung 8.16, rechts), welche die Luftzufuhr ins Brennstoffbett blockieren. Dadurch passiert quasi auch eine Umverteilung der Luft, sodass durch die anderen Bohrungen mehr Luft strömt und es lokal wieder zu Überhitzungen und dadurch zu Schmelzvorgängen kommen kann.

Als großer Nachteil erweist sich die Tatsache, dass die Primärluft über die Roststäben nun um den Anteil der über die zusätzlichen Löcher in der Rückwand strömenden Luft reduziert wird. Die über

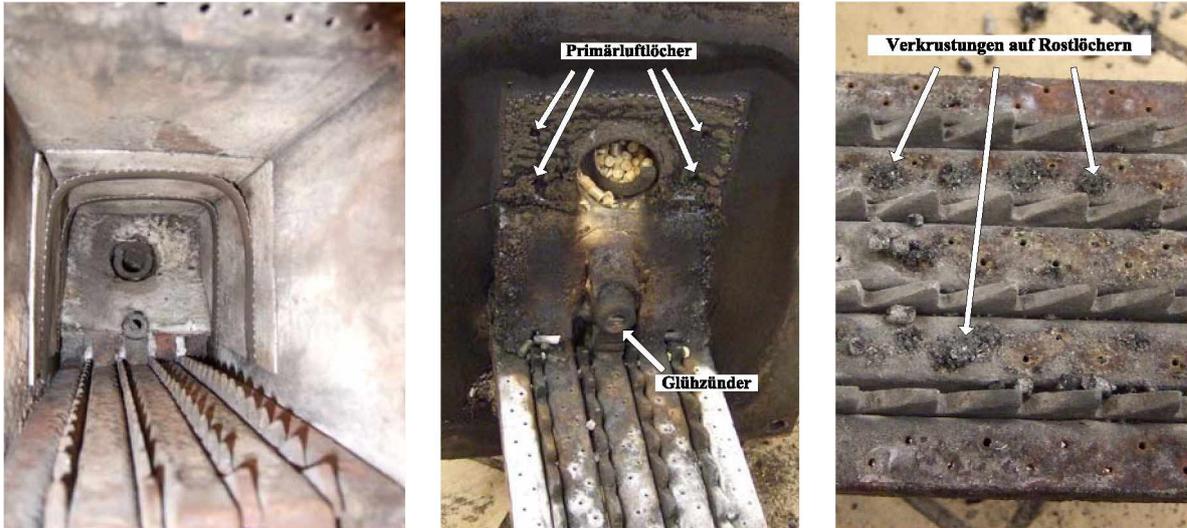


Abbildung 8.16.: Isolierung eines Teils des Brennraumes mit dünnen Feuerfest-Matten (links), Position der Primärluftlöcher in der Brennerrückwand (mitte) und Verkrustungen über den Rostlöchern (rechts).

dem Brennstoffbett eingebrachte Luft steht nun kaum mehr für die Umsetzung im Brennstoffbett zur Verfügung, was zur Folge hat, dass der Ausbrand vermindert wird [109].

Eliminierung der Verklebungen der obersten Brennstoffschicht und Vermeidung von Verkrustungen auf den Roststäben: Aufgrund der oben beschriebenen positiven Erfahrungen mit zusätzlicher Luftzufuhr über dem Brennstoffbett, wird nun dieses Konzept weiter verfolgt. Da reine Bohrungen in der Brennerrückwand keine gezielte Einbringung der Luft zulässt, werden an dessen Stelle Düsen eingesetzt, um die Luft gezielt auf die Oberfläche des Brennstoffbettes zu lenken. Dadurch soll die oberste Schicht des Brennstoffbettes zum Glühen gebracht und so teerartige Verklebungen hintangehalten und auch der Ausbrand erhöht werden. In einem ersten Schritt werden dazu nur kurze Düsen an der Brennerrückwand mittels Gewinde installiert (Abbildung 8.17, links).



Abbildung 8.17.: Kleine Düsen an der Brennerrückwand (links), mittlere und lange Düsen (mitte) und gewundene Düsen (rechts) zur Einbringung von Luft auf das Brennstoffbett. Im mittleren Bild sind die mit den Nägeln verschlossenen Düsen deutlich zu sehen.

Dabei werden anfangs die selben Einstellungen bezüglich Brennstoffzufuhr (Stoker 3-8), Rostvorschub (2-6) und Primärluftzufuhr ($1,7 \text{ m/s} \hat{=} 1,141/\text{s}$, 44% der stöchiometrischen Verbrennungsluftmenge) verwendet. In vielen Versuchen werden Schritt für Schritt neue Ideen umgesetzt. Dabei wird immer nur ein Parameter verändert, um dessen Auswirkung identifizieren und zuordnen zu können. In der Folge werden beispielsweise längere Düsen eingesetzt (Abbildung 8.17, mitte), verschiedene Düsenwinkel erprobt oder Kombinationen zwischen Düsen und Löchern an der Brennerrückwand, auch unterhalb des Rostes, getestet. Diese Düsen werden aus Edelstahl-Metallröhren mit einem Innendurchmesser von 6 mm gefertigt. Schließlich werden auch lange, an der Vorderseite gebogene Röhren (8 mm Innendurchmesser) mit Düsenöffnungen eingesetzt, um einen Großteil des Brennstoffbettes mit Luft beaufschlagen zu können (Abbildung 8.17, rechts). Eine Steigerung der Primärluftmenge von $1,7 \text{ m/s}$ auf den Wert von $2,3 \text{ m/s}$ ($\hat{=} 1,551/\text{s}$, 60% der stöchiometrischen Verbrennungsluftmenge) wirkt sich auf die Verbrennung positiv aus und wird deshalb beibehalten, da damit auch ein besserer Ausbrand erreicht wird.

Somit ist ein Ziel, der bessere Umsatz an der Oberfläche des Brennstoffbettes erreicht, doch gibt es noch kaum signifikante Verbesserungen bezüglich Verkrustung und Anlagerung von aufgeschmolzenem Material auf den Roststäben, sowohl bei den festen, als auch bei den beweglichen. Dies lässt den Schluss zu, dass im Bereich der Roststäbe noch immer zu hohe Temperaturen vorliegen, also zuviel Luft zugeführt wird. Darum werden im nächsten Schritt 35 der 144 Rostlöcher mit kleinen Nägeln, die genau in die Bohrungen passen und einen flachen Kopf haben, verschlossen (Abbildung 8.17, mitte). Da sich nun die Verschlackungen auf den Roststäben deutlich verringern, werden Schritt für Schritt alle Rostlöcher verschlossen. Dadurch bilden sich direkt an den Roststäben keine Verkrustungen mehr und es kann in der Folge die Primärluftmenge auf $2,75 \text{ m/s}$ ($\hat{=} 1,851/\text{s}$, 72% der stöchiometrischen Verbrennungsluftmenge) erhöht werden.

Mit diesem letzten Schritt wird die Richtung der Zufuhr von Primärluft von der Unterseite des Brennstoffbettes gänzlich auf die Oberseite verlegt. Zwar bilden sich durch oberflächlich örtliche Überhitzung mehr oder weniger große Agglomerationen, die aber weitergefördert werden, da die Berührungsflächen mit der seitlichen Wand klein sind. Die Düsenkonstruktionen stellen natürlich nur eine Versuchskonstellation dar, die einige Nachteile wie ungleichmäßige Luftverteilung oder gelegentliche Störung der Austragung von Agglomerationen nach sich ziehen. An deren Stelle soll in der Folge eine effizientere Konstruktion ausgeführt werden [109].

8.2.4. Emissionen und Ausbrand bei unterschiedlichen Einstellungen

Mit diesen Versuchen sollen die Auswirkungen auf Emissionen und Ausbrand bei unterschiedlichen Einstellungen der Anlage, wie Rostvorschub und Primärluftmenge, untersucht werden. Wie schon in den beiden vorigen Unterabschnitten, werden diese Untersuchungen hier nur zusammenfassend dargestellt und können bei [109] genauer nachgelesen werden.

Veränderung des Rostvorschubes: Hier werden die Auswirkungen von kurzen oder längeren Rosttaktintervallen bei gleichbleibenden Parametern von Brennstoffzufuhr (Stoker 3-8) und Primärluftmenge ($2,75 \text{ m/s}$) untersucht. Beginnend mit einem Rosttaktintervall von 1-7 (1 Sekunde Ein, 7 Sekunden Aus) werden die Intervalle verlängert und mit 2-14 und 4-28 verglichen. In der Summe sind die Dauer von Rostbewegung und Stillstand jedoch bei allen drei Einstellungen gleich.

Bei der Einstellung 4-28 wird eine zu 1-7 deutlich höhere und schwankendere bzw. unregelmäßigere Betthöhe beobachtet. Dies deshalb, da es bei längeren Förder- und Stillstandsintervallen in der Stillstandsphase zu größeren Adhäsionserscheinungen (evtl. leichte Verklebungen) zwischen Rost oder Brennraumwänden und Brennstoffbett kommt und daher die Bettgeschwindigkeit vermindert wird.

Bei den Kohlenstoffmonoxid-Konzentrationen CO ist keine Tendenz in eine Richtung feststellbar. Die über den Messzeitraum gemittelten Emissionswerte bei den drei Einstellungen liegen zwischen 30 und 77 mg/MJ und sind somit deutlich unter dem geforderten Grenzwert von 500 mg/MJ. Da der Flammenisationsdetektor für die Messung des organischen Gesamtkohlenstoffs (OGC) zu diesem Zeitpunkt defekt ist, können diese Werte nicht bestimmt werden. Es ist jedoch aufgrund des niedrigen CO-Wertes davon auszugehen, dass auch dieser Emissionswert deutlich unter dem Grenzwert zu liegen kommt.

Auch bei Stickstoffoxid NO_x ist keine Tendenz feststellbar, zumal diese Emissionen hauptsächlich vom Stickstoffgehalt des Brennstoffs abhängen. Die über den Messzeitraum gemittelten Emissionswerte liegen mit 248 bis 259 mg/MJ (umgerechnet auf NO_2) sehr eng beisammen und damit noch unten dem gesetzlich geforderten Grenzwert von 300 mg/MJ.

Die Emissionen bei Gesamtstaub (TSP) liegen jedoch bei allen drei Einstellungen über dem Grenzwert von 60 mg/MJ. Auch hier ist keine Tendenz oder ein Zusammenhang zu den Rostintervallen erkennbar. Aufgrund einer später entdeckten Undichtigkeit im TSP-Messgerät kann diesen Werten jedoch nicht vertraut werden.

Beim Ausbrand ist schon ein deutlicher Zusammenhang mit dem Rosttaktintervall zu beobachten: Mit steigender Intervalllänge wird der Ausbrand besser. Wird bei der Rostakteinstellung von 1-7 noch 73,0 % Brennbares im Rückstand gefunden, sinkt der Wert auf 70,7 % bei 4-28. Der Grund dafür ist höchstwahrscheinlich in der längeren Verweilzeit (größere Betthöhe, wie oben beschrieben) des Brennstoffbettes am Rost. Hier ist auch noch ein sehr großes Verbesserungspotential zu sehen, da über 70 % des Rückstandes (Asche) noch aus brennbarem Material besteht. Umgerechnet auf den eingesetzten Brennstoff bedeutet dies, dass ca. 44 % des Kohlenstoffs im Brennstoff nicht umgesetzt werden. So lassen sich auch die niedrigen Wirkungsgrade von knapp unter 60 % erklären [109].

Veränderung der Primärluftzufuhr: Hier werden die Auswirkungen von Variationen der Primärluftzufuhr bei gleichbleibenden Parametern von Brennstoffzufuhr (Stoker 3-8) und Rosttaktverhältnis (1-7) untersucht. Vor allem soll hier die Frage geklärt werden, inwieweit kleine Änderungen der Primärluftzufuhr Auswirkungen vor allem auf den Ausbrand haben. Ausgehend von einer Primärluftzufuhr von 2,75 m/s ($\hat{=}$ 1,85 l/s, 72 % der stöchiometrischen Verbrennungsluftmenge) wird diese auf 2,85 m/s ($\hat{=}$ 1,92 l/s, 74 % der stöchiometrischen Verbrennungsluftmenge) gesteigert und auf 2,65 m/s ($\hat{=}$ 1,78 l/s, 69 % der stöchiometrischen Verbrennungsluftmenge) reduziert.

Bei der höhern Primärluftzufuhr von 2,85 m/s zeigen sich zwar keine Verkrustungen, doch reicht das Brennstoffbett auf den ersten 10 cm am dem Brennstoffeintrag bis fast zur Decke im Brennraum. Als Grund für diesen Anstau wird die Feinkörnigkeit des Rückstands bei besserem Ausbrand vermutet, sodass dieses von den beweglichen Roststäben schlechter abtransportiert werden kann.

Bei den Kohlenstoffmonoxid-Konzentrationen CO ist eine Verschlechterung in beide Richtungen feststellbar. Die über den Messzeitraum gemittelten Emissionswerte erhöhen sich bei geringerer Primärluftzufuhr von ursprünglich 30 auf 133 mg/MJ und bei höherer Primärluftzufuhr von 30 auf 106 mg/MJ, liegen jedoch noch immer weit unter dem gesetzlichen Grenzwert von 500 mg/MJ. Bei verringerter Primärluftzufuhr könnte dies auf eine zu geringe Brennraumtemperatur zurückzuführen sein, bei der die Reaktion von CO mit Sauerstoff nur mehr eingeschränkt abläuft. Bei der erhöhten Primärluftzufuhr wird der Anstau von Material als Ursache vermutet. Dadurch kommt es zu unkontrollierten und stoßweisen Entgasungsvorgängen, welche die Nachverbrennungszone überfordert. Einerseits können kurzzeitig große Gasmengen hier nicht verarbeitet werden, andererseits ist schlichtweg die Regelung zeitlich überfordert, da die Information der Lambdasonde nicht rasch genug auf die Stellung der Sekundärluftklappe übertragen wird. Ebenfalls könnte hier der Eintrag von Falschluf eine Rolle spielen, da sich diese meist nicht ausreichend mit den Verbrennungsgasen

vermischt und dann trotzdem an der Lambdasonde ein ausreichender Restsauerstoffwert gemessen wird, aufgrund dessen dann die Sekundärluftklappe geschlossen wird.

Bei Stickstoffoxid NO_x ist keine Tendenz feststellbar, zumal diese Emissionen wiederum hauptsächlich vom Stickstoffgehalt des Brennstoffs abhängen. Die über den Messzeitraum gemittelten Emissionswerte liegen mit 242 bis 259 mg/MJ (umgerechnet auf NO_2) sehr eng beisammen und damit noch unten dem gesetzlich geforderten Grenzwert von 300 mg/MJ.

Die Emissionen bei Gesamtstaub (TSP) liegen jedoch bei allen drei Einstellungen über dem Grenzwert von 60 mg/MJ, und auch hier ist keine Tendenz oder ein Zusammenhang zu den Rostintervallen erkennbar.

Beim Ausbrand ist wiederum ein deutlicher Zusammenhang zur zugeführten Primärluftmenge zu beobachten: Mit verringerter Primärluftmenge wird der Ausbrand schlechter bzw. umgekehrt. Bei der Primärlufteinstellung von 2,65 m/s erhöht sich das Brennbarere im Rückstand deutlich von 73,6% auf 75,0%, bei 2,85 m/s sinkt es geringfügig von 73,6% auf 73,2%. Hier zeigt sich auch, dass ein besserer Ausbrand nicht allein über die Steigerung der Primärluftzufuhr erreicht werden kann, der Schlüssel zu einer wesentlichen Verbesserung ist auf alle Fälle auch in einer besseren Verteilung der Primärluftzufuhr zu finden, indem eine Zuführung über das gesamte Brennstoffbett erfolgen muss.

Ein Einfluss auf die Messung des Ausbrandes ist sicherlich auch dem Anstau von Brennstoff bei diesem Versuch zuzuschreiben. Da dieser Effekt erst gegen Ende des Messzeitraumes auftritt, kann hier höchstwahrscheinlich ein gewisser Rückhalteeffekt berücksichtigt werden, der gut ausgebranntes Material in der Rückstauzone speichert, sodass dieser Anteil dann nicht gemessen werden kann. Somit ist der Ausbrand etwas besser als es durch das Messergebnis hier dargestellt wird [109].

8.3. Sechste Version des Brenners mit neuer Luftführung

Aufgrund der Erkenntnisse und Erfahrungen vieler oben beschriebener Versuche wird ein Brenner mit neuer Luftführung für die Primärluft entworfen. Dafür werden die alten hohlen, festen Roststäbe von der Brennerrückwand entfernt und durch massive, demontierbare und 5° nach unten geneigte, feste Roststäbe mit einer Breite von 18 mm ersetzt. Der Rost ist mit einer Gesamtlänge von 425 mm um 40 mm länger als die fünfte Version, wobei sich aber die effektive Rostlänge aufgrund der schrägen Platte um 34 mm auf 391 mm reduziert (Abbildungen 8.18 links und 8.19 links).

Die gesamte Rostbreite beträgt 129 mm. Die seitlichen Flanken der festen Roststäbe sind nach unten mit einem Winkel von 2° leicht konisch gefertigt, um gegen die beweglichen Roststäbe so wenig Reibungsfläche wie möglich zu erzeugen. Die beweglichen Roststäbe haben eine Breite von 5 mm und sind nicht nur zwischen den festen Roststäben angeordnet, sondern auch seitlich, um Anhaftungen an den Seitenwänden vorbeugen bzw. lösen zu können. Durch eine exakte Fertigung soll das Durchfallen von Feinanteilen, sowohl Brennstoff als auch Asche, minimiert werden. Der Abstand zwischen festen und beweglichen Roststäben ist mit 0,75 mm genau definiert. Die Lagerung der beweglichen Roststäbe erfolgt frei beweglich auf einer gemeinsamen Achse, wobei wie schon in der vorigen Version diese Achse durch eine Schubstange bewegt wird. Durch eine verbesserte Führung der Schubstange und der Möglichkeit der Verstellung kann die Höhe des Austretens der beweglichen Roststäbe zwischen den festen Roststäben eingestellt werden.

Die größte Änderung betrifft den neu entworfenen, ca. 130 mm über dem Rost liegenden Luftkasten (381 x 124 mm), in dem die Primärluft verteilt und über 23 Löcher mit einem Durchmesser von je 3 mm auf das Brennstoffbett gedüst wird (Abbildungen 8.18 und 8.19). Dieser Luftkasten ist demontierbar mit der Brennerrückwand verbunden, wobei über eine Ausnehmung in der Brennerrückwand die Primärluft einströmen kann. Sowohl Luftkasten als auch Rost sind aus dem

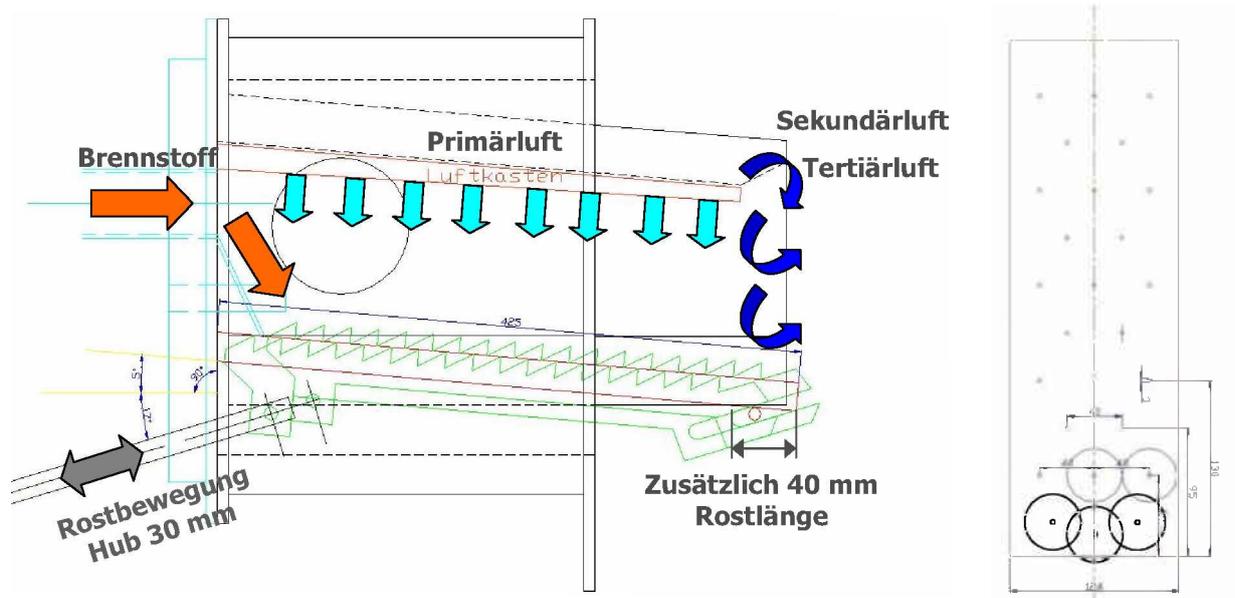


Abbildung 8.18.: Schema der sechsten Version des Vorschubrostes von der Seite (links) und Bohrungen für die Primärluft im Luftkasten, wobei die Kreise die äußeren Durchmesser des Freistrahlen beim Auftreffen auf das Brennstoffbett markieren (rechts).

Material DIN/EN 1.4841 gefertigt. Wie schon ab der zweiten Version kann der Rostteil mit den Antriebs- und Versorgungsaggregaten, wie in Abbildung 8.19 zu sehen ist, in den Brennerkanal eingesetzt und mit diesem fest verschraubt werden, sodass eine Reinigung, Wartung oder ein Umbau problemlos möglich ist.



Abbildung 8.19.: Rost der sechsten Version des Vorschubrostes seitlich (links) und schräg von unten (rechts).

Die Bohrungen im Luftkasten werden derart gesetzt, dass möglichst das gesamte Brennstoffbett mit Luft beaufschlagt werden kann (Abbildung 8.18 rechts). Die einzelnen Löcher sind voneinander jeweils 40 mm entfernt (ausgenommen die drei vordersten Bohrungen), sodass sich die Umfänge der durch die eingedüste Luft entstehenden Freistrahlen beim Auftreffen auf das Brennstoffbett berühren (vgl. Abb. 8.18, rechts).

Bei der Berechnung wird von einer Primärluftgeschwindigkeit von 4 m/s ausgegangen, was einem

Volumenstrom von 2,701/s entspricht. Über die Anzahl der Düsenlöcher, deren Durchmesser und einer angenommenen Luftvorwärmung von 100 °C kann über die Gleichung 3.8 das Existieren von turbulenten Bedingungen überprüft werden. Die Berechnung der Freistrahlradien beim Auftreffen auf das Brennstoffbett nach den Gleichungen von TU-CLAUSTHAL (Glg. 3.9), ECK (Glg. 3.12) und NEUNASS (Glg. 3.16), ergeben Werte von 19,5 mm, 21,2 mm bzw. 18,9 mm bei einem Abstand von 120 mm von der Düse, wobei von einer Betthöhe von ca. 10 mm ausgegangen wird. Die Berechnung der mittleren Massengeschwindigkeit nach den Gleichungen 3.10 und 3.11 ergibt einen Wert von 2,08 m/s beim Auftreffen des Luftstrahles auf das Brennstoffbett.

9. Versuchsdurchführung und Berechnungen an der sechsten Version des Brenners

In diesem Kapitel erfolgt die Beschreibung und Diskussion des Betriebes der sechsten Version des Brenners sowie die Erläuterung von Lösungsvorschläge zu noch auftretenden Problemen. Des weiteren werden die Grundlagen von Berechnungen an der Anlage erläutert, die in die Massen- und Energiebilanzierung einfließen. Messungen im Feuerraum betreffen die Verweilzeit des Brennstoffs am Rost und die Temperaturen direkt am Rost und über dem Brennstoffbett. Bezüglich der Emissionen werden gasförmige Komponenten, Gesamt- und Feinstaub gemessen und deren elementare Zusammensetzung ermittelt.

Die hier beschriebenen Versuche erfolgen an insgesamt 32 Tagen mit bis zu drei verschiedenen Parametereinstellungen pro Tag. Hier sind auch jene Versuche zum Vergleich der Berechnungsmethoden bezüglich theoretischer Leistung im Rückstand und der Massenbilanzen enthalten. Die Versuche zur Emissions-, Temperatur- und Verweilzeitmessung werden an 9 Tagen durchgeführt.

9.1. Betrieb, Probleme und Optimierungen der sechsten Version

Hier werden einige bestehende Probleme beschrieben und die Lösungsmöglichkeiten erläutert. Dazu gehören Bartbildung an den Düsen, Abdichtungsprobleme beim Brennerereinbau, Anhaftungen und Teerbildung, Ablagerungen unter dem Rost und thermische Isolierung der gesamten Anlage.

9.1.1. Flammenbilder mit neuem Brenner der sechsten Version

Bei den Inbetriebnahme der sechsten Version, bei der alle Parameter neu eingestellt werden, zeigen sich Probleme beim Starten des Verbrennungsvorganges: Durch zu große Luftgeschwindigkeiten im Bereich des Glühzünders kommt es vermehrt zu Auslöschungen der Flamme. Deshalb werden in der Trocknungszone fünf Bohrungen im Luftkasten mit kleinen Schrauben verschlossen. Im Gegenzug werden noch zusätzlich 3 Bohrungen im vordesten Bereich gesetzt, um auch im letzten Teil des Brennstoffbettes für Luftzufuhr zu sorgen. Diese sind in Abbildung 8.18, rechts, als stärker ausgezogenen Linien zu sehen. Im Mittelteil des Luftkastens kann an den Luftaustrittlöchern eine starke Bartbildung aus weißen Partikeln beobachtet werden. Diese Partikel bestehen hauptsächlich aus Kaliumchlorid (KCl), wie eine Analyse des Staubes aus der Feinstaubmessung mit dem REM/EDX später zeigt. Um dieser Bartbildung (Abbildung 9.5 links oben) entgegenzuwirken werden die Primärluftlöcher geringfügig auf 3,2 mm aufgebohrt und zusätzlich leicht nach außen erweiternd gestaltet.

Diese neue Verteilung der Primärluft, ausschließlich von oben, funktioniert einwandfrei und hat ein sehr schönes Flammenbild zur Folge, wie in Abbildung 9.1 an den Beispielen von Weizenstrohpellets der Charge 2 und Holzpellets zu sehen ist.

Dabei sind die Kontaktstellen der Primärluftstrahlen mit dem Brennstoffbett deutlich als glühend helle Zonen zu erkennen. Im Gegensatz zum Brennstoffbett der Weizenstrohpellets können die Primärluftstrahlen im Brennstoffbett der Holzpellets wesentlich tiefer in das Bett eindringen. Dies deshalb, da einerseits Holz sehr wenig Asche aufweist und andererseits der Ascherückstand sehr



Abbildung 9.1.: Flammenbilder der sechsten Version des Brenners: Verbrennung von Weizenstrohpellets Charge 2 (links) und Holzpellets (rechts).

leicht und flockig ist, sodass dieser vom Luftstrahl quasi weggeblasen wird. Die Weizenstrohpellets jedoch bilden nach dem Entweichen der flüchtigen Bestandteile ein stabiles Asche-Kohlenstoff-Gerüst, das sehr kompakt ist. Außerdem ist der Aschegehalt etwa um den Faktor 15 höher.

9.1.2. Problembereiche und Lösungsansätze

Trotz laufender Weiterentwicklung und permanenter Verbesserung des Brenners verbleiben einige Problembereiche, manche werden etwas entschärft oder es treten andere bzw. neue auf.

Einer davon ist die Abdichtung der Brennerrückwand zum Brenneraußenteil, was ursprünglich mit einer Dichtschnur bewerkstelligt wurde. Um Falschlufteintritt zuverlässig ausschließen zu können, findet stattdessen eine dünne Matte aus Feuerfest-Fasermaterial als Dichtmedium Verwendung. Diese wird jedoch in diesem Bereich mit Pyrolyseöl durchtränkt, sodass die Matte mit der Brennerrückwand bzw. dem Brenneraußenteil verklebt und bei jeder Reinigung des Brenners zerstört wird und deshalb erneuert werden muss. Darum werden die Metallflächen, als auch die Matte mit einem hitzebeständigen technischen Schmierstoff auf Aluminiumbasis (ANTI-SEIZE) behandelt. In Abbildung 9.2 ist die imprägnierte Fläche des Brenneraußenteils nach Entfernung der Matte (links) und die positionierte Matte mit appliziertem Schmierstoff (rechts) zu sehen.

Ein weiterer Problembereich sind die teerartigen Anlagerungen und Verkrustungen im Bereich der Brennerrückwand unter dem Rost (Abbildung 9.3 links). Wie schon oben erwähnt kommt es in diesem Bereich zur Bildung von Pyrolyseöl, das dann abkühlt und haften bleibt. Es wird vermutet, dass die Bildung des Pyrolyseöls weniger auf dem Rost geschieht und dann nach unten gelangt, sondern direkt dort gebildet wird. Dabei kann der Feinanteil des Brennstoffs durch die Rostbewegung zwischen den Roststäben nach unten fallen und sich unmittelbar dort ablagern. Wie in Abschnitt 7.1 ermittelt könnten bis zu etwa 3% des gesamten Brennstoffs zwischen die Roststäbe hindurch (maximale Spaltgröße 1,5 mm) nach unten gelangen, durch weiteren Abrieberscheinungen während des Chargiervorganges noch wesentlich mehr. Im Laufe des Verbrennungsvorganges erhöht sich die Temperatur im Brennraum als auch unter dem Rost, wodurch die Pyrolyse gestartet wird. Da diese Teerbildung vor allem im Bereich der Roststäbe und der Rückwand auftritt, liegt die Vermutung nahe, dass die für die Pyrolyse nötigen Temperaturen über die Roststäbe, die im vorderen Bettbereich rot-glühend sind, übertragen werden. Außerdem ist nur in diesem Bereich unverbrannter und pyrolysefähiger Brennstoff vorhanden.

Von oben nachkommendes Feinmaterial haftet wiederum an den bereits bestehenden Ablagerungen und auf diese Weise bilden sich immer größer werdende Agglomerationen. Es kommt auch zu



Abbildung 9.2.: Abdichtung der Brennerrückwand; Anti-Size-Beschichtung, demontierte Sekundärluftklappe (links), Feuerfestmatte mit ANTI-SEIZE-Beschichtung (rechts).

Ablagerungen auf der Schubstange des Antriebmechanismus mit einer einhergehenden Schwergängigkeit oder im Extremfall, der bereits aufgetreten ist, sogar zu einer Blockade, die zum sofortigen Abstellen der Anlage führt.



Abbildung 9.3.: Teerartige Verkrustungen unter dem Rost (links), Beschichtung mit technischem Schmierstoff auf Aluminiumbasis - ANTI-SEIZE (rechts).

Grundsätzlich können bei dieser Bauform des Rostes solche Ablagerungen nicht verhindert werden. Dazu müsste der Rost neu gebaut werden, wobei der Abstand zwischen festen und beweglichen Roststäben auf ein Minimum zu beschränken wäre. Die derzeitigen Abstände von 0,75 mm müssten in Versuchen sukzessive verkleinert werden um das Durchfallen von Feinanteil zu minimieren.

Um die teerartigen Ablagerungen bei den regelmäßigen Serviceintervallen leichter entfernen zu können, werden diese betroffenen Oberflächen mit dem oben bereits erwähnten hitzebeständigen technischen Schmierstoff auf Aluminiumbasis (ANTI-SEIZE) behandelt (Abbildung 9.3 rechts).

In direktem Zusammenhang mit dem oben Diskutierten steht der grundsätzliche Problembereich der Ablagerungen unter dem Rost, was in den drei Bildern der Abbildung 9.4 zu sehen ist. Grund-

sätzlich ist hier jedoch anzumerken, dass dies unmittelbar bei den Versuchen noch kein Problem darstellt, wenn nach jedem Versuch eine Reinigung erfolgt. Ansonsten ist eine Blockade der beweglichen Roststäbe im Laufe der Zeit nicht zu vermeiden.



Abbildung 9.4.: Ablagerungen unter dem Rost nach Versuchen.

Als Gegenmaßnahme müsste, wie oben bereits angedacht, der Abstand zwischen festen und beweglichen Roststäben auf ein Minimum reduziert werden. Sollte dies nicht ausreichend sein, oder als Alternative, könnte auch eine mechanische Austragung die Reinigung dieses Bereiches übernehmen. Dazu müsste der aktuell flache Boden u-förmig gestaltet und in dessen Basis eine Austragsschnecke installiert werden.

Ein weiterer Problembereich, der jedoch keine direkten Auswirkungen auch die aktuellen Versuche hat, sind die Ablagerungen und Korrosionserscheinungen im Abgasweg. Dies sind in der Reihenfolge des Abgasweges Ablagerungen und Bartbildung an der Primär- und Sekundärlöchern (Abb. 9.5 links oben), Ablagerungen in der Sekundärbrennzone unter dem Wärmeübertrager als auch darüber (Abb. 9.5 links unten), Ablagerungen und Korrosionserscheinungen an den Turbulatoren (Abb. 9.5 rechts oben) und Ablagerungen im Bereich des Abgaskanals im Bereich des Saugzuges (Abb. 9.5 rechts unten).

Die Bartbildung an den Primärluftlöchern des Luftkastens wird durch eine geringfügige Erweiterung des Lochdurchmessers auf 3,2 mm und durch eine leicht konische Gestaltung (wie bereits in 9.1.1 beschrieben) soweit vermindern, dass eine Beeinträchtigung der Luftführung ausgeschlossen werden kann. Dagegen fallen die Anlagerungen im Bereich der Sekundärluftlöcher massiver aus, wie in Abbildung 9.5 links oben deutlich zu sehen ist. Wenn aber hier vereinzelt Düsenlöcher teilweise verlegt sind, beeinträchtigt dies die Sekundärlufteinbringung nicht in einem starken Maße, da die Löcher in großer Anzahl in mehreren Reihen angeordnet sind. Nichts desto trotz muss dieser Bereich von Zeit zu Zeit von den Ablagerungen befreit werden. Die Ablagerungen in der Sekundärbrennzone haben keine Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb, außer dass das Quarzglas etwa stündlich gewechselt werden muss, da durch die Ablagerungen keine freie Sicht mehr auf das Brennstoffbett möglich ist und das, obwohl das Quarzglas durch eine vorgelagerte Klappe geschützt wird.

Korrosionserscheinungen treten vor allem im Bereich der Turbulatoren und über dem Wärmeübertrager auf, wo es zu großflächigen Abblätterungen des Werkstoffs kommt. Dies kann daran

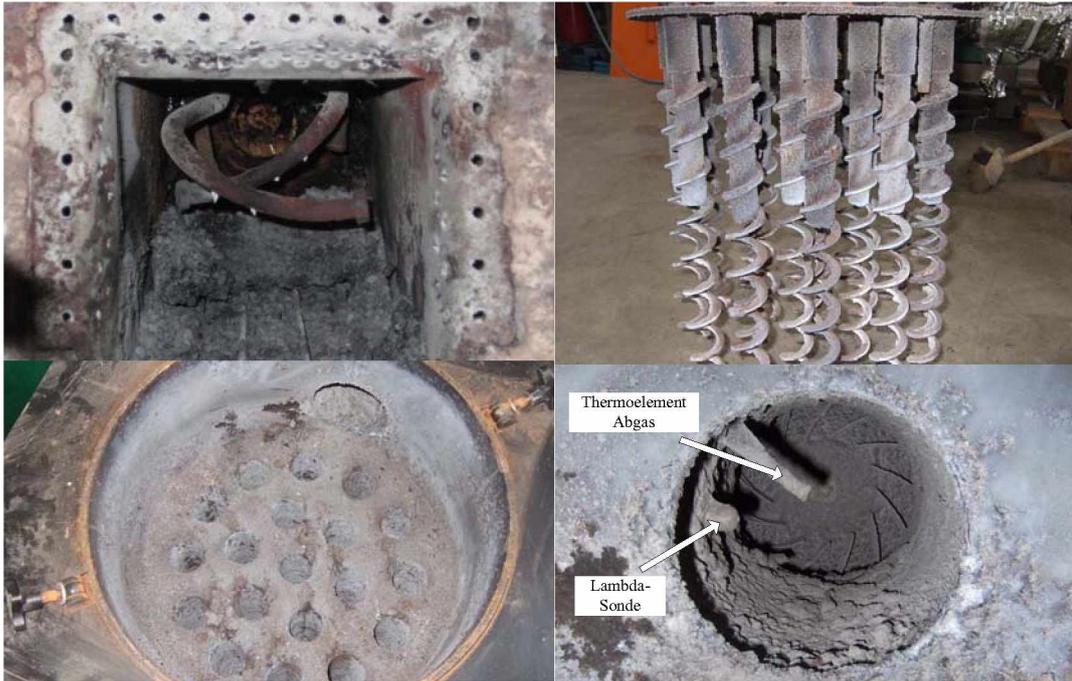


Abbildung 9.5.: Bartbildung an Düsenlöchern und Ablagerungen um Sekundärluftlöcher der fünften Version (links oben), Ablagerungen über dem Wärmeübertrager (links unten), an den Turbulatoren (rechts oben) und im Abgaskanal vor dem Saugzug (rechts unten).

liegen, dass der Werkstoff der Turbulatoren für diese Brennstoffe von nicht geeigneter Qualität ist oder es durch zu niedrige Abgastemperaturen, vor allem in der Hochfahrphase, zu Kondensation in diesem Bereich kommt. Einmal muss auch die im Abgaskanal eingebaute Lambda-Sonde ausgetauscht werden, da die Oberfläche der Sonde aufgrund von Korrosion löchrig ist. Sehr große Mengen an Ablagerungen, bestehend aus Korrosionsprodukten und Staub aus dem Abgas, sind über dem Wärmeübertrager zu finden (Abb. 9.5 links unten). Weiters ist der Abgaskanal bzw. Saugzug ebenfalls von starken Ablagerungen aus Staub des Abgases betroffen (Abb. 9.5 rechts unten).

Neben der Chargierung mit Brennstoff in Form von Pellets werden auch Versuche mit gehäckseltem, losem Miscanthus durchgeführt, um das Verhalten dieser Form des Brennstoffs kennen zu lernen. Was hier sofort auffällt, ist die Brückenbildung im Tagesbehälter. Aufgrund der faserförmigen Struktur und der ausgezeichneten Verzahnung der gehäckselten Miscanthus-Partikel sinkt das Material nicht nach unten. Zu Beginn wird ein kleiner Teil durch die Förderschnecke ausgetragen und es bildet sich im Bereich der Schnecke ein Hohlraum. Wird der Brennstoff im Behälter durch einen Gegenstand mechanisch nach unten gestoßen, so verbleibt ein zylinderförmiger Hohlraum und der Rest des Brennstoffs rutscht wiederum nicht selbstständig nach unten (Abbildung 9.6 links). Dies zeigt, dass diese Form der Austragung für diese Art des Materials völlig ungeeignet ist.

Des Weiteren kann durch die geringe Schüttdichte auch bei Dauerbetrieb des Stokers nur eine Brennstoffwärmeleistung von maximal 17 kW (dies gilt nur für Miscanthus Häckselgut) erreicht werden.

Das Flammenbild ist wieder sehr schön und man kann erkennen, dass die Primärluftstrahlen tief in das Brennstoffbett eindringen können bzw. dieses teilweise sogar aufwirbeln (Abbildung 9.6 rechts oben). Dadurch kann das ganze Brennstoffbett gut mit Verbrennungsluft versorgt werden. Der Nachteil dabei ist jedoch, dass dadurch vermehrt Partikel mit dem Abgas ausgetragen werden können. Diese Hypothese kann jedoch nicht bestätigt werden, da hier keine Staubmessung

durchgeführt wird.



Abbildung 9.6.: Brückenbildung im Vorratsbehälter mit Miscanthus-Häckselgut (links), Flammenbild (rechts oben) und Asche (rechts unten) desselben Brennstoffs.

Eine optische Beurteilung des Rückstandes lässt hier auch auf einen ausgezeichneten Ausbrand schließen (Abbildung 9.6 rechts unten). Die Messung des Unverbrannten im Rückstand und eine Umrechnung auf dadurch entgangene Leistung zeigt, dass lediglich 0,27% der Brennstoffwärmeleistung durch ungenügenden Ausbrand verloren gehen.

9.1.3. Isolierung des gesamten Brenner- und Kesselbereiches

Für die Versuche zur Leistungsmessung und die Bestimmung von Wirkungsgrad und Energiebilanzen soll die Anlage über ihre Oberfläche möglichst wenig Energie in Form von Wärme verlieren. Da der Kessel jedoch für die Versuche von der gesamten Verkleidung befreit ist sind die meisten Bauteile, außer dem Kesselteil, nicht wärmeisoliert. Auch der neue Brennerteil wird in den ersten Versuchsreihen ohne jegliche Isolierung betrieben um für Einstellungen sofort freien Zugang zu den entsprechenden Stellen zu haben und Umbauten, Reinigungen oder Servicearbeiten rascher durchführen zu können.

Deshalb werden alle, noch nicht wärmeisolierten Anlagenteile an deren Oberfläche mit wärmeisolierenden Matten ausgestattet. Dies sind vor allem der gesamte Brennerteil und die noch fehlenden Kesseloberflächen wie Boden, Aschetür, Sichtscheibe und Kesseldeckel. Daneben wird auch noch das Gehäuse des Saugzugventilators isoliert, um Kondensation im Kamin zu verringern und weiters das Rohr mit der Ascheaustragsschnecke zum Aschebehälter, da hier Wärme aus dem Kessel abgeleitet werden kann. Die unterschiedlichen Isoliergrade sind in Abbildung 9.7 anhand des Zustandes zu Beginn und nach vollständiger Isolierung der Anlage zu sehen.

9.2. Grundlegende Berechnungen an der Feuerungsanlage

In diesem Abschnitt werden grundlegende Fragen und Berechnungen, welche für die Bilanzen und Emissionen von Bedeutung sind, behandelt. Bei der Frage des Brennstoffeintrages geht es um die Problematik der genauen Erfassung der zugeführten Brennstoffmenge für die Erstellung von

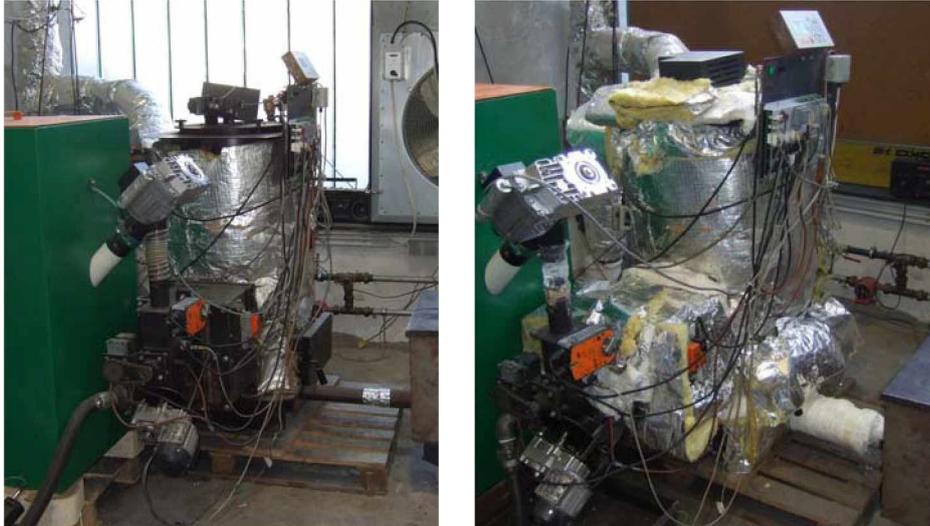


Abbildung 9.7.: Ausgangslage mit Isolierung des Kesselmantels (links) und vollständig isolierte Anlage zur Minimierung des Wärmeverlustes (rechts).

Massen- und Energiebilanzen. Ebenso wichtig ist die Berechnung der im Rückstand verbliebenen Energie. Da bei diesem Versuchsaufbau die Massen des Rückstands nicht erfasst werden kann, erfolgt dessen Ermittlung über eine aufwändige Aschebilanz, wobei verschiedenen Analysen- und Berechnungsmethoden verglichen werden.

Die Berechnung der relativen Luftmenge für vollständigen Ausbrand bzw. mit Berücksichtigung des Ausbrandes ist für die graphische Darstellung von Verschlackung und Ausbrand notwendig. Auch werden in einem Unterabschnitt die Massenverhältnisse von Flüchtigen und C_{fix} deren Energieinhalten gegenübergestellt und der dafür notwendige Mindestluftbedarf bestimmt, sowie die Luftverhältnisse primär- und sekundärseitig dargestellt.

9.2.1. Brennstoffeintrag

Um Wirkungsgrade und Bilanzen der Anlage erstellen zu können, ist die genaue Erfassung des Brennstoffeintrages essentiell. Die einfachste Methode dafür ist die experimentelle Erfassung des Pelletseintrages bei vorgegebenen verschiedenen Stokertaktverhältnissen.

9.2.1.1. Stokertaktverhältnis und dessen Zusammenhang mit der Brennstoffwärmeleistung

Wie bereits erwähnt werden die Pellets aus einer kleinen Vorlage mittels Stokerschnecke in den Brennraum gefördert. Um die geförderte Menge dosieren zu können, wird die Stokerschnecke mittels einstellbarem Ein- (T_{ein}) und Aus-Intervall (T_{aus}) betrieben.

Das Stokertaktverhältnis wird als Quotient von Einschaltzeit zum Gesamtintervall T_0 bezeichnet und dessen mathematischer Zusammenhang ist in Gleichung 9.1 definiert mit:

$$\frac{T_{ein}}{T_0} = \frac{T_{ein}}{T_{ein} + T_{aus}} \quad (9.1)$$

Die maximale Fördermenge wäre ein Dauerbetrieb mit $T_{aus}=0$ und das Stokertaktverhältnis ergäbe $T_{ein}/T_0 = 1$. Im gegensätzlichen Extremfall wäre $T_{ein}=0$ und das Stokertaktverhältnis $T_{ein}/T_0 = 0$, also keine Förderung. Daraus ist ersichtlich, dass sich das Stokertaktverhältnis nur zwischen 0 und 1 bewegen kann.

Die experimentelle Ermittlung des Pelletseintrages in den Brennraum erfolgt wie in Abbildung 9.8 dargestellt: In der Vorbeschickungsphase wird eine Tasse in den Brennraum eingebracht, welche die geförderten Pellets aufnimmt. Somit kann die in einem bestimmten Zeitraum gravimetrisch ermittelte Pelletsmenge einem eingestellten Stokertaktverhältnis zugeordnet werden. Die zugeführte Brennstoffwärmeleistung ergibt sich dann durch Multiplikation mit dem Heizwert des Brennstoffs.

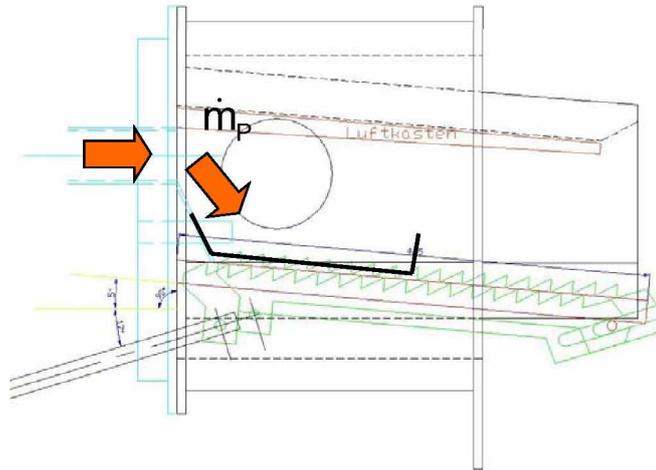


Abbildung 9.8.: Versuchsanordnung zur Bestimmung der Brennstoffwärmeleistung über das Stokertaktverhältnis.

Da die Stokerschnecke bei Deaktivierung etwa eine halbe Sekunde nachläuft, werden bei den theoretisch gleichen Stokertaktverhältnissen 3-6 oder 6-12 (entspricht $T_{ein} - T_{aus}$) unterschiedliche Mengen chargiert. So erfolgt beim Intervall 3-6 ein häufigerer Wechsel und infolge der häufigeren Nachläufe wird vergleichsweise mehr Material in den Brennraum gefördert. Deshalb wird zur besseren Vergleichbarkeit die Einschaltdauer mit $T_{ein} = 3$ Sekunden konstant gehalten und nur die Ausschaltdauer T_{aus} variiert. Das Ergebnis dieser Versuche ist in Abbildung 9.9 dargestellt.

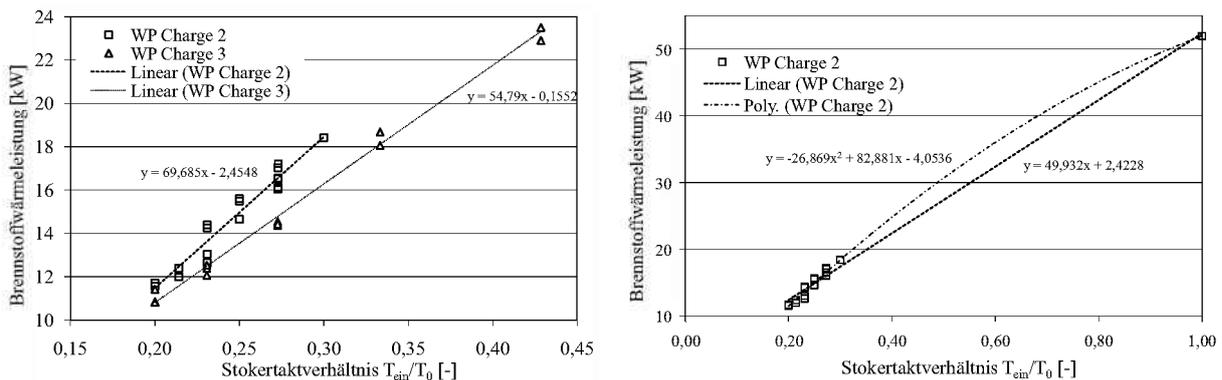


Abbildung 9.9.: Brennstoffwärmeleistung für die Chargierung von Weizenstrohpelletes der Chargen 2 und 3 in Abhängigkeit vom Stokertaktverhältnis im Bereich der Versuchseinstellungen (links) und Charge 2 mit Dauerbetrieb (rechts).

Daraus ist ersichtlich, dass es innerhalb gleicher Stokertakteinstellungen sehr große Differenzen (bis 1,6 kW oder 13 % bei Weizenstrohpellets Charge 2) bei der zugeführten Brennstoffwärmeleistung gibt, als auch zwischen verschiedenen Brennstoffchargen wie beispielsweise zwischen WP Charge 2 und Charge 3. In Abbildung 9.9 rechts, in der auch der Dauerbetrieb für WP Charge 2 einbezogen ist, sieht man deutlich das proportionale Absinken der Leistung aufgrund des Fehlens der oben

beschriebenen Nachlaufproblematik. Dies verdeutlicht auch die polynomische Regressionsgerade 2. Grades und die deutlich geringere Steigung der linearen Regressionsgerade.

Somit ist diese Methode zur Ermittlung der Brennstoffzufuhr über das Stokertaktverhältnis für genaue Berechnungen nicht geeignet.

Der Grund für diese weiten Streuungen ist sicherlich in der Pelletsgrößenverteilung zu finden. Chargen mit längeren Pellets sind nicht so dicht gepackt wie Chargen mit kürzeren Pellets oder einem großen Feinanteil. Diese Problematik fällt erstmals auf, als im Zuge der Erstellung von Energiebilanzen die Summe aus Kesselleistung und Leistung aus dem Rückstand Werte von über 100% erzielt werden. Dabei fehlen in dieser Berechnung noch die Anteile der Verlustleistungen über das Abgas und die Abwärme der Anlagenoberfläche.

9.2.1.2. Ermittlung Brennstoffwärmeleistung mittels Waage

Um den Brennstoffeintrag in die Anlage genau zu messen wird als Konsequenz der oben beschriebenen Probleme eine neue Methode angewandt. Dabei wird der Pelletsbehälter auf einer Waage positioniert und die Differenz der Masse zwischen Messbeginn und Messende errechnet. Somit wird nicht ein kurzes Zeitintervall, sondern die gesamte Messperiode über einige Stunden erfasst. Um den Pelletsbehälter mitsamt dem Austragsmechanismus von der Verbrennungsanlage mechanisch zu entkoppeln, wird der im Fallrohr vor der Brandschutzklappe serienmäßig installierte biegsame Schlauch durch ein dünne, schlauchförmige Kunststoffolie ersetzt (vgl. Abschnitt 6.1).

Die Messung beginnt, wenn der Wärmezähler auf die nächste Ziffer umspringt bzw. wenn die kleine Vorlage von der Austragsschnecke vollständig befüllt wurde. Da diese beiden Kriterien nicht synchronisiert werden können und man nicht weiss, wieviel Material in der Vorlage ist bzw. wann der Wärmezähler auf die nächste Ziffer springt, muss dies rechnerisch bewerkstelligt werden (Schema in Abbildung 9.10). Dabei beginnt die Messung bei Umspringen der Ziffer des Wärmezählers (t_1) und die Zeit bis zur nächsten Füllung der Vorlage (t_2) wird ebenfalls gemessen ($\Delta t_1 = t_2 - t_1$).

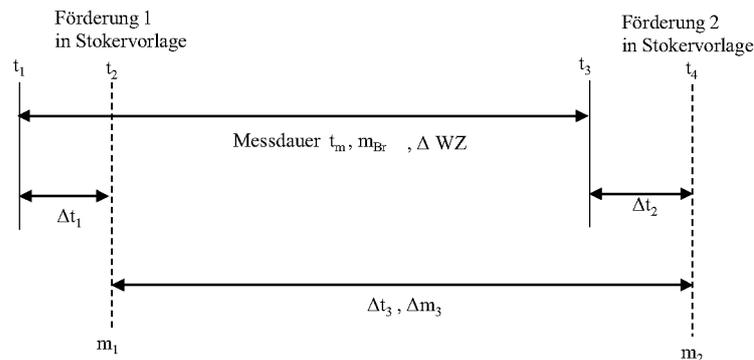


Abbildung 9.10.: Schema für die Berechnung der Waagenmessung

Wird der Versuch bei Umspringen der Ziffer des Wärmezählers beendet (t_3), beginnt die Messung der Zeispanne Δt_2 bis zur nächsten Füllung der Vorlage t_4 . Dabei liegen die Zeitspannen zwischen den Ziffernspringen des Wärmezählers, als auch jene jene zwischen den Füllungen der Vorlage im Bereich bis etwa 5 Minuten. Demnach sind für die Zeitspannen Δt_1 als auch Δt_2 Werte zwischen 0 und 5 Minuten möglich.

Es wird über die Zeitspanne $\Delta t_3 = t_m - \Delta t_1 + \Delta t_2$ die chargierte Pelletsmenge Δm_3 ermittelt und über den Quotienten dieser beiden Größen der Massenstrom des Brennstoffs \dot{m}_{Br} berechnet:

$$\dot{m}_{Br} = \frac{\Delta m_3}{\Delta t_3} \quad (9.2)$$

Nun wird davon ausgegangen, dass dieser Massenstrom des Brennstoffs \dot{m}_{Br} auch für die Zeitspanne t_m zwischen den Zeiten t_1 und t_3 gültig ist. Die Brennstoffwärmeleistung P_{BrWL} wird aus dem Produkt von Massenstrom \dot{m}_{Br} und Heizwert H_u gebildet:

$$P_{BrWL} = \dot{m}_{Br} \cdot H_u \quad (9.3)$$

Die in der Messzeit des Wärmehählers ΔWZ verbrauchte Brennstoffmenge m_{Br} ergibt sich aus dem Produkt von Massenstrom \dot{m}_{Br} und Messzeit des Wärmehählers t_m :

$$m_{Br} = \dot{m}_{Br} \cdot t_m \quad (9.4)$$

Die Nutzwärmeleistung P_{WZ} der Anlage über den Wärmehähler errechnet sich aus dem Quotienten von Messwert des Wärmehählers und der Messzeit:

$$P_{WZ} = \frac{\Delta WZ}{t_m} \quad (9.5)$$

Aus den Werten der Nutzwärmeleistung P_{WZ} und der zugeführten Brennstoffwärmeleistung P_{BrWL} kann schließlich der Wirkungsgrad der Anlage errechnet werden.

Im Zuge vieler Versuche, die ab sofort mit der Waagenmessung zur Bestimmung der zugeführten Brennstoffwärmeleistung durchgeführt werden, werden die Brennstoffwärmeleistungen für verschiedene Brennstoffe ermittelt und in einem Diagramm über dem Stokertaktverhältnis aufgetragen. In Abbildung 9.11 werden zusätzlich zu den Daten der Waagenmessung auch jene aus der Versuchsanordnung gemäß Abbildung 9.8 bzw. Abbildung 9.9 dargestellt (WP Charge 2, WP Charge 3).

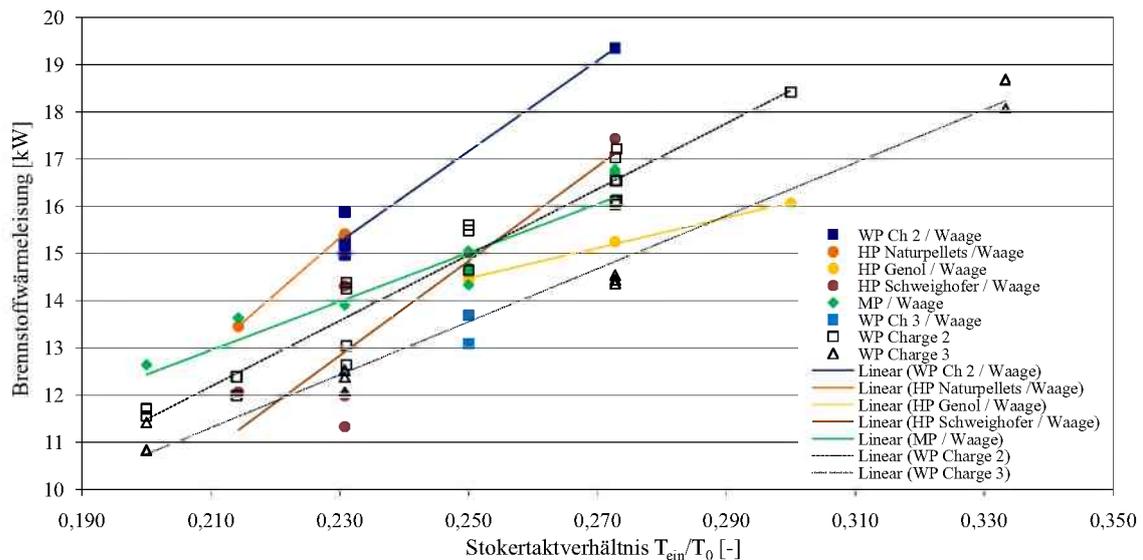


Abbildung 9.11.: Brennstoffwärmeleistungen bei verschiedenen Stokertakteinstellungen und für verschiedene Brennstoffe: Ermittlung über die Waagenmessung, zusätzlich WP Charge 2 und Charge 3 über Versuchsanordnung laut Abbildung 9.8.

Wie schon in Abbildung 9.9 sind hier wieder die extremen Unterschiede zwischen den einzelnen Brennstoffen bzw. Chargen als auch innerhalb einer einzelnen Gruppe zu sehen. So sind zum Beispiel die Messungen der Weizenpellets (WP Ch2/Waage) mit jenen über die frühere Methode (WP Charge 2) überhaupt nicht ähnlich. Bei den Holzpellets haben die Regressionsgeraden der drei verschiedenen Produkte (HP Naturpelletes, HP Genol, HP SCHWEIGHOFER) sehr unterschiedliche Steigungen.

Es zeigt sich hier nochmals, dass es unbedingt notwendig ist, die gesamte Pelletsmenge über den gesamten Messzeitraum zu erfassen. Ausschnitte daraus und damit abgeleitete Hochrechnungen würden unweigerlich zu falschen Ergebnissen führen.

Dies macht auch die Problematik einer konstanten Verbrennungsführung deutlich, sowohl für separate Versuche, als auch was die Bedingungen innerhalb eines Versuches betrifft. Beispielsweise zeigt das Diagramm in Abbildung 9.11, dass sich bei der Chargierung von Holzpellets SCHWEIGHOFER (HP Schweighofer/Waage) bei einer Stokertakteinstellung von $T_{ein}/T_0 = 0,231$ Brennstoffwärmeleistungen einmal von 11,3 kW und bei einem anderen Versuch von 14,3 kW, d.h. Differenzen bis zu 26 %, ergeben. Bei diesen Leistungsschwankungen müssten auf jeden Fall die Primärlufteinstellungen und der Rostvorschub angepasst werden, doch ist der genaue Leistungswert erst an Ende eines Versuches bekannt. Für Schwankungen innerhalb der Messperiode gibt es noch weniger die Möglichkeit einer Erfassung, um in der Folge Parameter einstellen zu können.

9.2.2. Konsistenz des Rückstandes, Probenahme und Berechnung des Unverbrannten im Rückstand

Nach dem Abwerfen der Asche vom Rost in den Kesselteil wird diese durch eine Ascheaustragschnecke, die intervallartig über eine separate Steuerung aktiviert wird (z.B. 6 Sekunden EIN, 12 Sekunden AUS), in den Aschebehälter transportiert. Die Form der im Aschebehälter ankommenden Asche bzw. Rückstand ist in Abbildung 9.12 zu sehen.



Abbildung 9.12.: Asche im Aschebehälter bei Versuchen mit Weizenstrohpellets der Charge 2.

Dabei kann hier in drei Fraktionen unterteilt werden: In Partikel, die in der Form dem eingesetzten Brennstoff gleichen, in einen Feinanteil und in verschlackte Partikel. Der Feinanteil hat seine Herkunft aus dem Feinanteil des eingesetzten Brennstoffes und aus dem Abrieb größerer Brennstoffpartikel auf dem Rost und vor allem aufgrund des Transports von Rückstandspartikel durch die Ascheaustragsschnecke. Die pelletsförmigen Rückstandspartikel haben eine feste Konsistenz und bilden ein stabiles Asche-Kohlenstoff- Gerüst. Aufgrund dieser festen Asche-Kohlenstoff-

Matrix mit dem im Vergleich zu Holz hohen Ascheanteil kann auch der am Rost zugeführte Sauerstoff kaum in das Innere des Partikels eindringen, was sich in einem ungenügenden Ausbrand des Rückstandes äußert [216]. Die verschlackten Partikel mit einer Größe bis etwa 5 cm entstehen durch überhitzte Bereiche am Rost, vor allem an der Oberfläche des Brennstoffbettes. Diese oberflächlichen Schollen haben eine Größe bis zu 0,5 dm², im Extremfall bei Überhitzung bis 10 x 20 cm, wobei durch den Transport mit der Ascheaustragsschnecke eine Zerkleinerung auf die oben genannte Größe stattfindet.

Um den Ausbrand bzw. den brennbaren Anteil des Rückstandes ermitteln zu können, müssen Proben entnommen werden, um diese im Labor analysieren zu können. Dafür wird eine Blechtasse direkt am Ausgang der Ascheförderkanals im Aschebehälter positioniert, um den ausgetragenen Rückstand aufnehmen zu können (Abb. 9.13). Mit dieser Methode werden Entmischungserscheinungen oder Probenahmefehler minimiert, da Teile des gesamten Massenstromen entnommen werden. Um eine repräsentative Probenmenge der gesamten, über den Versuchszeitraum anfallenden Rückstandsmenge zu erhalten, erfolgt die Sammlung von kleineren Mengen in regelmäßigen Zeitabständen. Diese Einzelmengen werden unmittelbar nach jeder Probenahme in einem verschlossenen Laborgefäß gesammelt. Durch die Manipulation aufgenommenes Wasser wird im Labor ermittelt und die gemessenen Analysenwerte der Zusammensetzung auf Trockensubstanz bezogen.



Abbildung 9.13.: Probenahme der Asche im Aschebehälter.

Probenahmen im Kessel, unmittelbar nach dem Rost, sind aufgrund des vorherrschenden hohen Temperaturen nicht praktikabel, Entnahme von Teilmengen aus der Schüttung im Aschebehälter führen, wie bereits oben erwähnt, zu Probenahmefehler.

Zu beachten ist, dass nach der Positionierung der Proben tasse der Deckel des Aschebehälters wieder sorgfältig geschlossen wird (siehe auch Dichtungsband in Abb. 9.13 links). Ist diese nicht der Fall, wird durch den in der Anlage herrschenden Unterdruck Falschluf t über den Ascheförderkanal angesaugt. Dies führt einerseits zu einer Beeinträchtigung der Bedingungen in der Sekundärzone und verfälschten Messwerten an der Lambdasonde, andererseits, und dies ist im Zusammenhang mit der Ausbrandqualität viel wesentlicher, findet eine weitere Verbrennung des Rückstandes im Ascheförderkanal statt. Dies äußert sich derart, dass der geförderte Rückstand im Ascheförderkanal intensiv zu glühen beginnt und „nachverbrannt“ wird, was natürlich den Anteil des Brenn baren im Rückstand deutlich verringert. Des weiteren werden Ascheförderkanal und Aschebehälter an deren Oberflächen sehr heiß und es bilden sich Glutnester im Aschebehälter. Außerdem kann der gesammelte Rückstand im heißen Zustand nicht in Kunststoff sammelgefä ße umgefüllt werden.

Um die im Labor ermittelten brennbaren Anteil im Rückstand vergleichbar zu machen und auf die Basis der Brennstoffzusammensetzung umzurechnen, sind die hier folgenden Überlegungen notwendig. Dies ist ebenso für die Ermittlung des Rückstands-Massenstromes im Zuge der Energie-

und Massenbilanzen erforderlich, da bei dieser Anlagenkonstellation die verbleibende Rückstandsmasse nicht direkt gemessen werden kann.

Der Rückstand besteht vorwiegend aus Asche und Kohlenstoff sowie geringen Anteilen an weiteren Elementen wie Schwefel, Chlor, Stickstoff und Wasserstoff. Da die im Labor gemessenen prozentuellen Anteile natürlich auf die gesamte Rückstandsmenge mit 100 Gew-% bezogen sind, sind diese nicht unmittelbar mit der prozentuellen Verteilung des eingesetzten Brennstoffs als Basis vergleichbar (siehe dazu die Abbildung 9.14).

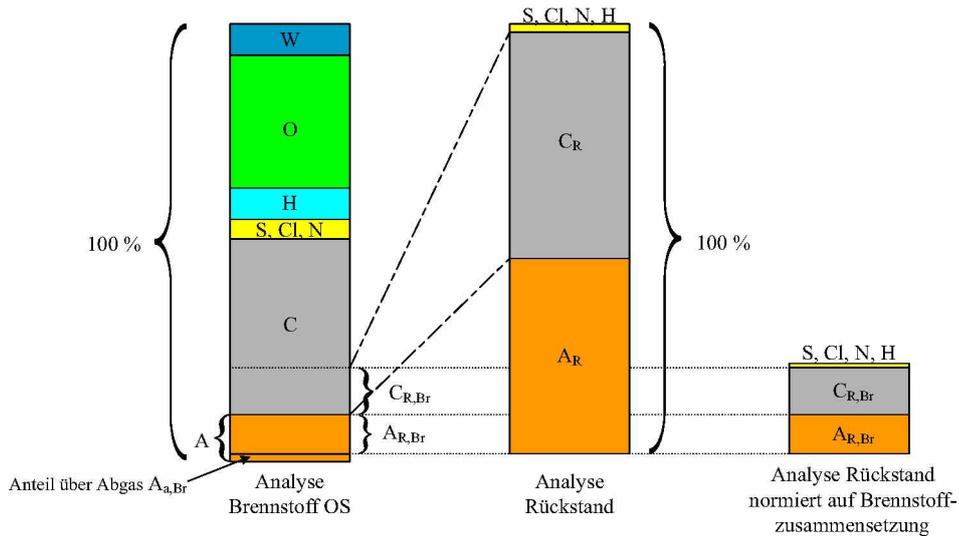


Abbildung 9.14.: Normierung der Ascheanalysen auf Brennstoffzusammensetzung der Originalsubstanz.

Bei der Umrechnung ist hier zu beachten, dass nicht der gesamte eingesetzte Asche-Massenstrom auch wieder jenem im Rückstand entspricht, da ein kleiner Anteil über das Abgas ausgetragen wird. Eine Abschätzung dieser Menge ist in Unterabschnitt 9.2.3.1 zu finden.

Der formale Zusammenhang der Gehalte in Rückstand und Brennstoff ist in Gleichung 9.6 dargestellt:

$$\frac{C_{R,Br}}{A_{R,Br}} = \frac{C_{R,Br}}{A - A_{a,Br}} = \frac{C_R}{A_R} \quad (9.6)$$

Der im Abgas abgeführte Ascheanteil $A_{a,Br}$ wird laut Gleichung folgendermaßen definiert:

$$A_{a,Br} = A \cdot A_{a,A} \quad (9.7)$$

AAschegehalt des Brennstoffs der OS

$A_{a,A}$Ascheanteil der über das Abgas abgeführt wird, bezogen auf die gesamte Asche

$A_{a,Br}$Ascheanteil der über das Abgas abgeführt wird, bezogen auf Brennstoffzusammensetzung

A_R ...Aschegehalt im Rückstand

$A_{R,Br}$Aschegehalt im Rückstand bezogen auf Brennstoffzusammensetzung

C_RKohlenstoffgehalt im Rückstand

$C_{R,Br}$Kohlenstoff im Rückstand bezogen auf Brennstoffzusammensetzung der OS

Für die Praxis kann angenommen werden, dass der Rückstand nur mehr aus Asche und Kohlenstoff besteht. Die ebenfalls noch im Rückstand vorhandenen andere Elemente wie S, Cl, N, H ergeben in Summe bei Umrechnung auf Brennstoffzusammensetzung nur einen Anteil von ca. 0,25 Gew-%, sodass hier diese Vereinfachung getroffen werden kann. Außerdem leisten S und H auch einen energetischen Beitrag, sodass dieser kleine Anteil annähernd zum Kohlenstoff gerechnet werden kann, was auch bei der Heizwertbestimmung oder Veraschung des Rückstandes zum Tragen kommt.

9.2.3. Berechnung des theoretischen Energieinhalts im Rückstand

Der Ausbrandgrad des Brennstoffs wird über den brennbaren Anteil im Rückstand bestimmt. Diese Information ist jedoch für sich nicht aussagekräftig genug, um sich den dadurch resultierenden Leistungsverlust vorstellen zu können. Wird der brennbare Anteil in einen Leistungswert umgewandelt, lässt sich der Leistungsverlust durch ungenügenden Ausbrand verständlicher darstellen. Wird dieser Wert der Minderleistung in Relation zur Brennstoffwärmeleistung gesetzt, so entspricht diese direkt der Wirkungsgradeinbuße durch den ungenügenden Ascheausbrand.

Dabei bestehen in der vorliegenden Anlagenkonstellation drei Möglichkeiten diese Leistungseinbuße aus der Analyse des Rückstandes zu berechnen:

- Gesamte Brennbare im Rückstand (Glühverlust) wird als Kohlenstoff angenommen
- Bestimmung des Heizwertes des Rückstands
- Elementaranalyse des Rückstands bezüglich Kohlenstoff und Wasserstoff

Grundlage dieser Berechnung ist der Massenstrom des Rückstandes über den diese verschiedenen Berechnungsmethoden angewendet werden können. Da bei dieser Versuchsanordnung der Massenstrom des Rückstandes nicht gemessen bzw. gewogen wird, erfolgt dessen Bestimmung über die Aschegehalte der Pellets und des Rückstandes.

Aufgrund der Kenntnis des Massenstromes der eingetragenen Pellets \dot{m}_P kann über den Ascheanteil A der Massenstrom der Asche \dot{m}_A bestimmt werden. Dieser ist theoretisch gleich dem mit dem Rückstand ausgetragenen Asche-Massenstrom. Durch Analyse des Rückstandes kann der Aschegehalt des Rückstandes A_R und somit auch der Massenstrom des Rückstandes \dot{m}_R ermittelt werden.

9.2.3.1. Fehlerkorrektur bei der Berechnung des Rückstand-Massenstromes aufgrund des Ascheverlustes über das Rauchgas

Nun wird jedoch ein Teil der Asche auch mit dem Abgasstrom in Form von Staub $\dot{m}_{A,a}$, ohne brennbarem Anteil, ausgetragen als auch im Kessel abgelagert. Somit wird dann in der Analyse des Rückstandes um diesen Anteil zu wenig Asche gemessen und der brennbare Anteil erhöht sich. Die folgenden Überlegungen sollen klären, inwiefern dieser Anteil des Ascheverlustes über das Rauchgas für die Berechnung überhaupt relevant ist bzw. evtl. sogar vernachlässigt werden kann.

Die mit dem Abgasstrom aus der Anlage transportierte Staubmenge kann über eine, bei Staubmessungen gemessene, mittlere Staubkonzentration bei der Verbrennung von Weizenstrohpellets (z.B. Charge 2) ermittelt werden:

Staubkonzentration im Abgas c_{St} : ca. $400 \text{ mg/Nm}^3 = 400 \text{ ng/l}$

spezifische Abgasmenge v_a : $10,3 \text{ Nm}^3/\text{kgOS} = 10,31/\text{gOS}$

Eintrag von Brennstoff \dot{m}_P : $1,0368 \text{ g/s}$

$$\text{Abgasvolumenstrom: } \dot{V}_a = \dot{m}_P \cdot v_a = 10,6791/\text{s}$$

$$\text{Staubmassenstrom im Abgas: } \dot{m}_{St,a} = \dot{V}_a \cdot c_{St} = 0,00427 \text{ g/s}$$

Da der Staub hauptsächlich aus Kaliumchlorid (KCl) besteht (vgl. Unterabschnitt 9.5.4) und das Chlor bei der Brennstoffanalyse nicht der Asche zugerechnet wird, muss der Anteil des Chlors abgezogen werden. Der Massenstrom des Kaliums im Abgasstaub $\dot{m}_{K,a}$ kann über die Stöchiometrie des KCl ermittelt werden.

$$\text{Massenstrom des Kaliums im Staub des Abgases: } \dot{m}_{K,a} = \frac{39}{74} \cdot \dot{m}_{St,a} = 0,00225 \text{ g/s}$$

$$\text{Massenstrom Asche im Brennstoff: } \dot{m}_A = \dot{m}_P \cdot a = 1,0368 \cdot 0,0717 = 0,07434 \text{ g/s}$$

$$\text{prozentueller Asche-Anteil } \dot{m}_{K,a}/\dot{m}_A = 0,00225/0,07434 = 3,03 \%$$

$$\text{prozentueller Anteil bzogen auf Pellets: } \dot{m}_{St,a}/\dot{m}_P = 0,00225/1,0368 = 0,22 \%$$

D.h. 3,03 % der Brennstoffasche - in Form von Kalium - werden aus der Anlage über den Abgasweg ausgetragen, was 0,22 % des eingesetzten Brennstoffs entspricht (vgl. Unterabschnitt 3.3.7).

Der Anteil des über den Staub in Form von KCl ausgetragenen Chlors beträgt 0,20 % bezogen auf den Brennstoff. Im Vergleich mit dem im Brennstoff vorhandenen Chlor von 0,46 % laut Brennstoffanalyse (Tab. 7.2, WP Ch2) werden somit beinahe die Hälfte des Chlors in Form von KCl, der andere Teil wahrscheinlich in Form von Chlorwasserstoff HCl mit dem Abgas ausgetragen.

Da zwischen der Staubkonzentration im Abgas und dem Aschegehalt im Brennstoff eine starke Korrelation besteht (vgl. Abbildung 9.50), kann dies auch auf die Brennstoffe Miscanthus und annähernd auf Holz übertragen werden (WP: ca. 50 mg/m³ pro %-Punkt Asche TS, MP: ca. 60 mg/m³ pro %-Punkt Asche TS, HP: ca. 90 mg/m³ pro %-Punkt Asche TS).

Weiters findet auch eine Deposition von Staub in der Sekundärbrennzone, im Wärmeübertrager, sowie im Abgasweg bis zur Staubmessung statt. Die Menge des in diesen Bereichen abgelagerten Staubes kann nur schwer abgeschätzt werden. Aufgrund der bei einer Vielzahl von Versuchen gefundenen Ablagerungen auf Scheibe, im Wärmeübertrager oder in den Abgasrohren (siehe Abbildungen 9.5 und 9.49) kann dieser Wert für die Asche über den Abgasweg, bezogen auf die Asche ($A_{a,A}$) durch eine grobe Schätzung auf 5 % erhöht werden. Damit ergibt sich für Rückstands-Asche, bezogen auf Brennstoffzusammensetzung:

$$A_{R,Br} = A \cdot (100 - A_{a,A}) \quad (9.8)$$

Dieser Fehler durch den Aschestrom im Abgas muss korrigiert werden, da er ebenfalls mit etwa diesem Prozentbereich in die Leistungsberechnung des Rückstandes eingeht. In Abbildung 9.15 ist der Zusammenhang der Korrektur und die Einbindung dieses Wertes in die Berechnung graphisch dargestellt.

Berechnung des Massenstromes des Rückstandes \dot{m}_R : Da der Pelletseintrag \dot{m}_P bekannt ist, kann der Ascheeintrag \dot{m}_A über den Ascheanteil der Pellets a ermittelt werden:

$$\dot{m}_A = \dot{m}_P \cdot a \quad (9.9)$$

Der Massenstrom der Asche \dot{m}_A in den Pellets entspricht der Summe der Massenströme von Rückstandsasche und Asche im Abgas:

$$\dot{m}_A = \dot{m}_{A,R} + \dot{m}_{A,a} \quad (9.10)$$

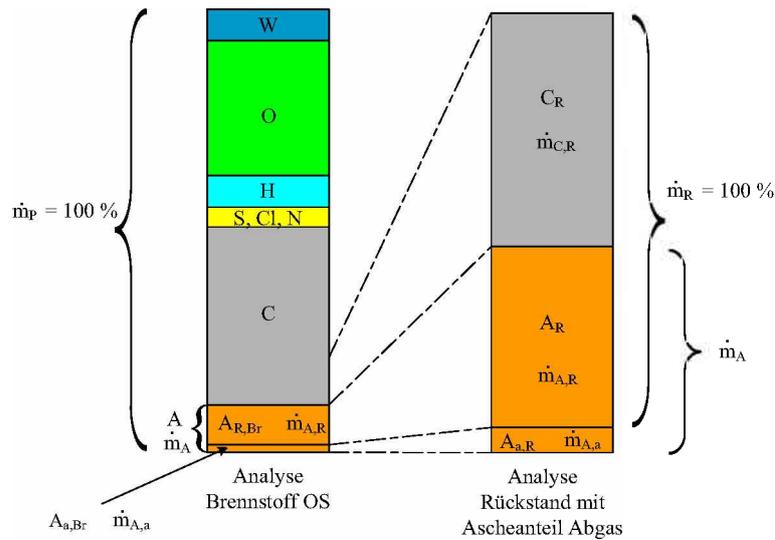


Abbildung 9.15.: Zusammenhang von Gehalten und Massenströmen der zugeführten Pellets und dem Rückstand bzw. Ascheanteil über das Abgas.

Der Massenstrom der Asche $\dot{m}_{A,R}$, welcher über den Rückstand ausgetragen wird, ergibt sich aus dem Massenstrom der Pellets \dot{m}_P und dem laut Glg. 9.8 auf Brennstoffzusammensetzung normierten Ascheanteil im Rückstand $A_{R,Br}$:

$$\dot{m}_{A,R} = \dot{m}_P \cdot \frac{A_{R,Br}}{100} = \dot{m}_P \cdot \frac{A \cdot (100 - A_{a,A})}{100} \quad (9.11)$$

Der Massenstrom des Rückstandes \dot{m}_R kann aus dem Massenstrom mit Hilfe des Aschegehaltes des Rückstandes ermittelt werden:

$$\dot{m}_R = \frac{\dot{m}_{A,R}}{A_R} \cdot 100 = \dot{m}_P \cdot \frac{A_{R,Br}}{A_R} = \dot{m}_P \cdot \frac{A \cdot (100 - A_{a,A})}{A_R} \quad (9.12)$$

Auf der Basis dieser Berechnungen ist man nun in der Lage die drei oben genannten Berechnungsmethoden für die Ermittlung der über den Rückstand verloren gegangenen Leistung durchzuführen.

9.2.3.2. Gesamten brennbaren Anteile im Rückstand (Glühverlust) werden als Kohlenstoff angenommen

Hier wird angenommen, dass neben der Asche im Rückstand nur Kohlenstoff vorhanden ist. Dabei ist nur eine Veraschung im Muffelofen durchzuführen, wobei der Glühverlust die Differenz der Asche auf die Ausgangsmasse darstellt. Auf Basis des oben ermittelten Massenstromes des Rückstandes \dot{m}_R kann der Massenstrom des Kohlenstoff-Anteils im Rückstand $\dot{m}_{C,R}$ über die Analysenzusammensetzung von c_R (entspricht $\frac{(100-A_R)}{100}$) ermittelt werden:

$$\dot{m}_{C,R} = \dot{m}_R \cdot c_R \quad (9.13)$$

Wird Gleichung 9.12 in Gleichung 9.13 eingesetzt ergibt sich:

$$\dot{m}_{C,R} = \dot{m}_P \cdot \frac{A_{R,Br}}{A_R} \cdot c_R \quad (9.14)$$

Die Leistung des Brennbares im Rückstand und somit des gesamten Rückstandes P_R errechnet sich mit der Bildungsenthalpie des Kohlenstoffs zu Kohlenstoffdioxid ($\Delta_R H_{CO_2}^0 = -393,51 \text{ kJ/mol}$ [63], dies entspricht $-32,76 \text{ kJ/gC}$):

$$P_R = \dot{m}_{C,R} \cdot \Delta_R H_{CO_2}^0 \quad (9.15)$$

9.2.3.3. Bestimmung des Heizwertes des Rückstands

Ausgehend von der Ermittlung des Rückstand-Massenstromes \dot{m}_R nach den Gleichungen 9.12 kann über den im Labor kalorimetrisch bestimmten Heizwert $H_{u,R}$ des Rückstands die Leistung P_R nach Gleichung 9.16 berechnet werden:

$$P_R = \dot{m}_R \cdot H_{u,R} \quad (9.16)$$

9.2.3.4. Elementaranalyse des Rückstands bezüglich Kohlenstoff und Wasserstoff

Wiederum ist der Ausgangspunkt dieser Berechnung der Rückstand-Massenstromes \dot{m}_R . Durch Analyse der Rückstands im Labor mittels Elementaranalysator können die Gehalte an Kohlenstoff c_R und Wasserstoff h_R im Rückstand gemessen werden. Mit Hilfe der Bildungsenthalpien von Kohlenstoff und Wasserstoff zu Kohlenstoffdioxid und Wasser ($\Delta_R H_{H_2O}^0 = -241,83 \text{ kJ/mol}$ [63], dies entspricht $-119,97 \text{ kJ/gH}$) lässt sich nun die Leistung im Rückstand über Gleichung 9.17 bestimmen:

$$P_R = \dot{m}_R \cdot (c_R \cdot \Delta_R H_{CO_2}^0 + h_R \cdot \Delta_R H_{H_2O}^0) \quad (9.17)$$

9.2.3.5. Vergleich der Berechnungsmethoden anhand von Rückständen verschiedener Versuche

Anhand von vier Versuchen werden diese drei Berechnungsmethoden überprüft und miteinander verglichen. Dabei wird die Anlage bei einer Brennstoffwärmeleistung von 16,4 kW mit verschiedenen Primärlufteinstellungen und Rostgeschwindigkeiten betrieben. Die gesammelten Ascheproben werden im Labor auf Kohlenstoff und Wasserstoff, Heizwert und Glühverlust untersucht und auf Basis der drei oben dargestellten Vorgangsweisen der Leistungsinhalt der Rückstände untersucht. Daneben wird auch die daraus resultierende Minderung der Wirkungsgrade ermittelt, wobei jeweils der Leistungswert zur Brennstoffwärmeleistung in Relation gesetzt wird. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9.16 dargestellt.

Es zeigt sich, dass der Unterschied sehr gering ist und die Berechnung mittels Heizwert jeweils einen geringfügig höheren Wert ergibt. Die größte Differenz bei Versuch 2, zwischen der Berechnung mittels Glühverlust und Heizwert, ergibt bezüglich der Brennstoffwärmeleistung lediglich einen Unterschied von 0,6%. Somit kann die Berechnungsmethode, bei welcher der Glühverlust als Kohlenstoff angenommen wird, für die weitere Auswertung verwendet werden. Dies hat natürlich den Vorteil, dass für die Bestimmung des Glühverlustes keine aufwändigen Geräte verwendet werden müssen.

9.2.4. Berechnung der relativen Primärluftmenge

Um die zugeführte Primärluft für verschiedene Versuche vergleichen zu können, wird die stöchiometrisch notwendige Luftmenge (Mindestluftmenge \dot{L}_{min}) als Basis verwendet. Als Größe fungiert

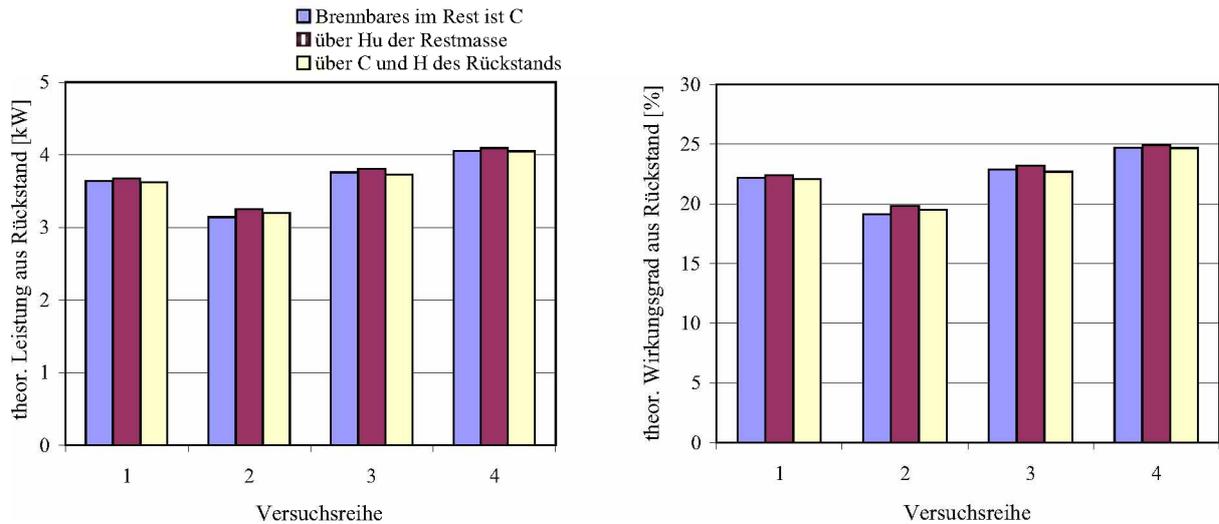


Abbildung 9.16.: Vergleich der Berechnungsmethoden zur Ermittlung des Brennbarens im Rückstand; Brennstoffwärmeleistungen (links) und Wirkungsgrade dieser im Rückstand verbleibenden Brennstoffwärmeleistung bezüglich eingesetzte Brennstoffwärmeleistung von 16,4 kW (rechts).

nicht mehr die absolute, sondern die relative Primärluftmenge l_{rel} , indem das Verhältnis von primär zugeführter Luftmenge \dot{L} zu Mindestluftmenge \dot{L}_{min} des Brennstoffs in Prozent angegeben wird:

$$l_{rel} = \frac{\dot{L}}{\dot{L}_{min}} \cdot 100 \quad (9.18)$$

Man kann hier die Primärluftmenge l_{rel} auch als Luftzahl Lambda am Rost verstehen.

Dabei errechnet sich die Mindestluftmenge (in l/s)

$$\dot{L}_{min} = l_{min,t} \cdot \dot{m}_P \quad (9.19)$$

wobei sich die spezifische Mindestluftmenge bei Umgebungstemperatur $l_{min,t}$ (in m^3/kgOS) wie folgt ermittelt wird:

$$l_{min,t} = l_{min,0^\circ\text{C}} \cdot \frac{273,15 + t_L}{273,15} \quad (9.20)$$

Die Berechnung der spezifischen Mindestluftmenge bei Normtemperatur $l_{min,0^\circ\text{C}}$ erfolgt im Zuge der Verbrennungsrechnung.

Da jedoch ein Teil des Brennstoffs nicht umgesetzt wird, kann dies in der Berechnung der zugeführten relativen Luftmenge berücksichtigt werden, indem der nicht verbrannte Kohlenstoff $C_{R,Br}$ vom Brennstoffkohlenstoff abgezogen und der Asche zugerechnet wird:

$$C_{verbr} = C - C_{R,Br} \quad (9.21)$$

Dabei ist C_{verbr} der bei der Verbrennung tatsächlich umgesetzte Kohlenstoff.

Die Berechnung der Mindestluftmenge erfolgt dann nicht mehr über die Verbrennungsrechnung, sondern auf einfacherem Wege gut angenähert über eine lineare Funktion zwischen Mindestluftmenge und Kohlenstoffgehalt.

$$l_{min,0^{\circ}C} = C_{verbr} \cdot x + y \quad (9.22)$$

Diese Funktion wird im Vorhinein aus drei bis vier Datenpunkten für jeden Brennstoff bestimmt (Abb. 9.17) und kann dann im Excel-Berechnungsformular einfacher als die Verbrennungsrechnung zur Berechnung der Mindestluftmenge eingesetzt werden.

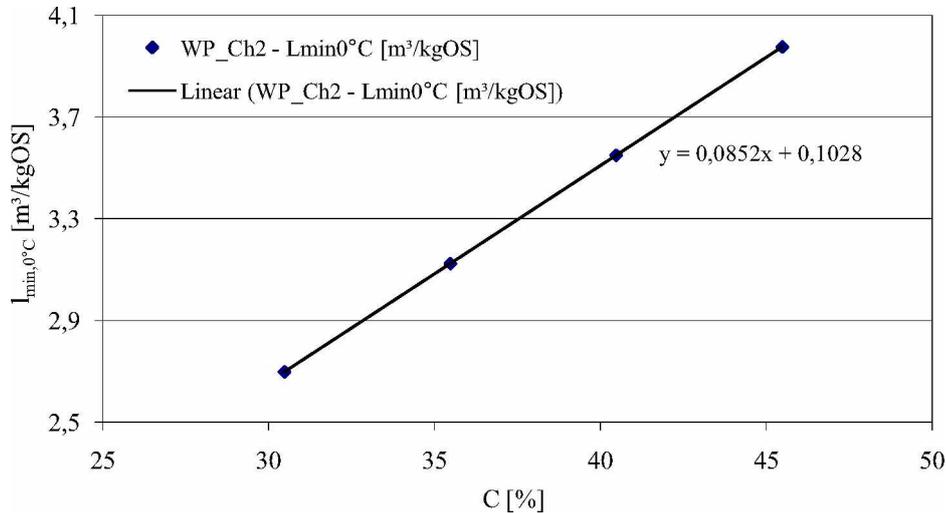


Abbildung 9.17.: Funktion zur einfacheren Bestimmung des spezifischen Mindestluftbedarfes $l_{min,0^{\circ}C}$ in Abhängigkeit des Kohlenstoffgehaltes im Brennstoff am Beispiel von Weizenstohpellets der Charge 2.

Diese relative Primärluftmenge l_{rel} , als auch die relative Primärluftmenge mit Berücksichtigung des Ausbrandes $l_{rel,Ausbr}$ wird auch zum Vergleich weiterer Untersuchungsparameter wie z.B. Verschlackungserscheinungen oder Ausbrand benötigt.

9.2.5. Massenverhältnisse, Heizwert und Mindestluftbedarf von Flüchtigen und C_{fix}

In diesem Unterabschnitt soll herausgefunden werden, wie viel Primärluft für den vollständigen Umsatz des Kohlenstoffs im Brennstoffbett nach der Pyrolysezone notwendig ist. Dabei werden auch die Massenverhältnisse sowie die Heizwerte der Flüchtigen Bestandteile und des C_{fix} (Fixed Carbon) für die Brennstoffe Weizenstohpellets Ch2, Miscanthuspellets und Holzpellets (Schweighofer) miteinander verglichen. Bei diesen Berechnungen wird generell davon ausgegangen, dass nach Entweichen der Flüchtigen aus dem Brennstoff nur mehr Kohlenstoff und Asche verbleiben, abweichend von den Messungen des Unterabschnittes 9.3.3, wo gezeigt wird, dass sich noch kleine Anteile von Wasserstoff, Stickstoff, Schwefel und Chlor neben dem verbleibenden Koks vorhanden sind.

Der Massenanteil „ C_{fix} + Asche (Koks)“ ist die Differenz der Flüchtigen zu 100%, wobei hier der Anteil der Asche noch vorhanden ist. Beim Massenanteil „af“ (aschefrei) wird der Ascheanteil des Brennstoffs abgezogen und nur das Verhältnis von C_{fix} und Flüchtigen betrachtet. Beim Vergleich der Anteile „af und ohne O-N-Cl“ werden zusätzlich die nicht brennbaren Komponenten wie Sauerstoff, Stickstoff und Chlor, welche idealerweise mit den Flüchtigen entweichen, abgezogen und nur die verbleibenden brennbaren Anteile dargestellt. Damit können die Massen nur der brennbaren Anteile mit dem eigenen Heizwertanteil und dem Anteil des Mindestluftbedarf verglichen werden.

Die Säule „Heizwert“ zeigt die Verhältnisse der Heizwerte des Koks (bzw. C_{fix}) und der Flüchtigen. Dabei wird der Heizwert des Kohlenstoffs über die Bildungsenthalpie berechnet und der Heizwert

der Flüchtigen sich dann über die Differenz zum gesamten Heizwert des Brennstoffs ergibt. Die Säule „Mindestluftbedarf“ illustriert die Anteile an Verbrennungsluft, welche zum thermochemischen Umsetzung des Kokes (bzw. C_{fix}) und der Flüchtigen notwendig ist. Die Berechnung erfolgt über die Verbrennungsrechnung des jeweiligen Brennstoffs bzw. reinen Kohlenstoffs. Der Mindestluftbedarf der Flüchtigen ergibt sich wiederum aus der Differenz des Mindestluftbedarfs des reinen Kohlenstoffs zu jenem des gesamten Brennstoffs.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 9.18 in drei getrennten Säulendiagrammen für die Brennstoffe Weizenstrohpellets Ch2, Miscanthuspellets und Holzpellets dargestellt.

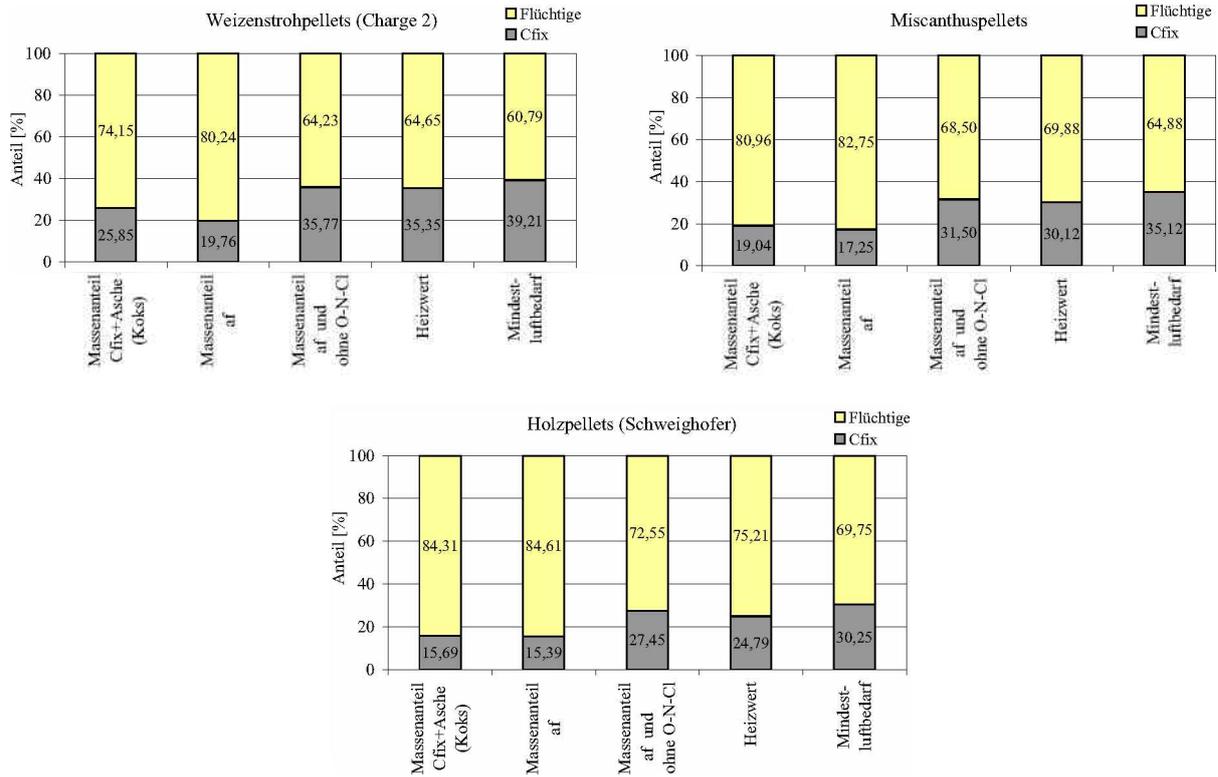


Abbildung 9.18.: Massenverhältnisse, Heizwert und Mindestluftbedarf für Flüchtige und C_{fix} der Brennstoffe Weizenstrohpellets Ch2, Miscanthuspellets und Holzpellets.

Bezüglich der Massenanteile der Flüchtigen ist der hohe Anteil von 84,31% der Holzpellets hervorzuheben. Dem gegenüber verbleiben lediglich 15,69% an Koks (C_{fix} und Asche), welche am Rost umgesetzt werden müssen. Als Kontrapunkt dazu hat der Brennstoff Weizenstrohpellets Ch2 mit 74,15% einen um etwa 10 %-Punkte geringeren Anteil an Flüchtigen. Dem entsprechend muss am Rost mehr Koks umgesetzt werden, was neben dem stabilen Asche-Kohlenstoff-Gerüst ein Grund für den schwer zu erreichenden vollständigen Ascheausbrand der Weizenstrohpellets ist. Der Brennstoff Miscanthuspellets liegt genau zwischen den beiden beschriebenen Brennstoffen.

Wird bei dieser Bilanz die Asche nicht berücksichtigt (bezogen auf aschefrei af), so ist dieser Unterschied zwar nicht mehr so deutlich, jedoch mit 15,39% für Holzpellets und 19,76% für Weizenstrohpellets noch klar erkennbar.

Werden bei den Flüchtigen die nicht brennbaren Anteil wie Sauerstoff, Stickstoff und Chlor abgezogen, so verbleiben bei der Darstellung der Massenverhältnisse nur brennbare Komponenten. Der Unterschied zwischen Weizenstrohpellets mit 35,77% C_{fix} und Holzpellets mit 27,45% C_{fix} wird hier wieder deutlicher.

Bezüglich des Heizwertes der Flüchtigen und des C_{fix} ist der Unterschied zwischen Weizenstroh-

(35,35 %) und Holzpellets (24,79 %) mit fast 11 %-Punkten wieder sehr groß. D.h. im Koks der Weizenstrohpellets ist aufgrund der gegenüber Holzpellets größeren Menge auch mehr Energie enthalten.

Anhand der Verhältnisse der Mindestluftmengen ist zu sehen, dass für den restlosen Umsatz des Kokes von Weizenstrohpellets fast 40 % der gesamten Mindestluftmenge notwendig ist. Für Holzpellets sind es nur 30,25 %, für Miscanthuspellets 35,12 %. Es ist hier auch gut zu sehen, dass der Kohlenstoff (C_{fix}) auch mehr Luft zum Umsatz braucht als die Flüchtigen, welche auch viele C_nH_m -Verbindungen besitzen.

Dabei ist hier auch anzumerken, dass der Umsatz des Kokes am Rost nie eine vollständige Oxidation ist, sondern mehr als Vergasungsvorgang zu sehen ist, bei dem die Umsetzung des Produktgases nicht am Rost, sondern in der räumlich getrennten Sekundärbrennzone geschieht. Deshalb sind am Rost auch weniger als die hier theoretisch berechneten Mindestluftmengen erforderlich.

9.2.6. Darstellung der Aufteilung in Primär- und Sekundärluft

Um eine Vorstellung über die zugeführten Luftmengen zu erhalten, sind in Abbildung 9.19 die relativen Luftmengen l_{rel} für die Primär- und Sekundärseite graphisch dargestellt, wobei hier alle im Zuge der Emissionsmessung durchgeführten Versuche herangezogen werden.

Die Berechnung für die Primärseite erfolgt wie in Unterabschnitt 9.2.4. Die relative Luftmenge für die Sekundärseite erhält man durch Bildung der Differenz aus relativer Primärluftmenge und der Luftüberschusszahl λ in Prozent, wobei die Luftüberschusszahl λ über die Verbrennungsrechnung aus dem Restsauerstoff im Abgas erhalten wird (oder über die Glg. 3.38). Die Summe der beiden relativen Luftmengen ergeben somit den Wert der Luftüberschusszahl in Prozent. Der Wert von 100 % ist die für den jeweiligen Brennstoff stöchiometrische Luftmenge.

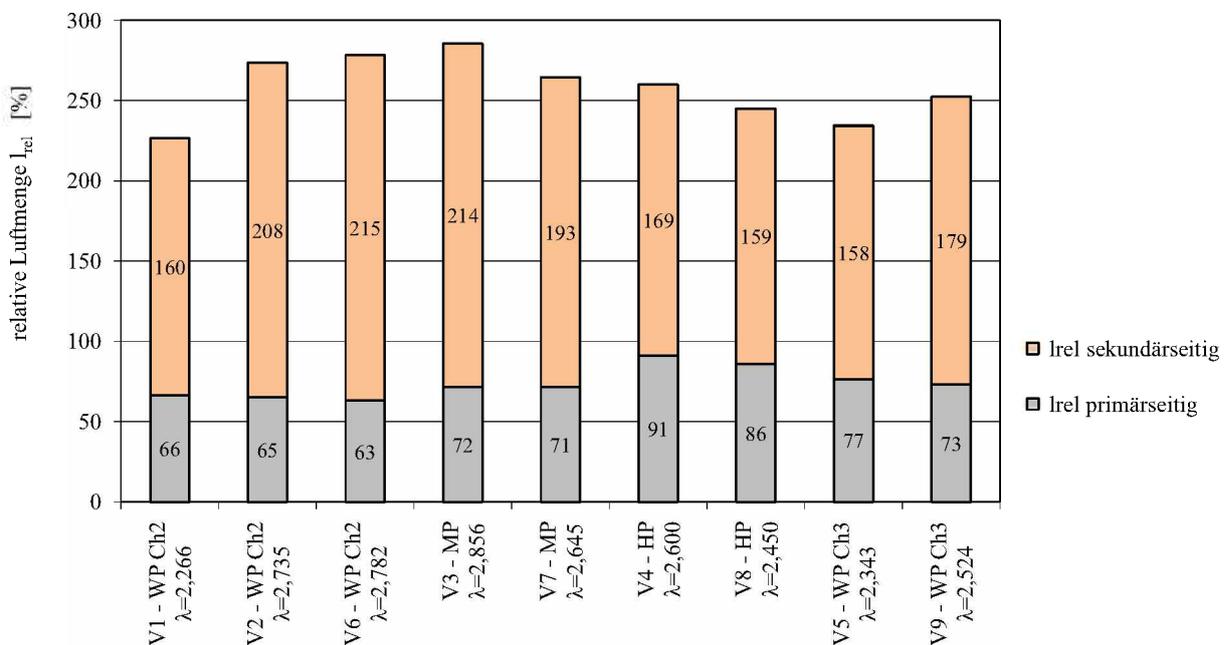


Abbildung 9.19.: Darstellung der relativen Primär- und Sekundärluftmenge. l_{rel} primärseitig ... relative Primärluftmenge, l_{rel} sekundärseitig ... relative Sekundärluftmenge.

Was zuerst am Diagramm auffällt, sind die großen Unterschiede der Summe aus relativer Primär- und Sekundärluftmenge bei den jeweiligen Versuchen, obwohl in der Regelung der Anlage immer

der gleiche Restsauerstoffwert eingestellt ist. So liegt der kleinste Luftüberschuss in Versuch V1 bei 227 %, der größte in Versuch V3 bei 286 %. Die Ursache dafür könnte in einer Messungenauigkeit λ -Sonde liegen, aber auch mit einer trägen Regelung der Sekundärluftklappe begründet werden, wenn schnelle Konzentrationsänderungen im Abgas nur sehr langsam korrigiert werden. Hier muss auch erwähnt werden, dass der Restsauerstoff in der Anlage mit 7 % eingestellt ist, jedoch bei den Emissionsmessungen Werte zwischen 11,7 % und 13,6 % gemessen werden, was wiederum auf die falsche Messung schließen lässt.

Hier ist auch deutlich zu erkennen, dass bei den Versuchen V4 und V8 mit Holzpellets die relative Primärluftmenge deutlich am größten ist, da hier die Problematik des Ascheschmelzens nicht auftreten kann. Probleme mit Verschlackungen durch Schollenbildung gibt es bei Versuch V3 mit Miscanthuspellets und besonders bei den Versuchen V1, V5 und V9 mit Weizenstrohpellets den Chargen 2 und 3. Dies sind auch jene Versuche, bei denen mit 66 % 72 %, 77 % und 73 % die größten Werte für relative Primärluftmenge erreicht werden.

Anhand dieser neun Versuche kann man hier bemerken, dass für die Brennstoffe Miscanthus- und Weizenstrohpellets der Charge 3 ab einer relativen Primärluftmenge von etwa 70 % das Schmelzen der Asche zu Problemen durch Schollenbildung führt. Für Weizenstrohpellets der Charge 2 ist die starke Verschlackung bei 66 % nicht erklärbar, das beim Versuch V2 bei 65 % überhaupt keine Verschlackung aufgetritt.

Die hier durchgeführte und in Abbildung 9.19 dargestellte Berechnung bezieht sich auf den vollständigen Ausbrand des Brennstoffs. Bei Berücksichtigung des Ascheausbrandes (siehe auch 9.2.4) bleibt die Summe der relativen Luftmengen gleich, es erhöht sich nur die relative Primärluftmenge und einige Prozentpunkte (etwa 3 bis 6, je nach Ascheausbrand) und die relative Sekundärluftmenge reduziert sich um diesen Betrag. Dies deshalb, da bei quasi vermindertem Kohlenstoffgehalt des Brennstoffs sich Mindestluftmenge und gesamte Luftmenge proportional vermindern und so die Luftüberschusszahl gleich bleibt.

9.2.7. Graphische Darstellung der Verschlackung und des Ausbrandes

Um im Vorhinein abschätzen zu können, ob es zu Verschlackungen kommt bzw. die Parameter so einzustellen, um dies zu verhindern, wird hier versucht, für Zusammenhänge von Verbrennungsparametern darzustellen und Gesetzmäßigkeiten daraus abzuleiten. Dasselbe gilt auch für die Ausbrandqualität.

Die Schwierigkeit besteht darin, dass Auswirkungen im Brennstoffbett von vielen Faktoren wie Primärluftmenge, Brennstoffwärmeleistung bzw. Brennraumbelastung, Vorschubgeschwindigkeit bzw. Verweildauer am Rost, Aschegehalt bzw. Aschezusammensetzung oder Versuchsdauer abhängig sind und eine Verknüpfung derer, etwa als Dimensionslose Kennzahlen, schwierig ist.

Nach einigen erfolglosen Versuchen, wie etwa Brennstoffwärmeleistung mit dem Vorschub zu verknüpfen und der relativen Luftmenge gegenüberzustellen oder die relative Primärluftmenge mit dem Vorschub zu kombinieren und über der Brennstoffwärmeleistung in einem Diagramm aufzutragen, werden hier Verschlackung und Ausbrand in Abhängigkeit der relativen Primärluftmenge in Diagrammen dargestellt.

In Abbildung 9.20 ist die Verschlackung im Brennstoffbett über der relativen Primärluftmenge dargestellt, wobei hier für die Verschlackung eine Bewertung von 0 bis 1 verwendet wird. Dabei bedeutet 0, dass keine Verschlackung beobachtet wird und im Gegensatz der Wert 1 einer großflächige Verschlackung mit Schollen größer als 1 dm^2 darstellt. Die relative Primärluftmenge ist der prozentuale Primärluftanteil bezogen auf die stöchiometrisch notwendige Luftmenge (siehe dazu Unterabschnitt 9.2.4). Im rechts dargestellten Diagramm wird bei der relativen Primärluftmenge auch der Ausbrand berücksichtigt, was ebenfalls in Unterabschnitt 9.2.4 erläutert ist.

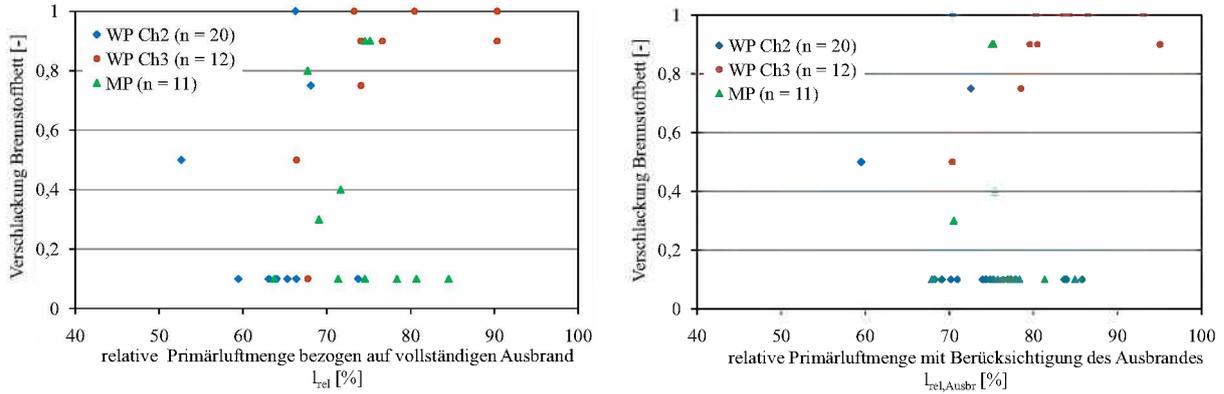


Abbildung 9.20.: Verschlackung in Abhängigkeit der relativen Primärluftmenge bezogen auf vollständigen Ausbrand (links) und Berücksichtigung des nicht verbrannten Kohlenstoffs im Rückstand (rechts).

Es zeigt sich, dass in beiden Varianten kaum Korrelationen zwischen beiden Parametern bestehen. Am ehesten kann beim Brennstoff WP Ch3 eine Tendenz festgestellt werden, bei WP Ch2 und MP kann überhaupt keine Aussage getroffen werden. Idealerweise müsste bei erhöhter relativer Primärluftmenge auch die Verschlackungstendenz zunehmen.

In Abbildung 9.21 ist der Kohlenstoffgehalt im Rückstand C_R , der den Maßstab für die Ausbrandqualität darstellt, über der relativen Primärluftmenge aufgetragen. Der Kohlenstoffgehalt im Rückstand C_R wird durch Veraschung des Rückstandes im Muffelofen bei 550 °C festgestellt (siehe dazu auch Unterabschnitt 9.2.3.5). Wie bereits bei der Verschlackung, gibt es bei der relativen Primärluftmenge ebenfalls zwei verschiedene Varianten. Hier sind, vor allem bei Bezug auf den vollständigen Ausbrand im linken Diagramm, Korrelationen für die Brennstoffe MP und WP Ch2 zu erkennen.

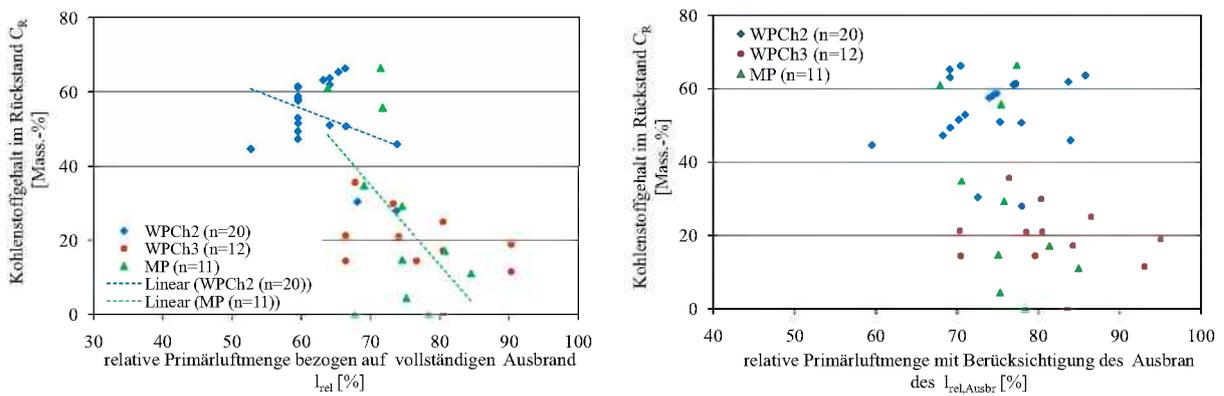


Abbildung 9.21.: Ausbrand des Rückstands in Abhängigkeit der relativen Primärluftzufuhr bezogen auf vollständigen Ausbrand (links) und Berücksichtigung des nicht verbrannten Kohlenstoffs im Rückstand (rechts).

Trotzdem ist diese Verknüpfung von Parameter nicht geeignet, da weitere Parameter wie Vorschubgeschwindigkeit, Brennraumbelastung, Versuchsdauer bzw. thermische Trägheit des Systems und vor allem die großen Schwankungen bei der Brennstoffchargierung (vgl. Unterabschnitt 9.2.1) einen erheblichen Einfluss haben. Eine geringere Vorschubgeschwindigkeit führt zu längerem Kontakt mit den Umgebungsflächen und erhöht die Verschlackungs- bzw. Verklebungsneigung. Gleichzeitig kann damit jedoch der Ausbrand verbessert werden. Eine höhere Brennraumbelastung bzw.

Brennstoffwärmeleistung erhöht die Temperatur im Inneren, was wiederum die Verschlackung fördert bzw. den Ausbrand erhöht. Bezüglich Versuchsdauer hat sich gezeigt, dass es bei länger dauernden Versuchen zu mehr Verschlackungen kommt bzw. Verschlackungsprobleme erst nach mehreren Stunden Versuchsdauer eintreten (vgl. dazu auch die Temperaturmessung in Unterabschnitt 9.4.2).

Alle hier in den Diagrammen verwendeten Daten sind aus dem Berechnungsformular der Versuche mit dem Brenner der sechsten Version, welches im Anhang dargestellt ist, entnommen.

9.3. Energie- und Massenbilanz der Feuerungsanlage für verschiedene Brennstoffe

In diesem Abschnitt werden Energie- und Massenbilanzen betrachtet und vor allem mittels Sankey-Diagrammen dargestellt. Bei den Energiebilanzen wird zuerst die Bilanz der handelsüblichen Serienanlage mittels Daten aus der Typenprüfung dargestellt und mit der umgebauten Anlage bei Einsatz von verschiedenen Brennstoffen verglichen.

Bei den Massenbilanzen wird anhand der wichtigsten brennstoffrelevanten Elemente wie Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Schwefel und Chlor untersucht, welche Anteile im Rückstand verbleiben und welche über den Abgasweg ausgetragen werden.

9.3.1. Energiebilanzierung für die Serienanlage PK-V30 und umgebauter, teilsolierter Anlage

Bei den mit der umgebauten Anlage durchgeführten Bilanzierungen werden ausschließlich Versuche mit Waagenmessungen des Brennstoffeintrages ausgewählt - zwei Versuche bei nicht vollständig isolierter Anlage im Zuge der Entwicklungs- und Einstellungsarbeiten, und fünf Versuche im Zuge der Durchführung der Emissionsmessungen mit verschiedenen Brennstoffen.

Die Ermittlung der zugeführten Brennstoffwärmeleistung erfolgt über die in Unterabschnitt 9.2.1.2 beschriebenen Waagenmessung, welche mit dem Heizwert H_u verknüpft wird. Die Nutzwärmeleistung wird über den Wärmezähler ermittelt, wobei auch auf das in Unterabschnitt 9.2.1.2 beschriebene Verfahren zurückgegriffen wird. Die im Rückstand verbliebenen Leistung (Verlust durch ungenügenden Ausbrand) wird durch das in Unterabschnitt 9.2.3 beschriebene Verfahren ermittelt, wobei das gesamte Brennbar als Kohlenstoff angenommen wird (siehe auch 9.2.3.2) und der Ascheverlust über das Abgas berücksichtigt wird (9.2.3.1).

Der Abgasverlust wird über die rechnerisch bestimmte Abgasmenge ermittelt, wo bei bei Durchführung der Verbrennungsrechnung auch das Unverbrannte im Rückstand berücksichtigt wird. Es wird in der Verbrennungsrechnung der um $C_{R,Br}$ (Kohlenstoff im Rückstand bezogen auf Brennstoffzusammensetzung der Originalsubstanz) reduzierte Kohlenstoffgehalt eingesetzt und dafür der Ascheanteil um diesen Betrag erhöht. Mit dieser neuen „virtuellen“ Brennstoffzusammensetzung wird die Verbrennungsrechnung durchgeführt und die spezifische Abgasmenge für die einzelnen Komponenten wie CO_2 , SO_2 , N_2 , H_2O und O_2 in der Einheit kgRG/kgOS ermittelt. Dabei wird in der Verbrennungsrechnung auch der Luftüberschuss genau wie im Versuch eingestellt.

Die Ermittlung der Verlustleistung über das Abgas für die jeweilige Abgaskomponente erfolgt gemäß der Formel

$$P = \dot{m}_P \cdot v_{a,i} \cdot c_P \cdot \Delta T \quad (9.23)$$

\dot{m}_PPelletseintrag in kg/s

$v_{a,i}$spezifische Abgasmenge für die jeweilige Abgaskomponente in kgRG/kgOS

c_Pspezifische Wärmekapazität in kJ/kgK

ΔTTemperaturdifferenz zwischen Abgas- und Umgebungstemperatur

Die spez. Wärmekapazität wird genau für die Abgastemperatur berechnet. Die Summe der Leistungen aller Abgaskomponenten ergibt den gesamten Abgasverlust.

Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung der Abgasverluste wäre über die Messung der Abgasgeschwindigkeit. Dies ist jedoch einerseits aufgrund des kleinen Abgasquerschnittes (125 mm) und des sich ausbildenden Strömungsprofils zu ungenau. Andererseits ist auch nur ein Anämometer zur Verfügung, das für die Messung des Primärluft verwendet wird. Dieses verfügt auch über keine Möglichkeit der Datenaufzeichnung, um einen verlässlichen Mittelwert über die gesamte Versuchsdauer zu ermitteln.

Der Abwärmeverlust über die Anlagenoberfläche ergibt sich aus der Differenz der Summe aller Anteile zur Brennstoffwärmeleistung bzw. zu 100 %.

Energiebilanz der Serienanlage PK-V30: Zunächst wird die Energiebilanz der handelsüblichen Pelletsanlage PK-V30 anhand der Daten der Typenprüfung [215] dargestellt. Dabei sind die Werte von Brennstoffwärmeleistung (34,4 kW) Nutzwärmeleistung (31,8 kW) und Abwärmeverlust (0,22 kW) explizit im Bericht angegeben. Der Verlust über den Rückstand wird aufgrund des ausgezeichneten Ausbrandes der Holzpellets mit 0,1 % (0,0344 kW) angenommen und der Abgasverlust mit 6,9 % (2,35 kW) als Differenz auf die Brennstoffwärmeleistung bzw. 100 % gerechnet.

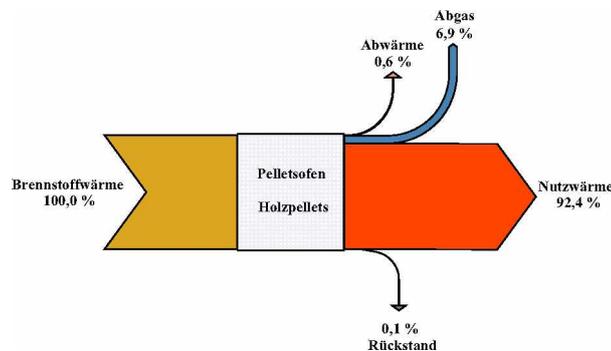


Abbildung 9.22.: Sankey-Diagramm für die Energiebilanz der Pelletsanlage PK-V30 bei Betrieb mit Holzpellets, Daten aus der Typenprüfung [215].

Mit diesen Werten ergibt sich das Sankey-Diagramm in Abbildung 9.22 mit einem Nutzwärmeanteil von 92,4%, dem Abgasverlust von 6,9%, einem Abwärmeverlust über die Oberfläche von 0,6% und einem minimalen Verlust über den Rückstand bzw. die Asche. Im Vergleich mit Literaturwerten (Abb. ??, [21]) liegt diese Anlage im obersten Bereich der Kesselwirkungsgrade.

Energiebilanz mit umgebauter, teilisolierter Anlage mit Weizenstroh- und Holzpellets: Die folgenden Energiebilanzen werden mit der umgebauten Anlage für die beiden Brennstoffe Weizenstrohpellets der Charge 2 und Holzpellets Genol ermittelt (Abb. 9.23).

Dabei fällt als erstes auf, dass die Nutzwärme im Vergleich zur Typenprüfung sehr gering ist. Der Versuch mit den Holzpellets (9.23, rechts) würde gerade noch den für eine angenommene Nennwärmeleistung von 12 kW laut Art. 15a B-VG [111] erforderlichen Wirkungsgrad von 80,6 %

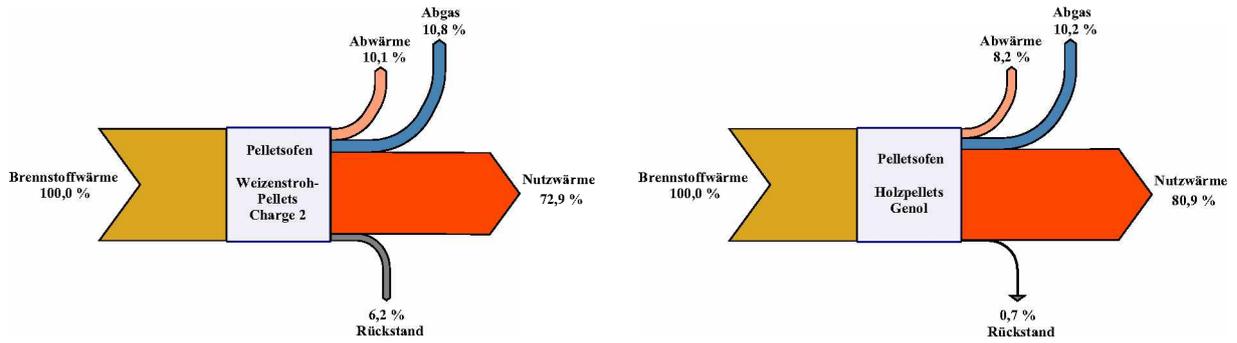


Abbildung 9.23.: Sankey-Diagramm für die Energiebilanz mit WP Ch2 (links) und mit HP Genol (rechts).

erreichen. Dieser Wert kann der Versuch mit dem Brennstoff Weizenstrohpellets der Charge 2 (9.23, links) bei weitem nicht erreicht werden. Dafür ist einerseits der im Rückstand noch vorhandenen Energieinhalt mit 6,2 % vorantwortlich, andererseits sind bei beiden Versuchen die Verluste über die Abgasseite und Abwärme der Anlagenoberfläche mit insgesamt 18 bis 21 % sehr groß. Der geringe Rückstandsverlust der Holzpellets ist mit dem guten Auscheausbrand aufgrund des geringen Aschegehaltes und dem leichten Zerfallen der Pellets bei der Verbrennung zu erklären. Der große Verlust über die Anlagenoberfläche kann mit der nur teilweise isolierten Anlage begründet werden. Der gegenüber der Typenprüfung hohe Abgasverlust ist auf dem ersten Blick jedoch nicht plausibel, zumal ja mit ähnlichen Abgastemperaturen (129 °C beim Versuch mit WP Ch2) gearbeitet wird. Auch Fehler im Bereich der Umrechnung des Ausbrandverlustes über die Rückstandanalyse und Abschätzung der Ascheverluste über das Abgas würden sich auch nicht in diesem Maße auf so hohe Abgasverlust niederschlagen. Zum Vergleich wird die Berechnung auch über die Messung der Abgasgeschwindigkeit durchgeführt und über diesen Weg Volumenstrom und somit Abgasverlust bestimmt. Dabei wird für WP Ch2 mit 10,6 % ein um nur 0,2 %-Punkte geringerer Wert ermittelt, der fast exakt mit dem errechneten Wert übereinstimmt (wobei hier auch auf die oben bereits erwähnte Messungenauigkeiten durch die Ausbildung eines Strömungsprofils im kleinen Rohrquerschnitt verwiesen werden muss).

Der Unterschied bei den Abgasverlusten kann schließlich mit dem unterschiedlichen Restsauerstoff im Abgas bzw. der Luftüberschusszahl λ sehr genau gezeigt werden. Der beim Versuch mit WP Ch2 (9.23, links) gemessene Restsauerstoff beträgt 13 % ($\lambda = 2,98$), was auch bei der Durchführung der Verbrennungsrechnung zur Berechnung des Abgas-Volumenstromes verwendet wird. Wird dieselbe Verbrennungsrechnung für einem Restsauerstoff von 8,40 % ($\lambda = 1,8$) wie bei der Typenprüfung durchgeführt und mit den dabei erhaltenen spezifischen Abgasströmen der Abgasverlust berechnet, so ergibt sich ein Abgasverlust von 6,9 % - derselbe Wert wie bei der Typenprüfung. Somit kann die Bilanzierung als relativ genau angesehen werden.

In der Regelung der Anlage ist ein Sollwert von 7 % für den Restsauerstoff vorgegeben, der laut Anzeige auch eingehalten wird. Es ist aber davon auszugehen, dass diese Lambda-Messung zu ungenau ist, da vom kalibrierten Sauerstoffmessgerät für die Emissionswertaufzeichnung Werte zwischen 12,5 und 14,5 % in den Versuchen gemessen werden. Somit gehen durch eine fehlerhafte anlageninterne Messung etwa 3 bis 4 %-Punkte der eingesetzten Energie unnötig verloren.

Es sei hier noch anzumerken, dass die hier angeführten Restsauerstoffgehalte im Abgas immer als Mittelwerte über die gesamte Messzeit zu verstehen sind.

9.3.2. Energiebilanzierung im Zuge der Versuche zur Emissionsmessung

Bei den Versuchen zur Emissionsmessung werden die noch frei liegenden Anlagenteile mit Isolationsmatten eingepackt, um den Energieverlust so gering wie möglich zu halten (siehe dazu Unterabschnitt 9.1.3). Dabei werden die Brennstoffe Weizenstrohpellets der Charge 2, Miscanthus- und Holzpellets, sowie Weizenstrohpellets der Charge 3 bei Verbrennungsversuchen für die Emissionsmessung getestet. Alle Brennstoffe außer Holzpellets werden bei diesen Versuchen mit einem 4 mm Sieb vom Feinanteil befreit, um Ablagerungen unter dem Rost zu vermeiden, was in Unterabschnitt 9.1.2 bereits beschrieben ist.

Der laut Art. 15a B-VG [111] geforderte Mindestwirkungsgrad für eine angenommenen Nennleistung von 12 kW liegt bei 80,6 %.

Energiebilanz mit dem Brennstoff Weizenstrohpellets der Charge 2: In Abbildung 9.24 ist zu sehen, dass mit dem Brennstoff Weizenstrohpellets der Charge 2 im Vergleich zur nicht isolierten Anlage mit den Werten von 82,9% und 79,1% (Abb. 9.23) ein deutlich höherer Wert für die Nutzwärme erreicht wird.

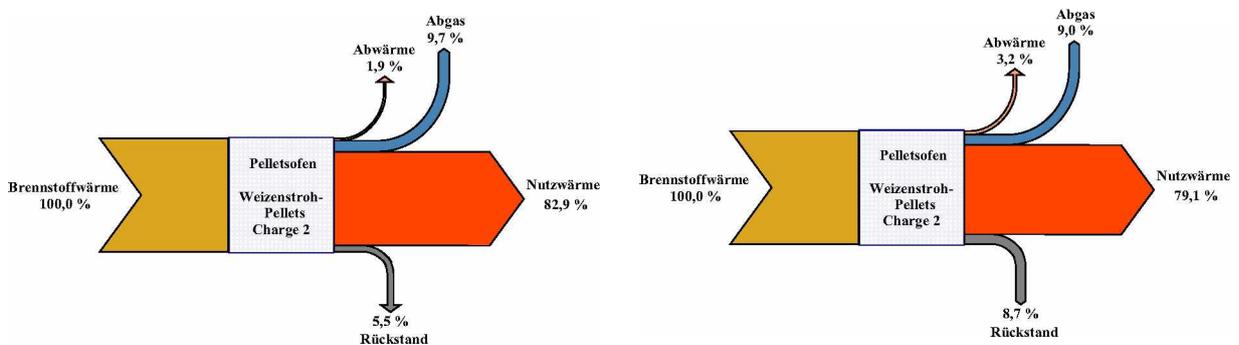


Abbildung 9.24.: Sankey-Diagramm für die Energiebilanz mit WP Ch2 bei Versuch 2 (links) und bei Versuch 6 (rechts).

Die Verluste durch unvollständig ausgebrannten Rückstand sind etwa in der selben Größenordnung, wobei für Versuch 2 ein relative Primärluftmenge mit Berücksichtigung des Ausbrandes $l_{rel,Ausbr}$ von 69,1% ($l_{rel} = 65,3\%$) und für Versuch 6 ein $l_{rel,Ausbr}$ von 69,1% ($l_{rel} = 63,1\%$) gefahren wird. Erster Wert gilt für den tatsächlich umgesetzten Brennstoff (Berücksichtigung des Ausbrandes, siehe dazu Unterabschnitt 9.2.4), der Wert in Klammer für den vollständig umgesetzten Brennstoff. Aufgrund des niedrigen Ascheschmelzpunktes dieses Brennstoffes müssen diese Werte relativ niedrig sein, um Verschlackungen und Schollenbildung möglichst gering zu halten. Deshalb ist hier mit dieser Rostlänge nur ein ungenügender Ausbrand möglich, der sich mit einem Verlust von 5,5% bzw. 8,7% niederschlägt. Die Abgasverluste liegen mit 9,7% bzw. 9,0% unter dem Wert von 10,8% in Abb. 9.23. Durch die gute Isolation der Anlage kann der Wärmeverlust der Oberfläche auf 1,9% bzw. 3,2% der Brennstoffwärmeleistung reduziert werden und liegt nun nur leicht über jenem von 0,6% der Typenprüfung. Hier darf nicht vergessen werden, dass der neue Brenner mit dem Vorschubrost gegenüber dem Brenner mit dem Klapprost eine deutlich größere äußere Oberfläche aufweist. Die Schwankungen der Abwärme-Werte kommen einerseits durch die Summation von Fehlern der anderen Teilströme zustande (Abwärme ist die Differenz zur Brennstoffwärmeleistung), wobei diese auch von den Brennräumtemperaturen abhängig sind, die ihrerseits von der Brennstoffwärmeleistung bestimmt werden.

Energiebilanz mit dem Brennstoff Miscanthuspellets: Die Energiebilanz für den Versuch mit den Miscanthuspellets (Abb. 9.25 links) sieht ähnlich aus wie jene der Weizenstrohpellets. Ledig-

lich der Ausbrand des Rückstandes ist mit 4,6 % etwas besser, was mit dem geringeren Aschegehalt und einem deshalb nicht so stabilen Asche-Kohlenstoff-Gerüst begründet werden kann. Auch das etwas höhere $l_{rel,Ausbr}$ von 75,4 % ($l_{rel} = 71,1 %$) kann für den höheren Brennstoffumsatz verantwortlich gemacht werden. Der Werte für Abgas liegt mit 9,4 % im Bereich der Bilanz mit den Weizenstrohpellets, der Wert für die Abwärme mit 3,7 % darüber.

Energiebilanz mit dem Brennstoff Holzpellets: Die Energiebilanz mit dem Brennstoff Holzpellets des Herstellers SCHWEIGHOFER zeigt den typischen guten Ausbrand des Holzbrennstoffs (Abb. 9.25). Die relative Primärluftmenge $l_{rel,Ausbr} = l_{rel}$ von 91,1 % ist hier im Vergleich sehr hoch, was zu diesem guten Ausbrand entscheidend beiträgt und hier aufgrund des hohen Ascheschmelzpunktes von Holz aber auch problemlos möglich ist.

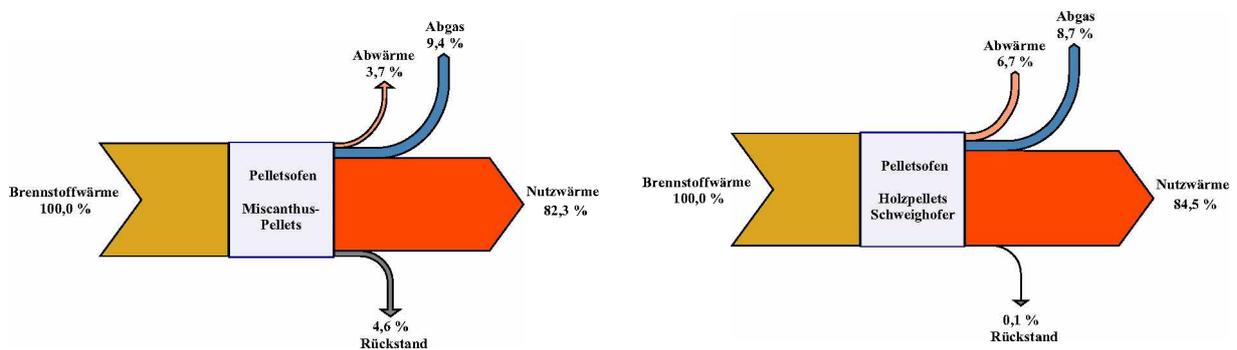


Abbildung 9.25.: Sankey-Diagramm für die Energiebilanz mit MP bei Versuch 3 (links) und HP SCHWEIGHOFER bei Versuch 4 (rechts).

Die Nutzwärme ist zwar höher, doch nicht in diesem Maße, wie durch den guten Ausbrand zu erwarten wäre. Der Grund dafür ist die niedrige Abgastemperatur von nur 95 °C aufgrund einerseits einer sehr geringen Brennstoffwärmeleistung von nur 11,3 kW (anderen Versuche bei 13 bis 15 kW) und andererseits durch den großen Luftüberschuss mit einem Restsauerstoffgehalt von 13,66 % Restsauerstoff im Abgas. Aufgrund dieser niedrigen Abgastemperatur kann weniger Energie über den Wärmeübertrager an das Wasser übertragen werden. Die Abgasverluste sind trotz der großen Abgasmengen aufgrund des hohen Restsauerstoffgehaltes im unteren Bereich im Vergleich zu den anderen Versuchen. Der Wert von 6,7 % für die Abwärme ist in einem sehr hohen Bereich. Der Grund dafür könnte neben Messfehlern auch die Tatsache sein, dass trotz der geringen Brennstoffwärmeleistung die Anlagenoberfläche unverändert bleibt und sich die Wärmeverluste im Verhältnis stärker auswirken.

Energiebilanz mit dem Brennstoff Weizenstrohpellets der Charge 3: Der Wert der Nutzwärme liegt bei diesem Versuch mit dem Brennstoff Weizenstrohpellets der Charge 3 mit einem Wert von 80,1 % (Abb. 9.26) im Bereich der Charge 2.

Im Rückstand ist ähnlich wie bei der Charge 2 noch ein Energieanteil von 8,5 % der Brennstoffwärmeleistung enthalten. Der Versuch wird mit einem $l_{rel,Ausbr}$ von 80,3 % ($l_{rel} = 73,3 %$) durchgeführt, wobei im Abgas ein durchschnittlicher Restsauerstoffgehalt von 12,73 % enthalten ist. Mit diesen Werten, als auch einer eher niedrigeren Abgastemperatur von 105 °C, beträgt der Abgasverlust 7,9 %, was unter jenem der Charge 2 liegt. Der Abwärmeverlust ist mit 3,5 % im Bereich der anderen Versuche.

Grundsätzlich passen diese Ergebnisse sehr gut mit denen in der Literatur (Abb. 3.33 in Unterabschnitt 3.4.6) zusammen, in denen die Wärmeabgabe der Kesseloberfläche mit ca. 3 % und die freie Wärme der Abgase mit etwa 12 % (hier meist höhere Abgastemperaturen) angegeben ist.

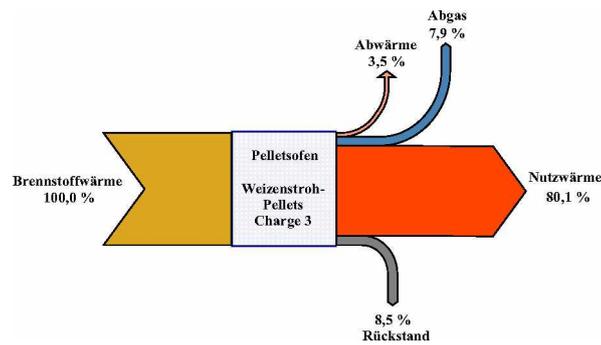


Abbildung 9.26.: Sankey-Diagramm für die Energiebilanz mit WP Ch3 bei Versuch 9.

9.3.3. Massenbilanzen (C, H, N, S, Cl)

Jene vier Versuche, welche für den Vergleich der Berechnung der theoretischen Leistung im Rückstand herangezogen werden (siehe Unterabschnitt 9.2.3), werden auch bezüglich der Pfade der wichtigsten Brennstoff-Elemente bei der Umsetzung in der Pelletsanlage genauer betrachtet. Die untersuchten Elemente sind Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Schwefel und Chlor. Die Brennstoffwärmeleistung beträgt dabei 16,4 kW bei einer relativen Primärluftmenge l_{rel} von 59 bis 64 % bzw. $l_{rel,Ausbr}$ von 76 bis 84 % bei Berücksichtigung des unvollständigen Ascheausbrandes. Die Rostvorschubgeschwindigkeiten variieren dabei zwischen 1-5 bis 1-13 (entspricht 0,167 bis 0,071). Weiters ist hier anzumerken, dass bei diesen Versuchen noch keine Waage zur Bestimmung des Brennstoffeintrages verwendet wird und es diesbezüglich auch Schwankungen gibt.

Als Ausgangspunkt mit 100 % dient die Masse des jeweiligen Elementes im eingesetzten Brennstoff, welche im Labor durch Elementaranalyse bestimmt wird. Der zweite Stoffstrom ist der aus der Anlage in Form von Asche bzw. teilverbranntem Brennstoff austretende Rückstand, welcher ebenfalls im Labor auf die interessierenden Elemente untersucht wird. Im Zuge dieser Messungen werden vier Verbrennungsversuche ausgewertet, deren Rückstände dann z.B. in Abbildung 9.27 für Kohlenstoff mit Rückstand 1 bis 4 angeführt sind. Für die Sankey-Diagramme werden die Mittelwerte aus diesen vier Analysen gebildet, wobei dies auch in Abbildung 9.27 rechts (hier z.B. wieder für Kohlenstoff) dargestellt ist. Die Differenz auf 100 % ist jener Anteil, der über das Abgas ausgetragen wird bzw. sich im Abgasweg ablagert.

Als interessanter Vergleich werden die einzelnen Rückstände bei der Normtemperatur von 550 °C verascht und mit dem bei 550 °C veraschten Brennstoff bezüglich dieser Elemente untersucht und verglichen (Abb. 9.27, 9.29, 9.31, 9.33, 9.35).

Kohlenstoff : Die Stoffströme für Kohlenstoff C sind ausschließlich vom Ausbrand des Rückstands abhängig und für alle Versuche ähnlich, obwohl hier beim Rostvorschub sehr unterschiedliche Einstellungen verwendet werden. Die Gehalte, bezogen auf die Brennstoffzusammensetzung (entspricht dem Kohlenstoffgehalt im Rückstand, bezogen auf Brennstoff-Trockensubstanz $C_{R,BrTS}$) bewegen sich zwischen 9 und 12 g/100gTS (Mittelwert 10,93 g/100gTS) und repräsentieren die Ausbrandqualität (Abb. 9.27).

Die Gehalte der veraschten Pelletasche und der veraschten Rückstände sind praktisch Null, da bei der Veraschung von einem vollständigen Ausbrand ausgegangen werden kann. Jedoch kann aufgrund der niedrigen Veraschungstemperatur von 550 °C noch ein wenig Kohlenstoff detektiert werden, da das Analysengerät mit wesentlich höheren Temperaturen arbeitet.

Das Sankey-Diagramm zeigt, dass 100 % an eingebrachtem Kohlenstoff für diese Versuche aufgrund des schlechten Ascheausbrandes zu 24,0 % in den Rückstand gehen und 76,0 % in Form von

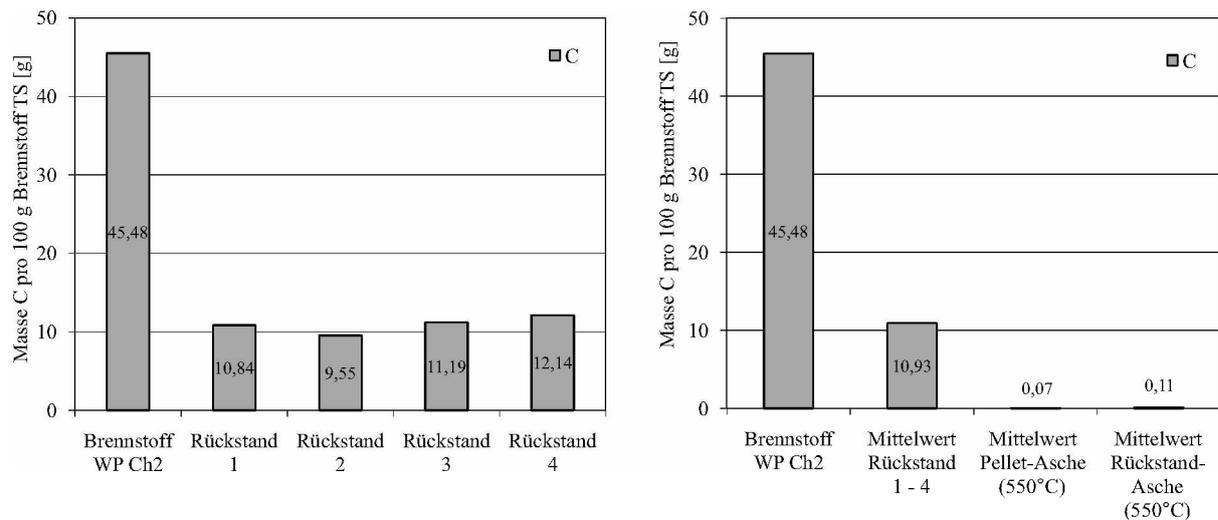


Abbildung 9.27.: Vergleich des Kohlenstoffgehaltes von Brennstoff (WP Ch2) und Rückständen aus 4 Versuchen (links), Vergleich Kohlenstoffgehalte von Brennstoff, Rückstand, veraschtem Brennstoff und veraschtem Rückstand, bei jeweils 550 °C (rechts).

hauptsächlich Kohlenstoffdioxid CO_2 über den Abgasweg die Anlage verlassen (Abb. 9.28).

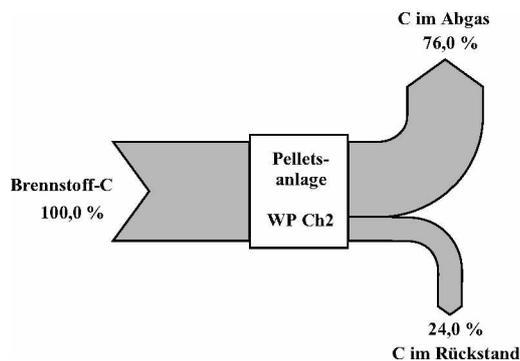


Abbildung 9.28.: Sankey-Diagramm für Kohlenstoff C aus Versuchen mit dem Brennstoff Weizenstrohpellets WP Ch2.

Wasserstoff: Die Stoffströme für Wasserstoff H sind, anders als beim Kohlenstoff, kaum vom Ausbrand abhängig. Es zeigen sich auch keine Abhängigkeiten von Einstellungen wie dem Rostvorschub. Die Gehalte der Rückstände, bezogen auf die Brennstoffzusammensetzung $H_{R,BrTS}$, bewegen sich zwischen 0,11 und 0,13 g/100 gTS (Abb. 9.29, links).

Die Gehalte der veraschten Pelletasche und der veraschten Rückstände sind wie beim Kohlenstoff praktisch Null, da bei der Veraschung von einem vollständigen Ausbrand ausgegangen werden kann. Die hier gemessenen 0,01 g/100 gTS können als Schwankungsbreite des Messfehlers angesehen werden.

Das Sankey-Diagramm zeigt, dass 100 % an eingebrachtem Wasserstoff für diese Versuche nur zu 2,2 % in den Rückstand gehen und 97,8 % in Form von hauptsächlich dampfförmigem Wasser H_2O über den Abgasweg die Anlage verlassen (Abb. 9.30), obwohl nur ein sehr schlechter Ausbrand erreicht wird.

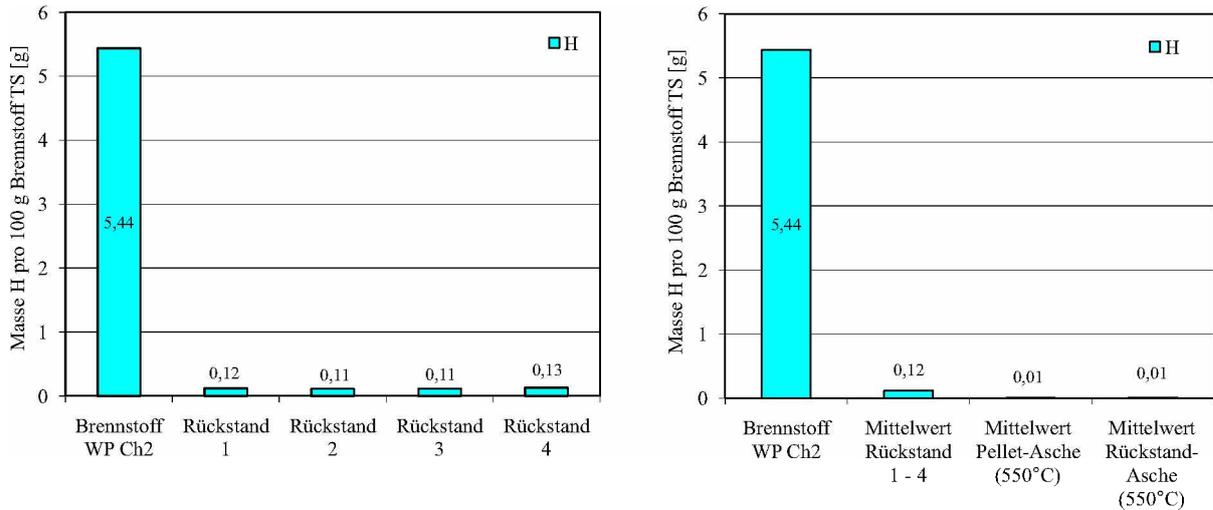


Abbildung 9.29.: Vergleich des Wasserstoffgehaltes von Brennstoff (WP Ch2) und Rückständen aus 4 Versuchen (links), Vergleich Wasserstoffgehalte von Brennstoff, Rückstand, veraschtem Brennstoff und veraschtem Rückstand, bei jeweils 550 °C (rechts).

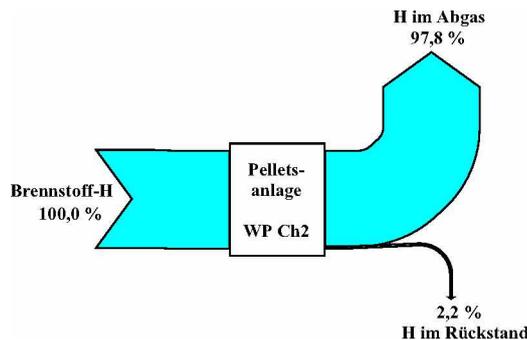


Abbildung 9.30.: Sankey-Diagramm für Wasserstoff H aus Versuchen mit dem Brennstoff Weizenstrohpellets WP Ch2.

Dies lässt den Schluss zu, dass der im Brennstoff vorhandene Wasserstoff vor allem mit den flüchtigen Bestandteilen (VOC bzw. C_nH_m) frühzeitig das Brennstoffpartikel verlässt und das schwieriger umsetzbare Asche-Kohlenstoff-Gerüst übrig bleibt.

Stickstoff: Die Stoffströme für Stickstoff N korrelieren mit jenen des Kohlenstoffs, sind also vom Ausbrand des Rückstandes abhängig. Die Gehalte der Rückstände, bezogen auf die Brennstoffzusammensetzung $N_{R,BrTS}$, bewegen sich zwischen 0,09 und 0,12 g/100 gTS (Mittelwert 0,11 g/100 gTS), siehe dazu Abb. 9.31.

Die Gehalte der veraschten Pelletasche und der veraschten Rückstände sind sehr gering, da offensichtlich bei einer Veraschungstemperatur von 550 °C und ausreichender Verweilzeit fast der gesamte Stickstoff in Form von N_2 oder NO_x mit dem Abgas abgeführt wird. Anders als der Wasserstoff, bzw. wie Kohlenstoff, wird der Stickstoff nicht vorzeitig mit den Flüchtigen aus dem Brennstoff ausgetragen, sondern bleibt noch im im Asche-Kohlenstoff-Gerüst eingebaut, was hier am noch deutlich vorhandenen Gehalt von etwa einem Fünftel des Brennstoffgehaltes im Rückstand zu sehen ist.

Das Sankey-Diagramm zeigt, dass 100 % an eingebrachtem Stickstoff für diese Versuche zu 21,5 %

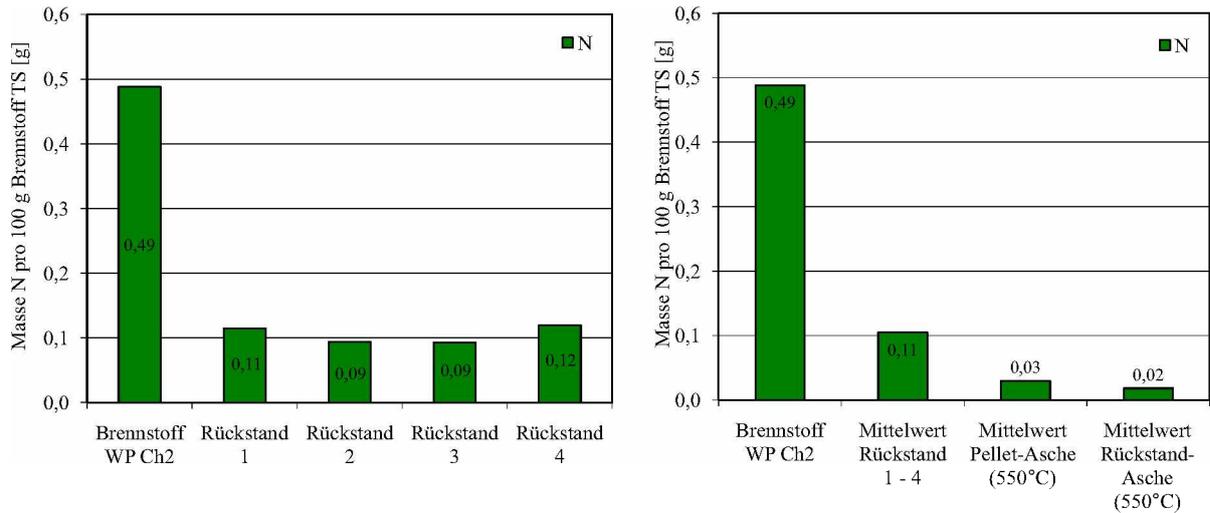


Abbildung 9.31.: Vergleich des Stickstoffgehaltes von Brennstoff (WP Ch2) und Rückständen aus 4 Versuchen (links), Vergleich Stickstoffgehalte von Brennstoff, Rückstand, veraschtem Brennstoff und veraschtem Rückstand, bei jeweils 550 °C (rechts).

in den Rückstand gehen und 78,5% in Form von N_2 oder NO_x über den Abgasweg die Anlage verlassen (Abb. 9.32).

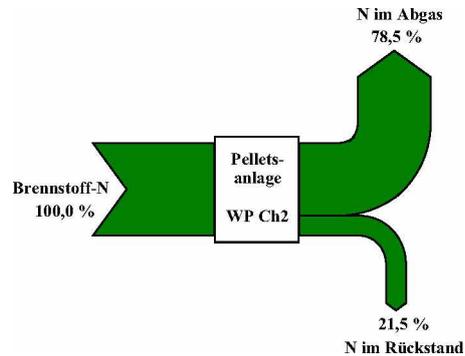


Abbildung 9.32.: Sankey-Diagramm für Stickstoff N aus Versuchen mit dem Brennstoff Weizenstrohpellets WP Ch2.

Schwefel: Die Gehalte der Rückstände für Schwefel, bezogen auf die Brennstoffzusammensetzung der Trockensubstanz $S_{R,BrrTS}$, bewegen sich für die vier ausgewählten Versuche zwischen 0,016 und 0,033 g/100 gTS, wobei der Mittelwert 0,025 g/100 gTS beträgt (Abb. 9.33). Bei Betrachtung der Werte für die einzelnen Rückstände erscheint es am ersten Blick, als ob hier wiederum eine Korrelation mit dem Kohlenstoff besteht. Jedoch beim Vergleich mit der veraschten Pelletasche und der veraschten Rückständen kann man erkennen, dass dies nicht so eindeutig ist. Der Mittelwert der Pellet-Asche liegt weit über jenen der Rückstände und der Mittelwert der Rückstand-Asche nur unwesentlich unter jenen der einzelnen Rückstände. Zweiteres kann damit begründet werden, dass ein Teil des Schwefels in der Asche gebunden und nicht verbrennbar ist oder nicht bei der Temperatur von 550 °C umgesetzt werden kann.

Der erstaunlich hohe Wert von 0,056 g/100 gTS für die Pellet-Asche kann eventuell mit der niedrigen Veraschungstemperatur von 550 °C begründet werden, denn in der Pelletsanlage selbst werden

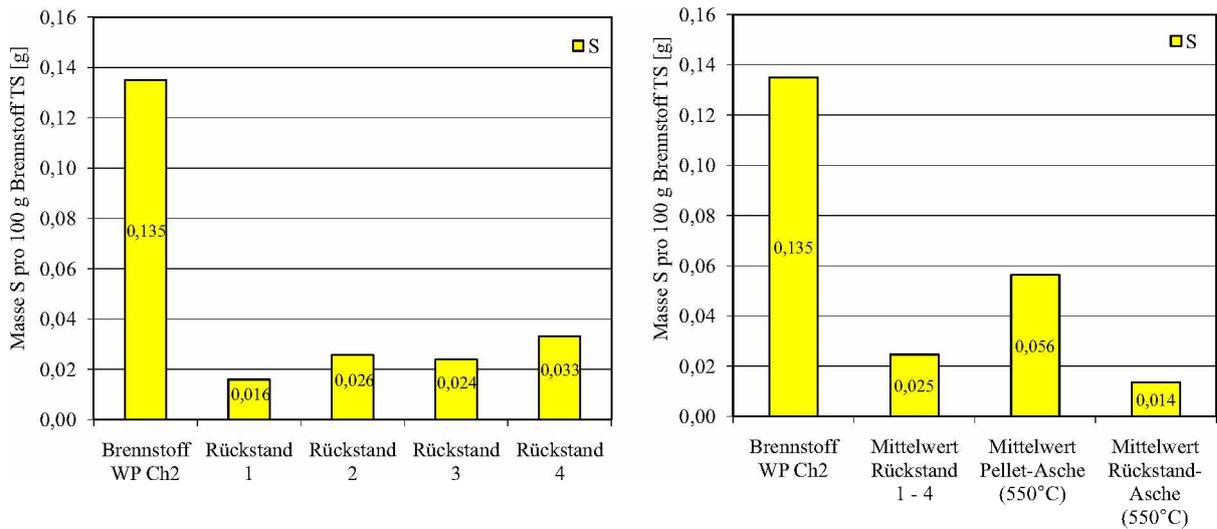


Abbildung 9.33.: Vergleich des Schwefelgehaltes von Brennstoff (WP Ch2) und Rückständen aus 4 Versuchen (links), Vergleich Schwefelgehalte von Brennstoff, Rückstand, veraschtem Brennstoff und veraschtem Rückstand, bei jeweils 550 °C (rechts).

Temperaturen von bis zu 1000 °C erreicht, was offenbar für die Umsetzung von Schwefel wichtiger ist als die Ausbrandqualität (Kohlenstoff).

Aufgrund dieser Tatsachen kann davon ausgegangen werden, dass keine unmittelbare Korrelation mit dem Kohlenstoff besteht, denn bei vollständigem Ausbrand würde noch immer ein nicht unbeträchtlicher Teil des Schwefels im Rückstand vorhanden sein.

Das Sankey-Diagramm zeigt, dass 100 % an eingebrachtem Schwefel für diese Versuche zu 18,3 % in den Rückstand gehen und 81,7 % in Form von SO₂ über den Abgasweg die Anlage verlassen (Abb. 9.34).

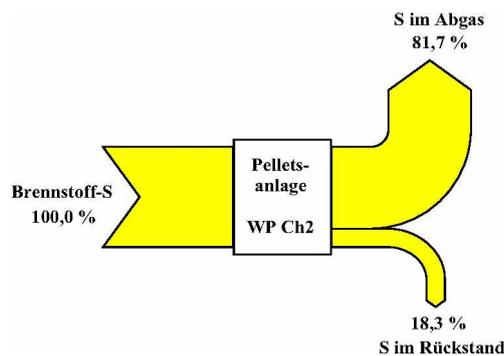


Abbildung 9.34.: Sankey-Diagramm für Schwefel S aus Versuchen mit dem Brennstoff Weizenstrohpellets WP Ch2.

Chlor: Die Gehalte der Rückstände für Chlor, bezogen auf die Brennstoffzusammensetzung $Cl_{R,BrTS}$, bewegen sich für die vier ausgewählten Versuche zwischen 0,14 und 0,18 g/100 gTS, wobei der Mittelwert 0,16 g/100 gTS beträgt (Abb. 9.35). Auch eine weitere Veraschung der Rückstände bei einer Temperatur von 550 °C bewirkt keine weitere deutliche Reduktion des Chlorgehaltes (0,12 g/100 gTS). Der Chlorgehalt der Pelletsasche ist mit einem Wert von 0,14 g/100 gTS im Vergleich zwischen den Werten von Rückständen und der Rückstand-Asche. Somit gibt es

hier ebenfalls keine deutlich Korrelation zwischen der Ausbrandqualität und dem Chlorgehalt im Rückstand.

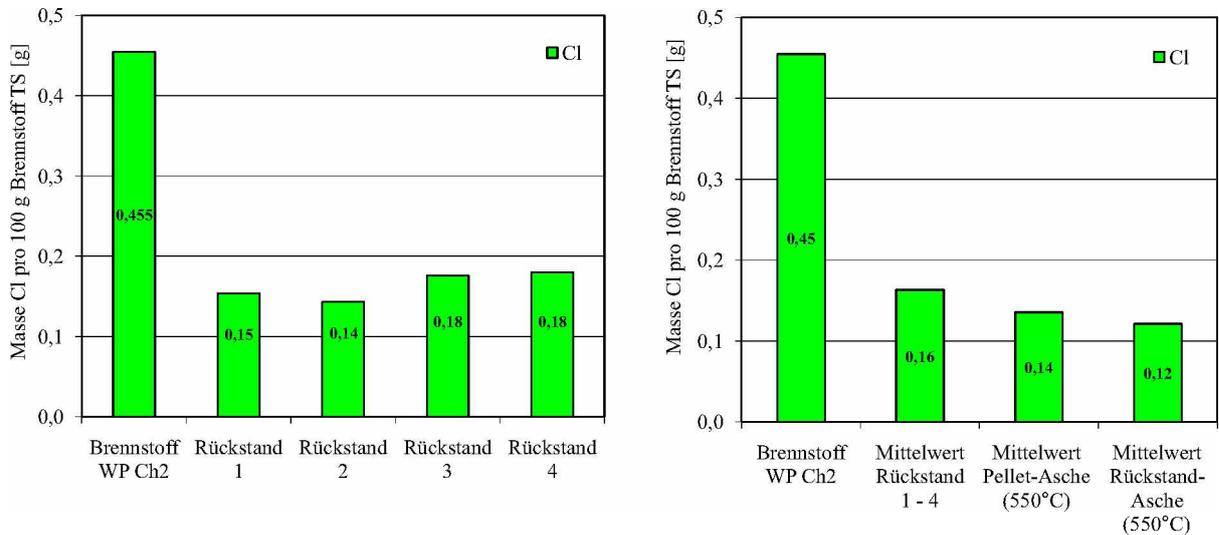


Abbildung 9.35.: Vergleich des Chlorgehaltes von Brennstoff (WP Ch2) mit Rückständen aus 4 Versuchen (links), Vergleich Chlorgehalte von Brennstoff, Rückstand, veraschtem Brennstoff und veraschtem Rückstand bei jeweils 550 °C (rechts).

Das Sankey-Diagramm zeigt, dass 100 % an eingebrachtem Chlor bei diesen Versuchen zu 35,9 % in den Rückstand gehen und 64,1 % über den Abgasweg, vorwiegend in Form des Kaliumchlorid-Salzes KCl, die Anlage verlassen (Abb. 9.36).

Dieses Ergebnis kann anhand der Ergebnisse der Staubmessungen sehr gut verifiziert werden, da der Staub fast ausschließlich aus Kaliumchlorid-Salzen KCl besteht: Aus Unterabschnitt 9.2.3.1 kann der Massenstrom für Chlor aus dem Massenstrom der Pellets mit dem Chlorgehalt im Brennstoff berechnet werden:

$$\dot{m}_{Cl} = \dot{m}_P \cdot \frac{Cl}{100} = 1,0368 \cdot 0,0043 = 4,46 \text{ mg/s} \quad (9.24)$$

Über die hier angewandte Methode ergibt sich über die 64,1 % ein Chlor-Massenstrom im Abgas $\dot{m}_{Cl,a}$ von 2,86 mg/s.

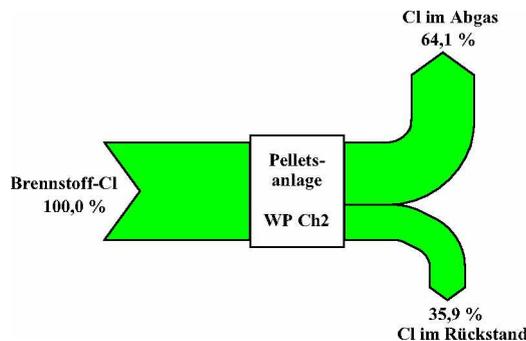


Abbildung 9.36.: Sankey-Diagramm für Chlor Cl aus Versuchen mit dem Brennstoff Weizenstroh-pellets WP Ch2.

Der Staub-Massenstrom im Abgas $\dot{m}_{St,a}$, ermittelt über die Staubmessung, ist aus Unterabschnitt 9.2.3.1 mit einem Wert von 4,27 mg/s berechnet worden. Der anteilige Massenstrom des Chlors errechnet sich über die stöchiometrische Zusammensetzung des Kaliumchlorids und beträgt somit 2,02 mg/s. Berücksichtigt man, dass der Staub nicht ausschließlich aus KCl besteht und auch jene Anteile, welche sich im Abgasweg der Anlage ablagern, so stimmt dieser Wert ausgezeichnet mit jenem oben berechneten 2,86 mg/s überein.

9.4. Messungen im Feuerraum

Die Messungen im Feuerraum betreffen vor allem die experimentelle Ermittlung der Verweilzeit des Brennstoffs im Feuerraum bzw. auf dem Rost, sowie die Messung der Temperaturen am Rost und über dem Brennstoffbett.

9.4.1. Messung der Verweilzeit des Brennstoffs am Vorschubrost

Die Messung der Verweilzeit des Brennstoffs am Vorschubrost wird im Zuge der Emissionsmessungen durchgeführt. Dabei wird ein Bruchstück eines Feuerleichtsteins durch das Sichtfenster mit Hilfe eines langes Werkzeuges am Beginn des Brennstoffbettes deponiert und die Zeit gemessen, bis dieser auf der anderen Seite vom Rost abgeworfen wird. Da der Feuerleichtstein sich inert verhält und keine große Masse besitzt, sinkt dieser auch nicht ein und wird auf der Oberfläche des Brennstoffbettes mit der gleichen Geschwindigkeit mittransportiert. Er werden meist zwei Steine mit einer Größe von etwa 20 mm auf der linken und rechten Seite des Brennstoffbettes platziert, da die Transportgeschwindigkeit nicht gleich ist (Abb. 9.37 links) . Ein Versuch mit einem größeren Feuerleichtstein erweist sich als nicht ideal, da es zu Berührungen mit den Seitenwänden kommt (Abb. 9.37).



Abbildung 9.37.: Messung der Verweilzeit des Brennstoffs am Vorschubrost: Links durch zwei kleine Bruchstücke von Feuerleichtsteinen beim Versuch mit Holzpellets (V8), rechts ein größerer Teil eines Feuerleichtsteins beim Versuch mit Miscanthuspellets (V7).

Dabei ist das in Abb. 9.38 verwendete Rosttaktverhältnis gleich definiert wie das Stokertaktverhältnis laut Glg. 9.1 in Unterabschnitt 9.2.1.1. Die unterschiedlichen Verweilzeiten in den Seitenbereichen könnten einerseits mit kleinen Hubdifferenzen der beweglichen Roststäbe zusammenhängen, andererseits könnte es durch den unterschiedlichen Erweichungsgrad der Partikel

aufgrund nicht gleichmäßiger Luftverteilung zu unterschiedlichen Hafttendenzen mit den Seitenwänden kommen. Da bei diesen Versuchen die Sichtscheibe demontiert werden muss und dadurch der Unterdruck in der Anlage nicht mehr vorhanden ist (keine Sekundärluft!), können diese Messungen nicht während der Emissionsmessung durchgeführt werden und werden daher kurz vor und nachher abgewickelt. Dabei zeigt sich, dass es nicht nur Unterschiede zwischen den Seiten gibt, sondern auch ob die Messung vor oder nach der Messung der Emissionen durchgeführt wird, wobei hier ein zeitlicher Unterschied von 5 bis 6 Stunden vorliegt. Deshalb wird in Abbildung 9.38 bei den Messwerten auch innerhalb der Brennstoffe in 'vor M' und 'nach M' unterschieden.

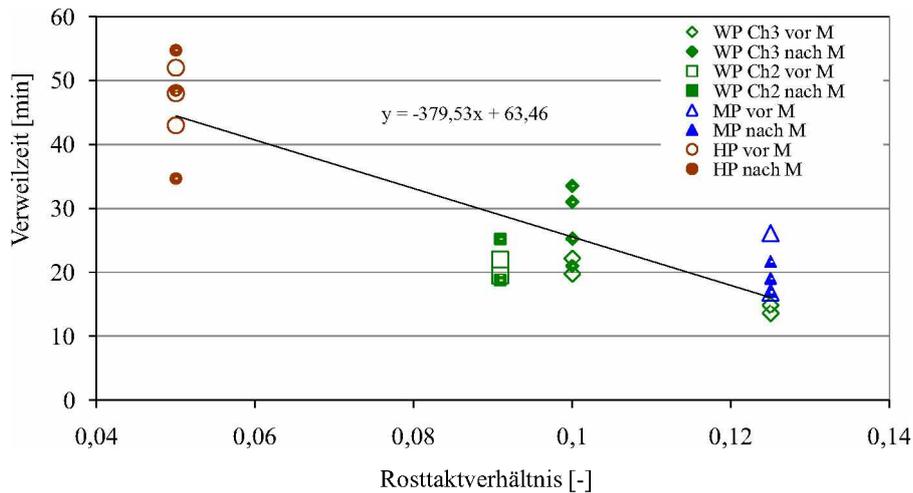


Abbildung 9.38.: Verweilzeit des Brennstoffs am Rost in Abhängigkeit des Rosttaktverhältnisses für verschiedene Brennstoffe bzw. vom Zeitpunkt abhängig vor (vor M) oder nach der Messung der Emissionen (nach M).

Für die Weizenstrophpellets der Charge 2 ergibt sich die geringste Streuung zwischen den Messwerten, auch was den Vergleich vor und nach der Periode der Emissionsmessung betrifft. Bei den Weizenstohpellets der Charge 3 ist deutlich zu sehen, dass die Verweilzeit nach der Emissionsmessung deutlich länger ist als davor. Die größte Streuung ist bei den Versuchen mit den Holzpellets zu beobachten, wobei bei den beiden kürzeren Zeitwerten (jeweils vor der Emissionsmessung und nachher) der Feuerleichtstein im der Mitte des Brennstoffbetts situiert ist. Das lässt den Schluss zu, dass vor allem die Reibung und die Haftung der teilweise aufgeschmolzenen Brennstoffpartikel an den Feuerraumwänden die entscheidende Rolle spielt. Die Streuung beim Brennstoff Miscanthuspellets ist vergleichsweise geringer, jedoch ist hier ein Wert bei Messung vor der Emissionsmessung unerklärlicherweise deutlich größer als jene danach.

9.4.2. Temperaturmessung im Feuerraum

Für die Temperaturmessung im Feuerraum werden insgesamt fünf Mantelthermoelemente mit einem Durchmesser von 1 mm der Type K verwendet. Dabei werden drei Thermoelemente im Abstand von 375 mm (R1), 295 mm (R2) und 155 mm (R3) von der Brennerrückwand im mittleren festen Roststab derart integriert, dass das Brennstoffbett bei der Weiterbewegung nicht gestört wird (Abb. 9.39).

Zwei weitere Temperaturmesspunkte (B1 mit 301 mm und B2 mit 161 mm Abstand von der Brennerrückwand) befinden sich im Brennraum an der Unterseite des Luftkastens. Die Zuleitung der Thermolemente von außen erfolgt über den Spalt zwischen Brennerrückwand und Brenneraußen teil, wobei diese mit der Feuerfestmatte eingeklemmt werden.

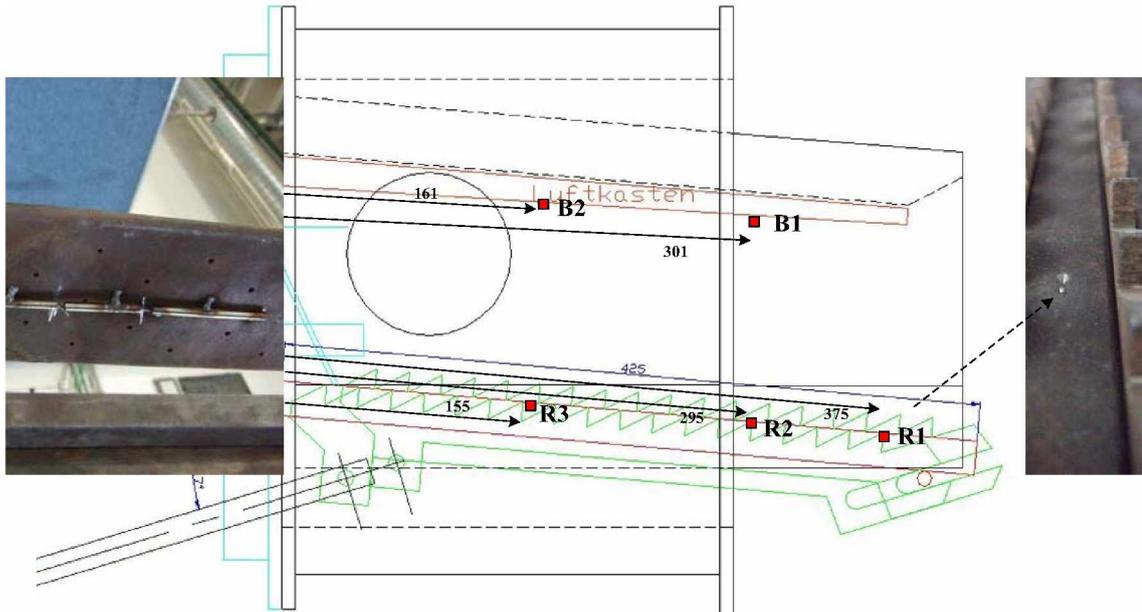


Abbildung 9.39.: Position und Bilder der installierten Thermoelemente am Rost und am Luftkasten.

Exemplarisch sind in Abbildung 9.40 die Temperaturverläufe für jeden verwendeten Brennstoff dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass direkt am Rost am Messpunkt R3 bei allen Versuchen mit Mittelwerten von etwa 600 bis 720 °C die geringsten Temperaturen gemessen werden, was auch in Abb. 9.41 deutlich zu sehen ist.

Dies hängt damit zusammen, dass an diesem Punkt einerseits die Pyrolysephase des Brennstoffs, vor allem in den unteren Schichten, nicht abgeschlossen ist und andererseits eine größere Bett­höhe die Strahlungswärme der darüber liegenden Flammen gut abschirmen kann. Vor allem wird die Wärme höchstwahrscheinlich durch Wärmeleitung im festen Roststab vom vorderen Bereich übertragen. Bezüglich der Temperaturmessstellen R1 und R2 kann dies anhand Abbildung 9.40 nicht eindeutig eine Reihung durchgeführt werden.

Bei Einbeziehung aller neun Versuche ist anhand Abbildung 9.41 für die Brennstoffe WP Ch3, MP und HP ein geringfügig höherer Wert für die Messstelle R2 zu erkennen. Hier ist die Reaktion im Brennstoff immer voll im Gange und es befindet sich immer eine Bettbedeckung über dem Thermoelement, wogegen es öfters passiert, dass durch das Abfallen einer größeren Verkrustung (z. B. Sprünge in Abb. 9.40 bei ca. 2 bzw. 3,5 Std. bei MP) oder durch vorzeitige Umsetzung des Brennstoffs (z. B. bei HP V4) die Messstelle R1 frei liegt. Dann kann die Strahlung der darüber stattfindenden Gasverbrennung oder der Sekundärzone hier eine höhere Temperatur hervorrufen. Die erhöhte Brennstoffwärmeleistung bei HP könnte hier natürlich auch eine Rolle spielen.

An den Messstellen B1 und B2 werden im Vergleich zu den Messpunkten am Rost um etwa 200 K höhere Temperaturen gemessen. Im Vergleich der beiden Temperaturen B1 und B2 ist bei den Brennstoffen WP Ch2, WP Ch3 und MP in Abbildung 9.40 für B2 eine geringfügig höhere Temperatur zu bemerken, in Abbildung 9.41, bei Bildung der Mittelwerte aller Versuch ist jedoch kaum mehr ein Unterschied zu sehen. Der Hohe Wert für B2 bei HP stammt aus dem Versuch, wo nach zwei Drittel des Rostes kein Brennstoffbett mehr vorhanden ist, da es bereits vollständig umgesetzt ist und auch hier schon großteils der vollständige Gasausbrand abgeschlossen ist.

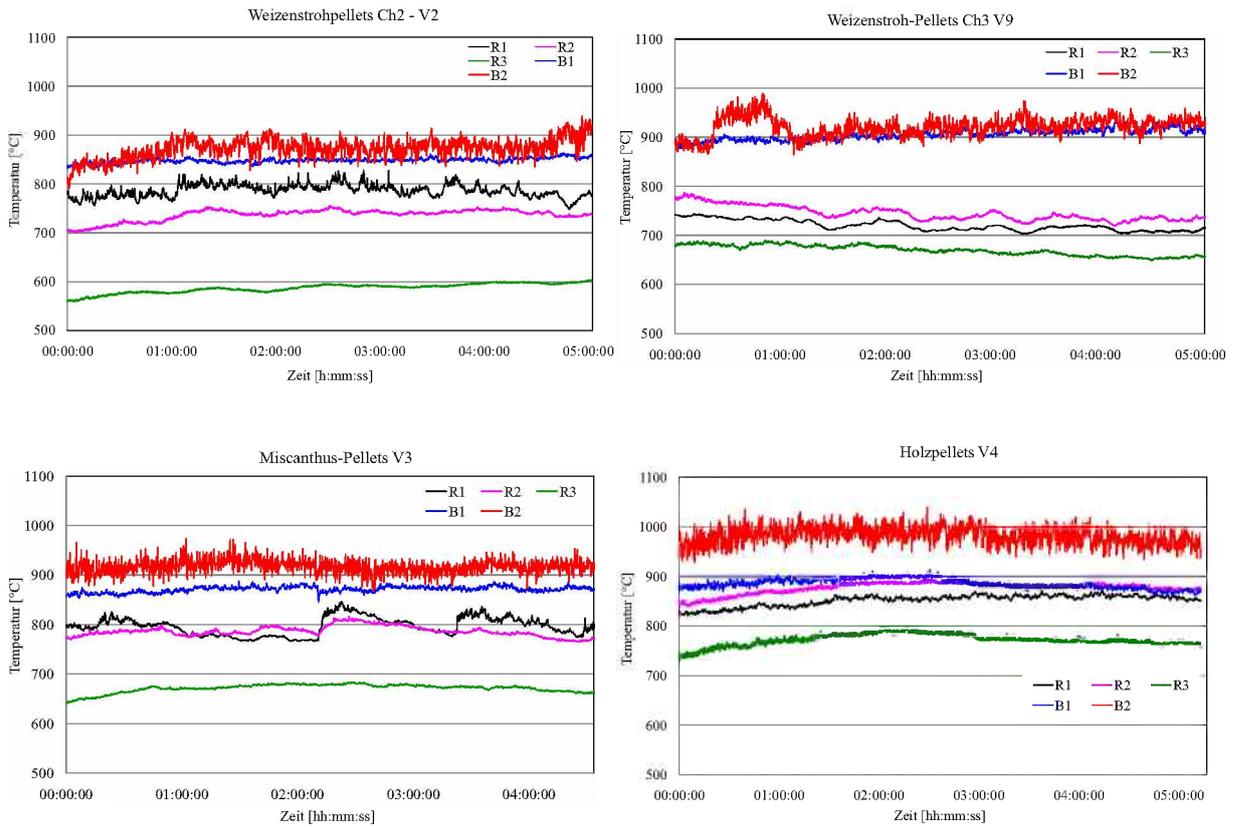


Abbildung 9.40.: Temperaturverlauf am Rost und im Feuerraum bei Versuchen mit verschiedenen Brennstoffen: WP Ch2 (oben links), WP Ch3 (oben rechts), MP (unten links) und HP (unten rechts).

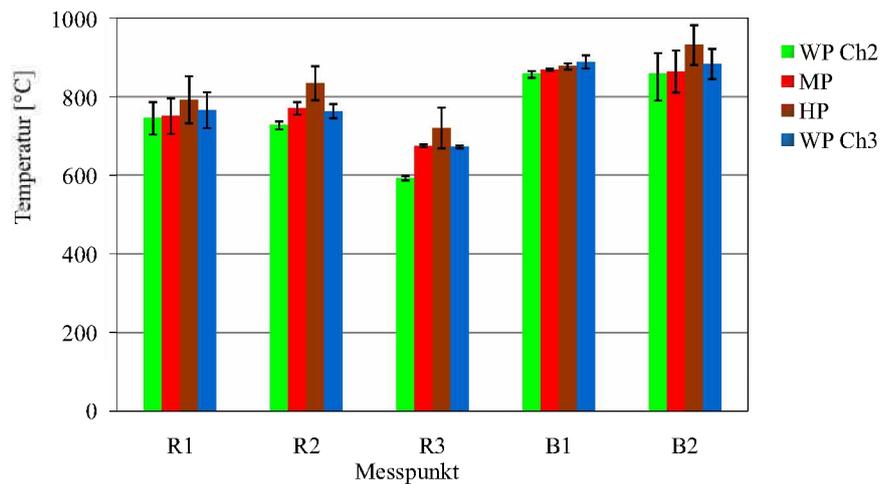


Abbildung 9.41.: Vergleich der mittleren Temperaturen und Streubreite je Messpunkt für die Brennstoffe WP Ch2 (n = 3), WP Ch3 (n = 2), MP (n = 2) und HP (n = 2).

Auffallend in Abbildung 9.41 ist auch, dass an den Messstellen R2, R3, und B1 - ausgenommen HP - die Streubreite relativ gering ist.

Die Hauptursache der niedrigeren Temperaturen, vor allem bei den Versuchen mit Weizenstrohpellets, ist das geringe Primärluftverhältnis von nur etwa 65 bis 75 % des vollständigen Ausbrandes

im Vergleich zu etwa 90 % bei den Versuchen mit Holzpellets. Das geringe Primärluftverhältnis bei WP ist notwendig, um die Temperaturen im Brennstoffbett möglichst gering zu halten und so das Ascheschmelzen zu verhindern. Beim Primärluftverhältnis von 90 % findet außerdem schon der Großteil des Gasausbrands über dem Brennstoffbett statt.

Der Vergleich zu Schrumpfungs- oder Sintertemperaturen in in Abbildung 7.6 in Abschnitt 7.3 zeigt, dass für Weizenstroh- und Miscanthuspellets die in der Anlage gemessenen Schrumpfungstemperaturen von etwa 640 bis 700 °C bis auf eine Ausnahme überall erreicht oder sogar überschritten werden. Auch die für diese Brennstoffe ermittelten Erweichungstemperaturen von etwa 800 bis 850 °C werden im Vergleich mit den im Brennraum gemessene Temperaturen (B1 und B2) überschritten. Beim Versuch V3 kommt es zu mittelgroßer Schlackebildung, bei V9 zu massiver Schlackebildung. Dies ist in den Diagrammen in Abb. 9.40 anhand der hohen Temperaturen bei B2 von über 900 °C zu erkennen.

Dabei muss noch bedacht werden, dass die Thermoelemente der Messpunkte B1 und B2 höchstwahrscheinlich etwas geringere Temperaturen messen, da der umgebende Mantel des Brennraums von außen mit Sekundärluft durchströmt wird und auf diese Weise die Wände abgekühlt werden. Durch diese kühleren Wände ist das Thermoelement durch Strahlungsverlust an die Wand etwas kühler als die Gastemperatur im Brennraum.

9.5. Messung der Emissionen

Die Messung der Emissionen werden im Zuge von insgesamt 9 Versuchen mit einer jeweiligen Messdauer bis etwa fünf Stunden durchgeführt. Dabei werden mit den Brennstoffen Weizenstohpellets der Charge 2 (3 Versuche), Weizenstrohpellets der Charge 3 (2 Versuche), Miscanthuspellets (2 Versuche) und Holzpellets (2 Versuche) gasförmige Emissionen (CO, OGC, NO_x), Feinstaub (PM) und Gesamtstaub (TSP) gemessen. Nach dem Start der Anlage wird diese jeweils 1,5 bis 2 Stunden auf Betriebstemperatur hochgefahren und dann mit den Messungen begonnen.

9.5.1. Gasförmige Emissionen

Die Messung der gasförmigen Emissionen wird mit den in Unterabschnitt 6.2.1 beschriebenen Geräten durchgeführt.

Die vom automatischen Aufzeichnungssystem erfassten Messwerte müssen einerseits auf den nötigen Bezugssauerstoff umgerechnet und der bei 4 °C (Kühler) noch verbleibende Wasseranteil abgezogen werden, andererseits sind die Messwerte von den Einheiten ppm oder mg/m³ in die Einheiten mg/MJ umzuwandeln (siehe dazu Unterabschnitt 3.3.1).

Abbildung 9.42 zeigt beispielhaft den zeitlichen Verlauf der Emissionskonzentrationen über die Versuchsdauer von fast vier Stunden beim Versuch V1 mit dem Brennstoff Weizenstrohpellets der Charge 2.

Bei Kohlenstoffmonoxid zeigt sich, dass die anfangs höheren Wert nach etwa 1,5 Studen auf ein konstant niedrigeres Niveau zurückgehen. Dies kann mit der Temperatur in der Sekundärzone zusammenhängen, die erst nach etwa drei Sunden nach dem Start ihr konstant hohes Niveau erreicht. Der über die Versuchsdauer errechnete Mittelwert beträgt für diesen Versuch 77 mg/MJ, was etwa 15 % des Grenzwerts von 500 mg/MJ entspricht.

Der zeitliche Verlauf der Stickstoffoxide NO_x ist sehr konstant und erreicht bei Versuch 1 mit einem Mittelwert von 181 mg/MJ etwa 60 % des vorgeschriebenen Grenzwertes von 300 mg/MJ. Der zeitliche Verlauf der Organischen Gesamtkohlenstoffe OGC ist ebenfalls sehr konstant und erreicht mit einem Mittelwert von 11 mg/MJ etwa 37 % des Grenzwertes von 30 mg/MJ.

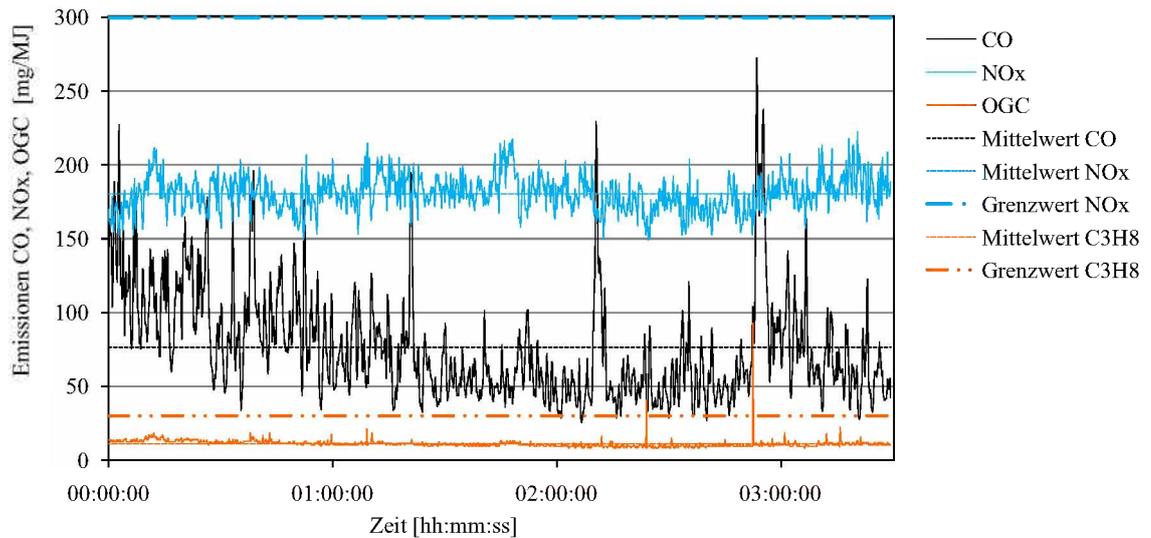


Abbildung 9.42.: Zeitlicher Verlauf der Emissionskonzentrationen von CO, NO_x und OGC inklusive Mittelwerten beim Versuch V1 mit Weizenstrohpellets der Charge 2. Als Vergleich sind die Grenzwerte ebenfalls eingezeichnet. Mit $H_u = 15,84 \text{ MJ/kgOS}$, $v_a = 10,19 \text{ m}^3/\text{kg}$, bei Bezugssauerstoff 13 % O₂, NO_x als NO₂.

In der Tabelle 9.1 sind die Mittelwerte aus mehreren Versuchen zu einem Mittelwert für den jeweiligen Brennstoff zusammengefasst und mit den jeweiligen Grenzwerten bzw. Literaturwerten verglichen. Hier zeigt sich wiederum, dass es bei CO und OGC überhaupt kein Problem ist, unter den Grenzwerten zu bleiben. Die Stickoxide NO_x bleiben hier noch bei etwa 70 % des Grenzwertes, wenn jedoch dieser in Zukunft gesenkt werden sollte und Brennstoffe mit hohen Stickstoffgehalten verwendet werden, wird es dann sicherlich zu Überschreitungen kommen.

Tabelle 9.1.: Mittel der Emissionswerte für CO, NO_x und OGC aus der Verbrennung der Brennstoffe WP Ch2 (n=3 Versuche), WP Ch3 (n=2), MP (n=2), HP (n=2), Vergleich mit den Grenzwerten und Typenprüfungen für HP. Bezugssauerstoff 13 % O₂, NO_x als NO₂.

Brennstoffart	Emissionswert [mg/MJ]		
	CO	NO _x	OGC
WP Ch2	69	210	8
WP Ch3	139	178	4
MP	23	208	4
HP	31	54	3
Grenzwert sonstige standardisierte biogene Brennstoffe [111]	500	300	30
Grenzwert HP Zentralheizgeräte	250	150	30
Mittelwert Typenprüfungen für HP im TFZ [21]	40	58	2

WP Ch2: $H_u = 15,84 \text{ MJ/kgOS}$, $v_a = 10,20 \text{ m}^3/\text{kgOS}$; WP Ch3: $H_u = 15,27 \text{ MJ/kgOS}$, $v_a = 10,01 \text{ m}^3/\text{kgOS}$; MP: $H_u = 16,76 \text{ MJ/kgOS}$, $v_a = 10,33 \text{ m}^3/\text{kgOS}$; HP: $H_u = 17,46 \text{ MJ/kgOS}$, $v_a = 10,92 \text{ m}^3/\text{kgOS}$; Abgasmenge v_a jeweils bezogen auf 13 % O₂ und Normalbedingungen.

Der hohe Wert von 139 mg/MJ für Kohlenstoffmonoxid beim Brennstoff WP Ch3 kann zunächst nicht erklärt werden, zumal doch laut Abbildung 9.41 alle Temperaturen im Bereich des Brennstoffbettes höher sind als jene bei den Versuchen mit WP Ch2. Bei weiterer Analyse der Verbrennungsbedingungen ist zu sehen, dass bei den Versuchen mit WP Ch2 rund 70 % der stöchiometrischen

Verbrennungsluftmenge als Primärluft zugeführt wird (l_{rel}), wogegen es bei den Versuchen mit WP Ch3 etwa 80% sind. Es könnte dadurch möglich sein, dass dadurch zu wenig Sekundärluft für die gezielte Zugabe und Vermischung zu den Verbrennungsgasen zur Verfügung steht.

In Abbildung 9.43 sind die Mittelwerte der Stickstoffemissionen (NO_x als NO_2) über dem Stickstoffgehalt des Brennstoffs aufgetragen. Hier zeigt sich, dass beim höherem Stickstoffgehalt des Brennstoffs auch die Stickoxidemissionen steigen. Zusätzlich sind auch die jeweiligen Kohlenstoffmonoxidemissionen CO eingezeichnet, um den Einfluss der reduzierenden Wirkung von CO abschätzen zu können. So müsste der höchste in Abb. 9.43 eingezeichnete Brennstoffgehalt auch die größte Stickoxidemission hervorrufen, was aber durch den im Vergleich zu den anderen Versuchen mehr als doppelt so hohen CO-Wert durch die reduzierende Wirkung verhindert wird.

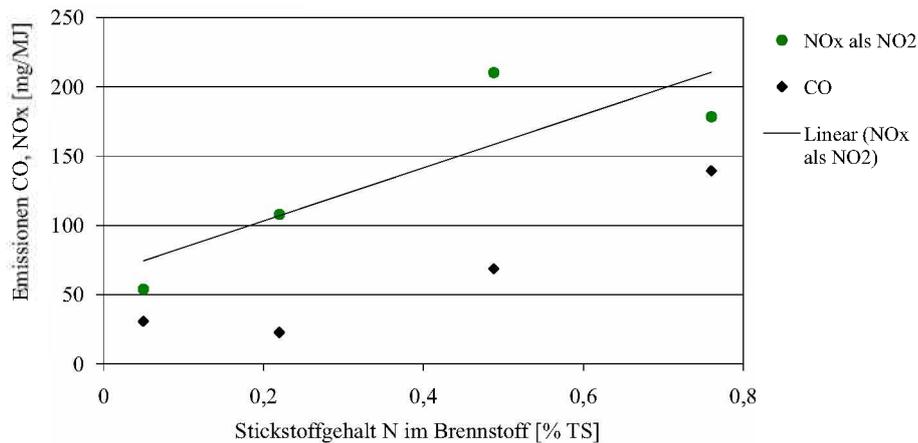


Abbildung 9.43.: Stickstoffoxid NO_x im Abgas als Funktion des Stickstoffgehaltes im Brennstoff inklusive CO-Werten. Regressionsgerade aller NO_x -Werte als durchgezogene schwarze Gerade, grün strichlierte Linie nur die drei kleineren Werte. NO_x als NO_2 .

Die drei niedrigeren Werte liegen bei geringer Reduktionswirkung aufgrund kleiner CO-Werte auf einer Gerade (grün strichlierte Gerade im Abb. 9.43).

Verfeinerte Massenbilanz für Stickstoff: Mit dem ermittelten Stickoxidwert von 210 mg/MJ für WP Ch2 kann über die stöchiometrische Zusammensetzung von NO_2 der spezifische Stoffstrom von 63,9 mgN/MJ berechnet werden. Auf der Input-Seite lässt sich über den Heizwert von 15,84 MJ/kgOS und dem Anteil von 0,46%OS Stickstoff im Brennstoff der spezifische Stoffstrom von 290,4 mgN/MJ ermitteln, was für den Stickstoff N im NO_x dann einem Anteil von 22,1% entspricht. Mit diesem Wert können die in Unterabschnitt 9.3.3 bzw. in Abbildung 9.32 durchgeführten Überlegungen weitergeführt und der Anteil des Stickstoffs im Abgas in die Fraktionen N_2 und NO_x aufgeteilt werden (Abb. 9.44).

Hinzuzufügen ist hier jedoch, dass dies nur für den Brennstoff WP Ch2 gilt und vor allem der Wert des Stickstoffs im Rückstand aus Untersuchungen anderer Versuche stammt, bei denen ein schlechterer Ausbrand erreicht worden ist. Es kann nicht gesagt werden, ob der zusätzliche, aus dem Rückstand frei werdende Stickstoff in der Form von N_2 und NO_x über das Abgas die Anlage verlässt.

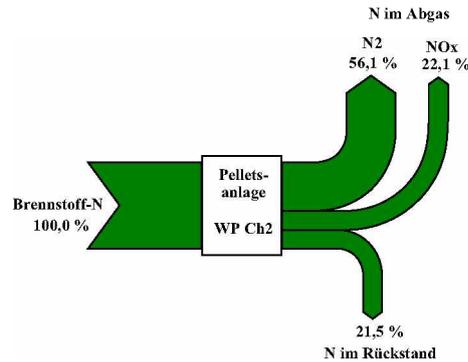


Abbildung 9.44.: Sankey-Diagramm für den Stofffluss von Stickstoff mit zusätzlichen Pfad für Stickstoff N als Stickstoffoxid NO_x .

9.5.2. Feinstaubmessung

Es werden bei 9 Verbrennungsversuchen insgesamt 22 Feinstaubmessungen mit dem „Berner Low Pressure Cascade Impactor“ BLPI ausgewertet. Dabei teilen diese sich auf in 8 Messungen bei 3 Anlagenversuchen mit Weizenstrohpellets der Charge 2, 5 Messungen bei 2 Versuchen mit Weizenstrohpellets der Charge 3, 5 Messungen bei 2 Versuchen mit Miscanthuspellets und 5 Messungen bei zwei Versuchen mit Holzpellets, wobei jeder Verbrennungsversuch eine Dauer von fünf bis sechs Stunden aufweist und die Messungen innerhalb dieses Zeitraumes verteilt durchgeführt werden. Die Absaugtemperatur beträgt dabei zwischen 90 und 120 °C.

Da kein Feuchtemessgerät zur Messung des Wassergehaltes im Abgas zur Verfügung steht, wird dies rechnerisch über die Verbrennungsrechnung ermittelt. Über die Verbrennungsrechnung können die trockene Norm-Abgasmenge $\dot{V}_{a(tr,13\%,0^\circ\text{C})}$ und die Betriebs-Abgasmenge $\dot{V}_{a(f,O_2,t)}$ errechnet werden, die mit dem BLPI abgesaugte Betriebs-Gasmenge $\dot{V}_{BLPI(f,O_2,t)}$ ist durch Umrechnung des werksseitig angegebenen Volumenstroms mit der Formel 6.12 auf Absaugtemperatur möglich.

Da die Verhältnisse zwischen Betriebs- und Normzustand sowohl beim gesamten Abgasstrom als auch bei einer Teilmenge gleich bleiben, kann über die Beziehung

$$\frac{\dot{V}_{BLPI(tr,13\%,0^\circ\text{C})}}{\dot{V}_{BLPI(f,O_2,t)}} = \frac{\dot{V}_{a(tr,13\%,0^\circ\text{C})}}{\dot{V}_{a(f,O_2,t)}} \quad (9.25)$$

kann die abgesaugte trockene Norm-Absaugmenge $\dot{V}_{BLPI(tr,13\%,0^\circ\text{C})}$ errechnet werden.

Da in den maßgeblichen rechtlichen Vorgaben die Grenzwerte für Staub in der Einheit mg/MJ angegeben sind, werden hier die Ergebnisse bezüglich Feinstaub auch in dieser Einheit publiziert. Die Umrechnung von mg/m^3 in mg/MJ ist in Unterabschnitt 3.3.1 dargestellt.

In Abbildung 9.45 sind die bei der Messung mit dem BLPI belegten Folien zu sehen. Dabei ist beim abgebildeten gesamten Satz von Folien der Messung von WP Ch2 die Belegung der der Stufen 4 bis 8 recht deutlich zu erkennen (oben links).

Die anderen Fotos in Abb. 9.45 zeigen die pyramidenförmig geformten Staubablagerungen auf den Folien.

In Abbildung 9.46 sind alle Messungen mit dem BLPI für jeden Brennstoff als Verteilungskurve dargestellt. Dabei ist zu sehen, dass der Großteil der Partikel auf den Stufen 3 bis 7 - dies entspricht dem mittleren Durchmesser von 78 bis 660 nm - abgelagert wird. Die Verteilungskurven für die Brennstoffe WP Ch3 und MP liegen jeweils für alle Messungen sehr eng beisammen. Für WP Ch2

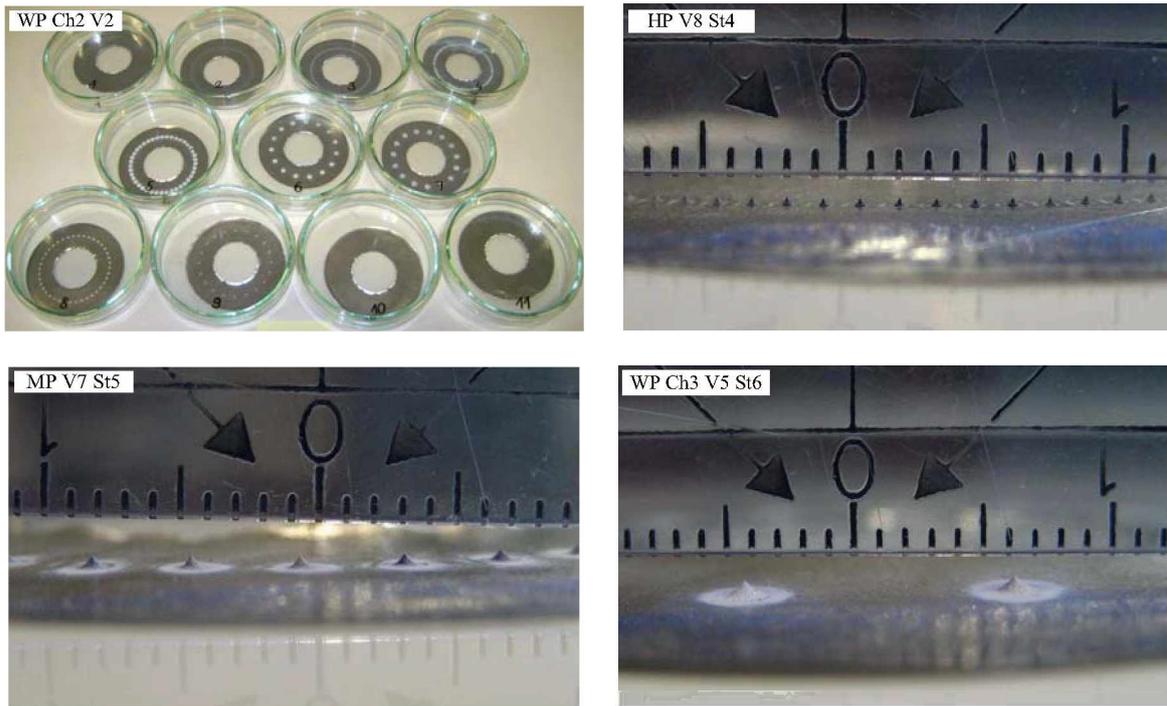


Abbildung 9.45.: Belegung der Folien bei der Messung mit dem BLPI in verschiedenen Versuchen: Foliensatz für Messung von WP Ch2 bei Versuch V2 (oben links); HP bei Versuch V8, Folie der Stufe 4 (oben rechts); MP bei Versuch V7, Folie der Stufe 5 (unten links) und WP Ch3 bei Versuch V5, Folie der Stufe 6 (unten rechts).

und HP ist eine gewisse Streuung zu sehen, obwohl sich an den Massenverhältnissen der Stufen zueinander je Einzelmessung wenig ändert.

Auffallend ist auch, dass bei der Verbrennung von Holzpellets die Mehrheit der Partikel mittlere Partikeldurchmesser von 36 bis 340 nm (Stufen 3 bis 6) aufweisen, bei den anderen Brennstoffen liegt dies bei 78 bis 660 nm (Stufen 4 bis 7).

Kritisch sind hier die Messungen bei den hohen Staubkonzentrationen im Abgas im Zuge der Versuche mit den Weizenstrohpellets zu betrachten: Um die Folien nicht zu überladen betragen die Absaubzeiten nur zwischen 40 Sekunden und 1 Minute. Dadurch wirken sich Ungenauigkeiten beim Ein- und Ausschalten der Vakuumpumpe verhältnismäßig stärker auf das Ergebnis aus als bei der Messung bei Holzpellets, wo durchaus 4 bis 5 Minuten abgesaugt werden kann. Ein Überladen der Folien führt zu vermehrtem Wiederablösen der Partikel (Bouncing) und die Partikel werden in die nächste Stufe gespült oder lagern sich auf den Lochplatten bzw. im Inneren des Gehäuses ab. Dies führt dann zu kleineren Messwerten, da sich diese Partikel einer Auswertung entziehen.

Abbildung 9.47 zeigt den Vergleich der Mittelwerte aus mehreren Messungen von Weizenstroh-, Miscanthus- und Holzpellets. Dabei ist zu erkennen, dass bei der Verbrennung von Weizenstroh-Pellets im Vergleich zu Miscanthus- oder Holz-Pellets ein Vielfaches an Partikel entstehen.

Das Maximum bei den Weizenstroh-Pellets liegen auf den Stufen 5 und 6 (mittlerer aerodynamischer Partikeldurchmesser von 0,17 bzw. 0,34 μm) und bei Miscanthus-Pellets auf Stufe 5 (0,17 μm). Im Vergleich dazu liegen bei den Holz-Pellets die Maximas auf den Stufen 4 (0,078 μm) und 5 (0,17 μm).

Die Partikelverteilung stimmt gut mit den in der Literatur z.B. von BRUNNER ET AL. [217] publizierten Ergebnissen überein.

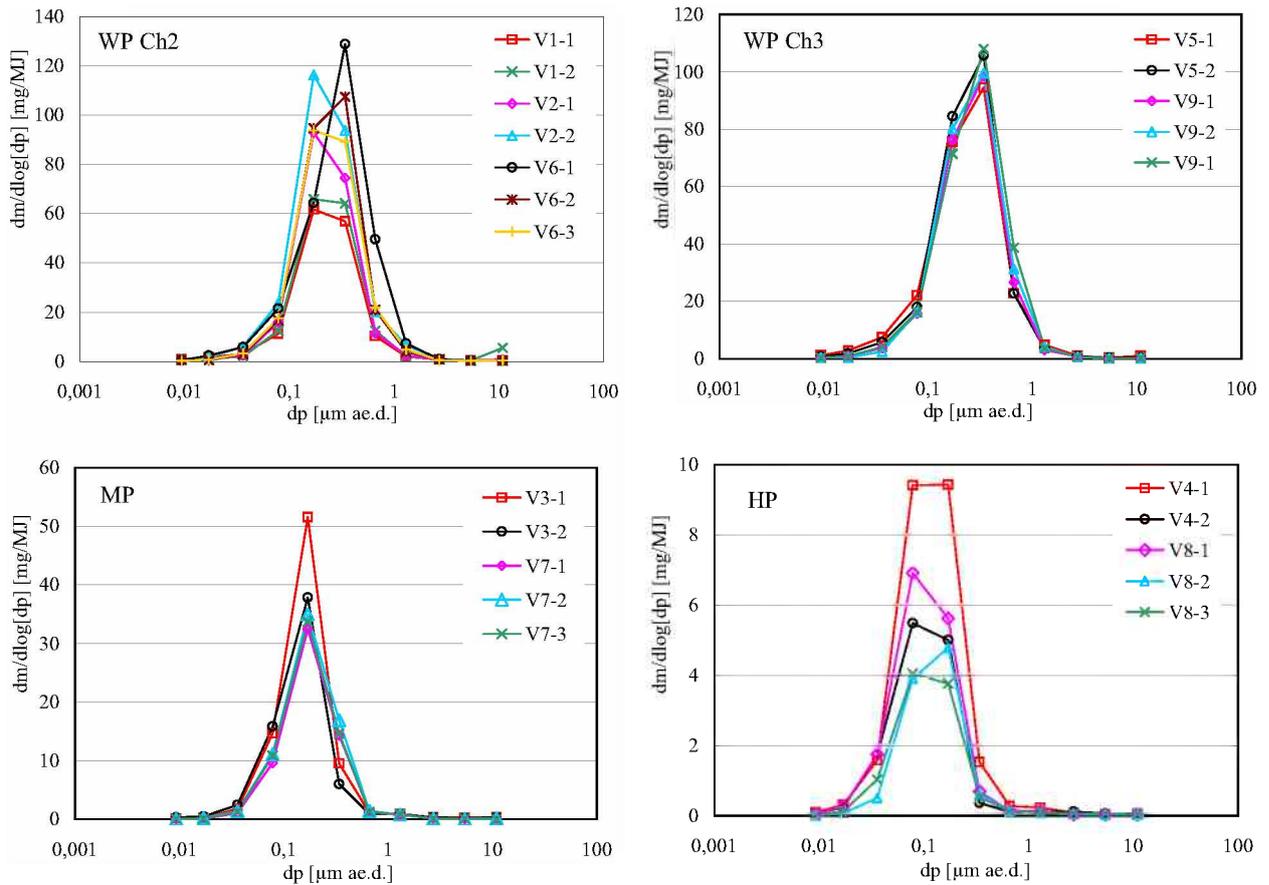


Abbildung 9.46.: Partikelverteilung für alle Messungen, jeweils für Weizen-, Miscanthus- und Holzpellets. (Erläuterung: Die Emissionswerte (-faktoren) beziehen sich auf trockenes Abgas und 13 % O₂; ae.d. aerodynamischer Durchmesser, V...Versuch).

Die relativ große Streuung bei den Messungen mit den Weizenstrohpellets kann einerseits mit der oben beschriebenen Problematik der Überladung zusammenhängen oder auch durch schwankende Verbrennungsbedingungen, gerade bei diesen kurzen Absaugzeiten, verursacht werden. Welcher Einfluss hier stärker zum Tragen kommt, kann an dieser Stelle nicht beurteilt werden.

9.5.3. Gesamtstaubmessung

Im Zuge von 9 Verbrennungsversuchen werden insgesamt 23 Gesamtstaubmessungen mit der in Unterabschnitt 6.2.2 beschriebenen Messanordnung ausgewertet. Dabei teilen diese sich auf in 5 Messungen bei drei Anlagenversuchen mit Weizenstrohpellets der Charge 2, 6 Messungen bei zwei Versuchen mit Weizenstrohpellets der Charge 3, 6 Messungen bei zwei Versuchen mit Miscanthuspellets und 6 Messungen bei zwei Versuchen mit Holzpellets, wobei jeder Versuch eine Dauer von fünf bis sechs Stunden aufweist und die Messungen innerhalb dieses Zeitraumes verteilt durchgeführt werden.

Bei den Versuchen mit dem Brennstoff Weizenstrohpellets der Charge 2 und 3 werden bei insgesamt 11 Messung sehr hohe Mittelwerte von 266 mg/MJ bzw. 252 mg/MJ gemessen. Dagegen ist die mittlere Gesamtstaubkonzentration bei Miscanthuspellets mit 79 mg/MJ vergleichsweise niedrig. Der Grenzwerte von 60 mg/MJ wird bei den Weizenstrohpellets um ein Vielfaches, von Miscanthus auch deutlich überschritten. Ein Betrieb ohne Entstaubungsanlage ist daher aus rechtlicher Sicht nicht möglich.

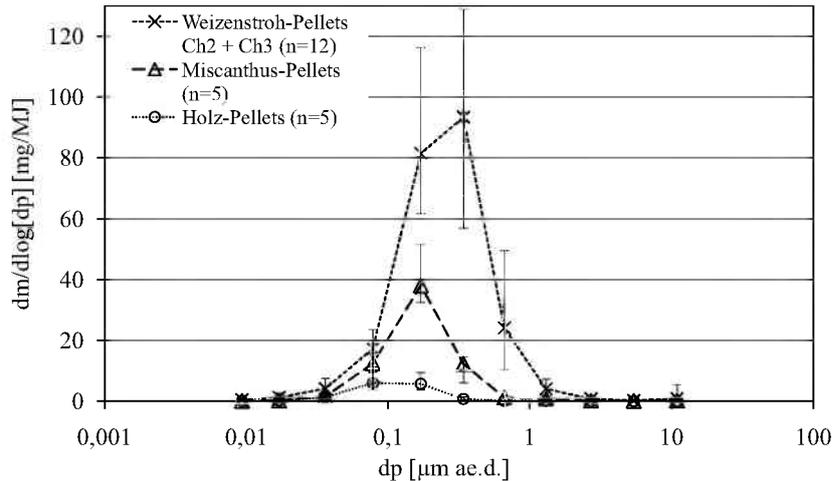


Abbildung 9.47.: Mittelwerte der Partikelverteilung aus der Verbrennung von Weizen-, Miscanthus- und Holzpellets. (Erläuterung: Die Emissionswerte (-faktoren) beziehen sich auf trockenes Abgas und 13 % O₂; ae.d. . . . aerodynamischer Durchmesser) [201].

Der Mittelwert der Versuche mit Holzpellets liegt bei nur 21 mg/MJ was etwa 50 % des zulässigen Grenzwertes von 40 mg/MJ entspricht (siehe dazu Abbildung 9.48). Als Vergleich liegt der Mittelwert von Typenprüfungen des TFZ (Technologie- und Förderzentrum, Straubing) für Holzpelletskessel von 15 bis 50 kW [21] bei 9 mg/MJ.

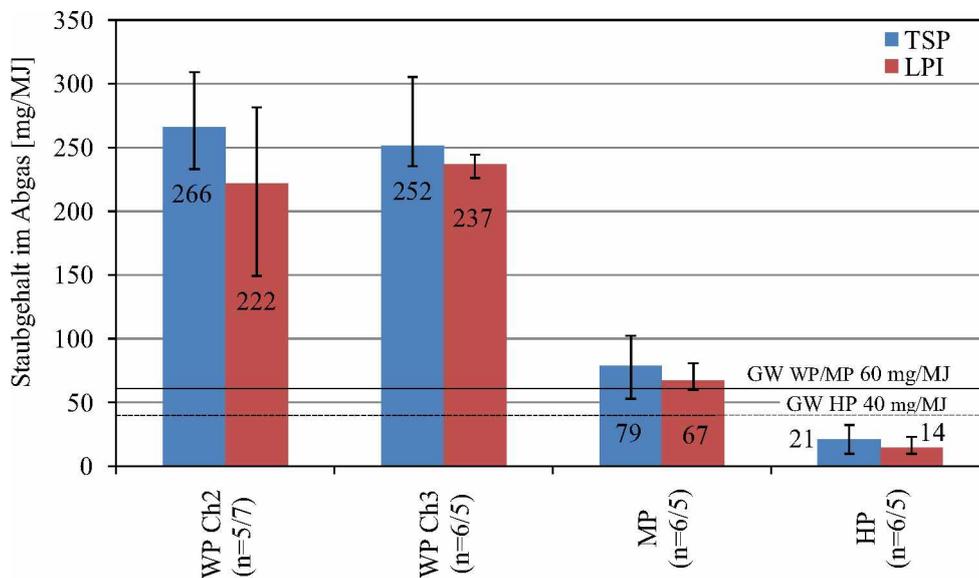


Abbildung 9.48.: Vergleich der Staubgehalte im Abgas für die Gesamtstaub- und Feinstaubmessung (Erläuterung: Die Emissionswerte (-faktoren) beziehen sich auf trockenes Abgas und 13 % O₂, GW...Grenzwert).

Die großen Schwankungsbreiten bei der Gesamtstaubmessung bei Weizenstrohpellets sind auch auf die hohen Konzentrationen zurückzuführen: Durch die großen Staubmengen werden die Staubhüllen rasch weniger durchlässig, wodurch der Druckverlust rasch steigt. Es wird die Pumpenleistung während der Messung zwar erhöht, doch vermindert sich der Volumenstrom, was eine geringere Absauggeschwindigkeit im Kamin zur Folge hat. Dabei kann die Forderung nach isokinetischer Absaugung nicht eingehalten werden und, im Vergleich zur abgesaugten Gasmenge, zuviel Staub

abgeschieden.

Um die Messungen von Gesamtstaub und Feinstaub zu vergleichen bzw. zu verifizieren, sind die Ergebnisse für die einzelnen Brennstoffe in Abbildung 9.48 gegenübergestellt. Dabei ist gut zu sehen, dass der Gesamtstaub-Wert jeweils über jenem der Summe der einzelnen Stufen für Feinstaub liegt. Dies muss auch so sein, da bei der Feinstaubmessung die Anteile größer ca. $10\ \mu\text{m}$ im vorgeschalteten Zyklon bzw. in der Entnahmesonde abgeschieden werden und der BLPI auch keinen Endfilter besitzt. Dieser Vergleich zeigt nochmals deutlich, dass der Großteil des Staubes aus der Verbrennung von Weizenstroh-, Miscanthus- oder Holzpellets dem Feinstaub zuzuordnen ist.

Die extrem hohen Staubkonzentrationen beim Brennstoff Weizenstrohpellets, welche hauptsächlich aus Kaliumchlorid KCl bestehen (vgl. Unterabschnitt 9.5.4), hinterlassen auch sichtbare Spuren an der Verbrennungsanlage (Abb. 9.49). So wird beispielsweise die Sichtscheibe innerhalb von wenigen Minuten vollkommen mit Staub belegt, sodass eine Durchsicht unmöglich wird.

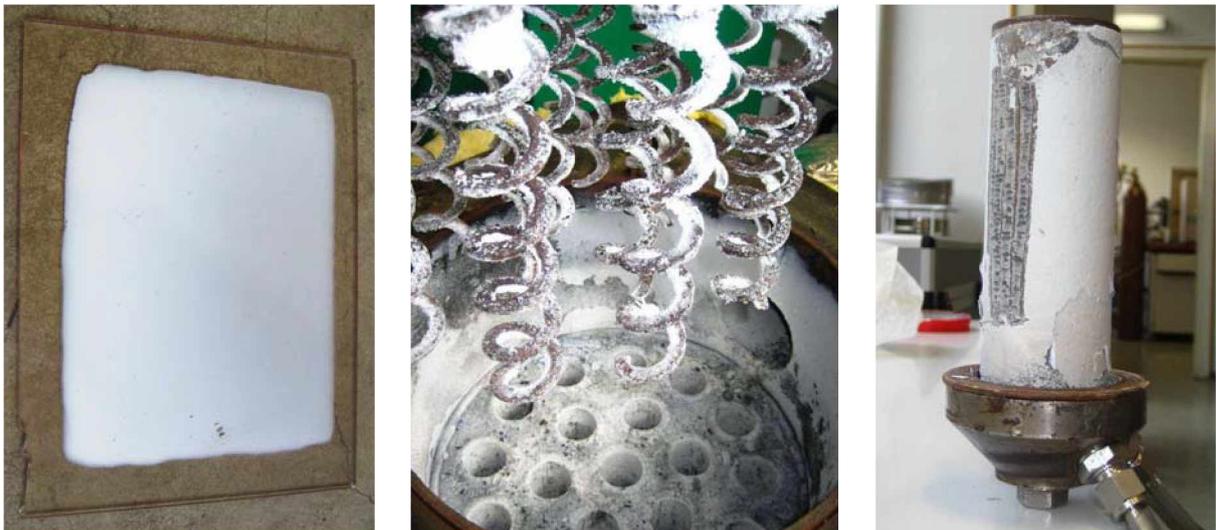


Abbildung 9.49.: Extreme Belegung und Ablagerung von Staub auf der Sichtscheibe (links), dem Wärmeübertrager bzw. den Turbulatoren (mitte) und des Keramikfilters zur Messgasabsaugung (rechts) aufgrund der Verbrennung von Weizenstrohpellets.

Die Turbulatoren, welche stündlich die Abreinigung der Wärmeübertrager-Rohre vornehmen und auch der Wärmeübertrager selbst werden vollkommen mit einer weißen Staubschicht bedeckt (Abb. 9.49, mitte). Auch der Keramikfilter, über den die Absaugung für die Gasmessung stattfindet, ist nach wenigen Versuchen mit einer dicken Staubschicht bedeckt. Abb. 9.49 (rechts) zeigt den ausgebauten Keramikfilter mit teilweise abgeschabter Staubschicht als Vergleich.

Um den Zusammenhang von Aschegehalt im Brennstoff und der Staubkonzentration im Abgas darzustellen, sind in Abbildung 9.50 die Staubgehalte im Abgas für Gesamtstaub TSP und für Feinstaub PM über dem Aschegehalt des jeweiligen Brennstoffes aufgetragen.

Dabei ist eine sehr deutliche Korrelation festzustellen. Die Regressionsgeraden sowohl für den Gesamtstaub als für jene für den Feinstaub haben sehr ähnlich Steigungen und unterscheiden sich hauptsächlich durch den Anteil der Partikel über $10\ \mu\text{m}$. Aufgrund dieser Zusammenhänge ist es möglich, für ähnliche biologische Brennstoffe oder für die gleichen Brennstoffe mit unterschiedlichen Aschegehalten im Vorhinein die Staubgehalte relativ genau vorauszusagen.

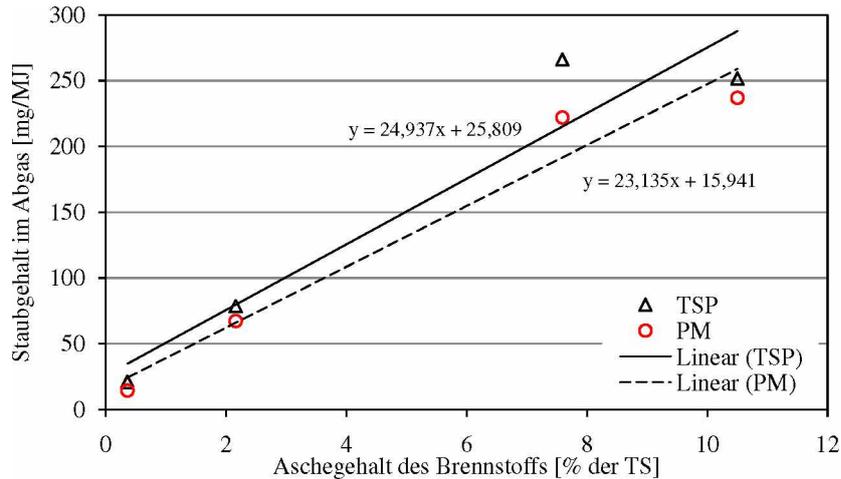


Abbildung 9.50.: Zusammenhang des Aschegehaltes mit der Staubkonzentration im Abgas für Gesamtstaub TSP und Feinstaub PM.

9.5.4. Feinstaubuntersuchungen mit REM/EDX

Die Untersuchung der Staubproben wird am MATERIALS CENTER LOEBEN (MCL) mittels REM/EDX (Zeiss Auriga Feldemissions-Rasterelektronenmikroskop / Energie-dispersive Röntgenanalyse) durchgeführt. Dabei werden von verschiedenen Folien insgesamt 12 Proben ausgewählt und am Probenhalter fixiert (Abb. 9.51, a) und mit Gold bedampft, um Aufladungen der Probe während der Messung zu vermeiden.

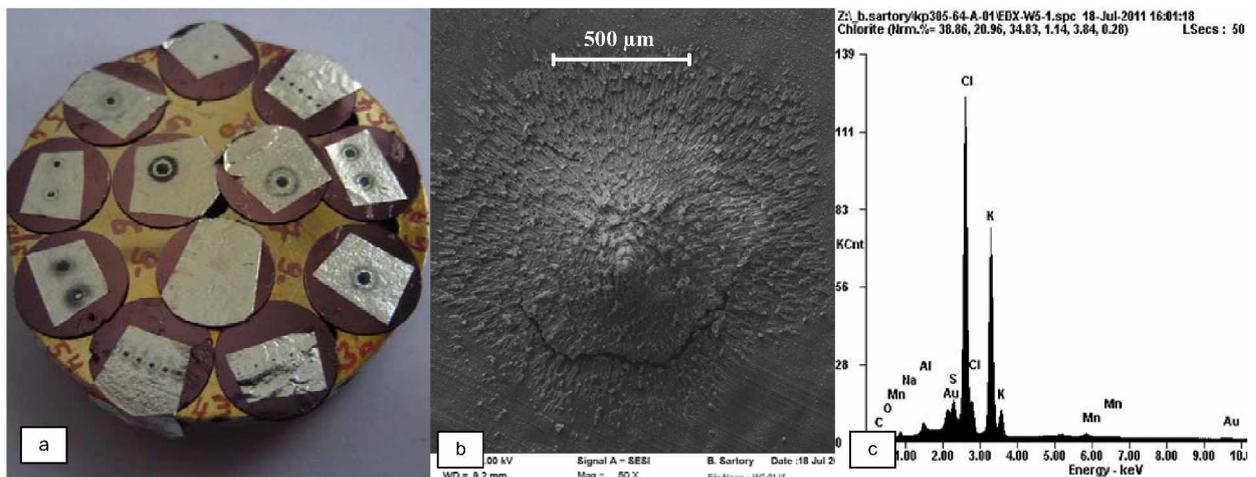


Abbildung 9.51.: Probenhalter für die REM/EDX-Analyse (a), Feinstaubansammlung auf der Stufe 5 (170 nm) bei der Verbrennung von WP bei einer 50-fachen Vergrößerung im REM (b), EDX-Spektrum von Feinstaub auf der Stufe 5 bei der Verbrennung von WP (c).

Die untersuchten Proben sind Ablagerungen auf den Stufen 4, 5 und 6 der Holzverbrennung, auf den Stufen 4, 5 und 6 der Miscanthusverbrennung und Ablagerungen auf den Stufen 3, 4, 5, 6, 7 und 9 der Verbrennung von Weizenstrohpellets.

Am Bild des Probenhalters (Abb. 9.51 a) sind die Feinstaubablagerungen als kreisförmige Flecken gut zu erkennen. Eine 50-fache Vergrößerung im Rasterelektronenmikroskop zeigt die pyramidenförmige Topographie dieser Ablagerungen (Abb. 9.51 b).

In Abbildung 9.51 c ist das EDX-Spektrum von Feinstaub auf der Stufe 5 bei der Verbrennung von Weizenstrohpellets dargestellt. Dabei werden überwiegend die Elemente Kalium (K) und Chlor (Cl) identifiziert. Die im EDX-Spektrum ebenfalls angezeigten Peaks von Gold und Aluminium sind auf die Goldbedampfung der Probe bzw. auf das Trägermaterial der Folie zurückzuführen.

In Abbildung 9.52 sind für alle Proben die gemessenen Zusammensetzungen von zufällig ausgewählten Partikeln dargestellt, wobei hier die ebenfalls gemessenen Anteile von Gold und Aluminium herausgerechnet sind.

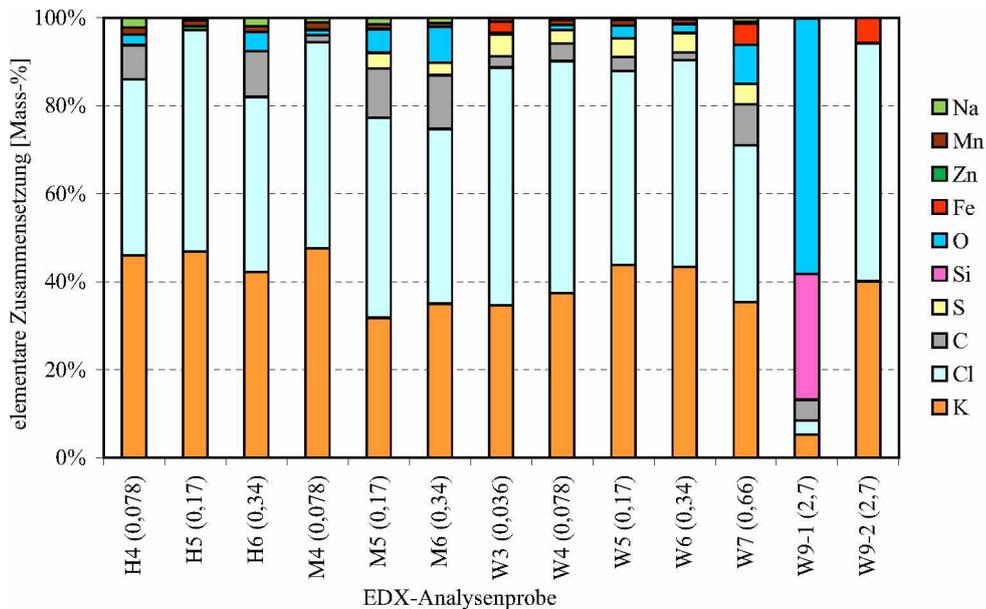


Abbildung 9.52.: Mit REM/EDX ermittelte elementare Zusammensetzung der im BLPI gesammelten Partikel. H...Holz, M...Miscanthus, W...Weizen; die Zahl kennzeichnet die Stufe des BLPI, in Klammer steht die mittlere Partikelgröße der Stufe in μm [201].

Neben den erwähnten Hauptanteilen Kalium und Chlor sind in kleineren Anteilen Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O), Silizium (Si), Natrium (Na), Schwefel (S), Zink (Zn), Mangan (Mn) und Eisen (Fe) vorhanden. Lediglich in der Probe W9-1 (WP der Stufe 9, Probe 1, $2,7 \mu\text{m}$) werden Sauerstoff (O) und Silizium (Si) als größte Fraktionen identifiziert. Der Grund dafür ist, dass hier ein auffälliges, einzelnes Partikel aus vorwiegend Siliziumdioxid (SiO_2) analysiert wird.

Abbildung 9.53 (c) zeigt dieses einzelne kugelförmige Partikel mit einer Größe von etwa $5 \mu\text{m}$. Die Probe W9-2 ($2,7 \mu\text{m}$) zeigt wieder eine ähnliche Zusammensetzung wie die anderen Proben. Da sehr geringe Partikelablagerungen auf Folien kaum Auswirkungen auf die Gesamt-Staubzusammensetzung haben, wird auf eine Untersuchung der Folien 1, 2, 10 und 11 verzichtet.

Bei der Partikelzusammensetzung ist bezüglich Kalium (K), Chlor (Cl) und Schwefel (S) eine gute Übereinstimmung mit der Strohverbrennung in großen Anlagen zu erkennen (vgl. [218]). Dagegen wird, im Gegensatz zur Literatur, kein Kalzium (Ca), Phosphor (P), Magnesium (Mg) und kaum Silizium (Si) oder Zink (Zn), jedoch aber Mangan (Mn) gefunden (vgl. dazu auch BRUNNER ET AL. [217] und JIMÉNEZ ET AL. [219]). Diese Unterschiede könnten einerseits in der Brennstoffzusammensetzung begründet sein, jedoch könnte dies auch ein Indiz dafür sein, dass sich die spezielle Luftführung mit der Primärluft von oben auf die Partikelbildungsbedingungen bzw. -mechanismen auswirkt. Hier wären noch weitere Untersuchungen notwendig, um diesen Sachverhalt aufzuklären.

In Abbildung 9.53 sind drei REM-Aufnahmen von Partikel (Verbrennung von Weizenstrohpellets) aus den Stufen 3 (36 nm mittlerer Partikeldurchmesser, Bild a) und der Stufe 9 (2700 nm , Bild

b) bei 25000-facher Vergrößerung, sowie wiederum der Stufe 9 (2700 nm, Bild c) bei 1000-facher Vergrößerung als Vergleich dargestellt. Dabei ist die sehr heterogene Konrgrößenverteilung von weniger als 100 nm bis hin zu über 1 μm zu sehen. Die in Bild a gemäß der Stufe 3 erwartete mittlere Partikelgröße von 36 nm wird hier von den meisten der abgebildeten Partikel bei weitem übertroffen. Der Grund dafür könnte einerseits mit einer sehr geringe Trennschärfe der Stufen als auch andererseits in einem Agglomerieren bzw. Zusammenwachsen von kleineren Partikeln zu größeren oder mit Kondensationsvorgängen an Ablagerung auf der Folie begründet werden.

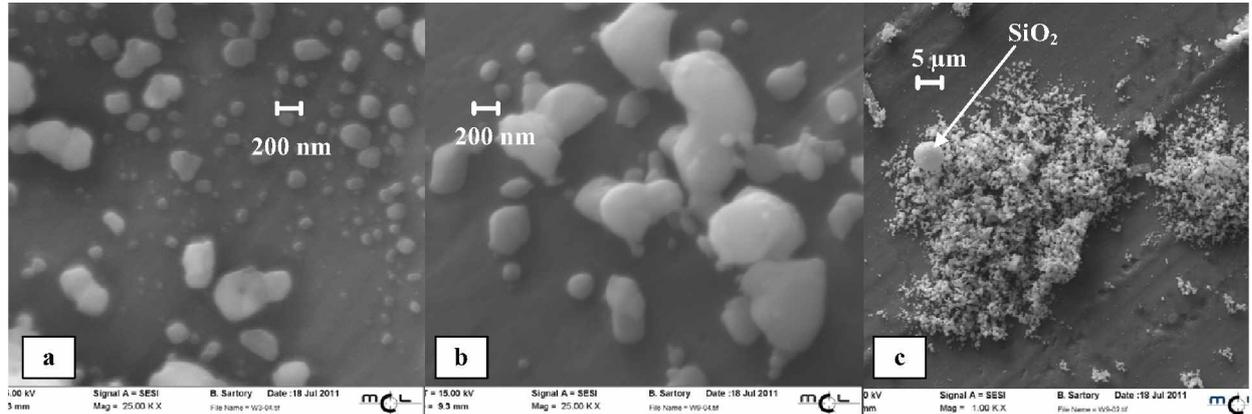


Abbildung 9.53.: REM-Aufnahmen der Partikel aus der Verbrennung von Weizenstrohpellets der Stufe 3 (36 nm mittlerer Partikeldurchmesser, a) und der Stufe 9 (2700 nm, b) bei 25000-facher Vergrößerung; SiO₂-Partikel der Stufe 9 (2700 nm) bei 1000-facher Vergrößerung.

Die in Abbildung 9.53, Bild b gemäß der Stufe 9 erwartete mittlere Partikelgröße von 2700 nm wird von keinem der hier abgebildeten Partikeln erreicht. Es ist schwer zu interpretieren, wie sich schon auf dieser Stufe bereits Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 0,1 μm ablageren können. Hier könnten molekularkinetische Vorgänge oder elektrostatische Kräfte für die Abscheidung verantwortlich sein [201].

In Bild c sind in einer weitaus geringeren Vergrößerung mit dem Faktor 1000 wiederum Partikel der Stufe 9 zu sehen: Neben sehr vielen kleinen, teilweise agglomerierten Partikeln mit der vorwiegenden Zusammensetzung von Kalium und Chlor ist ein sphärisches Partikel mit einem Durchmesser von etwa 5 μm zu sehen, das, wie oben erwähnt aus Silizium und Sauerstoff bzw. einem kleinen Anteil von Eisen besteht.

10. Schlussfolgerungen und Ausblick

Der im Rahmen der Arbeit entwickelte Prototyp eines Pelletsbrenners für eine Kleinfeuerungsanlage zur Verwertung von halmgutartigen Biomassepellets ist mit einer völlig neuen Primärluftführung ausgestattet. Anders als bei den am Markt vorhandenen und in der Literatur beschriebenen Anlagen wird die Primärluft dem Brennstoffbett nicht von unten oder seitlich, sondern ausschließlich von oben zugeführt. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die Partikel der untersten Schicht des Brennstoffbettes nicht überhitzt werden und dadurch Verklebungen mit dem Rost vermieden werden. Auf diese Weise kann auf aufwendige Konstruktionen, wie beispielsweise wassergekühlte Roste, die in kleinen Aggregaten schwierig umzusetzen sind, verzichtet werden. Bei der Luftzufuhr von oben ist eine gleichmäßige Verteilung einfacher zu bewerkstelligen, da der Strömungswiderstand im Brennstoffbett, anders als bei der Luftzufuhr von unten, keine Rolle mehr spielt. Diese gleichmäßige Luftverteilung ist wichtig, um punktuelle Überhitzungen (Hotspots) mit örtlichen Aufschmelzungen bzw. Stellen ohne Umsatz zu vermeiden. Eine gleichmäßige Umsetzung des Kohlenstoffs ist einerseits Voraussetzung zur Gewährleistung eines vollständigen Ausbrandes, andererseits können Hotspots in den Seitenbereichen des Brennstoffbettes zu Anhaftungen bzw. Verklebungen mit den Seitenwänden führen. Neben diesem Einfluss der Verklebung mit den Seitenwänden ist allein die Reibung der Partikel mit den Seitenwänden für eine verlängerte Verweilzeit der seitlichen Brennstoffpartikel verantwortlich.

Durch die Luftzufuhr von oben bilden sich im Bereich des Brennstoffeintrages bzw. am Beginn der Pyrolysezone keine teerartigen Ablagerungen mehr, da Strahlungswärme von den brennenden Gasen im Brennraum - den kegelförmig ausgebildeten Flammen durch die Primärlufteindüsung - die Temperatur in diesem Bereich erhöht und somit die Teerbildung verhindert. Im Vergleich dazu ist bei der Primärluftzufuhr von unten die Brennraumtemperatur niedriger, da aufgrund der Aschschmelzproblematik von Weizenstroh die Luftzufuhr sehr moderat erfolgt und die Reaktion in der oberen Schicht des Brennstoffbettes sehr reduziert ist. Bei Holz liegt der Aschschmelzpunkt wesentlich höher, es kann dadurch auch von unten mehr Luft zugeführt und so die Brennraumtemperatur erhöht werden. Vermutlich ist hier auch die Brennstoffwärmeleistung für diese Brennstoffgröße zu klein.

Ein Nachteil der Luftzufuhr von oben ist das Reagieren eines Teiles der Primärluft mit den Gasen aus dem Brennstoffbett, wodurch weniger Sauerstoff das Brennstoffbett erreicht. Dies gilt vor allem für die Außenbereiche des kegelförmig ausgebildeten Freistrahls, wo ein teilweise vorzeitiger Gasausbrand in einer quasi vorgelagerten Sekundärzone stattfindet. Allerdings wird dabei gebildetes Kohlenstoffdioxid und Wasser bei Kontakt mit dem Koks im Brennstoffbett partiell wieder zu Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff reagieren.

Durch die Aufweitung des Freistrahls vermindert sich dessen Geschwindigkeit, sodass die Primärluft weniger weit in das Brennstoffbett eindringen kann. Der daraus resultierende verminderte Koksabbrand kann durch einen längeren Rost bei Beibehaltung der Parameter Rostgeschwindigkeit, Betthöhe und Brennstoffwärmeleistung kompensiert werden. Eine geringere Bettgeschwindigkeit und somit längere Verweildauer führt bei gleichbleibender Rostlänge und gleicher Brennstoffwärmeleistung zu einer größeren Betthöhe und damit zu einer schlechteren Versorgung mit Primärluft. Daneben ist auch der im Vergleich zu Holz um fast 10 %-Punkte höhere Anteil an Koks (C_{fix}) für den vollständigen Ascheausbrand verantwortlich, da dementsprechend mehr Kohlenstoff am Rost durch Vergasung umgesetzt werden muss.

Eine weitere wichtige Erkenntnis aus dieser Arbeit ist die Problematik der unregelmäßigen Brennstoffzufuhr mittels Stokerschnecke. Dies wird im Zuge der Energiebilanzierung erkannt. Die anfangs über das Stokertaktverhältnis ermittelte Brennstoffwärmeleistung muss wegen Unregelmäßigkeiten von bis zu 13 % aufgrund verschiedener Partikelgrößen und der Nachlaufproblematik des Stokers durch eine Waagenmessung ersetzt werden. Beim Vergleich mehrerer Versuche bei gleich eingestellter Brennstoffzufuhr werden mit der Waagenmessung sogar Unterschiede bis zu 26 % registriert. Dies hat natürlich gravierende Auswirkungen auf die Verbrennungsbedingungen, da die tatsächliche Brennstoffwärmeleistung erst am Ende des Versuches bekannt ist, jedoch die Primärluftmenge im Vorhinein eingestellt werden muss. Somit sind Betriebszustände mit zuviel Primärluft und damit einhergehenden Überhitzungen bzw. Verschlackungen einerseits und ungenügendem Ascheausbrand andererseits nicht zu vermeiden. Abhilfe kann hier nur mit einem zuverlässigen Dosiersystem geschaffen werden.

Damit zusammenhängend erweisen sich Versuche der Darstellung von Verschlackung oder Ausbrandqualität in Abhängigkeit der relativen Primärluftmenge, quasi mittels dimensionslosen Kennzahlen, als wenig aussagekräftig bzw. völlig ergebnislos. Die Schwierigkeit besteht darin, dass Auswirkungen im Brennstoffbett von vielen Faktoren wie Primärluftmenge, Brennstoffwärmeleistung bzw. Brennraumbelastung, Schwankungen in der Brennstoffzufuhr, Vorschubgeschwindigkeit bzw. Verweildauer am Rost, Aschegehalt bzw. Aschezusammensetzung oder Versuchsdauer abhängig sind. Vor allem die oben erwähnten großen Schwankungen beim Brennstoffeintrag und die thermische Trägheit des Systems ermöglichen keinen stabilen Betriebszustand und lassen eine Rückführung der Verbrennungsbedingungen auf dimensionslose Kennzahlen nicht zu. Somit ist das Ziel, durch eine genaue Voreinstellung der Parameter, bei welchen ein maximaler Ausbrand bei möglichst geringer Verschlackung erzielt werden sollte, nur eingeschränkt möglich.

Bei den Ergebnissen der Feinstaubmessung fällt auf, dass die Maximas bei den Weizenstroh-Pellets auf den Stufen 5 und 6 (mittlerer aerodynamischer Partikeldurchmesser von 0,17 bzw. 0,34 μm) und bei Miscanthus-Pellets auf Stufe 5 (0,17 μm) liegen. Im Vergleich dazu liegen bei den Holz-Pellets die Maximas auf den Stufen 4 (0,078 μm) und 5 (0,17 μm), wobei die abgeschiedene Partikelmasse nur einen Bruchteil jener der WP erreicht. Generell kann gesagt werden, dass die Partikelverteilung gut mit den in der Literatur z.B. von BRUNNER ET AL. [217] publizierten Ergebnissen übereinstimmt. Ein Vergleich der Gesamtstaubmessung mit der Feinstaubmessung verifiziert diese Ergebnisse. Bei den Weizenstropellets wird der Grenzwert von 60 mg/MJ um ein Vielfaches überschritten, bei Miscanthus um etwa ein Drittel. Dies zeigt, dass der Betrieb ohne Entstaubungsanlage aus rechtlicher Sicht nicht möglich ist. Es kann mittels Diagramm auch deutlich dargestellt werden, dass eine gute lineare Korrelation zwischen dem Aschegehalt des Brennstoffs und der Staubemission besteht, sodass bei Kenntnis der Brennstoffeigenschaften eine gute Abschätzung der zu erwarteten Staubemissionen für diese Anlage möglich ist.

Die Untersuchung des Staubes mittels REM/EDX identifiziert, anders als in der Literatur angegeben (vgl. dazu auch BRUNNER ET AL. [217] und JIMÉNEZ ET AL. [219]), vor allem Kalium und Chlor, was auf KCl-Salz schließen lässt. Das bedeutet, dass nach Klassifizierung von LENZ [98] und OSER ET.AL. [99] diese Partikel aus den anorganischen Bestandteilen des Brennstoffs nach Fragmentierung und Verdampfung des Brennstoffpartikels bei darauffolgend sinkender Temperatur im Abgasweg durch Nukleation mit anschließender Koagulation sowie direkter Kondensation entstehen. Dies ist in der Literatur als *Fest-Dampf-Partikel-Pfad* mit typischen Partikelgrößen von 0,1 μm beschrieben ist, was gut mit den im REM detektierten Einzelpartikel zusammenpasst. Somit können organische Kohlenstoffverbindungen (Ruß), Flugasche und mitgerissene unverbrannte Brennstoffpartikel - zumindest in relevanten Mengen - ausgeschlossen werden.

Im Bereich der gasförmigen Emissionen ist sehr deutlich die Korrelation zwischen dem Stickstoff im Brennstoff und den Stickoxidgehalten im Abgas zu sehen, wobei auch der Einfluss von Kohlenstoffmonoxid als Reduktionsmittel für Stickoxide deutlich erkennbar ist. In diesen Zusammenhang kann aufgrund dieser Ergebnisse die Stoffbilanz von Stickstoff in der Weise präzisiert werden, als

etwa 22 % N im Rückstand verbleiben, 22 % als NO_x und 56 % als N_2 die Anlage verlassen. Die Massenbilanz für Chlor zeigt, dass etwa 64 % über den Abgasweg die Anlage verlassen, bei Schwefel sind dies etwa 82 %. Die Bilanzierung, auch für die Energie, erfolgt hier nicht über die Messung des Rückstand-Massenstromes, sondern über die Aschegehalte in Brennstoff und Rückstand. Dabei wird der Ascheaustrag über das Abgas mitberücksichtigt.

Die Elementaranalysen zeigen, dass bei allen Chargen von Weizenstrohpellets der geforderte maximale Chlorgehalt von 1500 mg/kg (entspricht 0,15 %) bis um das Dreifache überschritten wird. Zwar wird die Konzentration von Chlorwasserstoff im Abgas nicht gemessen, doch kann davon ausgegangen werden, dass der geforderte Maximalwert von 30 mg/Nm³ (11 % O₂) überschritten wird, zumal ein wirtschaftlicher Betrieb von Kleinfeuerungsanlagen mit Abgasreinigungsanlagen kaum vorstellbar ist. Beim Brennstoff Miscanthuspellets kann der geforderte Chlorgehalt knapp eingehalten werden. Überraschenderweise liegen bei zwei Holzpellets-Proben, NATURPELLETS und SCHWEIGHOFER, die Chlorgehalte über dem in ÖNORM M 7135 geforderten Wert von 0,02 % der Trockenmasse und bei den Holzpellets GENOL liegt der Aschegehalt über dem in der Norm. Beim Ascheschmelzverhalten liegen die Schrumpfungstemperaturen (SST) für Weizenstroh- und Miscanthuspellets mit einem Bereich von etwa 650 bis 680 °C deutlich unter jenen der Literaturangaben. Die Erweichungstemperaturen decken sich mit etwa 800 bis 860 °C wieder weitgehend mit den Literaturangaben.

Um diesen Prototyp des Brenners dieser Feuerungsanlage für halmgutartige Biomassepellets zur Serienreife zu bringen, müssten vor allem die Ascheablagerungen unter dem Rost hintangehalten werden. Die Lösung dieses Problems könnte durch einerseits Minimierung der Abstände zwischen den Roststäben als auch durch ein Austragssystem unter dem Rost bewerkstelligt werden. Die in diesem Zusammenhang im Bereich der Brennerrückwand auftretenden teerartigen Ablagerungen, die in Verbindung mit kleinen Brennstoff- und Aschepartikel massive Ablagerungen bilden, könnten durch Isolierung der kalten Brennerrückwand minimiert werden. Zusätzlich könnte durch Verkleinerung des für diese Brennstoffwärmeleistung zu großen Brennraumes die Temperatur speziell in diesem Bereich erhöht werden.

Der Ausbrand könnte durch einen längeren oder breiteren Rost bei Beibehaltung der Vorschubgeschwindigkeit erhöht werden, sodass sich auch der Wirkungsgrad der Anlage verbessert. Eine theoretische Möglichkeit, dies durch eine geringere Vorschubgeschwindigkeit bei gleichzeitig kleinerer Brennstoffwärmeleistung zu bewerkstelligen, scheidet aufgrund der für diese Anlagengröße zu geringen Leistung aus.

Um den Ascheausbrand zu steigern, müsste der Abstand des Luftkastens zur Bettoberfläche verringert werden. Dadurch wird durch den Freistrahler weniger Gas miteingesaugt und somit kann mehr Luft das Brennstoffbett erreichen. Zudem könnte durch die höhere Strahlgeschwindigkeit die Luft tiefer in das Brennstoffbett eindringen. Dabei könnte sich eine mögliche punktuelle Überhitzung am Auftreffpunkte des Freistrahlers am Brennstoffbett auswirken. Außerdem müsste die Verteilung der einzelnen Düsenlöcher für die Primärluft neu angeordnet und berechnet werden.

Im Laufe der großen Anzahl der Versuche ist es in der Anlage bzw. im Abgasweg zu deutlich sichtbaren Korrosionserscheinungen aufgrund der hohen Chlor- und Stickstofffrachten gekommen. Um dies in einem kommerziellen Betrieb zu verhindern, ist unbedingt der Einsatz von geeigneten Materialien für Wärmeübertrager, Kesselwand, Turbulatoren und Abgasrohren notwendig.

Die Senkung der Stickoxidemissionen ist aufgrund des vorhandenen Brennstoffstickstoffs verfahrenstechnisch kaum möglich. Im Bereich der Staubemissionen ist ein weiteres Senken der Betttemperatur zur weiteren Minimierung der Partikelbildung über den *Fest-Dampf-Partikel-Pfad* nicht mehr möglich, da sich somit der Ascheausbrand verschlechtern würde. Einzig eine weitere Vergleichmäßigung der Primärluftverteilung zur Reduktion von Hotspots könnte in geringem Maße zielführend sein.

Generell ist die Verwendung dieser Brennstoffe in Kleinfeuerungsanlagen nicht sinnvoll, da in diesen kleinen Einheiten die Integration von technischen Einrichtungen zur Rauchgasrezirkulation, Rostkühlung, Luft- bzw. Brennstoffstufung oder überhaupt Mechaniken technisch kaum realisierbar, als auch wirtschaftlich nicht sinnvoll sind. Auch ist der Betrieb von Entstaubungs- oder Denoxanlagen für diese Anlagengrößen wirtschaftlich kaum vertretbar.

Nomenklatur

Chemische Formelzeichen

<i>Al</i>	Aluminium
<i>Al₂O₃</i>	Aluminiumoxid
<i>As</i>	Arsen
<i>C</i>	Kohlenstoff
<i>CH₄</i>	Methan
<i>C_nH_m</i>	Kohlenwasserstoff
<i>CO</i>	Kohlenstoffmonoxid
<i>CO₂</i>	Kohlenstoffdioxid
<i>Ca</i>	Kalzium
<i>CaO</i>	Kalziumoxid
<i>CaSO₄</i>	Kalziumsulfat
<i>Cl</i>	Chlor
<i>Cd</i>	Cadmium
<i>Co</i>	Kobalt
<i>Cr</i>	Chrom
<i>Fe</i>	Eisen
<i>Fe₂O₃</i>	Eisen(III)-oxid
<i>H</i>	Wasserstoff
<i>H₂</i>	Wasserstoff molekular
<i>HCl</i>	Chlorwasserstoff
<i>HC</i>	Kohlenwasserstoff-Radikal
<i>HCN</i>	Cyanwasserstoff
<i>H₂O</i>	Wasser
<i>H₂S</i>	Schwefelwasserstoff
<i>Hg</i>	Quecksilber
<i>K</i>	Kalium
<i>KCl</i>	Kaliumchlorid
<i>K₂O</i>	Kaliumoxid
<i>KSO₄</i>	Kaliumsulfat
<i>Mg</i>	Magnesium
<i>MgO</i>	Magnesiumoxid
<i>Mn</i>	Mangan
<i>MnO</i>	Manganoxid
<i>Mo</i>	Molybdän
<i>N</i>	Stickstoff
<i>N₂</i>	Stickstoff molekular
<i>NH₃</i>	Ammoniak
<i>NO</i>	Stickstoffmonoxid
<i>NO₂</i>	Stickstoffdioxid
<i>N₂O</i>	Distickstoffmonoxid
<i>NO_x</i>	Stickstoffoxid
<i>Na</i>	Natrium

$NaCl$	Natriumchlorid
Na_2O	Natriumoxid
Ni	Nickel
O	Sauerstoff
O_2	Sauerstoff molekular
OH	Hydroxyl-Radikal
P	Phosphor
P_2O_5	Phosphorpentoxid
Pb	Blei
S	Schwefel
SO_2	Schwefeldioxid
SO_3	Schwefeltrioxid
Si	Silizium
SiO_2	Siliziumdioxid
Zn	Zink
ZnO	Zinkoxid

Symbole

A	Konstante	-
A	Aschegehalt im Brennstoff	%
a	Aschegehalt im Brennstoff	kg/kg
A_R	Aschegehalt im Rückstand bezogen auf Rückstand	%
$A_{R,Br}$	Aschegehalt im Rückstand bezogen auf Brennstoff	%
$A_{a,Br}$	Aschegehalt im Abgas bezogen auf Brennstoff	%
$A_{a,A}$	Aschegehalt im Abgas bezogen auf gesamte Asche	%
B	Konstante	-
b	Konstante	-
C	Kohlenstoffgehalt	%
C	Cunningham-Faktor	-
c	Kohlenstoffgehalt	kg/kg
c	Schadstoffkonzentration	ppm, mg/m ³ , mg/MJ
C_{fix}	fixed Carbon	%
c_i	mittlere Impulsgeschwindigkeit	m/s
c_m	mittlere Massengeschwindigkeit	m/s
c_0	Düsenaustrittsgeschwindigkeit	m/s
$CO_{2,max}^a$	maximaler Kohlenstoffdioxidanteil im Abgas	Vol.-%
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	kJ/kgK
C_R	Kohlenstoffgehalt im Rückstand	%
c_R	Kohlenstoffgehalt im Rückstand	kg/kg
$C_{R,Br}$	Kohlenstoffgehalt im Rückstand bezogen auf Brennstoff	%
$C_{R,BrTS}$	Kohlenstoffgehalt im Rückstand bezogen auf Brennstoff TS-Zusammensetzung	%
c_{St}	Staubkonzentration im Abgas	mg/m ³
D	Durchmesser	mm
d_a	Düsendurchmesser	m
$d_{ae\ 50\%}$	aerodynamischer Durchmesser für 50% der Partikel	m

dP	Pelletdurchmesser	mm
\bar{d}_p	mittlerer Partikeldurchmesser (mean diameter)	m
ΔH_A	Enthalpiedifferenz zwischen Abgas und Umgebungsluft	MJ/kg
$\Delta_R H^0$	Standardreaktionsenthalpie	MJ/kg
$\Delta_R H_{CO}^0$	Bildungsenthalpie Kohlenstoffmonoxid	MJ/kg
f	Umrechnungsfaktor Bezugssauerstoffgehalt im Abgas	-
Fl	flüchtige Bestandteile bzw. „Flüchtige“	%
H	Wasserstoffgehalt	%
h	Wasserstoffgehalt	kg/kg
H_A	Enthalpie des Abgases	MJ/kg
H_o	Brennwert	MJ/kg
H_u	Heizwert	MJ/kg
$H_{u,R}$	Heizwert des Rückstandes	MJ/kg
$H_{u(OS)}$	Heizwert bezogen auf Originalsubstanz	MJ/kg
$H_{u(wf)}$	Heizwert bezogen auf wasserfreie Substanz	MJ/kg
L	Länge	mm
\dot{L}	Luftmenge	l/s
l_{min}	Mindestluftmenge bezogen auf Brennstoffmasse	m ³ /kg
l_{rel}	relative Luftmenge	%
M_M	Molmasse	g/mol
m	Masse	kg
Δm	Massendifferenz	kg
m	Turbulenzfaktor	-
\dot{m}_A	Massenstrom Asche im Brennstoff	g/s
$\dot{m}_{A,a}$	Massenstrom Asche im Abgas	g/s
$\dot{m}_{A,R}$	Massenstrom der Asche im Rückstand	g/s
m_{Br}	Masse des Brennstoffs	g
\dot{m}_{Br}	Brennstoffmassenstrom	g/s
$\dot{m}_{C,R}$	Massenstrom Kohlenstoff im Rückstand	g/s
$\dot{m}_{K,a}$	Massenstrom Kalium im Abgas	g/s
\dot{m}_R	Rückstand-Massenstrom	g/s
$\dot{m}_{St,a}$	Massenstrom Staub im Abgas	g/s
m_W	Masse des Wassers	g
N	Stickstoffgehalt	%
n	Stickstoffgehalt	kg/kg
O	Sauerstoffgehalt	%
o	Sauerstoffgehalt	kg/kg
P_n	Nennleistung	kW
p	Druck	Pa
p_S	Sättigungsdampfdruck	Pa
p_d^*	Partialdruck Wasserdampf	Pa
p_L^*	Partialdruck Luft	Pa
p_0	Luftdruck	Pa
\dot{Q}	Volumenstrom	m ³ /h
r	Radius	mm
r_a	Strahlbreite	mm
Re	Reynoldszahl	-
R_m	allgemeine Gaskonstante	J/molK
S	Schwefelgehalt	%
S	Abstand zwischen Düse und Prallplatte	m

s	Schwefelgehalt	kg/kg
St	Stokes-Zahl	
T	Temperatur	K
T_0	Gesamtzeit	s
T_{ein}	Einschaltzeit	s
T_{aus}	Ausschaltzeit	s
t	Temperatur	°C
Δt	Zeitdifferenz	s
u	Brennstoff-Feuchte	%
\bar{u}_G	mittlere Geschwindigkeit im Düsenaustrittsquerschnitt	m/s
V	Verlust	MJ kg ⁻¹ /MJ kg ⁻¹
\dot{V}	Volumenstrom	m ³ /s
\dot{V}_a	Abgasvolumenstrom	l/s
v_A	spezifische Abgasmenge	m ³ /kg
v_{A,O_2}	spez. Sauerstoffgehalt im Abgas bezogen auf Brennstoffmasse	m ³ /kg
v_{A,N_2}	spez. Stickstoffgehalt im Abgas bezogen auf Brennstoffmasse	m ³ /kg
v_{A,H_2O}	spez. Wassergehalt im Abgas bezogen auf Brennstoffmasse	m ³ /kg
\dot{V}_{BLPI}	Volumenstrom über BLPI	l/s
V_M	Molvolumen	l/mol
w	Wassergehalt im Brennstoff	kg/kg
W	Wassergehalt im Brennstoff	%
w_L	Beladung der trockenen Luft mit Wasser	m ³ _{H₂O} /m ³ _{L,tr}
ΔWZ	Wärmezählerdifferenz	kWh
X	Beladung der trockenen Luft mit Wasser	kg _{H₂O} /kg _{L,tr}
x	Länge	mm
x_0	Kernlänge des Strahls	mm
y_a	Strahlbreite	mm

Griechische Symbole

α	Mechanismusfaktor	-
η_f	Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	-
η_K	Kesselwirkungsgrad	-
η_n	Nutzungsgrad	-
λ	Luftüberschusszahl Lambda	-
λ	freie Weglänge der Gasmoleküle	m
μ_G	dynamische Viskosität	kg/ms
ν_a	kinematische Viskosität	m ² /s
ρ_0	Partikeldichte	kg/m ³
ρ_G	Dichte des Gases	kg/m ³
ρ_L	Dichte der trockenen Luft	kg _{L,tr} /m ³ _{L,tr}
ρ_{H_2O}	Dichte des Wasserdampfes	kg _{H₂O} /m ³ _{H₂O}
φ_L	relative Luftfeuchtigkeit	%

Indizes

0	Ausgangsbedingungen
<i>a</i>	Abgas
<i>ae</i>	aerodynamisch
<i>af</i>	aschefrei
<i>aus</i>	ausgeschaltet
<i>Ausbr</i>	Ausbrand
<i>Br</i>	Brennstoff
<i>bez</i>	Bezug
<i>BrWL</i>	Brennstoffwärmeleistung
<i>chem</i>	chemisch
<i>D</i>	Düse
<i>ein</i>	eingeschaltet
<i>G</i>	Gas
<i>gem</i>	gemessen
<i>ges</i>	gesamt
<i>i</i>	Impaktorstufe
<i>K</i>	Kamin
<i>L</i>	Luft
<i>M</i>	Mol
<i>m</i>	Messung
<i>max</i>	maximal
<i>min</i>	minimal
<i>OS</i>	Originalsubstanz
<i>P</i>	Pellets, Partikel
<i>t</i>	Temperatur
<i>therm</i>	thermisch
<i>tr</i>	trocken
<i>U</i>	Umgebung
<i>verbr</i>	verbrannt
<i>W</i>	Wasser
<i>wf</i>	wasserfrei
<i>WZ</i>	Wärmezähler

Abkürzungen

AM	Flügelradanämometer
BLPI	Berner Low Pressure Cascade Impactor
BMWA	Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten
BSK	Brandschutzklappe
B-VG	Bundes-Verfassungsgesetz
Ch	Charge
DT	Deformation Temperature
EDX	Energie-dispersive Röntgenanalyse
EU	Europäische Union
FAV	Feuerungsanlagenverordnung

FS	Frischsubstanz
FT	Flow Temperature
GW	Grenzwert
Heizöl S	Heizöl schwer
M	Zeitraum der Messperiode
HP	Holzpellets
HT	Hemisphere Temperature
LPI	Low Pressure Cascade Impactor
MH	Miscanthus Häckselgut
MP	Miscanthuspellets
NDIR	nicht dispersive Infrarot-Analyse
Nm ³	Normkubikmeter
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OGC	Organischer Gesamtkohlenstoff
OS	Originalsubstanz
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PAN	Peroxyacetylnitrat
PM	Particulate Matter
PV	Primärluftventil
REM	Rasterelektronenmikroskop
RL	Rücklauf
RP	Rindenpellets
SCR	Selektiv katalytische Reduktion
SK	Sekundärluftklappe
SNCR	Selektiv nicht-katalytische Reduktion
SST	Shrinkage Starting Temperature
ST	Stufe
TFZ	Technologie- und Förderzentrum, Straubing
TM	Trockenmasse
TSP	Total Suspended Particles
UF	Urea Formaldehyd
V	Versuch
VL	Vorlauf
VOC	Volatile Organic Compounds
WP	Weizenstrohpellets
WZ	Wärmezähler

Literaturverzeichnis

- [1] ENERGIE-CONTROL AUSTRIA FÜR DIE REGULIERUNG DER ELEKTRIZITÄTS- UND ERDGASWIRTSCHAFT: *Projekt Energieeffizienz - Elektrische Energie effizient nutzen*. Online, <http://www2.e-control.at/>, 2012. – letzter Zugriff am 07.08.2012
- [2] ÖSTERREICHISCHE ENERGIEAGENTUR - AUSTRIAN ENERGY AGENCY: *Homepage der Energieagentur*. Online, <http://www.energyagency.at>, 2012. – letzter Zugriff am 07.08.2012
- [3] JAUSCHNEGG, Horst ; PFEMETER, Christopf: *Bioenergie - Basisdaten 2011*. Broschüre, Online, <http://www.biomasseverband.at>, 2011
- [4] STATISTIK AUSTRIA: *Außenhandel nach Warenabschnitten*. Online, <http://www.statistik.at>, 2012. – letzter Zugriff am 08.08.2012
- [5] LIEBEL, Günter ; SCHUSTER, Martina: *Erneuerbare Energie 2020 - Potentiale und Verwendung in Österreich*. Broschüre des Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Online, <http://www.lebensministerium.at>, 2009
- [6] KOPETZ, Heinz ; SCHEIBER, Ernst: *34 Prozent Erneuerbare machbar - EU-Richtlinie für erneuerbare Energien - Konsequenzen für Österreich*. Broschüre, Online, <http://www.biomasseverband.at>, 2010
- [7] PROPELLETS AUSTRIA: *Homepage*. Online, <http://www.propellets.at>, 2012. – letzter Zugriff am 07.08.2012
- [8] KALTSCHMITT, M.: Biomasse als nachwachsender Energieträger. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2009, S. 1–7
- [9] KALTSCHMITT, M. ; THRÄN, D.: Biomasse im Energiesystem. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2009, S. 7–36
- [10] THRÄN, D. ; U.A.: *Sustainable Strategies for Biomass Use in the European Context. Analysis in the charged debate on national guidelines and the competition between solid, liquid and gaseous biofuels*. IE-Report 1/2006. Leipzig, 2006
- [11] WITT, R. & Kaltschmitt M. J. & Offermann O. J. & Offermann: Erneuerbare Energien - Stand 2009 weltweit und in Europa. In: *BWK 62* (2010), Nr. 6, S. 6–22
- [12] BP (HRSG.): *BP Statistical Review of World Energy 2008*. BP, London, Juni 2008
- [13] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND RAKTORSICHERHEIT (HRSG.): *Erneuerbare Energien in Zahlen - nationale und internationale Entwicklung 2007*. Berlin, 2008
- [14] STRASBURGER, E.: *Lehrbuch der Botanik*. 32. Auflage. Gustav Fischer, Stuttgart, New York, 1983
- [15] LEWANDOWSKI, I.: Primärproduktion. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2009, S. 46–54

- [16] HARTMANN, H.: Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2009, S. 333–375
- [17] NULTSCH, W.: *Angewandte Botanik*. 7. Auflage. Thieme, Stuttgart, 1982
- [18] KALTSCHMITT, M. ; REINHARDT (HRSG.), G.: *Nachwachsende Energieträger - Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung*. Vieweg Verlag, 1997
- [19] HARTMANN, H. ; BÖHM, T. ; MAIER, L.: *Naturbelassene biogene Festbrennstoffe - Umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten*. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), Reihe "Materialien", Nr. 154, München, 2000
- [20] SPLIETHOFF, H. ; SIEGLE, V. ; HEIN, K.R.G.: *Erforderliche Eigenschaften von holz- und halmgutartiger Biomasse bei einer Zufeuerung in existierenden Kraftwerksanlagen*. Tagung "Biomasse als Festbrennstoff - Anforderungen, Einflussmöglichkeiten, Normung", Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" Band 6, Landwirtschaftsverlag, Münster, 1996, S. 155-175
- [21] HARTMANN, H. ; HÖLDRICH, A.: Wirkungsgrad, Emissionen, Aschequalität. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (FNR); HARTMANN, H. (Hrsg.): *Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen*. 2. vollst. überarbeitete Auflage. Sonderpublikation des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) und der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow, 2007, S. 118–130
- [22] LAUNHARDT, T. ; HARTMANN, H. ; LINK, H. ; SCHMID, V.: *Verbrennungsversuche mit naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen in einer Kleinf Feuerungsanlage - Emissionen und Aschequalität*. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), Reihe "Materialien", Nr. 156, München, 2000
- [23] OBERNBERGER, I.: *Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente*. Schriftenreihe Thermische Biomassennutzung (Band 1), dbv-Verlag, Graz, 1997
- [24] BRUNNER, T.: *Aerosol and coarse fly ashes in fixed-bed biomass combustion*, Dissertation an der Eindhoven University of Technology (Faculty of Mechanical Engineering), The Netherlands, Eigenverlag T. Brunner, 2006
- [25] KALTSCHMITT, M. (Hrsg.) ; HARTMANN, H. (Hrsg.) ; HOFBAUER, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse*. 2. Auflage. Springer, 2009
- [26] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT (HRSG.): *ÖNORM EN 14961-1:2010 (Feste Bio-brennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen) Teil 1: Allgemeine Anforderungen*. Wien, 2010
- [27] THRÄN, D.: Halmgutähnliche Biomasse. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2009, S. 148–157
- [28] OBERNBERGER, I. ; THEK, G.: *Herstellung und energetische Nutzung von Pellets - Produktionsprozess, Eigenschaften, Feuerungstechnik, Ökologie und Wirtschaftlichkeit*. Schriftenreihe Thermische Biomassennutzung (Band 5), dbv-Verlag, Graz, 2009
- [29] HARTMANN, H. ; KALTSCHMITT, M.: Bereitstellungskette für Halmgutbrennstoffe. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2009, S. 199–211
- [30] HARTMANN, H.: Ernte. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2009, S. 217–244

- [31] LEWANDOWSKI, I. ; BÖHMEL, C. ; VETTER, A. ; HARTMANN, H.: Landwirtschaftlich produzierte Lignocellulosepflanzen. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2009, S. 88–108
- [32] HARTMANN, H.: Zerkleinern. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2009, S. 245–262
- [33] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSIINSTITUT (HRSG.): *ÖNORM M 7135:2000 (Presslinge aus naturbelassenem Holz oder naturbelassener Rinde, Pellets und Briketts, Anforderungen und Prüfbestimmungen)*. Wien, 2000
- [34] HARTMANN, H. ; WITT, J.: Pressen - Mechanische Aufbereitung. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2009, S. 264–276
- [35] EDER, G.: *Wirtschaftliche und technische Möglichkeiten für die Herstellung und Nutzung einer neuen Generation von Biomassepellets*, Fachhochschule Wiener Neustadt, Wieselburg, Österreich, Diplomarbeit, 2003
- [36] HOLZ-ENERGIE-ZENTRUM OLSBERG GMBH: *Information zur Herstellung von Holzpellets*. Online im Internet, <http://www.holzpellet.com>, 2011. – letzter Zugriff am 12.01.2011
- [37] GEISLHOFER, A. ET AL.: *Holzpellets in Europa*. Schriftenreihe "Berichte aus Energie- und Umweltforschung" des Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.), Nr. 9/00, Wien, Österreich, 2000
- [38] TOSI, E. ; SOLDAINI, F.: *Introduction to an innovative technology for the production of wood-pellets with very low energy consumption*. In: Tagungsbeiträge zum 1. Europäischen Experten Forum "Holzpellets", UMBERA Umweltorientierte Betriebs-, Forschungs- und Entsorgungsgesellschaft mbH (Hrsg.), Salzburg, Österreich, Oktober 1999
- [39] LAUNHARDT, T.: *Umweltrelevante Einflüsse bei der thermischen Nutzung fester Biomasse in Kleinanlagen*, Technische Universität München, Dissertation, 2002
- [40] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSIINSTITUT (HRSG.): *ÖNORM C 4002:2010 (Strohpresslinge - Anforderungen und Prüfmethoden)*. Wien, 2010
- [41] TEMMERMANN, M. ; RABIER, F. ; DAUGBJERG JENSEN, P. ; HARTMANN, H. ; BÖHM, T.: Comparative study on durability test methods for pellets and briquettes. In: *Biomass and Bioenergy* 30 (2006), S. 964–972
- [42] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (HRSG.): *CEN/TS 15210-1:2005 (Feste Biobrennstoffe - Verfahren zur Bestimmung der mechanischen Festigkeit - Teil 1 - Pellets)*. Beuth, Berlin, 2005
- [43] SIEGLE, V.: *Biogene Brennstoffe in Aufbereitung und Verbrennung*, Fakultät Energietechnik der Universität Stuttgart, Dissertation, 2000
- [44] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSIINSTITUT (HRSG.): *ÖNORM M 7132:1998 (Energiewirtschaftliche Nutzung von Holz und Rinde als Brennstoff, Begriffsbestimmungen und Merkmale)*. Wien, 1998
- [45] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSIINSTITUT (HRSG.): *ÖNORM EN 14918:2010 (Feste Biobrennstoffe - Verfahren zur Bestimmung des Heizwertes)*. Wien, 2010
- [46] STOCKINGER, H. ; OBERNBERGER, I.: *Systemanalyse der Nahwärmeversorgung mit Biomasse*. Schriftenreihe Thermische Biomassenutzung (Band 2), dbv-Verlag, Graz, 1998

- [47] NETZ, H.: *Verbrennung und Gasgewinnung bei Festbrennstoffen*. Technischer Verlag, München, 1982
- [48] FRIEDL, A. ; PADOUVAS, E. ; ROTTER, H. ; K., Varmuza: Prediction of heating value of biomass fuel from elemental composition. In: *Analytica Chimica Acta* 544 (2005), S. 191–198
- [49] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT (HRSG.): *ÖNORM EN 15148:2009 (Feste Biobrennstoffe - Bestimmung des Gehaltes an flüchtigen Substanzen)*. Wien, 2009
- [50] HARTMANN, H.: Grundlegendes zur Feststoff-Verbrennung. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (FNR); HARTMANN, H. (Hrsg.): *Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen*. 2. vollst. überarbeitete Auflage. Sonderpublikation des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) und der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow, 2007, S. 68–74
- [51] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (HRSG.): *CEN/TS 14588:2003 (Feste Biobrennstoffe - Terminologie, Definition und Beschreibungen)*. Beuth, Berlin, 2003
- [52] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT (HRSG.): *ÖNORM EN 14774-1:2009 (Feste Biobrennstoffe - Bestimmung des Wassergehaltes - Ofentrocknung, Teil 1: Gesamtgehalt an Wasser - Referenzverfahren)*. Wien, 2009
- [53] HARTMANN, H. ; REISINGER, K.: Brennstoffeigenschaften und Mengenplanung. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (FNR); HARTMANN, H. (Hrsg.): *Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen*. 2. vollst. überarbeitete Auflage. Sonderpublikation des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) und der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow, 2007, S. 56–67
- [54] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT (HRSG.): *ÖNORM EN 14775:2009 (Feste Biobrennstoffe - Bestimmung des Aschegehaltes)*. Wien, 2009
- [55] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (HRSG.): *DIN 51719 (Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung des Aschegehaltes)*. Beuth, Berlin, 1997
- [56] OTTMANN, M.: *Verbrennung biogener Brennstoffe in stationären Wirbelschichten*, Technische Universität München, Diss., 2006
- [57] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT (HRSG.): *VORNORM ÖNORM CEN/TS 15370-1:2006 (Feste Biobrennstoffe - Verfahren zur Bestimmung des Schmelzverhaltens der Asche - Teil 1: Verfahren zur Bestimmung charakteristischer Temperaturen)*. Wien, 2006
- [58] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (HRSG.): *DIN 51730 (Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens)*. Beuth, Berlin, 1984
- [59] STEENARI, B.-M. ; LINDQVIST, O.: High-Temperature Reactions of Straw Ash and the Anti-Sintering Aditives Kaolin an Dolomite. In: *Biomass and Bioenergy* 14 (1998), S. 67–76
- [60] POPPENWIMMER, M.: *Untersuchung und Entwicklung von alternativen biogenen Brennstoffen aus pflanzlichen landwirtschaftlichen Reststoffen*, Montanuniversität Leoben, Dissertation, 2011
- [61] HOFBAUER, H. ; KALTSCHMITT, M. ; NUSSBAUMER, T.: Thermo-chemische Umwandlungsprozesse. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2009, S. 375–407
- [62] NUSSBAUMER, T. ; KALTSCHMITT, M.: Begriffsdefinitionen zu Grundlagen der Festbrennstoffnutzung. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Springer Verlag, 2001, S. 239–247

- [63] BAEHR, H.D. ; KABELAC, S.: *Thermodynamik, Grundlagen und technische Anwendungen*. 13. Auflage. Springer, 2006
- [64] ECK, B.: *Technische Strömungslehre, Band 1: Grundlagen*. 8. Auflage. Springer, 1978
- [65] INSTITUT FÜR ENERGIEVERFAHRENSTECHNIK UND BRENNSTOFFTECHNIK, TU CLAUSTHAL: *Verbrennungsführung an einem Injektorbrenner*. Fachpraktikum Vt - Ciw - Est, Praktikum Ust, Online, <http://www.ievb.tu-clausthal.de>, 2009. – letzter Zugriff am 16.02.2011
- [66] NEUNASS, E.: *Praktische Strömungslehre*. VEB Verlag Technik, Berlin, 1967
- [67] ECK, B.: *Technische Strömungslehre*. 6. Auflage. Springer, 1961
- [68] KALTSCHMITT, M. ; BAUMBACH, G.: Grundlagen der thermochemischen Umwandlung. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Springer Verlag, 2001, S. 272–281
- [69] NUSSBAUMER, T.: Grundlagen der thermochemischen Umwandlung. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Springer Verlag, 2001, S. 288–322
- [70] NUSSBAUMER, T. ; GOOD, J. ; JENNI, A. ; KOCH, P. ; RUTSCHMANN, C.: *Projektieren automatischer Holzfeuerungen*. Pacer, Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern, 1995
- [71] RÜDIGER, H.: *Pyrolyse von festen biogenen Brennstoffen zur Erzeugung eines Zusatzbrennstoffes für Feuerungsanlagen*. Berichte aus der Energiewirtschaft D93, Shaker, Aachen, 1997
- [72] FAIX, O.: *Mitteilung aus dem Institut für Holzchemie der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft*. Hamburg, 1999
- [73] HELLWIG, M.: *Zum Abbrand von Holzbrennstoffen unter besonderer Berücksichtigung der zeitlichen Abläufe*, Technische Universität München, Landtechnik Weihenstephan, Dissertation, 1988
- [74] SCHILLING, H.-D. ; BONN, B. ; U., Krauß ; PETERS, W. (Hrsg.): *Rohstoffwirtschaft International. Band 4 "Kohlevergasung"*. 2. Auflage. Essen : Verlag Glückauf GmbH, 1979
- [75] NUSSBAUMER, T.: *Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz*, ETH Zürich, Dissertation, 1989
- [76] CERBE, G. ; WILHELMS, G.: *Technische Thermodynamik*. 13. Auflage. Hanser, 2005
- [77] RECKNAGEL, H. ; SPRENGER, E ; SCHRAMEK, E.-R. ; SCHRAMEK, E.-R. (Hrsg.): *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 05/06*. 72. Auflage. Oldenbourg Industrieverlag, München, 2002
- [78] JOOS, F.: *Technische Verbrennung*. Springer, 2006
- [79] BRANDT, F.: *Brennstoffe und Verbrennungsrechnung*. 3. Auflage. Fachverband Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau e.V., Vulkan Verlag, Essen, 1999
- [80] RIEDER, G.: *Skriptum zur Vorlesung Energieformen, Energienutzung und Energieumwandlung*. Eigenverlag Institut für Wärmetechnik, Industrieofenbau und Energiewirtschaft der Montanuniversität Leoben, 2000
- [81] BAUMBACH, G.: *Luftreinhalung*. 3. Auflage. Springer, 1993
- [82] AMT DER BURGENLÄNDISCHEN LANDESREGIERUNG: *79. Verordnung der Burgenländischen Landesregierung vom 19. Dezember 2000 zur Durchführung des Burgenländischen Luftreinhalte- und Heizungsanlagengesetzes 1999 (Burgenländische Luftreinhalte- und Heizungsanlagenverordnung 2000 - LHG-VO 2000)*. 2000

- [83] Eidgenössisches Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK - Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Luftreinhaltung und NIS: *Information zum Inverkehrbringen von Kohle- und Holzfeuerungen nach Artikel 20 der Luftreinhalte-Verordnung (LRV)*. 2009
- [84] Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg.): *ÖNORM EN 15259:2007 (Luftbeschaffenheit - Messung von Emissionen aus stationären Quellen - Anforderungen an die Messstrecken und Messplätze und an die Messaufgabe, den Messplan und den Messbericht)*. Wien, 2007
- [85] Bliefert, C.: *Umweltchemie*. 3. Auflage. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2002
- [86] Nussbaumer, T.: Stoffe aus vollständiger und unvollständiger Oxidation der Hauptbrennstoffbestandteile. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2009, S. 407–417
- [87] Leuckel, W. ; Römer, R.: Schadstoffe aus Verbrennungsprozessen. In: VDI (Hrsg.): *VDI-Berichte 346, Düsseldorf*, 1979
- [88] Warnatz, J. ; Maas, U. ; Dibble, R.W.: *Technische Verbrennung - Physikalische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1997
- [89] Baumbach, G.: *Air Quality Control*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1996
- [90] Hofbauer, H. ; Vogel, A. ; Kaltschmitt, M.: Vergasungstechnik. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2009, S. 600–628
- [91] Nussbaumer, T.: Stickstoffoxide. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2009, S. 417–426
- [92] Nussbaumer, T.: *Primär- und Sekundärmaßnahmen zur Stickoxidminderung bei Holzfeuerungen. Moderne Feuerungstechnik zur energetischen Verwertung von Holz und Holzabfällen*. Springer-VDI, Düsseldorf, 1997. – S. 279–308
- [93] Nussbaumer, T.: *Verbrennung und Vergasung von Energiegras und Feldholz*. Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, 1997
- [94] Keller, R. ; Nussbaumer, T. ; Sutter, P.: Untersuchung der Luftstufung mit Reduktionskammer als Primärmaßnahmen zur NO_x-Minderung bei Holzverbrennung. In: *VDI-Berichte 1090*, VDI, Düsseldorf, 1993, S. 167–174
- [95] Keller, R.: *Primärmaßnahmen zur NO_x-Minderung bei der Holzverbrennung mit dem Schwerpunkt der Luftstufung*, ETH Zürich, Dissertation, 1997
- [96] Salzmann, R. ; Nussbauer, T.: *Zweistufige Verbrennung mit Reduktionskammer und Brennstoffstufung als Primärmaßnahmen zur Stickoxidminderung bei Holzfeuerungen*. Institut für Energietechnik, ETH Zürich, 1995
- [97] Nussbaumer, T.: Emissionen aus Schwefel, Chlor und Kalium. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2009, S. 427–428
- [98] Lenz, V.: Emissionen fester und flüssiger Teilchen. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2009, S. 428–436

- [99] OSER, M. ; NUSSBAUMER, T. ; MÜLLER, P. ; MORH, M. ; FIGI, R.: *Grundlagen der Aerosolbildung in Holzfeuerungen, Beeinflussung der Partikelemissionen durch Primärmaßnahmen und Konzept für eine partikelarme automatische Holzfeuerung (Low-Particle-Feuerung)*. i. A. Bundesamt für Energie Bern, 2003
- [100] HARTMANN, H. ; TUROWSKI, P. ; ROSSMANN, P. ; ENNER-SCHUBERTH, F. ; HOPF, N. ; BIMÜLER, A.: *Getreidekörner als Brennstoff für Kleinfeuerungen - Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte / Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe*. 2007 (Berichte aus dem TFZ 13). – Forschungsbericht
- [101] OBERNBERGER, I.: *Feste Konversionsrückstände und deren Verwertung*. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2009, S. 441–461
- [102] NUSSBAUMER, T. ; HARTMANN, H.: *Anforderungen und Besonderheiten der direkten thermo-chemischen Umwandlung (Verbrennung)*. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2009, S. 463–468
- [103] HARTMANN, H. ; NUSSBAUMER, T. ; HOFBAUER, H. ; GOOD, J.: *Automatisch beschickte Feuerungen*. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2009, S. 492–533
- [104] HARTMANN, H. ; REISINGER, K.: *Feuerungen und Anlagentechnik*. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (FNR); HARTMANN, H. (Hrsg.): *Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen*. 2. vollst. überarbeitete Auflage. Sonderpublikation des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) und der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow, 2007, S. 75–130
- [105] NUSSBAUMER, T. ; HARTMANN, H.: *Automatisch beschickte Feuerungen*. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Springer Verlag, 2001, S. 345–363
- [106] LAUNHARDT, T. ; HURM, R. ; SCHMID, V. ; LINK, H.: *Dioxin- und PAK-Konzentrationen in Abgas und Aschen von Stückholzfeuerungen*. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (BaySt-MLU) (Hrsg.), Reihe "Materialien", Nr. 142, München, 1998
- [107] GÜNTHER, R.: *Verbrennung und Feuerungen*. Springer, 1974
- [108] BLT WIESELBURG: *schriftliche Mitteilung (Herr Lasselsberger, Herr Baumgartner)*. Bundesanstalt für Landtechnik, Rottenhauser Straße 1, A-3250 Wieselburg, Österreich,
- [109] KARNER, P.: *Entwicklung einer Feuerungsanlage für Pellets eines alternativen Energieträgers*, Montanuniversität Leoben, Diplomarbeit, 2009
- [110] LAND STEIERMARK - AMT DER STEIERMÄRKISCHEN LANDESREGIERUNG: *Vorlage der Steiermärkischen Landesregierung zum Beschluss über Art. 15a B-VG über das Inverkehrbringen von Kleinfeuerungsanlagen und Blockheizkraftwerken*. Online, <http://www.landtag.steiermark.at/cms/beitrag/11384616/58064506>, 2010. – letzter Zugriff am 10.08.2011
- [111] LAND STEIERMARK - AMT DER STEIERMÄRKISCHEN LANDESREGIERUNG: *Ver einbarung gemäß Art 15a B-VG über das Inverkehrbringen von Kleinfeuerungen und die Überprüfung von Feuerungsanlagen und Blockheizkraftwerken*. Online, <http://www.landtag.steiermark.at/cms/beitrag/11384616/58064506>, 2010. – letzter Zugriff am 10.08.2011

- [112] BUNDESGESETZBLATT FÜR DIE REPUBLIK ÖSTERREICH: 331. *Verordnung des Bundesministers für wirtschaftliche Angelegenheiten über die Bauart, die Betriebsweise, die Ausstattung und das zulässige Ausmaß der Emission von Anlagen zur Verfeuerung fester, flüssiger oder gasförmiger Brennstoffe in gewerblichen Betriebsanlagen (Feuerungsanlagen-Verordnung - FAV)*. 1997
- [113] LASSELSBERGER, L.: *Überprüfung von Kleinf Feuerungen für feste Brennstoffe - Landes- und Bundesgesetzgebung*. BLT Wieselburg. Online, <http://www.blt.bmlf.gv.at/vero/artikel/artik017/kflubg.pdf>, 2003. – letzter Zugriff am 10.08.2010
- [114] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT (HRSG.): *VORNORM ÖNORM M 7139:2006 (Energiekorn - Anforderungen und Prüfbestimmungen)*. Wien, 2006
- [115] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT (HRSG.): *ÖNORM EN 303-5: 1999 (Heizkessel - Teil 5: Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatische beschickte Feuerungen, Nenn-Wärmeleistung bis 300 kW - Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung)*. Wien, 1999
- [116] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT (HRSG.): *ÖNORM M 7133:1998 (Holzhackgut für energetische Zwecke, Anforderungen und Prüfbestimmungen)*. Wien, 1998
- [117] HIENDLMEIER, S.: *Heizen mit Getreide, Stroh und Co. - Brennstoffe von der Fläche*. Präsentationsunterlagen zum C.A.R.M.E.N. - Fachgespräch im Rahmen der Biomasse-Messe 2009, Straubing. Online im Internet, <http://www.carmen-ev.de>, 2009. – letzter Zugriff am 23.07.2010
- [118] GUNTAMATIC HEIZTECHNIK GMBH: *Planungsunterlagen Energiekornfeuerung Powercorn*. Online, <http://www.guntamatic.com>, 2008. – Version Nov. 2008
- [119] GUNTAMATIC HEIZTECHNIK GMBH: *Produktinformation zu Guntamac Heizanlagen*. Online, <http://www.guntamatic.com>, 2010. – letzter Zugriff am 17.08.2010
- [120] GUNTAMATIC HEIZTECHNIK GMBH: *Planungsunterlagen Guntamatic Hackgutfeuerung Powerchip*. Online, <http://www.guntamatic.com>, 2009. – Version Nov. 2009
- [121] REGENERATIVE WÄRMETECHNIK R. FELDMANN: *Produktinformation zu Guntamatic Powercorn*. Online, <http://www.energiegetreide.net>, 2010. – letzter Zugriff am 17.08.2010
- [122] GUNTAMATIC HEIZTECHNIK GMBH: *Prospekt Guntamatic Energiekornprogramm Powercorn*. Online, <http://www.guntamatic.com>, 2010. – Version 04/2010
- [123] BLT WIESELBURG - AKKREDITIERTE PRÜFANSTALT: *Prüfbericht Pelletsfeuerung POWER-CORN 7-30*. Online, <http://blt.josephinum.at>, 2009. – BLT-Protokollnummer: 016/09
- [124] HEIZOMAT GMBH: *Produktbroschüre zu Heizomat Feuerungsanlagen*. Online, <http://www.heizomat.de>, 2010. – Version 04/2010
- [125] HEIZOMAT GMBH: *Produktinformation zu Heizomat Heizkessel*. Online, www.heizomat.de, www.heizomat.at, 2010. – letzter Zugriff am 10.08.2010
- [126] HARTMANN, H. ; TUROWSKI, P. ; ROSSMANN, P. ; ENNER-SCHUBERTH, N. F. and H. F. and Hopf: *Getreide- und Strohverbrennung in Kleinf Feuerungen - Brennstoffeinflüsse und Schadstoffminderungsmaßnahmen*. CD als Beilage zu den Tagungsunterlagen Mitteleuropäische Biomassekonferenz 2008, Graz, 2008
- [127] PEISKER, D.: *Stand und Erfahrung bei der Verbrennung von Getreide*. Präsentationsunterlagen, Online im Internet, <http://www.tll.de/ainfo/pdf/gbre0707.pdf>, 2007
- [128] A.P. BIOENERGIETECHNIK GMBH: *Produktinformation zu Ökothem Biomasseanlagen*. Online, www.oeko-therm.net, 2010. – letzter Zugriff am 11.08.2010

- [129] IBS INGENIEURBÜRO FÜR HAUSTECHNIK SCHREINER: *Kessel und Anlagentechnik für Getreidekorn, Holz-/Stroh-/Getreidepellets etc. und Hackschnitzel: Rostlose Schubbodenfeuerung*. Online, <http://energieberatung.ibs-hk.de>, 2010. – letzter Zugriff am 11.08.2010
- [130] BIOKOMPACT HEIZTECHNIK GMBH: *Kurzprospekt im pdf-Format*. Online, <http://www.biokompakt.com>, 2006
- [131] BIOKOMPACT HEIZTECHNIK GMBH: *Präsentation der Biokompakt Heiztechnik GmbH*. Online, <http://www.izes.de>, 2008
- [132] BAUERMEISTER, U. ; RUMPLER, J.: *Felduntersuchung des "Biokompakt® - AWK 45 SI" zum Nachweis der Genehmigungsfähigkeit im Bereich dezentraler Wärmeerzeugungsanlagen < 1 MW th am Standort Bernburg*. Eigenverlag, 2007. – Abschlussbericht, gefördert durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, downloadbar: www.sachen-anhalt.de
- [133] BIOKOMPACT HEIZTECHNIK GMBH: *Prospekt Hackschnitzel - Biomasse*. Online, <http://www.biokompakt.com>, 2006
- [134] VETTER, A. ; HERING, T. ; PEISKER, D.: *Energetische Verwertung von Getreide und Halmgutpellets*. FNR-Projekt, Eigenverlag, Jena, 2006
- [135] ATG AGRARTECHNIKERÄTE: *Produktinformation zum REKA Biomassekessel*. Online im Internet, <http://www.a-t-g.at>, 2010. – letzter Zugriff am 27.07.2010
- [136] ATG AGRARTECHNIKERÄTE: *Produktbroschüre REKA*. Online im Internet, <http://www.a-t-g.at>, 2010
- [137] J RILEY BEET HARVESTERS (UK) LIMITED: *Produktinformation über REKA Biomass Boilers*. Online im Internet, <http://www.riley-reka.co.uk/compacts.html>, 2010. – letzter Zugriff am 05.08.2010
- [138] FERRO WÄRMETECHNIK GMBH: *Biomassefeuerung und Brenngutlagersysteme*. Produktbroschüre, Online, <http://www.ferro-waermetechnik.de>, 2009. – Stand 16.07.2009
- [139] FERRO WÄRMETECHNIK GMBH: *Produktinformation auf der Firmenhomepage*. Online, <http://www.ferro-waermetechnik.de>, 2010. – letzter Zugriff am 13.05.2010
- [140] DISTRIBUCIONES SOLARES DEL PRINCIPADO, S.L.: *Produktinformation Hargassner Heizkessel*. Online, <http://www.distribucionessolares.com>, 2011. – letzter Zugriff am 22.09.2011
- [141] HARGASSNER GESMBH: *Produktinformation über den Biomasse Heizkessel AgroFire 25-40 kW*. Online, <http://www.hargassner.at>, 2010. – letzter Zugriff am 12.08.2010
- [142] HARGASSNER GESMBH: *Gesamtprospekt zu Hargassner Hackgut-Heizungen*. Online, <http://www.roserweb.de>, 2010
- [143] BLT WIESELBURG - AKKREDITIERTE PRÜFANSTALT: *Prüfbericht Pelletsfeuerung Heizkessel - AGROFIRE 30*. Online, <http://blt.josephinum.at>, 2007. – BLT-Protokollnummer: 067/07
- [144] C.S. THERMOS S.R.L.: *Device for cleaning the brazier of heating apparatus*. 31020 San Vendemiano - TV (IT) : Online, <http://at.espacenet.com>, 05 2009. – Patent Nr. EP 2144001 A1
- [145] CS THERMOS SRL: *ECOFUOCO - Bruciatori a biomassa e caldaie*. Eigenverlag, 2009. – Produktbroschüre
- [146] CS THERMOS SRL: *Produktinformation auf der Firmenhomepage*. Online, <http://www.csthermos.it>, 2010. – letzter Zugriff am 21.09.2010
- [147] VERNER: *Produktinformation auf der Firmenhomepage*. Online im Internet, <http://www.kotle-verner.cz>, 2010. – letzter Zugriff am 27.07.2010

- [148] C.A.R.M.E.N. E.V.: *Kesselhersteller, Verbrennung aschereicher Biomasse im kleinen Leistungsbereich*. Online, <http://www.carmen-ev.de>, 2010. – letzter Zugriff am 23.08.2010
- [149] VERNER: *Produktbroschüre Verner*. Online im Internet, <http://www.kotle-verner.cz/data/sharedfiles/1752/aut-ger-eu.pdf>, 2008
- [150] AGENTUR FÜR ENERGIESYSTEME: *Produktinformation über BENEKOV Pelletskessel*. Online im Internet, <http://www.aes-energie.com>, 2010. – letzter Zugriff am 27.07.2010
- [151] BENEKOV: *Produktinformation über BENEKOV Heizkessel*. Online im Internet, <http://www.benekov-heizung.de>, 2010. – letzter Zugriff am 27.07.2010
- [152] BENEKOV: *Produktbroschüre Benekov*. Online im Internet, <http://www.benekov-heizung.de/download/Benekov-Prospekt.pdf>, 2010. – letzter Zugriff am 06.08.2010
- [153] BAXI A/S: *Produktbroschüre zum Baxi Multi-Heat*. Online, <http://www.kaliro.de>, 2010
- [154] BAXI A/S: *Produktbroschüre zu Baxi Multi-Heat Biomassekessel*. Online, <http://www.baxi.dk>, 2008
- [155] PENTENRIEDER, F. J.: *Heizen mit Weizen*. Informationsseite über das Heizen mit Getreide, Online, <http://www.getreideheizung.de>, 2010. – letzter Zugriff am 04.08.2010
- [156] PASSAT ENERGI A/S: *Produktbroschüre Passat Compact Biokessel*. Online, <http://113099.buildyourownpublisher.com/?lang=de>, 2006
- [157] PASSAT ENERGI A/S: *Produktinformation auf der Firmenhomepage*. Online, <http://113099.buildyourownpublisher.com/?lang=de>, 2010. – letzter Zugriff am 26.07.2010
- [158] BECOFLAMM BACH KEG: *Produktinformation zu Passat Compact Biomassekessel*. Online, <http://www.pelletofen.at>, 2010. – letzter Zugriff am 26.07.2010
- [159] P&H ENERGY: *Produktinformation über P&H Heizkessel*. Online im Internet, <http://www.ph-energy.dk>, 2010. – letzter Zugriff am 27.07.2010
- [160] DÄNISCHES TECHNOLOGISCHES INSTITUT: *Prüfbericht des P&H PH 23*. Übersetzung des Originalberichtes; Online, <http://www.ph-energy.dk/>, 2001
- [161] MARQUARDT: *UltraHeat Produktinformation auf der Firmenhomepage der Marquardt-GmbH*. Online im Internet, <http://www.marquardt-gmbh.de>, 2010. – letzter Zugriff am 28.07.2010
- [162] TWINHEAT: *Produktinformation auf der Firmenhomepage*. Online im Internet, www.twinheat.dk, 2010. – letzter Zugriff am 22.07.2010
- [163] TWINHEAT: *Produktbroschüre Twinheat*. Online im Internet, <http://www.twinheat.dk>, 2008
- [164] HELBIG GMBH: *Produktinformation über Twinheat Biobrennstoffanlagen*. Online im Internet, <http://www.helbig-gmbh.de/>, 2010. – letzter Zugriff am 06.08.2010
- [165] AGRISERVE GMBH: *Produktinformation zu den Heizanlagen*. Online, <http://www.agriservice.de>, 2010. – letzter Zugriff am 24.08.2010
- [166] BRUSBERG GMBH: *Produktinformation zu REFO Heizanlagen*. Online im Internet, <http://getreideheizung-shop.de>, 2010. – Letzter Zugriff am 15.09.2010
- [167] REFO ENERGI A/S: *Produktinformation zu REFO Heizanlagen*. Online im Internet, <http://www.refo-energi.dk>, 2010. – Letzter Zugriff am 15.09.2010
- [168] BLT WIESELBURG - AKKREDITIERTE PRÜFANSTALT: *Prüfbericht ALA-TALKKARI Hackgutfeuerung Type VETO CHIPMATIC*. Online, <http://blt.josephinum.at>, 2001. – BLT-Protokollnummer: 068/01

- [169] BRÖKELAND, R. ; BÖHM, R. ; HIENDLMEIER, S.: *Heizen mit Getreide*. Online im Internet, <http://www.shk-stollenwerk.de>, 2005
- [170] TFZ - TECHNOLOGIE- UND FÖRDERZENTRUM: *Bauarten von Zentralheizungskesseln für Festbrennstoffe (Kleinanlagen)*. Auflistung der Hersteller, Online im Internet, <http://www.tfz.bayern.de>, Stand Oktober 2006, Straubing, 2006
- [171] DAN TRIM ENERGI APS: *Produktinformation auf der Firmenhomepage*. Online, <http://dantrim.dk>, 2010. – letzter Zugriff am 20.09.2010
- [172] FA. BMHT: *Produktinformation zu Gejs Heizkessel*. Online, <http://www.bmht.de>, 2010. – letzter Zugriff am 16.09.2010
- [173] GEJS STOKER OG SOLVARME: *Produktinformation zu Gejs Heizkessel*. Online, <http://www.gejs.dk>, 2010. – letzter Zugriff am 16.09.2010
- [174] FUMO APS: *Produktinformation zu FUMO Heizkessel*. Online, <http://www.fumo.dk>, 2010. – letzter Zugriff am 16.09.2010
- [175] ETA HEIZTECHNIK GMBH: *Produktbroschüre zu ETA HACK Hackgutkessel*. Online im Internet, <http://www.eta.co.at>, 2009. – Stand 10/2009
- [176] ETA HEIZTECHNIK GMBH: *Produktinformation auf der Firmenhomepage*. Online im Internet, <http://www.eta.co.at>, 2010. – letzter Zugriff am 14.09.2010
- [177] FRÖLING: *Produktinformation auf der Firmenhomepage*. Online im Internet, <http://www.froeling.com>, 2010. – letzter Zugriff am 23.07.2010
- [178] WOPIENKA, E. ; CARVALHO, L. ; EDER, G. ; EMHOFER, W. ; FRIEDL, G. ; SCHWABL, M.: *Strohpellets für Kleinfeuerungen / Austrian Bioenergy Centre GmbH*. 2009. – Forschungsbericht
- [179] KWB - KRAFT UND WÄRME AUS BIOMASSE GMBH : *Produktinformation auf der Firmenhomepage*. Online im Internet, <http://www.kwb.at>, 2010. – letzter Zugriff am 14.09.2010
- [180] KWB - KRAFT UND WÄRME AUS BIOMASSE GMBH : *Bedienungsanleitung KWB Powerfire 150-300 Hackgut- und Pelletheizung*. Online im Internet, <http://www.kwb.at>, 2007. – Stand 24. April 2007
- [181] MEISL, J.: *Energetische Nutzung von kornartigen Sämereien in Kleinfeuerungsanlagen*. Online, <http://www.lfs-tulln.ac.at>, 2003
- [182] BLT WIESELBURG - AKKREDITIERTE PRÜFANSTALT: *Liste der positiv geprüften Kleinfeuerungen*. Online, <http://blt.josephinum.at>, 2010. – letzter Zugriff am 24.08.2010
- [183] BLT WIESELBURG - AKKREDITIERTE PRÜFANSTALT: *Prüfbericht Heftberger Hackgutfeuerung Type HVR I - S*. Online, <http://blt.josephinum.at>, 2002. – BLT-Protokollnummer: 042/02
- [184] LAWAG MBH: *Produktinformation der Lausitz Wärme Gesellschaft*. Online, <http://www.lawamat.de>, 2009. – letzter Zugriff am 24.08.2010
- [185] PELLISITO HEIZTECHNIK GMBH: *Produktinformation zu Pellsito Heizkessel*. Online, <http://pelletheiztechnik.at>, 2010. – letzter Zugriff am 24.08.2010
- [186] KSM-STOKER A/S: *Produkthomepage*. Online, <http://www.ksm-stoker.dk>, 2010. – letzter Zugriff am 17.09.2010
- [187] BIOMEX GMBH & Co. KG: *Produkthomepage zu KSM-Biomassekessel*. Online, <http://www.bio-mex.de>, 2010. – letzter Stand 17.09.2010

- [188] WVT - WIRTSCHAFTLICHE VERBRENNUNGS-TECHNIK GMBH: *Produktinformation auf der Firmenhomepage*. Online, <http://www.bioflamm.de>, 2010. – letzter Zugriff am 17.09.2010
- [189] OLYMP WERK GMBH: *Produkthomepage*. Online, <http://www.olymp.at>, 2010. – letzter Zugriff am 17.09.2010
- [190] BIOMASS CONSULTING LIST: *Firmenhomepage*. Online, <http://www.bc-list.at>, 2010. – letzter Zugriff am 17.09.2010
- [191] BLACKSMITH: *Produktinformation zu Blacksmith Heizkessel*. Online, <http://www.blacksmith.dk>, 2010. – letzter Zugriff am 16.09.2010
- [192] ENDRESS HOLZFEUERUNGSANLAGEN GMBH: *Produktinformation auf der Firmenhomepage*. Online, <http://www.endress-feuerungen.de>, 2010. – letzter Zugriff am 17.09.2010
- [193] CORMALL A/S: *Firmenhomepage*. Online, <http://www.comall.dk>, 2010. – letzter Zugriff am 20.09.2010
- [194] WOLF GMBH: *Prospekt für Wolf Luftheizer LH*. Online, <http://www.wolf-heiztechnik.de/de/pkp/produkte/lueftungstechnik/luftheizer/luftheizer-lh.html>, 2007
- [195] HARTMANN & BRAUN GMBH & CO KG: *Betriebsanleitung für Advance SCC Kühlereinheit*. 42/23-50-1 DE, Frankfurt am Main
- [196] HARTMANN & BRAUN GMBH & CO KG: *Betriebsanleitung für NDIR-Betriebsphotometer Uras 10 E*. 42/20-27-0 DE, Frankfurt am Main
- [197] HARTMANN & BRAUN GMBH & CO KG: *Betriebsanleitung für Radas 1 G Betriebsphotometer im Aufbaugeschäuse*. 42/20-22-2, Frankfurt am Main
- [198] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (HRSG.): *VDI 2066 Bl.1 (Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung)*. Düsseldorf, 2006
- [199] KYTOLA INSTRUMENTS: *Information zur Umrechnung der Rotameter-Messwerte für andere Gase und Bedingungen*. Online, <http://www.kytola.com>, 2010. – letzter Zugriff am 21.12.2011
- [200] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (HRSG.): *VDI 2066 Bl.5 (Staubmessung in strömenden Gasen, Fraktionierte Staubmessung nach dem Impaktionsverfahren - Kaskadenimpaktor)*. Düsseldorf, 1994
- [201] HAMMER, A. ; RAUPENSTRAUCH, H.: Feinstaubemissionen bei der Verbrennung von landwirtschaftlichen Reststoffen in Kleinf Feuerungsanlagen. In: *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 156 (2011), Nr. 9, S. 363–367
- [202] MARPLE, V.A. ; LIU, B.Y.H.: Characteristics of laminar jet impactors. In: *Env. Sci. and Technology* 8 (1974), S. 648
- [203] HINDS, W. C.: *Aerosol Technology*. John Wiley & Sons, Inc., 1999
- [204] MARPLE, V. A. ; RUBOW, K. L. ; OLSON, B. A.: Inertial, Gravitational, Centrifugal, and Thermal Collection Techniques. In: WILLEKE, K.; BARON, P. A. (Hrsg.): *Aerosol Measurement*. John Wiley & Sons, Inc., 1993, S. 206–232
- [205] HOUBEN, J.J.H.: *Aärosolen bij kleine biomasse-verbrandingsinstallaties*. Studienarbeit, Eindhoven, 2005
- [206] BISWAS, P. ; FLAGAN, R.C.: High-Velocity Inertial Impactors. In: *Environ. Sci. Technol.* 18 (1984), S. 611–616
- [207] BRUNNER, T. ; FRIESENBICHLER, J. ; OBERNBERGER, I. ; BERNER, A.: Development, test and application of a new low-pressure impactor for particle sampling at high temperatures up to about 1000 °C. In: *Proc of the Int. Conf. "Impacts of Fuel Quality on Power Production"*, EPRI report No. 1014551. Palo Alto, CA; USA : EPRI (Ed), 2007, S. 7–61 to7–76

- [208] HILLAMO, R.E. ; KAUPPINEN, E.I.: On the performance of the Berner Low Pressure Impactor. In: *Aerosol Science and Technology* 14 (1991), S. 33–47
- [209] HAUKE GES.M.B.H. & CO KG: *LPI Cascade Impactor User's Manual and Data Sheet*. A-4810 Gmunden Austria, 2008
- [210] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (HRSG.): *DIN 51724-1 (Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung des Schwefelgehaltes - Teil 1: Gesamtschwefel)*. Beuth, Berlin, 1999
- [211] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (HRSG.): *DIN 51727 (Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung des Chlorgehaltes)*. Beuth, Berlin, 2001
- [212] HOFBAUER, H.: *BIOBIB - A Database For Biofuels*. Institute of Chemical Engineering, Vienna University of Technology, Austria, Vienna; Online, <http://www.vt.tuwien.ac.at/biobib/info.html>, 2004. – letzter Zugriff am 12.11.2011
- [213] HESSE INSTRUMENTS: *Handbuch für das Bildanalyse-System für Erhitzungsmikroskope, Optische Dilatometer*. D-37520 Osterode am Harz, Germany, 2002
- [214] PERHOFFER GMBH: *Produktinformation auf der Firmenhomepage*. Online, <http://www.perhofer.at>, 2012. – letzter Zugriff am 19.04.2012
- [215] BLT WIESELBURG - AKKREDITIERTE PRÜFANSTALT: *Prüfbericht Pelletsfeuerung Perhofer PK-V30*. Online, <http://blt.josephinum.at>, 2006. – BLT-Protokollnummer: 056/06
- [216] HAMMER, A. ; POPPENWIMMER, M. ; RAUPENSTRAUCH, H.: Verbrennung von landwirtschaftlichen Reststoffen in Haushaltsfeuerungen. In: VDI WISSENSFORUM GMBH (Hrsg.): *24. Deutscher Flammentag* Bd. VDI-Berichte 2056, 2009, S. 487–490
- [217] BRUNNER, T. ; BÄRNTHALER, G. ; OBERNBERGER, I.: *Fine particulate emissions from state-of-the-art small-scale Austrian pellet furnaces*. Online, <http://www.bios-bioenergy.at/>, 2006
- [218] OBERNBERGER, I.: *Aktuelle Forschungsergebnisse bezüglich der Feinstaub- und NO_x-Bildung bei der Verbrennung von Stroh*. Institut für Prozesstechnik der TU-Graz, Powerpoint-Unterlagen, 2011
- [219] JIMÉNEZ, S. ; BALLESTER, J.: Formation and Emission of Submicron Particles in Pulverized Olive Residue (Orujillo) Combustion. In: *Aerosol Science and Technology* 38 (2004), Nr. 7, S. 707–723

Abbildungsverzeichnis

1.1. Österreichischer Bruttoinlandsverbrauch von Energie für 2010 und dessen Struktur für 2009 [2], [3] nach STATISTIK AUSTRIA und ÖSTERREICHISCHE ENERGIEAGENTUR.	1
1.2. Struktur der erneuerbaren Energie (oben) und Bioenergie (unten), jeweils als Bruttoinlandsverbrauch 2009 in Österreich, in [3] nach STATISTIK AUSTRIA und ÖSTERREICHISCHE ENERGIEAGENTUR	2
1.3. Ziele und Potentiale der weiteren energetischen Biomassenutzung bis 2020 [6].	3
1.4. Pelletspreisentwicklung [7].	3
2.1. Stoffbilanz einer Pflanzengesellschaft am Beispiel eines Hainbuchenwaldes (nach [14] aus [15])	9
2.2. Prinzip von Kollergangpressen mit Ringmatrize [34].	15
2.3. Prinzip von Kollergangpressen mit Flachmatrize [34].	16
2.4. Arbeitsprinzip der ETS-Technik durch zwei gegenlaufende Matrizen [28].	17
2.5. Differenz zwischen Heiz- und Brennwert von holzartigem Brennstoff in Abhängigkeit vom Wassergehalt [19].	19
2.6. Einfluss des Aschegehaltes auf den Heizwert von Holz- und Halmgutbrennstoffen (jeweils bezogen auch die Trockenmassen TM) [19].	22
2.7. Typische Aschezusammensetzung von Weizenstroh, Fichtenholz und Kohle, dargestellt als Oxide [56]	23
2.8. Zylindrischer Asche-Probenkörper mit charakteristischen Phasen während des Schmelzvorganges gemäß ÖNORM CEN/TS 15370-1 [57] (Die Ausgangsform entspricht der Größe bei 550 °C; H Höhe der Probe, r_2 Radius der Halbkugel).	24
3.1. Entwicklung eines Freistrahles [64]	29
3.2. Reichweite der 1 m/s (links) und 2 m/s (rechts) -Geschwindigkeitsgrenze bei unterschiedlichen Düsendurchmessern (nach RUMMEL zitiert in ECK [67])	30
3.3. Teilschritte der thermo-chemischen Umsetzung biogener Festbrennstoffe [61].	31
3.4. Massenabnahme von Holz bei Temperaturerhöhung ohne Sauerstoffzufuhr (nach [70] in [61]).	31
3.5. Pyrolyseprodukte und Gewichtsverlauf beim pyrolytischer Abbau von trockenem Buchenholz [72].	32
3.6. Pyrolytische Zersetzung von Holz und seiner Komponenten [73].	32
3.7. Boudouard-Gleichgewicht und Gleichgewicht der heterogenen Wassergas-Reaktion in Abhängigkeit der Temperatur (nach SCHILLING [74] aus [61])	34
3.8. Abhängigkeit der effektiven Geschwindigkeitskonstante bei der Verbrennung von Pyrolysekoks von der Temperatur [61].	34
3.9. Zeitliches Verhalten eines Holzpartikels ind einer Rostfeuerung [75].	35
3.10. Sankey-Diagramm der Stoffströme einer technischen Feuerung [63].	36
3.11. Modell zur Berechnung der adiabatischen Verbrennungstemperatur [76].	38
3.12. Adiabate Verbrennungstemperatur von Holz in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl und bei verschiedenen Holzfeuchten (u) [61].	38
3.13. Verschiedene Brennstoffe im BUNTE-DREIECK [76]. $\alpha = 1$ bedeutet, dass der gesamt Kohlenstoff vergast wurde und kein unverbrannter mehr übrig ist.	40
3.14. OSTWALD-DREIECK für Heizöl schwer [76].	41

3.15. Quellen und Einflussgrößen auf die Art und Größe der Schadstoffemissionen bei Feuerungsanlagen [81].	42
3.16. Emissionen von flüchtigen organischen Kohlenstoffverbindungen und Kohlenstoffmonoxid in Holzfeuerungen (11 % Restsauerstoff, a: geschlossener Kaminofen, b: Stückholzkessel mit unterem Abbrand, c: Unterschubfeuerung) [75].	44
3.17. Restanteil von CO in Abhängigkeit der Verweilzeit bei verschiedenen Temperaturen exemplarisch für das Brennkammerverhalten eines Rührkessel- und Rohrreaktors (nach [87] aus [86]).	45
3.18. Kohlenstoffmonoxid-Emission als Funktion der Luftüberschusszahl (11 % Restsauerstoff) für verschiedene Feuerungsanlagen. (a einfache handbeschickte Holzfeuerung, b Stückholzkessel mit unterem Abbrand, c automatisch beschickte Holzfeuerung mit Verbrennungstechnik - Stand 1990, d automatisch beschickte Holzfeuerung mit optimierter Verbrennungstechnik - heutiger Standard) [86].	46
3.19. Entstehung von Brennstoff-, thermischem und promptem NO_x in Abhängigkeit der Feuerraumtemperatur mit typischen Bereichen (Richtwerte) für Holz, Halmgüter und UF-Spanplatten [91].	48
3.20. Reaktionswege des Brennstoff-Stickstoffs bei der Verbrennung biogener Festbrennstoffe (nach [92] aus [91]).	49
3.21. Stickstoffoxidemissionen als Funktion des Stickstoffgehalts im Brennstoff für konventionelle Verbrennung, Low- NO_x Verbrennung mit Luftstufung und Entstickung durch SNCR- und SCR-Verfahren für verschiedene biogene Festbrennstoffe (nach [93] aus [91]).	50
3.22. NO_x -Reduktion durch Luftstufung [91].	50
3.23. NO_x -Reduktion durch Brennstoffstufung [91].	51
3.24. Schema der Partikelbildung von naturbelassenem Holz in automatischen Feuerungen [99].	52
3.25. Zusammenhang zwischen Gesamtstaubemission und Gehalt an Hauptaerosolbildnern (Kalium, Natrium, Schwefel, Chlor) [100].	54
3.26. Staubemission von biogenen Brennstoffen mit unterschiedlichen Kalium-, Chlor- und Schwefelgehalten [98].	54
3.27. Zuordnung des Ascheanfalls in einer automatisch beschickten Kleinfeuerungsanlage für Fichtenholz und Weizenstroh (nach [22] aus [21]).	55
3.28. Abläufe bei der Biomasseverbrennung (Pfeilstärke symbolisiert Molanteile bei $w = 20\%$) [102].	56
3.29. Einteilungssystematik von Festbettfeuerungen [104].	58
3.30. Prinzip des Schalenbrenners (links) und einer Feuerung mit Kipprost (rechts) [105].	59
3.31. Vorschubrost im Gegenstrom- (links) und Gleichstromprinzip (rechts) [103].	59
3.32. Funktionsschema der Lambda-Regelung (links, Luftüberschuss und Brennstoffmenge werden gemessen, Verbrennungsluftmenge wird durch Leistungsregelung vorgegeben) und der Verbrennungstemperatur-Regelung (rechts, Verbrennungstemperatur wird gemessen und die Brennstoffmenge geregelt, Verbrennungsluftmenge wird durch Leistungsregelung vorgegeben) [103].	61
3.33. Typisches Wärmeflusschema einer Hackschnitzelanlage mit 50 kW bei Nennwärmeleistung (nach [106] aus [21]).	62
3.34. Feuerungstechnische Wirkungsgrade von Einzelfeuerstätten (links), Kesselwirkungsgrade von Zentralheizungsanlagen (rechts) [21].	63
3.35. Verbesserung der Kesselwirkungsgrade von hand- und automatisch beschickten Holzfeuerungen kleinerer Leistung (Ergebnisse aus Typenprüfung nach [108] aus [21]).	63

5.1. Guntamatic Energiekornfeuerung Powercorn im Schnitt (links) [118] , Treppenrost mit Primärluftschlitzen (rechts oben) und Flambbild mit Energiekorn (rechts unten) [119].	70
5.2. Schema des HEIZOMAT RHK [125].	71
5.3. HEIZOMAT RHK-AK Brennraum mit Ketten-Entaschung (links) [126] und Ascheausstragung (rechts) [125].	72
5.4. Brennraum des HEIZOMAT HSK-RA (links) und Rost mit Ascheräumer (rechts) [125].	72
5.5. Schema der ÖKOTHERM COMPACT-Anlage C0 [129].	73
5.6. Biokompakt Kessel im Schnitt durch Brennkammer und Wärmetauscher (links) [130] und Schnitt 90° dazu durch die Brennkammer (rechts) [131].	74
5.7. Brennkammer des BOKOMPAKT AWK mit wannenförmiger Retorte aus Schamotte mit Primärluftauslässen (links) und Flamme beim Austritt aus der schamottierten Wirbelkammer in die Ausbrennzone, Versuch mit Roggen bei Vollast, 45 kW [132].	74
5.8. REKA Biomassekessel HKRST-FSK 20 im Schnittbild (links) [134] und Ansicht des Brenners (rechts) [135].	75
5.9. Schema des FERRO BIOMAT (links) und isometrische Ansicht mit Schubrost (rechts) [138].	76
5.10. Pelletkessel vom Typ FERRO TURBO (links) mit Mehrstoff-Pelletbrenner (rechts) [138].	77
5.11. Schnittbild des Hargassner AGROFIRE 25-40 kW [140].	78
5.12. Pelletsfeuerung CALDAIA CST35 (links), Brenner ECOFUOCO (mitte), Kaminofen FENICE (rechts)[146].	79
5.13. Brenner des ECOFUOCO in Vorder- (links) und Seitenansicht (rechts) [144].	79
5.14. Blick in den Brenner (links), VERNER-Kessel (mitte) [147]; Brenner in der Ausbrandphase mit Weizenstrohpellets (rechts).	80
5.15. Brenner des BENEKOV-Heizkessels: seitliche Ansicht (links), Sekundärluftdüsen (mitte) [150], Brennteller bei Betrieb (rechts)[151].	81
5.16. BAXI MULTI HEAT Biomassekessel im Schnitt (links)[154], Brenner in Betrieb (rechts) [155].	82
5.17. Schnittbild des Biomassekessels PASSAT COMPACT (links) [156], Blick in den Brenner (rechts) [155].	83
5.18. Funktionsschema der Feuerungsanlage AGRO 40 der Fa. AGROFLAMM [134]	84
5.19. Schnittbild der Anlage von P&H ENERGY [159].	85
5.20. Brennraum des Biomasse Heizkessels ULTRAHEAT bei Erstbeschickung mit Brennstoff (links) und in Betrieb (rechts) [155].	85
5.21. TWINHEAT CPI12 mit 12 kW (links) und TWINHEAT FARMERFIRE COMPACT mit 29 kW (rechts)[162].	86
5.22. AGRISERVE Pelletskessel in Vorderansicht (links) und Brenner mit Unterschubfeuerung (rechts) [165].	87
5.23. Schnitt des REFO Biomassekessels [167].	87
5.24. Schnitt der Anlage VETO CHIPMAT von ALA-TALKKARI mit einer Nennwärmeleistung von 43 kW [168].	88
5.25. Feuerung MINIMATIC (links) und INDUMATIC (rechts) des Herstellers DAN TRIM ENERGI APS [171].	89
5.26. GEJS 400L Heizkessel mit einer Nennleistung von 37 kW mit Holz [172].	89
5.27. FUMO 25 mit einer Nennwärmeleistung für Holzpellets von 25 kW [174].	90
5.28. Schnitt durch den Heizkessel ETA HACK [175].	91
5.29. Hackgut- und Pelletsfeuerung TURBOMATIC der Firma FRÖLING [177].	92
5.30. Drehrost des TDS POWERFIRE der Firma KWB mit Einschubschnecke und Vorbrennkammer [179].	93

6.1.	Schema des Versuchsaufbaues - letzter Entwicklungsstand; AM...Flügelradanemometer, BSK...Brandschutzklappe, PV...Primärluftventil, t_a ... Abgastemperatur, WZ... Wärmehähler, t_{VL} ... Vorlauftemperatur Kesselkreis, t_{RL} ... Rücklauftemperatur Kesselkreis	96
6.2.	Versuchsstand (letzter Entwicklungsstand) von vorne und seitlich von links. PV...Primärluftventil, AM...Flügelradanemometer, BSK...Brandschutzklappe, SK...Sekundärluftklappe.	97
6.3.	Luftheizer (links), Emissionsmesstechnik (rechts)	99
6.4.	Schema der Gesamtstaubmessung	102
6.5.	Messaufbau für die Gesamtstaubmessung TSP	103
6.6.	Prinzip der Impaktion von Partikeln [200] (links), Sammelfolie aus Aluminium (Stärke ca. 10 μm) mit impaktierten Partikeln [201] (rechts)	104
6.7.	Schnitt durch eine Stufe des BLPI (links), Stufen des BLPI mit Sicht auf die Düsenplatte der Stufe 9 (rechts)	104
6.8.	Ideale und reale Trennlinien einer Impaktorstufe (links) [203] und reale Trennlinien der einzelnen Stufen eines Micro-Orifice Uniform Deposit Cascade Impactor (rechts) [204]	106
6.9.	Schema der Feinstaubmessung mit dem BLPI (links), Messanordnung bei der Versuchsdurchführung bei geöffneter Box (rechts)	107
6.10.	Änderung des Cut-Durchmessers in Abhängigkeit des Eingangsdruckes (links) und der Eingangstemperatur (rechts) [206]	108
7.1.	Fraktionen des Brennstoffs WP Ch2 (von links nach rechts): Pellets mit einer geometrisch zylindrischen Form ab 3 mm Länge, gebrochene Pellets ohne streng zylindrischer Form mit einer Länge von 4 mm bis Pelletsdurchmesser (6 mm), Feinanteil mit 1 bis 4 mm und Feinanteil < 1 mm.	110
7.2.	Verteilung der Pelletslängen einer Teilmenge zylinderförmiger Weizenstrohpellets aus Charge 2 (WP Ch2) ab einer Pelletslänge von 3 mm.	110
7.3.	Fraktionen einer Teilmenge zylinderförmiger Weizenstrohpellets aus Charge 2 (WP Ch2), dP...Pelletsdurchmesser.	111
7.4.	Bestimmung des Feinanteiles < 4 mm mittels Siebanalyse bei verschiedenen Proben und Probennahmen bei den Weizenstrohpellets Charge 2.	112
7.5.	Graphischer Vergleich der Elementarzusammensetzung (links) und der Heizwerte (rechts) von Weizenstroh-, Miscanthus- und Holzpellets der in den Versuchen verwendeten Chargen. WP...Weizenstrohpellets, MP...Miscanthuspellets, HP...Holzpellets, Ch... Charge	113
7.6.	Graphischer Vergleich der charakteristischen Temperaturen des Ascheschmelzverhaltens mit den Literaturwerten ([16], [212], [23])	117
7.7.	Änderung der Fläche während der Analyse des Schmelzverhaltens von Weizenstrohpellets-Asche Ch2 für drei ausgewertete Proben mit Darstellung der einzelnen charakteristischen Temperaturen SST, DT, HT und FT.	118
7.8.	Änderung der Fläche während des Schmelzverhaltens von Weizenstrohpellets-Asche Ch3 für drei ausgewertete Proben mit Darstellung der einzelnen charakteristischen Temperaturen SST, DT, HT und FT.	119
7.9.	Änderung der Fläche während des Schmelzverhaltens von Miscanthuspellets-Asche für drei ausgewertete Proben mit Darstellung der einzelnen charakteristischen Temperaturen SST, DT, HT und FT.	119
7.10.	BUNTE-Dreieck [76] erweitert um die Brennstoffe Holzpellets, Weizenstroh und Miscanthus. Dabei wird der gesamte Kohlenstoff vergast ($\alpha = 1$), d. h. kein unverbrannter ist mehr übrig und im Abgas befindet sich auch kein Kohlenstoffmonoxid CO.	121
8.1.	Schnitt durch PK-V30 mit Brenner (links) und Brenner im Detail (rechts) [214].	122
8.2.	Emissionsmessung von CO, NO _x , OGC, CO ₂ und O ₂ bei der Verbrennung von Holzpellets im Volllastbetrieb.	123

8.3. Mit Asche und verschlackter Asche verstopfter Brenner (links), Verbrennungsrückstand mit verschlackten Bestandteilen und teilverbranntem Brennstoff (rechts).	124
8.4. Verbrennung von Weizenpellets am Rost des Heizkessels der Firma Verner während der Betriebsphase (links) und nach dem Abstellen (rechts). In beiden Bildern ist deutlich die oberflächliche Verkrustung zu sehen.	125
8.5. Schema eines beweglichen Roststabes mit exzentrischer Lagerung der ersten Version des Vorschubrostes (links) und Ansicht von oben mit Primärluftzufuhr und Antriebseinheit (rechts).	126
8.6. Erste Version des Vorschubrostes mit Fotomontage in die Schnittdarstellung des Herstellers (links) [214] und Vorschubrost nach Durchführung der Versuchsreihen mit integrierten Thermoelementen zur Messung der Temperatur im Brennstoffbett (rechts).	127
8.7. Zweite Version mit langem Vorschubrostes (links) und Abdeckteil für verlängerten Rost mit Sekundärluftzufuhr (rechts).	127
8.8. Beispiel einer Temperaturmessung über bzw. im Bett. Thermoelement T1 ist bei der Brennstoffzufuhr, T5 im Bereich der Sekundärluftzufuhr am Rostende, T1 ist 1 cm und T2 bis T5 3 cm über dem Rost (links); Versinterungen und Anbackungen am letzten Teil des Rostes, Thermoelement T5 ist in der Mitte erkennbar, darüber der Aufbau für die Sekundärluftzuführung (rechts).	128
8.9. Emissionsmessung am langen Vorschubrost mit Weizenstrohpellets der Charge 1 (mit $H_u = 15,6$ MJ/kg, $v_a = 10,1$ m ³ /kg, bei 13% O ₂).	129
8.10. Dritte Version des Vorschubrostes mit außenliegendem Motor (links), Wellenantrieb mit Schneckengetriebe (mitte) und Distanzrahmen zum Kessel (rechts).	130
8.11. Entwicklung der Sekundärluftzufuhr: 2 Reihen Sekundärluftdüsen oben (links), 4 Reihen Sekundärluftdüsen oben (mitte), Sekundärluft- und Tertiärluftdüsen oben und seitlich (rechts).	131
8.12. Vierte Version des Vorschubrostes mit Kettenantrieb, bewegliche Roststäbe sind auf einer exzentrisch gelagerten Platte angebracht (links) und Konstruktionszeichnung des Rostes im Brenner (rechts).	131
8.13. abgebrochene Achse an der Brennerunterseite mit exzentrisch gelagertem Schlitten zur Aufnahme der bewegliche Roststäbe (links) und Ascheautrag mittels Austragschnecke bzw. drehenden Räumers, nur Unterteil (rechts).	132
8.14. Schema der fünften Version des Vorschubrostes (links) und Antrieb des Rostmechanismus (rechts).	133
8.15. Bilder vom Brennerkanal mit teerartigen Versottungen (a), Verkrustungen auf den Roststäben (b), Schlackebildung und Agglomerationen auf dem Rost (c, d).	136
8.16. Isolierung eines Teils des Brennraumes mit dünnen Feuerfest-Matten (links), Position der Primärluftlöcher in der Brennerrückwand (mitte) und Verkrustungen über den Rostlöchern (rechts).	137
8.17. Kleine Düsen an der Brennerrückwand (links), mittlere und lange Düsen (mitte) und gewundene Düsen (rechts) zur Einbringung von Luft auf das Brennstoffbett. Im mittleren Bild sind die mit den Nägeln verschlossenen Düsen deutlich zu sehen.	137
8.18. Schema der sechsten Version des Vorschubrostes von der Seite (links) und Bohrungen für die Primärluft im Luftkasten, wobei die Kreise die äußeren Durchmesser des Freistrahlen beim Auftreffen auf das Brennstoffbett markieren (rechts).	141
8.19. Rost der sechsten Version des Vorschubrostes seitlich (links) und schräg von unten (rechts).	141
9.1. Flammenbilder der sechsten Version des Brenners: Verbrennung von Weizenstrohpellets Charge 2 (links) und Holzpellets (rechts).	144

9.2. Abdichtung der Brennerrückwand; Anti-Size-Beschichtung, demontierte Sekundär- luftklappe (links), Feuerfestmatte mit ANTI-SEIZE-Beschichtung (rechts).	145
9.3. Teerartige Verkrustungen unter dem Rost (links), Beschichtung mit technischem Schmierstoff auf Aluminiumbasis - ANTI-SEIZE (rechts).	145
9.4. Ablagerungen unter dem Rost nach Versuchen.	146
9.5. Bartbildung an Düsenlöchern und Ablagerungen um Sekundärluftlöcher der fünften Version (links oben), Ablagerungen über dem Wärmeübertrager (links unten), an den Turbulatoren (rechts oben) und im Abgaskanal vor dem Saugzug (rechts unten).	147
9.6. Brückenbildung im Vorratsbehälter mit Miscanthus-Häckselgut (links), Flammen- bild (rechts oben) und Asche (rechts unten) desselben Brennstoffs.	148
9.7. Ausgangslage mit Isolierung des Kesselmantels (links) und vollständig isolierte An- lage zur Minimierung des Wärmeverlustes (rechts).	149
9.8. Versuchsanordnung zur Bestimmung der Brennstoffwärmeleistung über das Stoker- taktverhältnis.	150
9.9. Brennstoffwärmeleistung für die Chargierung von Weizenstrohpelletes der Chargen 2 und 3 in Abhängigkeit vom Stokertaktverhältnis im Bereich der Versuchseinstel- lungen (links) und Charge 2 mit Dauerbetrieb (rechts).	150
9.10. Schema für die Berechnung der Waagemessung	151
9.11. Brennstoffwärmeleistungen bei verschiedenen Stokertakteinstellungen und für ver- schiedene Brennstoffe: Ermittlung über die Waagemessung, zusätzlich WP Charge 2 und Charge 3 über Versuchsanordnung laut Abbildung 9.8.	152
9.12. Asche im Aschebehälter bei Versuchen mit Weizenstrohpellets der Charge 2.	153
9.13. Probenahme der Asche im Aschebehälter.	154
9.14. Normierung der Ascheanalysen auf Brennstoffzusammensetzung der Originalsubstanz.	155
9.15. Zusammenhang von Gehalten und Massenströmen der zugeführten Pellets und dem Rückstand bzw. Ascheanteil über das Abgas.	158
9.16. Vergleich der Berechnungsmethoden zur Ermittlung des Brennaren im Rückstand; Brennstoffwärmeleistungen (links) und Wirkungsgrade dieser im Rückstand ver- bleibenden Brennstoffwärmeleistung bezüglich eingesetzte Brennstoffwärmeleistung von 16,4 kW (rechts).	160
9.17. Funktion zur einfacheren Bestimmung des spezifischen Mindestluftbedarfes $l_{min,0^{\circ}C}$ in Abhängigkeit des Kohlenstoffgehaltes im Brennstoff am Beispiel von Weizenstoh- pellets der Charge 2.	161
9.18. Massenverhältnisse, Heizwert und Mindestluftbedarf für Flüchtige und C_{fix} der Brennstoffe Weizenstrohpellets Ch2, Miscanthuspellets und Holzpellets.	162
9.19. Darstellung der relativen Primär- und Sekundärluftmenge. l_{rel} primärseitig ... rela- tive Primärluftmenge, l_{rel} sekundärseitig ... relative Sekundärluftmenge.	163
9.20. Verschlackung in Abhängigkeit der relativen Primärluftmenge bezogen auf vollstän- digen Ausbrand (links) und Berücksichtigung des nicht verbrannten Kohelinstoffs im Rückstand (rechts).	165
9.21. Ausbrand des Rückstands in Abhängigkeit der relativen Primärluftzufuhr bezogen auf vollständigen Ausbrand (links) und Berücksichtigung des nicht verbrannten Kohelinstoffs im Rückstand (rechts).	165
9.22. Sankey-Diagramm für die Energiebilanz der Pelletsanlage PK-V30 bei Betrieb mit Holzpellets, Daten aus der Typenprüfung [215].	167
9.23. Sankey-Diagramm für die Energiebilanz mit WP Ch2 (links) und mit HP Genol (rechts).	168
9.24. Sankey-Diagramm für die Energiebilanz mit WP Ch2 bei Versuch 2 (links) und bei Versuch 6 (rechts).	169
9.25. Sankey-Diagramm für die Energiebilanz mit MP bei Versuch 3 (links) und HP SCHWEIGHOFER bei Versuch 4 (rechts).	170

9.26. Sankey-Diagramm für die Energiebilanz mit WP Ch3 bei Versuch 9.	171
9.27. Vergleich des Kohlenstoffgehaltes von Brennstoff (WP Ch2) und Rückständen aus 4 Versuchen (links), Vergleich Kohlenstoffgehalte von Brennstoff, Rückstand, veraschtem Brennstoff und veraschtem Rückstand, bei jeweils 550 °C (rechts).	172
9.28. Sankey-Diagramm für Kohlenstoff C aus Versuchen mit dem Brennstoff Weizenstrohpellets WP Ch2.	172
9.29. Vergleich des Wasserstoffgehaltes von Brennstoff (WP Ch2) und Rückständen aus 4 Versuchen (links), Vergleich Wasserstoffgehalte von Brennstoff, Rückstand, veraschtem Brennstoff und veraschtem Rückstand, bei jeweils 550 °C (rechts).	173
9.30. Sankey-Diagramm für Wasserstoff H aus Versuchen mit dem Brennstoff Weizenstrohpellets WP Ch2.	173
9.31. Vergleich des Stickstoffgehaltes von Brennstoff (WP Ch2) und Rückständen aus 4 Versuchen (links), Vergleich Stickstoffgehalte von Brennstoff, Rückstand, veraschtem Brennstoff und veraschtem Rückstand, bei jeweils 550 °C (rechts).	174
9.32. Sankey-Diagramm für Stickstoff N aus Versuchen mit dem Brennstoff Weizenstrohpellets WP Ch2.	174
9.33. Vergleich des Schwefelgehaltes von Brennstoff (WP Ch2) und Rückständen aus 4 Versuchen (links), Vergleich Schwefelgehalte von Brennstoff, Rückstand, veraschtem Brennstoff und veraschtem Rückstand, bei jeweils 550 °C (rechts).	175
9.34. Sankey-Diagramm für Schwefel S aus Versuchen mit dem Brennstoff Weizenstrohpellets WP Ch2.	175
9.35. Vergleich des Chlorgehaltes von Brennstoff (WP Ch2) mit Rückständen aus 4 Versuchen (links), Vergleich Chlorgehalte von Brennstoff, Rückstand, veraschtem Brennstoff und veraschtem Rückstand bei jeweils 550 °C (rechts).	176
9.36. Sankey-Diagramm für Chlor Cl aus Versuchen mit dem Brennstoff Weizenstrohpellets WP Ch2.	176
9.37. Messung der Verweilzeit des Brennstoffs am Vorschubrost: Links durch zwei kleine Bruchstücke von Feuerleichtsteinen beim Versuch mit Holzpellets (V8), rechts ein größerer Teil eines Feuerleichtsteins beim Versuch mit Miscanthuspellets (V7).	177
9.38. Verweilzeit des Brennstoffs am Rost in Abhängigkeit des Rosttaktverhältnisses für verschiedene Brennstoffe bzw. vom Zeitpunkt abhängig vor (vor M) oder nach der Messung der Emissionen (nach M).	178
9.39. Position und Bilder der installierten Thermolemente am Rost und am Luftkasten.	179
9.40. Temperaturverlauf am Rost und im Feuerraum bei Versuchen mit verschiedenen Brennstoffen: WP Ch2 (oben links), WP Ch3 (oben rechts), MP (unten links) und HP (unten rechts).	180
9.41. Vergleich der mittleren Temperaturen und Streuungsbreite je Messpunkt für die Brennstoffe WP Ch2 ($n = 3$), WP Ch3 ($n = 2$), MP ($n = 2$) und HP ($n = 2$).	180
9.42. Zeitlicher Verlauf der Emissionskonzentrationen von CO, NO _x und OGC inklusive Mittelwerten beim Versuch V1 mit Weizenstrohpellets der Charge 2. Als Vergleich sind die Grenzwerte ebenfalls eingezeichnet. Mit $H_u = 15,84 \text{ MJ/kgOS}$, $v_a = 10,19 \text{ m}^3/\text{kg}$, bei Bezugssauerstoff 13 % O ₂ , NO _x als NO ₂	182
9.43. Stickstoffoxid NO _x im Abgas als Funktion des Stickstoffgehaltes im Brennstoff inklusive CO-Werten. Regressionsgerade aller NO _x -Werte als durchgezogene schwarze Gerade, grün strichlierte Linie nur die drei kleineren Werte. NO _x als NO ₂	183
9.44. Sankey-Diagramm für den Stofffluss von Stickstoff mit zusätzlichen Pfad für Stickstoff N als Stickstoffoxid NO _x	184
9.45. Belegung der Folien bei der Messung mit dem BLPI in verschiedenen Versuchen: Foliensatz für Messung von WP Ch2 bei Versuch V2 (oben links); HP bei Versuch V8, Folie der Stufe 4 (oben rechts); MP bei Versuch V7, Folie der Stufe 5 (unten links) und WP Ch3 bei Versuch V5, Folie der Stufe 6 (unten rechts).	185

9.46. Partikelverteilung für alle Messungen, jeweils für Weizen-, Miscanthus- und Holzpellets. (Erläuterung: Die Emissionswerte (-faktoren) beziehen sich auf trockenes Abgas und 13 % O ₂ ; ae.d. aerodynamischer Durchmesser, V...Versuch).	186
9.47. Mittelwerte der Partikelverteilung aus der Verbrennung von Weizen-, Miscanthus- und Holzpellets. (Erläuterung: Die Emissionswerte (-faktoren) beziehen sich auf trockenes Abgas und 13 % O ₂ ; ae.d. aerodynamischer Durchmesser) [201].	187
9.48. Vergleich der Staubgehalte im Abgas für die Gesamtstaub- und Feinstaubmessung (Erläuterung: Die Emissionswerte (-faktoren) beziehen sich auf trockenes Abgas und 13 % O ₂ , GW...Grenzwert).	187
9.49. Extreme Belegung und Ablagerung von Staub auf der Sichtscheibe (links), dem Wärmeübertrager bzw. den Turbulatoren (mitte) und des Keramikfilters zur Messgasabsaugung (rechts) aufgrund der Verbrennung von Weizenstrohpellets.	188
9.50. Zusammenhang des Aschegehaltes mit der Staubkonzentration im Abgas für Gesamtstaub TSP und Feinstaub PM.	189
9.51. Probenhalter für die REM/EDX-Analyse (a), Feinstaubansammlung auf der Stufe 5 (170 nm) bei der Verbrennung von WP bei einer 50-fachen Vergrößerung im REM (b), EDX-Spektrum von Feinstaub auf der Stufe 5 bei der Verbrennung von WP (c).189	
9.52. Mit REM/EDX ermittelte elementare Zusammensetzung der im BLPI gesammelten Partikel. H... Holz, M... Miscanthus, W... Weizen; die Zahl kennzeichnet die Stufe des BLPI, in Klammer steht die mittlere Partikelgröße der Stufe in µm [201].	190
9.53. REM-Aufnahmen der Partikel aus der Verbrennung von Weizenstrohpellets der Stufe 3 (36 nm mittlerer Partikeldurchmesser, a) und der Stufe 9 (2700 nm, b) bei 25000-facher Vergrößerung; SiO ₂ -Partikel der Stufe 9 (2700 nm) bei 1000-facher Vergrößerung.	191
E.1. Änderung der Fläche während der Analyse des Schmelzverhaltens der Asche von Weizenstrohpellets Ch1 für fünf ausgewertete Proben mit Darstellung der einzelnen charakteristischen Temperaturen SST, DT, HT und FT.	XX
E.2. Änderung der Fläche während der Analyse des Schmelzverhaltens der Asche von Weizenstrohpellets Ch2-gesiebt für fünf ausgewertete Proben mit Darstellung der einzelnen charakteristischen Temperaturen SST, DT, HT und FT.	XX
E.3. Änderung der Fläche während der Analyse des Schmelzverhaltens der Asche von Weizenstrohpellets Ch3-gesiebt für vier ausgewertete Proben mit Darstellung der einzelnen charakteristischen Temperaturen SST, DT, HT und FT.	XXI
E.4. Änderung der Fläche während der Analyse des Schmelzverhaltens der Asche von Miscanthus Häckselgut für drei ausgewertete Proben mit Darstellung der einzelnen charakteristischen Temperaturen SST, DT, HT und FT.	XXI
E.5. Änderung der Fläche während der Analyse des Schmelzverhaltens der Asche von Miscanthuspellets-gesiebt für drei ausgewertete Proben mit Darstellung der einzelnen charakteristischen Temperaturen SST, DT, HT und FT.	XXII
E.6. Änderung der Fläche während der Analyse des Schmelzverhaltens der Asche von Holzpellets SCHWEIGHOFER für vier ausgewertete Proben mit Darstellung der einzelnen charakteristischen Temperaturen SST, DT, HT und FT.	XXII

Tabellenverzeichnis

2.1. Gehalte an Hauptelementen in naturbelassenen Biomasse-Festbrennstoffen (Mittelwerte nach [19]) und Stein- und Braunkohle als Vergleich (Mittelwerte nach [20]), nach Darstellung von [16].	11
2.2. Bezeichnung der Größenklassen (Durchmesser (D) bzw. Länge (L) von Biomassepellets nach ÖNORM EN 14961-1 [26]	17
2.3. Verbrennungstechnische Kenndaten von naturbelassenen Biomasse-Festbrennstoffen (jeweils bezogen auf Trockensubstanz) im Vergleich zu Stein- und Braunkohle [16] (Mittelwerte nach [19], Kohle nach [20], Bestimmung der Ascheerweichungspunkte nach DIN 51 730 [58]).	24
3.1. Umrechnungsfaktoren für Holzfeuerungen. Diese gelten jedoch nur für Abgase mit einem Sauerstoffgehalt von 13 % [83].	43
4.1. Mindestwirkungsgrade von Zentralheizungsgeräten für feste fossile und standardisierte biogene Brennstoffe in Abhängigkeit der Nennwärmeleistung [111].	65
4.2. Emissionsgrenzwerte für feste Brennstoffe mit automatischer Beschickung [111]. . .	65
4.3. Emissionsgrenzwerte und Abgasverluste von Feuerungsanlagen im Betrieb für standardisierte feste Brennstoffe [111].	65
4.4. Emissionsgrenzwerte für die erstmalige Überprüfung mit nicht standardisierten festen biogenen Brennstoffen [111].	66
4.5. Brennstofftechnische Anforderungen Presslinge aus Biomasse-Brennstoffen und Energiekorn laut ÖNORM (Auszug aus [33] und [114])	66
6.1. Betriebsdaten der Kühlereinheit ADVANCE SCC [195].	100
6.2. Messkomponenten mit Messbereichen, Einheiten und Messprinzip des URAS 10 E[196].	100
6.3. Prüfgaszusammensetzung laut Analysenzertifikat der Firma Linde für Prüfklasse 1 nach DIN ISO 6141	101
6.4. Daten der BLPI-Stufen [209]	108
7.1. Bei den Versuchen zur Feuerungsanlagenentwicklung verwendete Brennstoffe . . .	110
7.2. Gehalte an Hauptelementen und verbrennungstechnische Kenndaten der untersuchten bzw. verwendeten Weizenstrophpellets, Literaturdaten von HARTMANN [19] und der Datenbank BIOBIB [212] als Vergleich.	113
7.3. Gehalte an Hauptelementen und verbrennungstechnische Kenndaten der verwendeten Miscanthuspellets (bzw. Häckselgut), Literaturdaten von HARTMANN [19] und der Datenbank BIOBIB [212] als Vergleich.	114
7.4. Gehalte an Hauptelementen und verbrennungstechnische Kenndaten der untersuchten bzw. verwendeten Holzpellets und Literaturdaten von [28] (Analysen von 21 Holzpelletsproben).	115
7.5. Ergebnisse des Ascheschmelzverhaltens der Erhitzungsmikroskopversuche und Vergleich mit der Literatur.	116

7.6. Verwendete Elementarzusammensetzung für die Verbrennungsrechnung der Brennstoffe Weizenstroh-, Miscanthus- bzw. Holzpellets und theoretisch erreichbarer maximaler Kohlenstoffdioxidwert $CO_{2,max}^a$ im Abgas bei stöchiometrischer Verbrennung für die Konstruktion der BUNTE-Dreiecke.	120
8.1. Vergleich der Emissionswerte für die Verbrennung von Holzpellets bei Nennlast mit jenen der Typenprüfung und den Grenzwerten.	124
9.1. Mittel der Emissionswerte für CO, NO _x und OGC aus der Verbrennung der Brennstoffe WP Ch2 (n = 3 Versuche), WP Ch3 (n = 2), MP (n = 2), HP (n = 2), Vergleich mit den Grenzwerten und Typenprüfungen für HP. Bezugssauerstoff 13 % O ₂ , NO _x als NO ₂	182
A.1. Ermittlung des Brennbaren im Rückstand.	I
A.2. Übersicht Versuchsparameter und Daten der Versuche mit dem Brenner der Version sechs, Teil 1.	II
A.3. Übersicht Versuchsparameter und Daten der Versuche mit dem Brenner der Version sechs, Teil 2.	III
A.4. Ermittlung des Pelletseintrages in den Brenner.	IV
A.5. Ermittlung der Leistung und des Wirkungsgrades für die Versuche V1 bis V9.	V
B.1. Berechnung zu Massenverhältnisse, Heizwert und Mindestluftbedarf von Flüchtigen und C_{fix}	VI
B.2. Berechnung zur Aufteilung in Primär- und Sekundärluft.	VI
B.3. Messwerte zur Verweilzeitmessung des Brennstoffs am Vorschubrost	VII
B.4. Temperaturen am Rost (R1, R2, R3) und unter dem Luftkasten (B1, B2) bei den Versuchen mit WP Ch2, WP Ch3, MP und HP (Versuche V1 bis V9)	VII
B.5. Analyse des Rückstandes für den Vergleich verschiedener Berechnungsmethoden zur Ermittlung der theor. Leistung im Rückstand.	VIII
B.6. Beurteilung der Verschlackung.	IX
B.7. Massenbilanzierung für die Darstellung in den Sankey-Diagrammen.	IX
B.8. Analysen der Aschen von Brennstoff und Rückstand für die Massenbilanzierung.	X
B.9. Berechnung zur Energiebilanzierung für den Brennstoff Weizenstrophpellets der Charge 2 im Versuch V2.	XI
B.10. Berechnung zur Energiebilanzierung für den Brennstoff Weizenstrophpellets der Charge 3 im Versuch V9.	XI
B.11. Berechnung zur Energiebilanzierung für den Brennstoff Miscanthuspellets im Versuch V3.	XII
B.12. Berechnung zur Energiebilanzierung für den Brennstoff Holzpellets im Versuch V4.	XII
C.1. Analysenwerte zur Feinstaubzusammensetzung mit REM/EDX	XIII
C.2. Auswertung zur Gesamtstaubbmessung TSP.	XIV
C.3. Auswertung zur Feinstaubmessung mit dem BLPI.	XV
D.1. Verbrennungsrechnung für den Brennstoff Weizenstrophpellets Charge 2	XVI
D.2. Verbrennungsrechnung für den Brennstoff Weizenstrophpellets Charge 3	XVII
D.3. Verbrennungsrechnung für den Brennstoff Miscanthuspellets.	XVIII
D.4. Verbrennungsrechnung für den Brennstoff Holzpellets SCHWEIGHOFER.	XIX
F.1. Molare Masse, molares Normvolumen, Normdichte und Anzahl der Atome nach DIN 1871 [79].	XXIII

A. Versuchssparameter und Daten

Tabelle A.1.: Ermittlung des Brennbaren im Rückstand.

Datum	Nr	W _{Rest} [%]	A _{Rest mess.} [%]	A _{Rest(wf)} [%]	C _{Rest(wf)} [%]
18.06.09	1	0,00	27,38	27,38	72,62
19.06.09	1	0,00	37,06	37,06	62,94
22.06.09	1			0,00	
23.06.09	1	1,77	41,11	41,85	58,15
	2	1,01	40,84	41,26	58,74
	3	1,07	38,17	38,58	61,42
03.07.09	1	0,90	47,99	48,43	51,57
	2	0,74	52,28	52,67	47,33
08.07.09	1	1,04	46,53	47,02	52,98
09.07.09	1	0,87	50,18	50,62	49,38
	2	1,21	38,40	38,87	61,13
	3	0,92	42,02	42,41	57,59
14.07.09	1	1,19	37,66	38,11	61,89
	2	1,48	35,80	36,34	63,66
	3	1,12	48,47	49,02	50,98
22.07.09	1	0,98	48,77	49,25	50,75
	2	1,08	53,47	54,05	45,95
	3	0,93	71,35	72,02	27,98
19.10.09	1	0,68	75,24	75,76	24,24
30.10.09	1	0,63	82,22	82,74	17,26
	2	0,59	74,53	74,97	25,03
03.11.09	1	0,60	87,93	88,46	11,54
	2	0,56	80,64	81,09	18,91
	3			0,00	
	4	1,34	63,47	64,33	35,67
10.11.09	1	0,40	85,21	85,55	14,45
12.11.09	1	0,52	78,28	78,69	21,31
	2	0,60	78,60	79,07	20,93
16.11.09	1	0,73	78,39	78,97	21,03
	2	0,78	71,71	72,27	27,73
03.12.09	1	0,72	54,95	55,35	44,65
04.12.09	1	0,81	68,98	69,54	30,46
22.12.09	1	0,64	29,19	29,38	70,62
04.03.10	1	0,59	56,99	57,33	42,67
12.03.10	1	0,53	56,04	56,34	43,66
17.03.10	1	0,77	55,64	56,07	43,93
14.04.10	1	1,04	17,60	17,78	82,22
21.04.10	1	0,27	92,70	92,95	7,05
28.04.10	1	0,61	4,01	4,03	95,97
06.05.10	1	1,75	17,97	18,29	81,71
12.05.10	1	1,94	87,25	88,98	11,02
21.02.10	1	0,96	82,07	82,87	17,13
	2	1,17	69,90	70,73	29,27
27.05.10	1	4,22	37,38	39,03	60,97
	2	1,98	93,67	95,56	4,44
01.06.10	1	3,40	82,40	85,30	14,70
	2	3,59	62,86	65,20	34,80
	3	0,00	100,00	100,00	0,00
05.05.11	1	1,66	69,1	70,27	29,73
12.05.11	2	0,73	71,17	71,69	28,31
16.05.11	3	1,52	43,59	44,26	55,74
18.05.11	4	0	99	99,00	1,00
09.06.11	5	0,88	84,75	85,50	14,50
15.06.11	6	1,04	61,24	61,88	38,12
20.06.11	7	1,14	33,29	33,67	66,33
22.06.11	8	1,51	19,22	19,51	80,49
28.06.11	9	1,02	69,38	70,09	29,91

Tabelle A.3.: Übersicht Versuchsparameter und Daten der Versuche mit dem Brenner der Version sechs, Teil 2.

Aus Verbrennungsrechnung - Naturpellets Hornbach - L _{min}															4,4913 m ³ /kgFS										Asche OS					Asche AAA					Asche R				
Holzpellets (Naturp. Hornbach) Lufttemperatur: 15 °C															L _{min} 15°C 4,7379 I/gFS										Holz - Naturpellets Hornbach: Asche OS 0,41 %					Asche AAA [%] 5					Asche R Ar,Br 0,3895 %				
22.12.09	1	3737	3828	3-10	0,8565	15,420	4,20	2,83	49,69	4,20	4,435	3,80	74,4	69,7	1-30	0,032	7,0	12-60	117-128	606-696	12,32	79,91	70,62	0,94	0,26	1,70	12,58	81,61	0,0114										
4.3.10	1	3828	3893	3-11	0,7475	13,4567	4,00	2,69	60,34	4,26	4,492	3,36	80,2	76,0	1-27	0,036	7,0	6-24	112-120	565-636	10,29	76,46	42,67	0,29	0,07	0,53	10,36	76,99	0,0051										
Aus Verbrennungsrechnung - Holzpellets Genol - L _{min}															4,4237 m ³ /kgFS										Asche OS					Asche AAA					Asche R				
Holzpellets Genol Lufttemperatur: 15 °C															L _{min} 15°C 4,6866 I/gFS										Holz Pellets Genol: Asche OS 0,54 %					Asche AAA [%] 5					Asche R Ar,Br 0,513 %				
11.3.10	1	3893	3964	3-9	0,8296	14,4463	4,15	2,79	50,45	4,27	4,50	3,73	74,8	72,1	1-16	0,059	7,0	6-48	121-138	616-662	11,68	80,86	43,66	0,40	0,11	0,75	11,79	81,60	0,0076										
17.3.10	1	3964	4033	3-8	0,8758	15,2514	4,30	2,89	50,45	4,27	4,50	3,94	73,4	70,8	1-14	0,067	7,0	6-48	121-135	580-674	12,15	79,66	43,93	0,40	0,12	0,76	12,26	80,41	0,0080										
14.4.10	1	4033	4046	3-7	0,9220	16,0555	4,45	2,99	48,48	4,10	4,327	3,99	75,1	69,6	1-17	0,056	7,0	6-30	120-136	574-636	12,99	80,93	82,22	2,37	0,72	4,46	13,71	85,39	0,0266										
Aus Verbrennungsrechnung - Miscanthus-Häckselgut - L _{min}															3,8214 m ³ /kgFS										Asche OS					Asche AAA					Asche K				
Miscanthus-Häckselgut Lufttemperatur: 15 °C															L _{min} 15°C 4,0313 I/gFS										Miscanthus-Häckselgut: Asche OS 1,75 %					Asche AAA [%] 5					Asche K Ar,Br 1,8625 %				
19.4.10	1	4046	4124	3-1	0,8029	13,1351	3,80	2,56							1-5	0,167	7,0	6-30			11,08	75,88	7,05	0,13	0,04	0,25	11,11	76,13	0,0160										
21.4.10	1	4124	4164	5-1	0,8923	14,5977	4,30	2,89	48,27	3,81	4,02	3,59	80,6	80,5	1-3	0,250	7,0	6-30	119-129	528-640	11,08	75,88	7,05	0,13	0,04	0,25	11,11	76,13	0,0160										
Aus Verbrennungsrechnung - Holzpellets Schweighofer - L _{min}															4,2405 m ³ /kgFS										Asche OS					Asche AAA					Asche K				
Holzpellets Schweighofer Lufttemperatur: 15 °C															L _{min} 15°C 4,4734 I/gFS										Holz Pellets Schweighofer: Asche OS 0,33 %					Asche AAA [%] 5					Asche K Ar,Br 0,3135 %				
28.4.10	1	4164	4253	3-8	0,9987	17,4351	4,30	2,89	42,67	3,62	3,81	3,81	76,0	64,8	1-19	0,050	7,0	6-30	112-129	610-692	13,23	75,89	95,97	7,46	2,44	13,99	15,67	89,88	0,0776										
6.5.10	1	4253		3-10	0,8198	14,3119	4,50	3,03	48,73	4,12	4,35	3,57	84,9	82,6	1-29	0,033	7,0	12-30	118-130	587-660	12,59	87,96	81,71	1,40	0,38	2,63	12,97	90,59	0,0141										
	2	4330		3-11	0,6910	12,0631																																	
Aus Verbrennungsrechnung - Miscanthus-Pellets - L _{min}															4,0026 m ³ /kgFS										Asche OS					Asche AAA					Asche R				
Miscanthus-Pellets Lufttemperatur: 15 °C															L _{min} 15°C 4,2224 I/gFS										Miscanthus-Pellets: Asche OS 1,99 %					Asche AAA [%] 5					Asche R Ar,Br 1,8905 %				
12.5.10	1	4330		3-12	0,7541	12,6403	4,00	2,69	47,77	3,98	4,20	3,17	84,9	84,5	1-11	0,083	7,0	6-30								11,02	0,23												
	2	4372		3-11	0,8134	13,6333	4,00	2,69	48,00	4,00	4,22	3,43	78,4	78,4	1-11	0,083	7,0	6-30																					
21.5.10	1	4372	4399	3-10	0,8295	13,9031	4,20	2,83	47,61	3,97	4,19	3,47	81,4	80,7	1-11	0,083	7,0	6-30			10,03	72,13	17,13	0,39	0,11	0,76	10,13	72,89	0,0189										
	2	4399	4429	3-9	0,8979	15,0495	4,20	2,83	47,22	3,94	4,15	3,73	75,8	74,6	1-7	0,125	7,0	6-30			13,30	88,36	29,27	0,78	0,23	1,53	13,53	89,89	0,0240										
27.5.10	1	4429	4471	3-8	1,0002	16,7648	4,00	2,69	45,05	3,76	3,96	3,96	67,9	63,7	1-7	0,125	7,0	6-30	134-141	588-644	12,47	74,35	60,97	2,95	0,97	5,77	13,43	80,13	0,0485										
	2	4471	4422	3-8	0,9966	16,7037	4,70	3,16	47,91	4,00	4,21	4,20	75,3	75,2	1-7	0,125	7,0	6-30	130-151	608-658	13,81	82,65	4,44	0,09	0,03	0,17	13,83	82,82	0,0197										
1.6.10	1	4522	4545	3-9	0,8551	14,3318	4,00	2,69	47,67	3,98	4,19	3,59	75,1	74,6	1-7	0,125	7,0	6-30	125	556-590	12,16	84,86	14,70	0,33	0,09	0,64	12,25	85,50	0,0190										
	2	4556	4580	3-9	0,8770	14,6986	3,80	2,56	46,99	3,92	4,13	3,63	70,5	69,1	1-7	0,125	7,0	6-30	117-125	578-600	11,77	80,08	34,80	1,01	0,29	1,97	12,06	82,06	0,0254										
	3	4582	4608	3-9	0,8944	14,9908	3,80	2,56						67,7	1-11	0,083	7,0	6-30	121-129	592-600	11,83	78,89																	
Aus Verbrennungsrechnung - Charge 2 - L _{min}															3,967 m ³ /kgFS										Asche OS					Asche AAA					Asche K				
Weizenp.-Charge 2 Lufttemperatur: 20 °C															L _{min} 20°C 4,2575 I/gFS										Charge 2: Asche OS 7,17 %					Asche AAA [%] 5					Asche K Ar,Br 6,8115 %				
05.05.11	V1	4712	4754	3-10	0,954	15,115	4,00	2,69	42,60	3,73	4,01	3,82	70,4	66,3	4-10	0,091	7,0	6-12			12,0382	79,642	29,73	2,88	0,90	5,96	12,94	85,60	0,0925										
12.05.11	V2	4779	4843	3-10	0,968	15,338	4,00	2,69	42,79	3,75	4,02	3,90	69,1	65,3	1-10	0,091	7,0	6-12			12,7152	82,902	28,31	2,69	0,85	5,56	13,57	88,46	0,0920										
15.06.11	V6	5111	5167	3-10	1,002	15,875	4,00	2,69	41,28	3,62	3,89	3,89	69,1	63,1	1-10	0,091	7,0	6-12			12,5529	79,075	38,12	4,20	1,38	8,68	13,93	87,75	0,1103										
Aus Verbrennungsrechnung - Miscanthus - L _{min}															4,0026 m ³ /kgFS										Asche OS					Asche AAA					Asche K				
Miscanthus-Pellets Lufttemperatur: 20 °C															L _{min} 20°C 4,2957 I/gFS										Miscanthus Pellets: Asche OS 1,99 %					Asche AAA [%] 5					Asche K Ar,Br 1,8905 %				
16.05.11	V3	4866	4922	3-9	0,874	14,655	4,00	2,69	45,62	3,80	4,08	3,57	75,4	71,7	1-7	0,125	7,0	6-12			12,0574	82,273	55,74	2,38	0,68	4,65	12,74	86,93	0,0373										
20.06.11	V7	5195	5255	3-9	0,878	14,719	4,00	2,69	44,28	3,69	3,96	3,48	77,4	71,4	1-7	0,125	7,0	6-12			11,6067	78,854	66,33	3,72	1,07	7,28	12,68	86,13	0,0493										
Aus Verbrennungsrechnung - Holzpellets Schweighofer - L _{min}															4,2405 m ³ /kgFS										Asche OS					Asche AAA					Asche K				
Holzpellets Schweighofer Lufttemperatur: 20 °C															L _{min} 20°C 4,551 I/gFS										Holz: Asche OS 0,33 %					Asche AAA [%] 5					Asche K Ar,Br 0,3135 %				
18.05.11	V4	4944	4994	3-10	0,649	11,330	4,00	2,69	50,13	4,24	4,55	2,95	91,1	91,1	1-19	0,050	7,0	6-12			9,56938	84,459	1,00	0,003	0,0007	0,01	9,57	84,46	0,0021										
22.06.11	V8	5284	5336	3-10	0,687	11,987	4,00	2,69	48,84	4,13	4,43	3,05	88,4	86,1	1-19	0,050	7,0	6-12			10,0971	84,232	80,49	1,29	0,29	2,43	10,39	86,66	0,0110										
Aus Verbrennungsrechnung - Charge 3 - L _{min}															3,9136 m ³ /kgFS										Asche OS					Asche AAA					Asche R				
Weizenp.-Charge 3 Lufttemperatur: 20 °C															L _{min} 20°C 4,2002 I/gFS										Charge 3: Asche OS 9,73 %					Asche AAA [%] 5					Asche R Ar,Br 9,2435 %				
09.06.11	V5	5026	5079	3-9	0,857	13,089	4,10	2,76	43,11	3,77	4,04	3,47	78,6	76,6	1-9	0,100	7,0	6-12			10,5008	80,226	14,50	1,57	0,44	3,36	10,94	83,59	0,0927										
28.06.11	V9	5366	5422	3-9	0,897	13,688	4,10	2,76	40,74	3,57	3,83	3,43	80,3	73,3	1-9	0,100	7,0	6-12			10,9625	80,087	29,91	3,94	1,16	8,46	12,12	88,55	0,1182										

Ab hier ganze Anlage isoliert !!!

III

A. VERSUCHSPARAMETER UND DATEN

Tabelle A.4.: Ermittlung des Pelletseintrages in den Brenner.

Datum	Stokerintervall			Dauer [hh:mm:ss]	Dauer [s]	Pellets-menge [g]	m _B [g/s]	Hu der OS [MJ/kg]	Brennstoff wärmeleistung [kW]	
	ein [s]	aus [s]	[-]							
06.08.07	Dauerbetrieb			00:05:10	310,00	1034,4	3,3368	15,552	51,894	Ch1
08.08.09	Dauerbetrieb			00:05:00	300,00	836,3	2,7877	18,003	50,186	Holzpellets
27.11.08	Dauerbetrieb			00:05:00	300,00	1208,0	4,0267	15,552	62,623	Ch1
	3	8	0,273	00:05:00	300,00	382,8	1,2760	15,552	19,844	Ch1
16.07.09	Dauerbetrieb			00:01:42	102,00	334,6	3,2804	15,839	51,958	WP Charge 2
	3	8	0,273	00:04:53	293,00	297,7	1,0160	15,839	16,093	
	3	8	0,273	00:08:25	505,00	511,2	1,0123	15,839	16,033	
	3	8	0,273	00:08:35	515,00	537,6	1,0439	15,839	16,534	
	3	8	0,273	00:08:36	516,00	554,8	1,0752	15,839	17,030	
							1,0368			16,423
17.07.09	3	8	0,273	00:05:29	329,00	343,6	1,0444	15,839	16,542	16,880
	3	8	0,273	00:06:02	362,00	393,5	1,0870	15,839	17,217	
	3	9	0,250	00:05:12	312,00	307,3	0,9849	15,839	15,600	
	3	9	0,250	00:05:12	312,00	305,1	0,9779	15,839	15,489	
	3	10	0,231	00:05:12	312,00	280,8	0,9000	15,839	14,255	
	3	10	0,231	00:05:25	325,00	295,1	0,9080	15,839	14,382	15,545
							0,8575			14,318
23.07.09	3	10	0,231	00:07:09	429,00	342,4	0,7981	15,839	12,642	12,844
	3	10	0,231	00:05:25	325,00	267,7	0,8237	15,839	13,046	
	3	11	0,214	00:05:22	322,00	243,7	0,7568	15,839	11,987	
	3	11	0,214	00:05:08	308,00	240,9	0,7821	15,839	12,388	
	3	12	0,200	00:03:45	225,00	164,2	0,7298	15,839	11,559	
	3	12	0,200	00:03:59	239,00	176,7	0,7393	15,839	11,710	12,188
	3	9	0,250	00:06:59	419,00	387,5	0,9248	15,839	14,648	11,635
	3	8	0,273	00:06:05	365,00	371,6	1,0181	15,839	16,125	
	3	7	0,300	00:05:10	310,00	360,6	1,1632	15,839	18,424	
										13,581
										12,844
										12,188
										11,635
										14,444
										0,9462
										18,686
										18,663
										18,063
										22,905
										23,503
										27,083
										11,021
										0,7219
										12,371
										0,8104
										14,444
										0,9462

Berechnung ab hier mit Waage											
Datum	Stokerintervall			m _B [g/s]	Hu der OS [MJ/kg]	Brennstoff wärmeleistung [kW]					
	ein [s]	aus [s]	[-]								
03.12.09	3	8	0,273	1,2216	15,839	19,348	WP Ch 2 / Waage				
04.12.09	3	10	0,231	0,9447	15,839	14,963	WP Ch 2 / Waage				
22.12.09	3	10	0,231	0,8565	18,003	15,420	HP Naturpellets /Waage				
04.03.10	3	11	0,214	0,7475	18,003	13,457	HP Naturpellets Hornbach				
11.03.10	3	9	0,250	0,8296	17,414	14,446	HP Genol / Waage				
17.03.10	3	8	0,273	0,8758	17,414	15,251	Holzpellets Genol Lagerhaus				
14.04.10	3	7	0,300	0,9220	17,414	16,055	Holzpellets Genol Lagerhaus				
19.04.10	3	1	0,750	0,8029	16,36	13,135	Miscanthus Häckselgut				
21.04.10	5	1	0,833	0,8923	16,36	14,598	Miscanthus Häckselgut				
28.04.10	3	8	0,273	0,9987	17,457	17,435	HP Schweighofer / Waage				
06.05.10	3	10	0,231	0,8198	17,457	14,312	Holzpellets Schweighofer Lagerhaus				
	3	11	0,214	0,69	17,457	12,063	Holzpellets Schweighofer Lagerhaus				
12.05.10	3	12	0,200	0,7541	16,761	12,640	MP / Waage				
	3	11	0,214	0,8134	16,761	13,633	Miscanthus Pellets				
21.05.10	3	10	0,231	0,8295	16,761	13,903	Miscanthus Pellets				
	3	9	0,250	0,8979	16,761	15,049	Miscanthus Pellets				
27.05.10	3	8	0,273	1,0002	16,761	16,765	Miscanthus Pellets				
	3	8	0,273	0,9966	16,761	16,704	Miscanthus Pellets				
01.06.10	3	9	0,250	0,8551	16,761	14,332	Miscanthus Pellets	11:03:52	11,0644	105,2	
	3	9	0,250	0,8770	16,761	14,699	Miscanthus Pellets	Messung über gesamten Tag			
	3	9	0,250	0,8944	16,761	14,991	Miscanthus Pellets	16:52:20	16,8722	86,9	0,8753
V1	05.05.11	3	10	0,231	0,9543	15,839	15,115	Weizenstrophpellets Charge 2			
V2	12.05.11	3	10	0,231	0,9683	15,839	15,338	Weizenstrophpellets Charge 2			
V3	16.05.11	3	9	0,250	0,8744	16,761	14,655	Miscanthus Pellets			
V4	18.05.11	3	10	0,231	0,6490	17,457	11,330	Holzpellets Schweighofer Lagerhaus			
V5	09.06.11	3	9	0,250	0,8574	15,266	13,089	WP Ch 3 / Waage			
V6	15.06.11	3	10	0,231	1,0023	15,839	15,875	Weizenstrophpellets Charge 2			
V7	20.06.11	3	9	0,250	0,8782	16,761	14,719	Miscanthus Pellets			
V8	22.06.11	3	10	0,231	0,6867	17,457	11,987	Holzpellets Schweighofer Lagerhaus			
V9	28.06.11	3	9	0,250	0,8966	15,266	13,688	WP Ch 3 / Waage			

Tabelle A.5.: Ermittlung der Leistung und des Wirkungsgrades für die Versuche V1 bis V9.

Datum	Parameter	Uhrzeit [hh:mm:ss]	Δt [hh:mm:ss]	Δt [h]	WZ [kWh]	ΔWZ [kWh]	Leistung [kW]	P_{BWWL} [kW]	eta [%]	m_1, m_2 [kg]	m_3 [kg]	\dot{m}_{Br} [g/s]		
05.05.11 Versuch 1	V1-10 : 0,0909 S 3-10 PL 4,00 Weizenstrohp. Charge 2	00:01:55			4712									
			t_1 [s] =	70							110,1			
		03:31:15	03:29:20	3,4889	4754	42	12,038	15,133	79,550		98,1	12,0	0,9554	
			t_m =	03:29:20	3,4889									
			t_2 [s] =	294								97,9	12,20	
			t_3 [s] =	12784								m_{Br} [kg] = 11,986		
H_u [MJ/kg] 15,839														
12.05.11 Versuch 2	V1-10 : 0,0909 S 3-10 PL 4,00 Weizenstrohp. Charge 2	00:02:10			4779									
			t_1 [s] =	142							35,5			
		05:04:10	05:02:00	5,0333	4843	64	12,715	15,122	84,083		18,2	17,3	0,9547	
			t_m =	05:02:00	5,0333									0,9683
			t_2 [s] =	94								18,0	17,50	
			t_3 [s] =	18072								m_{Br} [kg] = 17,546		
H_u [MJ/kg] 15,839														
16.05.11 Versuch 3	V1-7 : 0,125 S 3-9 PL 4,00 Miscanthus-P	00:00:00			4866									
			t_1 [s] =	270							28,0			
		04:38:40	04:38:40	4,6444	4922	56	12,057	14,235	84,704		13,8	14,2	0,8493	
			t_m =	04:38:40	4,6444									0,8744
			t_2 [s] =	19								13,6	14,40	
			t_3 [s] =	16469								m_{Br} [kg] = 14,619		
H_u [MJ/kg] 16,761														
18.05.11 Versuch 4	V1-19 : 0,05 S 3-10 PL 4,00 Holzp. Schweighofer	00:07:10			4944									
			t_1 [s] =	177							24,6			
		05:20:40	05:13:30	5,2250	4994	50	9,569	11,044	86,647		12,7	11,9	0,6326	
			t_m =	05:13:30	5,2250									0,6490
			t_2 [s] =	10								12,5	12,10	
			t_3 [s] =	18643								m_{Br} [kg] = 12,208		
H_u [MJ/kg] 17,457														
09.06.11 Versuch 5	V1-9 : 0,10 S 3-9 PL 4,10 Weizenstrohp. Charge 3	00:00:00			5026									
			t_1 [s] =	123							23,2			
		05:02:50	05:02:50	5,0472	5079	53	10,501	12,855	81,689		7,9	15,3	0,8420	
			t_m =	05:02:50	5,0472									0,8574
			t_2 [s] =	31								7,7	15,50	
			t_3 [s] =	18078								m_{Br} [kg] = 15,579		
H_u [MJ/kg] 15,266														
15.06.11 Versuch 6	V1-10 : 0,0909 S 3-10 PL 4,00 Weizenstrohp. Charge 2	00:05:00			5111									
			t_1 [s] =	206							21,4			
		04:32:40	04:27:40	4,4611	5167	56	12,553	15,583	80,557		5,6	15,8	0,9838	
			t_m =	04:27:40	4,4611									1,0023
			t_2 [s] =	110								5,4	16,00	
			t_3 [s] =	15964								m_{Br} [kg] = 16,096		
H_u [MJ/kg] 15,839														
20.06.11 Versuch 7	V1-7 : 0,125 S 3-9 PL 4,00 Miscanthus	00:00:00			5195									
			t_1 [s] =	140							21,2			
		05:10:10	05:10:10	5,1694	5255	60	11,607	14,590	79,550		5,0	16,2	0,8705	
			t_m =	05:10:10	5,1694									0,8782
			t_2 [s] =	205								4,8	16,40	
			t_3 [s] =	18675								m_{Br} [kg] = 16,343		
H_u [MJ/kg] 16,761														
22.06.11 Versuch 8	V1-19 : 0,05 S 3-10 PL 4,00 Holzp. Schweighofer	00:00:00			5284									
			t_1 [s] =	290							19,9			
		05:09:00	05:09:00	5,1500	5336	52	10,097	11,770	85,788		7,4	12,5	0,6742	
			t_m =	05:09:00	5,1500									0,6867
			t_2 [s] =	245								7,2	12,70	
			t_3 [s] =	18495								m_{Br} [kg] = 12,731		
H_u [MJ/kg] 17,457														
28.06.11 Versuch 9	V1-9 : 0,10 S 3-9 PL 4,10 Weizenstrohp. Charge 3	00:00:00			5366									
			t_1 [s] =	20							28,5			
		05:06:30	05:06:30	5,1083	5422	56	10,962	13,531	81,017		12,2	16,3	0,8864	
			t_m =	05:06:30	5,1083									0,8966
			t_2 [s] =	32								12,0	16,50	
			t_3 [s] =	18402								m_{Br} [kg] = 16,489		
H_u [MJ/kg] 15,266														

B. Darstellung von Messwerten und Berechnungen

Tabelle B.1.: Berechnung zu Massenverhältnisse, Heizwert und Mindestluftbedarf von Flüchtigen und C_{fix} .

	WP Ch2	MP	HP	
kJ/kgTS	Hu = 16922	18359	20261	
%	FI = 74,15	80,96	84,31	
%	C: 45,48	48,00	50,13	
%	H: 5,44	5,55	5,69	
%	N: 0,49	0,22	0,05	
%	O: 40,41	43,91	43,72	
%	S: 0,130	0,040	0,020	
%	Cl: 0,460	0,120	0,030	
%	A: 7,59	2,16	0,36	
	100,00	100,00	100,00	

	WP Ch2	MP	HP	
Massenanteil Cfix+Asche (Koks)				
$C_{fix} + A =$	25,85	19,04	15,69	%
$C_{fix} =$	18,26	16,88	15,33	%

	WP Ch2	MP	HP	
Massenanteil af				
$F_{l,af} =$	80,24	82,75	84,61	% af
$C_{fix,af} =$	19,76	17,25	15,39	% af

Annahme: Cl, S, N, C-H-O-Verb. gehen mit Flüchtigen vollständig weg

	WP Ch2	MP	HP	
FI (ohne O-N-Cl) =	32,79	36,71	40,51	% entspricht
C_{fix} ohne O-N-Cl =	35,77	31,50	27,45	% ohne O-N-Cl

	WP Ch2	MP	HP	
$\Delta H_{rC} =$	-393,5	-32,76		kJ/kmolC
$H_c = C_{fix} * \Delta H_{rC}$	5982,0	5529,9	5022,1	kJ/kgTS
$H_{FI} = H_u - H_c$	10940,0	12829,1	15238,9	kJ/kgTS

	WP Ch2	MP	HP	
$C_{fix} =$	0,183	0,169	0,153	kgC/kgTS
entspricht	35,35	30,12	24,79	% des H_u
entspricht	64,65	69,88	75,21	% des H_u

	WP Ch2	MP	HP	
Aus Verbrennungsrechnung: $L_{tmin} =$	4,1341	4,2669	4,4991	$m^3_N/kgTS$
$L_{ctmin} =$	8,8776			m^3_N/kgC (Luftbedarf von 100 % Kohlenstoff)
$L_{Cfixtmin} =$	1,621	1,499	1,361	$m^3_N/kgTS$
entspricht	39,21	35,12	30,25	% der L_{tmin}
$L_{FItmin} =$	2,513	2,768	3,138	$m^3_N/kgTS$
entspricht	60,79	64,88	69,75	% der L_{tmin}

Tabelle B.2.: Berechnung zur Aufteilung in Primär- und Sekundärluft.

	% primärseitig	% O ₂ -Rest	m^3/kg $l_{l,pr}$	m^3/kg $l_{l,min,pr}$	m^3/kg $v_{a,min,pr}$	il. Formel	Verbr. Kontrolle	λ	$l_{l,pr}$	Summe $l_{rel} = \lambda$	l_{rel} sekundärseitig
WP Ch2 $\lambda=2,57$	64,9	12,86	10,6361	4,1337	4,1134	0,99508915	2,5721	10,6323	257,3	192,4	
V1 - WP Ch2 $\lambda=2,266$	66,3	11,76	9,367	4,1337					226,6	160,3	
V2 - WP Ch2 $\lambda=2,735$	65,3	13,34	11,3057	4,1337					273,5	208,2	
V6 - WP Ch2 $\lambda=2,782$	63,1	13,48	11,5	4,1337					278,2	215,1	
MP $\lambda=2,75$	71,55	13,365	11,7297	4,2669	4,2625				274,9	203,3	
V3 - MP $\lambda=2,856$	71,7	13,66	12,1863	4,2669					285,6	213,9	
V7 - MP $\lambda=2,645$	71,4	13,07	11,286	4,2669					264,5	193,1	
HP $\lambda=2,52$	88,6	12,695	11,7915	4,6829	4,6426				251,8	163,2	
V4 - HP $\lambda=2,600$	91,1	12,94	11,6976	4,4991					260,0	168,9	
V8 - HP $\lambda=2,450$	86,1	12,45	11,0228	4,4991					245,0	158,9	
WP Ch3 $\lambda=2,43$	74,95	12,405	10,1064	4,1573	4,1195				243,1	168,2	
V5 - WP Ch3 $\lambda=2,343$	76,6	12,08	9,7406	4,1573					234,3	157,7	
V9 - WP Ch3 $\lambda=2,524$	73,3	12,73	10,493	4,1573					252,4	179,1	

Tabelle B.3.: Messwerte zur Verweilzeitmessung des Brennstoffs am Vorschubrost

		WP Ch3 vor M		WP Ch3 nach M	
V5	vor M.	V1-7	0,125	13,57	
	vor M.	V1-7	0,125	14,83	
	nach M.	V1-9	0,1	21	
	nach M.	V1-9	0,1	25,25	
V9	vor M.	V1-9	0,1	19,75	re
	vor M.	V1-9	0,1	22,17	li
	nach M.	V1-9	0,1	31	re
	nach M.	V1-9	0,1	33,5	li
		WP Ch2 vor M		WP Ch2 nach M	
V6	vor M.	V1-10	0,09091	19,5	
	vor M.	V1-10	0,09091	22	
	nach M.	V1-10	0,09091	18,75	re
	nach M.	V1-10	0,09091	25,2	li
		MP vor M		MP nach M	
V7	vor M.	V1-7	0,125	16,83	re
	vor M.	V1-7	0,125	26,1	li
	nach M.	V1-7	0,125	17	re
	nach M.	V1-7	0,125	21,67	li
	nach M.	V1-7	0,125	19 gr. Stück	
		HP vor M		HP nach M	
V8	vor M.	V1-19	0,05	48	re
	vor M.	V1-19	0,05	43	mi li
	vor M.	V1-19	0,05	52	li
	nach M.	V1-19	0,05	54,75	re
	nach M.	V1-19	0,05	34,67	mitte
	nach M.	V1-19	0,05	48,45	li

Tabelle B.4.: Temperaturen am Rost (R1, R2, R3) und unter dem Luftkasten (B1, B2) bei den Versuchen mit WP Ch2, WP Ch3, MP und HP (Versuche V1 bis V9)

Brennstoff	Versuch Nr.	Mitteltemperatur [°C]				
		R1	R2	R3	B1	B2
Weizenstrohpellets Charge 2	V1	746	731	598	860	911
	V2	786	737	587	848	872
	V6	704	717	593	865	790
Miscanthuspellets	V3	796	786	671	871	917
	V7	705	754	678	866	810
Holzpellets	V4	852	877	772	885	982
	V8	732	791	668	869	880
Weizenstrohpellets Charge 3	V5	811	781	676	872	845
	V9	720	745	669	905	921

B. DARSTELLUNG VON MESSWERTEN UND BERECHNUNGEN

Tabelle B.5.: Analyse des Rückstandes für den Vergleich verschiedener Berechnungsmethoden zur Ermittlung der theor. Leistung im Rückstand.

Probe: 09.7.2009-2 Rückstand

Eingabe						bez. auf OS	wf
			1,21	Wassergehalt	[%]	1,21	
				Trockensubstanz	[%]	98,79	100
				Glühverlust	[%]	61,6	61,13
			38,4	Aschegehalt (550 °C)	[%]	38,4	38,87
			4,48	Flüchtige Bestandteile	[%]	4,48	3,31
19995	20544	19884	20141	Brennwert H _o	[kJ/kg]	20141	20388
				Heizwert H _u	[kJ/kg]	19972	20246
			57,7582	Kohlenstoff C	[%]	57,76	58,47
			0,77092	Wasserstoff H	[%]	0,64	0,64
			0,61123	Stickstoff N	[%]	0,61	0,62
	0,09	0,08	0,085	Ges. Schwefelgehalt S _{ges}	[%]	0,09	0,09
	0,8	0,84	0,82	Chlorgehalt Cl	[%]	0,82	0,83
99,51							

Probe: 09.7.2009-3 Rückstand

Eingabe						bez. auf OS	wf
			0,92	Wassergehalt	[%]	0,92	
				Trockensubstanz	[%]	99,08	100
				Glühverlust	[%]	57,98	57,59
			42,02	Aschegehalt (550 °C)	[%]	42,02	42,41
			4,09	Flüchtige Bestandteile	[%]	4,09	3,20
19399	19881	19232	19504	Brennwert H _o	[kJ/kg]	19504	19685
				Heizwert H _u	[kJ/kg]	19337	19539
			55,6853	Kohlenstoff C	[%]	55,69	56,20
			0,76223	Wasserstoff H	[%]	0,66	0,67
			0,54626	Stickstoff N	[%]	0,55	0,55
	0,14	0,16	0,15	Ges. Schwefelgehalt S _{ges}	[%]	0,15	0,15
	0,88	0,79	0,835	Chlorgehalt Cl	[%]	0,84	0,84
100,82							

Probe: 14.7.2009-1 Rückstand

Eingabe						bez. auf OS	wf
			1,19	Wassergehalt	[%]	1,19	
				Trockensubstanz	[%]	98,81	100
				Glühverlust	[%]	62,34	61,89
			37,66	Aschegehalt (550 °C)	[%]	37,66	38,11
			4,68	Flüchtige Bestandteile	[%]	4,68	3,53
20566	20357	20392	20438,3	Brennwert H _o	[kJ/kg]	20438	20684
				Heizwert H _u	[kJ/kg]	20279	20552
			58,4567	Kohlenstoff C	[%]	58,46	59,16
			0,72781	Wasserstoff H	[%]	0,59	0,60
			0,48488	Stickstoff N	[%]	0,48	0,49
	0,13	0,12	0,125	Ges. Schwefelgehalt S _{ges}	[%]	0,13	0,13
	0,91	0,93	0,92	Chlorgehalt Cl	[%]	0,92	0,93
99,42							

Probe: 14.7.2009-2 Rückstand

Eingabe						bez. auf OS	wf
			1,48	Wassergehalt	[%]	1,48	
				Trockensubstanz	[%]	98,52	100
				Glühverlust	[%]	64,2	63,66
			35,8	Aschegehalt (550 °C)	[%]	35,8	36,34
			4,85	Flüchtige Bestandteile	[%]	4,85	3,42
20971	20875	20829	20891,7	Brennwert H _o	[kJ/kg]	20892	21206
				Heizwert H _u	[kJ/kg]	20712	21060
			60,2774	Kohlenstoff C	[%]	60,28	61,18
			0,81769	Wasserstoff H	[%]	0,65	0,66
			0,59231	Stickstoff N	[%]	0,59	0,60
	0,18	0,15	0,165	Ges. Schwefelgehalt S _{ges}	[%]	0,17	0,17
	0,9	0,89	0,895	Chlorgehalt Cl	[%]	0,90	0,91
99,86							

Tabelle B.6.: Beurteilung der Verschlackung.

WP Ch2(n=20)	$I_{rel,Ausbr}$	I_{rel}	Verschlackung
23.06.09	74,4	59,5	0,1 Leistungsmessung nach knapp 2 Std. Anlaufzeit. Messdauer 01:46:15
	74,8	59,5	0,1 Messdauer 02:15:45
	77,2	59,5	0,1 Leistungsmessung nur 01:09:00
03.07.09	70,2	59,5	0,1 Messdauer 02:05:10
	68,2	59,5	0,1 Messdauer 02:08:00
08.07.09	71,0	59,5	0,1 Abbruch wegen Siromausfall. Messdauer 02:05:06
09.07.09	69,1	59,5	0,1 Messdauer 02:00:30
	77,0	59,5	0,1 Messdauer 02:38:10
	73,9	59,5	0,1 Messdauer 01:55:50
14.07.09	83,7	64,0	0,1 Messdauer 02:00:15
	85,8	64,0	0,1 Messdauer 01:59:10
	75,3	64,0	0,1 Messdauer 01:59:00
22.07.09	77,9	66,4	0,1 Messdauer 02:00:45
	84,0	73,7	0,1 Messdauer 02:19:55
	78,0	73,7	0,1 Messdauer 01:59:40
03.12.09	59,5	52,7	0,50 Verschlackungen bis 0,5 dm ² , aber immer weggefördert
04.12.09	72,5	68,1	0,75 Verschlackungen bis 0,75 dm ² , oberflächliches dünnes Gitter, aber immer weggefördert
05.05.11	70,4	66,3	1,00 Versuch abgebrochen wegen zuviel Material unter Rost. große Verschlackung auf Brennstoff
12.05.11	69,1	65,3	0,10 keine Aufschmelzungen
15.06.11	69,1	63,1	0,10 keine Aufschmelzungen

WP Ch3(n=12)	$I_{rel,Ausbr}$	I_{rel}	Verschlackung
30.10.09	84,3	80,5	1,0 Messdauer ca. 2 Std., ab hier neue Pellets mit Schneidmühle zerkleinert; Krusten bis 1 dm ² ...
	86,5	80,5	1,0 Messdauer ca. 1:20 Std., Krusten bis 1 dm ² ...> zuviel PL?
03.11.09	93,1	90,3	1,0 Messdauer 01:55. Schollen > 1 dm ² ...> oft nicht ausgefragt von Schnecke
	95,1	90,3	0,9 Messdauer 02:00. Schollen bis 1 dm ² ...> oft nicht ausgefragt von Schnecke
	0,0	0,0	1,0 Messdauer 00:50. extreme Verschlackung - fördert nicht mehr
	76,4	67,7	0,1 Messdauer 01:00 Std.
10.11.09	83,6	80,5	1,0 Messdauer 02:59:30 großflächige Verschlackungen!
12.11.09	70,4	66,4	0,5 Messdauer 02:21:30 nur kleinere Verschlackungen bis 0,5 dm ² wird aber von Schnecke weg
	70,3	66,4	0,5 Messdauer 02:36:35 nur kleinere Verschlackungen bis 0,5 dm ² wird aber von Schnecke weg
16.11.09	78,5	74,1	0,8 Messdauer 02:26:40. Verschlackungen bis 0,75 dm ² . aber immer weggefördert
	80,5	74,1	0,9 Messdauer 02:20:00, Verschlackungen bis 1 dm ² , aber immer weggefördert
09.06.11	79,6	76,6	0,9 Verschlackungen bis 1 dm ²
28.06.11	80,3	73,3	1,0 Große Verschlackungen bis 10 x 20 cm

MP (n=11)	$I_{rel,Ausbr}$	I_{rel}	Verschlackung
12.05.10	84,9	84,5	0,1 Messzeit nur 00:55:15. keine Aufschmelzungen
	78,4	78,4	0,1 Messzeit nur 00:34:50. keine Aufschmelzungen
21.05.10	81,4	80,7	0,1 Messzeit nur 01:29:45. keine Aufschmelzungen
	75,8	74,6	0,1 Messzeit nur 01:34:45. keine Aufschmelzungen
27.05.10	67,9	63,7	0,1 Messzeit 02:29:13. keine Aufschmelzungen
	75,3	75,2	0,9 Messzeit 02:49:30. Schollen bis 1 dm ² . klebt an Roststab. keine Förderung
01.06.10	75,1	74,6	0,9 Messzeit 01:14:00. Verklebungen an Roststäben. fördert nicht mehr. ca. 10 cm vor Rostende
	70,5	69,1	0,3 Messzeit 02:02:20. anfangs eine Verklebung. mit Haken entfernt. dann wieder gefördert
	0,0	67,7	0,8 Messzeit 03:37:25. recht bald kaugummiartige Verklebungen. überhaupt keine Förderung mehr
16.05.11	75,4	71,7	0,4 Verschlackungen bis 0,3 dm ² . aber weggefördert
20.06.11	77,4	71,4	0,1 keine Aufschmelzungen

Tabelle B.7.: Massenbilanzierung für die Darstellung in den Sankey-Diagrammen.

		Asche Abgas $A_{As,2}$ [%]		Asche Rückstand $A_{As,R}$			
		5		7,21			
		Rückstand 1	Rückstand 2	Rückstand 3	Rückstand 4		
		Umgerechnet auf Brennstoff	Umgerechnet auf Brennstoff	Umgerechnet auf Brennstoff	Umgerechnet auf Brennstoff		
	Brennstoff	Rest	Rest	Rest	Rest	Rest	Rest
	WP Ch1	09.07.2009-2	09.07.2009-3	14.07.2009-1	14.07.2009-2	14.07.2009-2	14.07.2009-2
C	45,86	45,48	10,84	9,55	59,16	61,18	12,14
H	5,55	5,44	0,12	0,67	0,60	0,66	0,13
N	0,60	0,49	0,619	0,11	0,491	0,601	0,12
O	40,08	40,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
S	0,043	0,135	0,086	0,02	0,127	0,167	0,03
Cl	0,271	0,455	0,830	0,14	0,931	0,908	0,18
Asche	7,59	7,59	38,87	42,41	38,11	36,34	7,21
	100,00	100,00	99,51	100,82	99,42	99,86	

	Brennstoff	Mittelwerte im Rückstand Charge 2	% in Rückstand bei 100 % Input	Element im Abgas
C	45,48	10,93	24,03	76,0
H	5,44	0,12	2,20	97,8
N	0,49	0,11	21,53	78,5
O	40,42			
S	0,135	0,025	18,30	81,7
Cl	0,455	0,163	35,93	64,1

für Darstellung Sankey-Diagramme

B. DARSTELLUNG VON MESSWERTEN UND BERECHNUNGEN

Tabelle B.8.: Analysen der Aschen von Brennstoff und Rückstand für die Massenbilanzierung.

Probe: 09.7.2009-2 Rückstand

Eingabe					bez. auf OS	wf
			1,21	Wassergehalt	1,21	
				Trockensubstanz	98,79	100
				Glühverlust	61,6	61,13
			38,4	Aschegehalt (550 °C)	38,4	38,87
			4,48	Flüchtige Bestandteile	4,48	3,31
19995	20544	19884	20141	Brennwert H _o	20141	20388
				Heizwert H _u	19972	20246
			57,7582	Kohlenstoff C	57,76	58,47
			0,77092	Wasserstoff H	0,64	0,64
			0,61123	Stickstoff N	0,61	0,62
	0,09	0,08	0,085	Ges. Schwefelgehalt S _{ges}	0,09	0,09
	0,8	0,84	0,82	Chlorgehalt Cl	0,82	0,83
						99,51

Probe: 09.7.2009-3 Rückstand

Eingabe					bez. auf OS	wf
			0,92	Wassergehalt	0,92	
				Trockensubstanz	99,08	100
				Glühverlust	57,98	57,59
			42,02	Aschegehalt (550 °C)	42,02	42,41
			4,09	Flüchtige Bestandteile	4,09	3,20
19399	19881	19232	19504	Brennwert H _o	19504	19685
				Heizwert H _u	19337	19539
			55,6853	Kohlenstoff C	55,69	56,20
			0,76223	Wasserstoff H	0,66	0,67
			0,54626	Stickstoff N	0,55	0,55
	0,14	0,16	0,15	Ges. Schwefelgehalt S _{ges}	0,15	0,15
	0,88	0,79	0,835	Chlorgehalt Cl	0,84	0,84
						100,82

Probe: 14.7.2009-1 Rückstand

Eingabe					bez. auf OS	wf
			1,19	Wassergehalt	1,19	
				Trockensubstanz	98,81	100
				Glühverlust	62,34	61,89
			37,66	Aschegehalt (550 °C)	37,66	38,11
			4,68	Flüchtige Bestandteile	4,68	3,53
20566	20357	20392	20438,3	Brennwert H _o	20438	20684
				Heizwert H _u	20279	20552
			58,4567	Kohlenstoff C	58,46	59,16
			0,72781	Wasserstoff H	0,59	0,60
			0,48488	Stickstoff N	0,48	0,49
	0,13	0,12	0,125	Ges. Schwefelgehalt S _{ges}	0,13	0,13
	0,91	0,93	0,92	Chlorgehalt Cl	0,92	0,93
						99,42

Probe: 14.7.2009-2 Rückstand

Eingabe					bez. auf OS	wf
			1,48	Wassergehalt	1,48	
				Trockensubstanz	98,52	100
				Glühverlust	64,2	63,66
			35,8	Aschegehalt (550 °C)	35,8	36,34
			4,85	Flüchtige Bestandteile	4,85	3,42
20971	20875	20829	20891,7	Brennwert H _o	20892	21206
				Heizwert H _u	20712	21060
			60,2774	Kohlenstoff C	60,28	61,18
			0,81769	Wasserstoff H	0,65	0,66
			0,59231	Stickstoff N	0,59	0,60
	0,18	0,15	0,165	Ges. Schwefelgehalt S _{ges}	0,17	0,17
	0,9	0,89	0,895	Chlorgehalt Cl	0,90	0,91
						99,86

Tabelle B.9.: Berechnung zur Energiebilanzierung für den Brennstoff Weizenstrohpellets der Charge 2 im Versuch V2.

Berechnung mittels Verbrennungsrechnung:

V2	Charge 2	Elemente im Rückstand	C vermindert durch unvollst. Ausbrand
C	45,48	2,69	42,79
H	5,44		5,44
N	0,49		0,49
O	40,42		40,42
S	0,13		0,13
Cl	0,45		0,45
Asche	7,59		10,28
	100,00		100,00

Berechnung des Abgasstromes:

Achtung: Kohlenstoffanteil im Rückstand wird der Asche zugerechnet, da dieser nicht an der Reaktion teilnimmt und sich inert verhält!!!

neue Zusammensetzung für Verbrennungsrechnung

Versuch vom 12.5.2011
 Versuchsparameter:
 S 3-10, PL 2,63, V 6-12
 Ermittlung des Brennstoffeintrages über Waage
 $C_{R,br} = 28,31\%$, $C_{R,br} = 2,69\%$

RGT [°C] 116
 Umgebungstemperatur [°C] 22

Brennstoff-WL [kW] 15,338 --
 Brennstoffeintrag [g/s] 0,968 --
 Heizwert [kJ/kg] 15839 --

Abgas-Komponente	kgRG/kaFS	kJ/kgK	kJ/kgK	t1	t2	$c_{p,t1-t2}$	P in Abgas-komponente
V-CO2	1,4807	0,8169	0,8673	0	100	0,8673	9,39% V-CO2
V-SO2	0,0025	0,6092	0,6355	0	100	0,6355	0,000
V-N2-Br	0,0046	1,039	1,039	0	100	1,039	0,000
V-N2-Luft	11,32	1,039	1,039	0	100	1,039	1,070
V-H2O - Br-H	0,4591	1,859	1,871	0	100	1,871	0,078
V-H2O - Br-f	0,0556	1,859	1,871	0	100	1,871	0,009
V-H2O - Lu-f	0,14	1,859	1,871	0	100	1,871	0,024
V-O2	2,31	0,915	0,9227	0	100	0,9227	0,194
	15,7725					gewichtetes c_p : 1,040319541	1,493

RG-Verluste [%] 9,73

2,91% V-H2O - Br-H
 0,35% V-H2O - Br-f
 0,89% V-H2O - Lu-f
 14,65% V-O2
 99,95%

Energiebilanz: Versuch 12.05.2011

Brennstoffwärmeleistung	15,338	100,0 %
Nutzwärmeleistung	12,715	82,90 %
Abgasverluste	1,493	9,73 %
Abwärmeverluste	0,280	1,82 %
Ausbrandverluste	0,85	5,54 %

Tabelle B.10.: Berechnung zur Energiebilanzierung für den Brennstoff Weizenstrohpellets der Charge 3 im Versuch V9.

Berechnung mittels Verbrennungsrechnung:

V9	WP Ch3,	Elemente im Rückstand	C vermindert durch unvollst. Ausbrand
C	44,68	3,94	40,74
H	5,49		5,49
N	0,76		0,76
O	38,01		38,01
S	0,16		0,16
Cl	0,40		0,40
Asche	10,50		14,44
	100,00		100,00

Berechnung des Abgasstromes:

Achtung: Kohlenstoffanteil im Rückstand wird der Asche zugerechnet, da dieser nicht an der Reaktion teilnimmt und sich inert verhält!!!

neue Zusammensetzung für Verbrennungsrechnung

Versuch vom 28.6.2011
 Versuchsparameter:
 S 3-9, PL 4,1, V 1-9
 Ermittlung des Brennstoffeintrages über Waage
 $C_{R,br} = 29,91\%$, $C_{R,br} = 3,94\%$

RGT [°C] 104
 Umgebungstemperatur [°C] 23

Brennstoff-WL [kW] 13,688
 Brennstoffeintrag [g/s] 0,897
 Heizwert [kJ/kg] 15839

Abgas-Komponente	kgRG/kaFS	kJ/kgK	kJ/kgK	t1	t2	$c_{p,t1-t2}$	P in Abgas-komponente
V-CO2	1,382	0,8169	0,8673	0	100	0,8673	9,72% V-CO2
V-SO2	0,003	0,6092	0,6355	0	100	0,6355	0,000
V-N2-Br	0,007	1,039	1,039	0	100	1,039	0,001
V-N2-Luft	10,1493	1,039	1,039	0	100	1,039	0,766
V-H2O - Br-H	0,4542	1,859	1,871	0	100	1,871	0,062
V-H2O - Br-f	0,0742	1,859	1,871	0	100	1,871	0,010
V-H2O - Lu-f	0,1322	1,859	1,871	0	100	1,871	0,018
V-O2	2,0099	0,915	0,9227	0	100	0,9227	0,135
	14,2118					gewichtetes c_p : 1,04443922	1,078

RG-Verluste [%] 7,86

3,20% V-H2O - Br-H
 0,52% V-H2O - Br-f
 0,93% V-H2O - Lu-f
 14,14% V-O2
 99,93%

Energiebilanz: Versuch 28.06.2011

Brennstoffwärmeleistung	13,688	100,0 %
Nutzwärmeleistung	10,963	80,09 %
Abgasverluste	1,078	7,88 %
Abwärmeverluste	0,487	3,56 %
Ausbrandverluste	1,16	8,47 %

Tabelle B.11.: Berechnung zur Energiebilanzierung für den Brennstoff Miscanthuspellets im Versuch V3.

Berechnung des Abgasstromes:

Berechnung mittels Verbrennungsrechnung:

V3	MP, TS	Elemente im Rückstand $C_{R,Br}$	C vermindert durch unvollst. Ausbrand
C	48,00	2,38	45,62
H	5,55		5,55
N	0,22		0,22
O	43,91		43,91
S	0,04		0,04
Cl	0,12		0,12
Asche	2,16		4,54
	100,00		100,00

Achtung: Kohlenstoffanteil im Rückstand wird der Asche zugerechnet, da dieser nicht an der Reaktion teilnimmt und sich inert verhält!!!

aus Excel Leistungsberechnung Brenner - Versuchparameter, Asche über Abgas berücksichtigt, gesamtes Brennbares als C angenommen.

neue Zusammensetzung für Verbrennungsrechnung

Versuch vom 16.5.2011
 Versuchsparameter:
 S 3-9, PL 2,63, V 6-12
 Ermittlung des Brennstoffeintrags es über Waage
 $C_R = 55,74\%$, $C_{R,Br} = 2,38\%$

RGT [°C] 111
 Umgebungstemperatur [°C] 20

Brennstoff-WL [kW] 14,655
 Brennstoffeintrag [g/s] 0,874
 Heizwert [kJ/kg] 15839

Abgas-Komponente	Massenstrom $C_{p,0-t1}$	$C_{p,0-t2}$	$t1$	$t2$	$C_{p,t1-t2}$	P in Abgas-komponente		
V-CO2	1,5432	0,8169	0,8673	0	100	0,8673	0,106	9,29% V-CO2
V-SO2	0,0007	0,6092	0,6355	0	100	0,6355	0,000	
V-N2-Br	0,002	1,039	1,039	0	100	1,039	0,000	71,65% V-N2
V-N2-Luft	11,8966	1,039	1,039	0	100	1,039	0,983	
V-H2O - Br-H	0,4579	1,859	1,871	0	100	1,871	0,068	2,76% V-H2O - Br-H
V-H2O - Br-f	0,0768	1,859	1,871	0	100	1,871	0,011	0,46% V-H2O - Br-f
V-H2O - Lu-f	0,1549	1,859	1,871	0	100	1,871	0,023	0,93% V-H2O - Lu-f
V-O2	2,4721	0,915	0,9227	0	100	0,9227	0,181	14,89% V-O2
	16,6042				gewichtetes c_p : 1,040264263	1,374		99,98%

Energiebilanz: Versuch 16.05.2011

Brennstoffwärmeleistung	14,655	100,0 %
Nutzwärmeleistung	12,057	82,27 %
Abgasverluste	1,374	9,37 %
Abwärmeverluste	0,544	3,71 %
Ausbrandverluste	0,68	4,64 %

RG-Verluste [%] 9,37

Tabelle B.12.: Berechnung zur Energiebilanzierung für den Brennstoff Holzpellets im Versuch V4.

Berechnung des Abgasstromes:

Berechnung mittels Verbrennungsrechnung:

V4	HP Schweigheo	Elemente im Rückstand $C_{R,Br}$	C vermindert durch unvollst. Ausbrand
C	50,13	0,00	50,13
H	5,69		5,69
N	0,05		0,05
O	43,72		43,72
S	0,02		0,02
Cl	0,03		0,03
Asche	0,36		0,36
	100,00		100,00

Achtung: Kohlenstoffanteil im Rückstand wird der Asche zugerechnet, da dieser nicht an der Reaktion teilnimmt und sich inert verhält!!!

aus Excel Leistungsberechnung Brenner - Versuchparameter, Asche über Abgas berücksichtigt, gesamtes Brennbares als C angenommen.

neue Zusammensetzung für Verbrennungsrechnung

Versuch vom 18.5.2011
 Versuchsparameter:
 S 3-10, PL 4,0, V 1-19
 Ermittlung des Brennstoffeintrags es über Waage
 $C_R = 1,0\%$, $C_{R,Br} = 0,003\%$

RGT [°C] 97
 Umgebungstemperatur [°C] 19

Brennstoff-WL [kW] 11,330
 Brennstoffeintrag [g/s] 0,649
 Heizwert [kJ/kg] 15839

Abgas-Komponente	Massenstrom $C_{p,0-t1}$	$C_{p,0-t2}$	$t1$	$t2$	$C_{p,t1-t2}$	P in Abgas-komponente		
V-CO2	1,7039	0,8169	0,8673	0	100	0,8673	0,075	9,11% V-CO2
V-SO2	0,0003	0,6092	0,6355	0	100	0,6355	0,000	
V-N2-Br	0,0005	1,039	1,039	0	100	1,039	0,000	71,98% V-N2
V-N2-Luft	13,4665	1,039	1,039	0	100	1,039	0,708	
V-H2O - Br-H	0,4718	1,859	1,871	0	100	1,871	0,045	2,52% V-H2O - Br-H
V-H2O - Br-f	0,0724	1,859	1,871	0	100	1,871	0,007	0,39% V-H2O - Br-f
V-H2O - Lu-f	0,1754	1,859	1,871	0	100	1,871	0,017	0,94% V-H2O - Lu-f
V-O2	2,8179	0,915	0,9227	0	100	0,9227	0,132	15,06% V-O2
	18,7087				gewichtetes c_p : 1,037640366	0,983		100,00%

Energiebilanz: Versuch 18.05.2011

Brennstoffwärmeleistung	11,330	100,0 %
Nutzwärmeleistung	9,569	84,46 %
Abgasverluste	0,983	8,68 %
Abwärmeverluste	0,768	6,78 %
Ausbrandverluste	0,01	0,09 %

RG-Verluste [%] 8,68

C. Daten zu den Emissionsmessungen

Tabelle C.1.: Analysenwerte zur Feinstaubzusammensetzung mit REM/EDX

Wt%	H4 (0,078)	H5 (0,17)	H6 (0,34)	M4 (0,078)	M5 (0,17)	M6 (0,34)	W3 (0,036)	W4 (0,078)	W5 (0,17)	W6 (0,34)	W7 (0,66)	W9-1 (2,7)	W9-2 (2,7)
C	7,08	0	8,45	1,52	10,16	11,67	1,03	3,9	2,98	1,71	8,52	3,97	0
O	2,19	0	3,54	1,14	4,9	7,75	0,21	1,14	2,82	1,94	8,2	48,13	0
Na	2,01	0,52	1,58	1	1,35	1,14	0	0,45	0,45	0,28	0,87	0,12	0
Si	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23,67	0
S	0	0	0	0	3,26	2,72	2,01	2,99	4,04	4,26	4,37	0	0
Cl	36,01	47,87	32,35	44,28	41,31	37,93	22,08	52,07	42,07	45,22	32,9	2,6	6,2
K	41,44	44,68	34,29	44,92	28,86	33,46	14,14	36,84	41,75	41,8	32,6	4,37	4,6
Mn	1,43	1,35	1,06	1,62	1,01	0,88	0,36	1,12	1,25	1,12	0,39	0	0
Zn	0	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe	0	0	0	0	0	0	1,01	0,12	0	0	4,39	0,01	0,67
Al	1,77	1,2	7,72	1,83	4,68	0,44	58,97	0,92	2,4	1,85	4,82	17,01	84,84
Au	8,07	3,58	11,01	3,69	4,47	4,01	0,19	0,45	2,24	1,82	2,94	0,12	3,69
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
C	7,85	0,00	10,40	1,61	11,18	12,21	2,52	3,95	3,13	1,78	9,24	4,79	0,00
O	2,43	0,00	4,36	1,21	5,39	8,11	0,51	1,16	2,96	2,01	8,89	58,08	0,00
Na	2,23	0,55	1,94	1,06	1,49	1,19	0,00	0,46	0,47	0,29	0,94	0,14	0,00
Si	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	28,56	0,00
S	0,00	0,00	0,00	0,00	3,59	2,85	4,92	3,03	4,24	4,42	4,74	0,00	0,00
Cl	39,94	50,27	39,81	46,87	45,47	39,70	54,06	52,79	44,12	46,94	35,67	3,14	54,05
K	45,96	46,92	42,19	47,54	31,77	35,02	34,62	37,35	43,78	43,39	35,34	5,27	40,10
Mn	1,59	1,42	1,30	1,71	1,11	0,92	0,88	1,14	1,31	1,16	0,42	0,00	0,00
Zn	0,00	0,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,47	0,12	0,00	0,00	4,76	0,01	5,84
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Na	2,48	0,55	2,28	1,09	1,78	1,50	0,00	0,48	0,50	0,30	1,15	0,39	0,00
Si	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	76,93	0,00
Si	0,00	0,00	0,00	0,00	4,30	3,57	5,08	3,19	4,51	4,60	5,79	0,00	0,00
Cl	44,52	50,27	46,69	48,22	54,51	49,82	55,76	55,64	46,97	48,79	43,56	8,45	54,05
K	51,23	46,92	49,49	48,92	38,08	43,95	35,71	39,36	46,62	45,10	43,17	14,20	40,10
Mn	1,77	1,42	1,53	1,76	1,33	1,16	0,91	1,20	1,40	1,21	0,52	0,00	0,00
Zn	0,00	0,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,55	0,13	0,00	0,00	5,81	0,03	5,84
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabelle C.2.: Auswertung zur Gesamtstaubmessung TSP.

Datum	06.05.2011-1	12.05.2011-1	12.05.2011-2	12.05.2011-3	16.05.2011-1	16.05.2011-2	16.05.2011-3	18.05.2011-1	18.05.2011-2	18.05.2011-3	09.06.2011-1	09.06.2011-2	09.06.2011-3	15.06.2011-1	15.06.2011-2	15.06.2011-3	17.06.2011-1	17.06.2011-2	17.06.2011-3	21.06.2011-1	21.06.2011-2	21.06.2011-3	28.06.2011-1	28.06.2011-2	28.06.2011-3							
Brennstoff	02:38:36	00:39:40	02:14:40	04:03:50	00:00:00	02:05:00	04:00:00	00:32:25	02:37:25	04:42:25	00:34:00	02:45:00	04:37:00	00:59:30	02:07:00	03:33:00	00:50:00	02:37:00	04:00:40	00:48:20	02:14:00	03:46:00	00:39:00	02:01:00	03:35:00							
Messende	03:06:36	01:09:40	02:44:40	04:13:50	00:39:10	02:27:00	04:19:00	01:02:25	02:37:25	04:57:25	00:49:00	03:16:00	04:52:00	01:19:30	02:32:00	04:03:00	01:20:00	03:07:00	04:30:40	01:16:20	02:44:00	04:16:00	01:05:00	02:31:00	04:05:00							
Messzeit (min:s)	30:00	30:00	30:00	10:00	30:10	22:00	19:00	30:00	30:00	19:00	19:00	30:00	19:00	20:00	29:00	30:00	30:00	30:00	30:00	30:00	30:00	30:00	30:00	30:00	30:00							
Düsenwahl und Pumpeneinstellung:																																
Abgastemp. [°C]	120	115	115	113	101,5	110	116,5	86	86,5	102,6	104,2	109,3	111	114	119	120	101,1	103,4	102,7	90,9	93,3	93,5	96,1	102,3	107,9							
Brennstoffeintrag (Stoker 3-10) [g/s]	0,9447	0,9447	0,9447	0,9447	0,87	0,87	0,87	0,85	0,85	0,85	0,875	0,875	0,875	0,9447	0,9447	0,9447	0,87	0,87	0,87	0,85	0,85	0,85	0,875	0,875	0,875							
spez. Abgasmenge (f. CO ₂ , O ₂) [kg/kg FS]	8,9519	8,9519	8,9519	8,9519	11,194	11,194	11,194	10,9428	10,9428	10,9428	10,9428	10,9428	10,9428	8,9519	8,9519	8,9519	11,194	11,194	11,194	12,9428	12,9428	12,9428	10,9428	10,9428	10,9428							
Abgasvolumenstr. (f. CO ₂ , O ₂) [l/s]	8,457	8,457	8,457	8,457	9,739	9,739	9,739	10,651	10,651	10,651	9,482	9,482	9,482	8,457	8,457	8,457	9,739	9,739	9,739	10,551	10,551	10,551	9,452	9,452	9,452							
Abgasvolumenstr. bei Betriebsbed. (f. CO ₂ , O ₂) [l/s]	12,172	12,017	12,017	11,955	13,358	13,651	13,892	14,016	14,056	14,674	13,059	13,276	13,335	11,986	12,141	12,172	13,343	13,425	13,400	14,209	14,303	14,311	12,887	13,033	13,227							
Kaminurchmesser [mm]	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125						
Kamingeschwindigkeit theor. [m/s]	0,922	0,960	0,960	0,975	1,069	1,114	1,133	1,143	1,163	1,198	1,068	1,082	1,087	0,977	0,990	0,992	1,088	1,095	1,093	1,158	1,168	1,167	1,051	1,063	1,078							
Verluste Ascheausbrand [%]	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7							
Kamingeschwindigkeit real [m/s]	0,923	0,911	0,911	0,906	1,013	1,036	1,053	1,131	1,171	1,164	0,993	1,007	1,011	0,909	0,921	0,923	1,012	1,016	1,016	1,147	1,164	1,165	0,977	0,988	1,003							
gewählter Düsendurchmesser [mm]	25	25	25	25	25	25	25	21	21	21	21	25	25	25	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21							
Abgasvolumenstrom (aktuell) [l/s]	0,453	0,447	0,447	0,452	0,497	0,508	0,517	0,392	0,406	0,410	0,344	0,404	0,456	0,446	0,319	0,320	0,350	0,353	0,352	0,367	0,400	0,400	0,338	0,342	0,347							
Unterdruck im Gaszähler [mbar]	150	50	155	155	155	150	150	45	45	45	150	150	150	200	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155							
Temperatur im Gaszähler [°C]	36	24	24,5	24,5	23	24	24	24	24	24	24	24	24	23,5	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24							
Abgasvolumenstrom im Gerät [l/h]	1509	1298	1471	1471	1674	1670	1670	1373,24	1215,89	1222,25	1021,14	1525,29	1615,02	1536,25	1029,32	941,57	1037,11	1027,77	1027,77	1209,27	1210,84	1209,90	1047,31	1053,12	1026,51							
Einstellung Rotameter (100% = 4100 l/h) [%]	37	32	36	36	41	41	41	33	30	30	25	37	39	36	25	23	26	26	25	29	30	30	26	26	26							
Staubgehaltsbestimmung:																																
Staubulsen Nummer [1]	4	5	5	5	10	12	16	2	2	5	10	6	1	3	17	14	6	4	5	19	13	7	16	2	18							
Staubulsen Masse [g]	24,6378	22,5466	22,6764	22,3506	27,9167	26,8927	26,4631	21,4024	22,4670	21,2662	26,3309	21,1129	20,6034	20,6349	25,2926	24,3081	25,1275	21,9273	20,0759	25,2353	25,3247	24,9613	25,4565	20,0499	23,3832							
Staubulsen brutto [g]	24,6594	23,0216	22,8757	22,4153	28,0196	28,5262	28,5104	21,4282	22,6424	21,2939	26,3507	21,319	21,0053	20,7846	25,4092	25,1060	25,1936	21,9767	20,1218	25,268	25,3401	24,9910	25,6264	20,1860	25,4937							
Staubgewicht netto [g]	0,0216	0,0748	0,1993	0,0645	0,1011	0,0525	0,0473	0,0258	0,0172	0,0277	0,1196	0,2051	0,1229	0,1498	0,1586	0,1779	0,066	0,0494	0,0423	0,3327	0,0154	0,0097	0,1679	0,1361	0,1305							
Gaszähler Messbeginn [m³]	304,340	205,240	306,090	306,090	306,300	307,240	308,460	308,785	309,460	310,120	310,540	310,920	311,334	311,655	312,300	312,253	313,394	313,917	314,446	314,450	315,050	315,751	316,380	316,540	317,290							
Gaszähler Messende [m³]	309,245	209,073	306,852	306,852	307,833	308,773	309,457	310,116	310,520	311,334	311,655	312,300	312,253	313,394	313,917	314,446	314,450	315,050	315,751	316,380	316,540	317,290	317,920	318,640	319,390							
Gaszähler Messbedingungen [m³]	0,905	0,833	0,762	0,762	1,033	0,763	0,763	0,902	0,658	0,658	0,400	0,793	0,793	0,514	0,420	0,453	0,594	0,517	0,524	0,636	0,643	0,626	0,454	0,441	0,420							
Unterdruck im Gaszähler [mbar]	54	50	155	155	240	326	326	35	47	47	278	219	219	197,5	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155							
Temperatur im Gaszähler [°C]	24	24	29,5	29,5	23	24	24	23,5	24,5	24,5	22	22	22	23,5	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24							
Gaszähler Normbedingungen [m³]	0,787	0,727	0,687	0,687	0,724	0,465	0,292	0,612	0,575	0,575	0,267	0,574	0,325	0,360	0,328	0,365	0,527	0,483	0,470	0,568	0,570	0,555	0,389	0,375	0,367							
Staubgehalt [mg/Nm³]	78,3	102,8	339,6	345,7	139,7	128,9	162,2	42,1	29,9	26,5	448,2	399,4	376,1	393,5	480,0	462,5	129,2	108,8	90,0	57,8	27,0	17,5	432,1	367,9	365,8							
Reststaubgehalt im Abgas [%]	12,3	13,1	13,5	13,6	13,6	13,7	13,2	13,9	14,0	13,4	13,3	13,0	12,3	13,2	13,0	12,6	12,7	12,5	12,6	12,1	12,2	12,1	12,9	12,8	12,7							
Normfaktor für 13 % O ₂ [1]	0,920	1,013	1,067	1,067	1,081	1,096	1,028	1,127	1,143	1,053	1,039	1,000	0,920	1,026	1,000	0,978	0,964	0,941	0,952	0,909	0,909	0,909	0,968	0,976	0,964							
Staubgehalt bei 13 % O ₂ [mg/Nm³ norm]	72,0	104,1	362,2	368,7	151,0	141,3	166,3	47,5	34,2	27,8	465,7	390,4	347,7	403,6	480,0	451,2	129,6	108,5	85,7	51,9	24,6	16,7	406,7	368,9	342,9							
Staubgehalt bei 13 % O ₂ [mg/MJ]	46,3	67,0	233,2	237,4	93,1	87,1	102,5	29,7	21,4	17,5	305,4	235,7	228,0	259,8	309,1	290,5	74,3	61,9	52,8	32,5	15,4	9,8	279,9	235,4	224,0							
Mittelwerte	236,3				94,2				22,8				266,4				266,5				63,0				19,2				246,7			
Mittel alle WP Ch2+Ch3	268,1																															
V ₀ (l, 13% O ₂)																																
Weizenst Ch2	10,1973 m³/l, 13% O ₂ /kg OS																															
Miscanhus P.	10,3297 m³/l, 13% O ₂ /kg OS																															
Holz P.-Schweigerhof	10,8182 m³/l, 13% O ₂ /kg OS																															
Weizenst - Ch3	10,0114 m³/l, 13% O ₂ /kg OS																															
HU	15 839 kJ/kg OS																															
Faktor V ₀ /HU	0,8436																															
	0,8183																															
	0,8294																															
	0,8938																															

D. Verbrennungsrechnung der eingesetzten Brennstoffe

Tabelle D.1.: Verbrennungsrechnung für den Brennstoff Weizenstrohpellets Charge 2 .

Projekt: STROHPELLETSVERBRENNUNG Charge 2 -2007

Brennstoffdaten:							
Brennstoff	Br.-menge srm	WG %	Schüttdichte kgTS/Srm	Schüttdichte kgFS/Srm	Masse FS t	Masse TS t	Masse H ₂ O t
Holz+Rind	100,0	5,56	162,8	172,4	17,24	16,28	0,96
WHG	0,0	35	162,8	250,5	0,00	0,00	0,00
WHG	0,0	40	162,8	271,3	0,00	0,00	0,00
IHG	0,0	40	162,8	271,3	0,00	0,00	0,00
Summe	100,0	5,56%			17,24	16,28	0,96
					100,00%	94,44%	5,56%

Brennstoffzusammensetzung:

C	45,48%	0,4548	kg/kgTS	0,4295	kg/kgFS	0,8
H	5,44%	0,0544	kg/kgTS	0,0514	kg/kgFS	0,1
O	40,42%	0,4042	kg/kgTS	0,3817	kg/kgFS	0,8
S	0,13%	0,0013	kg/kgTS	0,0012	kg/kgFS	0,0
N	0,49%	0,0049	kg/kgTS	0,0046	kg/kgFS	0,0
Rest:Ox+Cl+Met	8,040%	0,0804	kg/kgTS	0,0759	kg/kgFS	0,1
Summe	100,00%	1,0000	kg/kgTS	0,9444	kg/kgFS	

Luftüberschuss λ :	2,734
Feuchtegehalt x :	10 g/kg
Bezugs-O ₂ :	13,0%

Jahresbetriebsdauer:	8760 h
Jahresvolllaststunden:	4200 h

Zuluftmengen:		m ³ /kgTS	m ³ /kgFS	kg/kgTS	kg/kgFS
erforderliche mind.Sauerstoffmenge:	O _{2min} =	0,8681	0,8198	1,2405	1,1715
Sauerstoffmenge bei λ:	O ₂ =	2,3733	2,2414	3,3916	3,2030
erforderliche mind. Luftmenge trocken:	I _{min,tr} =	4,1337	3,9039	5,3447	5,0475
erforderliche mind. Luftmenge feucht:	I _{min,f} =	4,2002	3,9667	5,3981	5,0980
Luftmenge trocken (Luftüberschuss):	I _{λ,tr} =	11,3016	10,6732	14,6124	13,7999
Luftmenge feucht (Luftüberschuss):	I _{λ,f} =	11,4834	10,8449	14,7585	13,9379
Abgasmengen:		m ³ /kgTS	m ³ /kgFS	kg/kgTS	kg/kgFS
Kohlendioxid:	V _{CO2} =	0,8429	0,7961	1,6664	1,5738
Schwefeldioxid:	V _{SO2} =	0,0009	0,0008	0,0026	0,0025
Stickstoff aus Brennstoff:	V _{N2} =	0,0039	0,0037	0,0049	0,0046
Stickstoff aus Verbrennungsluft:	V _{N2} =	8,9283	8,4319	11,2208	10,5970
Wasserdampf aus Brennstoff H:	V _{H2O} =	0,6049	0,5712	0,4862	0,4591
Wasserdampf aus Brennstoff-Feuchte:	V _{H2O} =	0,0000	0,0692	0,0000	0,0556
Wasserdampf aus Luftfeuchte:	V _{H2O} =	0,1818	0,1717	0,1461	0,1380
Überschüssiger Luftsauerstoff:	V _{O2} =	1,5053	1,4216	2,1511	2,0315
Summe Abgasmenge feucht:	V _f =	12,0679	11,4661	15,6781	14,8620
Abgasmenge trocken:	V _t =	11,2812	10,6540	15,0458	14,2093
Sauerstoffanteil (Rauchgas f.):	O ₂ =	12,47%vol	12,40%vol	13,72%mass	13,67%mass
Sauerstoffanteil (Rauchgas tr.):	O ₂ =	13,34%vol	13,34%vol	14,30%mass	14,30%mass
Rauchgasmenge trocken, 13%O ₂ =		10,7976	10,1972	14,4008	13,6001

D. VERBRENNUNGSRECHNUNG DER EINGESETZTEN BRENNSTOFFE

Tabelle D.2.: Verbrennungsrechnung für den Brennstoff Weizenstrohpellets Charge 3 .

Projekt: STROHPELLETSVERBRENNUNG charge 3 - 2009

Brennstoffdaten:

Brennstoff	Br.-menge srm	WG %	Schüttdichte kgTS/Srm	Schüttdichte kgFS/Srm	Masse FS t	Masse TS t	Masse H ₂ O t
Holz+Rinde	100,0	7,42	162,8	175,8	17,58	16,28	1,30
WHG	0,0	35	162,8	250,5	0,00	0,00	0,00
WHG	0,0	40	162,8	271,3	0,00	0,00	0,00
IHG	0,0	40	162,8	271,3	0,00	0,00	0,00
Summe	100,0	7,42%			17,58	16,28	1,30
					100,00%	92,58%	7,42%

Brennstoffzusammensetzung:

C	44,68%	0,4468	kg/kgTS	0,4136	kg/kgFS	0,8
H	5,49%	0,0549	kg/kgTS	0,0508	kg/kgFS	0,1
O	38,01%	0,3801	kg/kgTS	0,3519	kg/kgFS	0,7
S	0,16%	0,0016	kg/kgTS	0,0015	kg/kgFS	0,0
N	0,76%	0,0076	kg/kgTS	0,0070	kg/kgFS	0,0
Rest:Ox+Cl+Met	10,898%	0,1090	kg/kgTS	0,1009	kg/kgFS	0,2
Summe	100,00%	1,0000	kg/kgTS	0,9258	kg/kgFS	

Luftüberschuss λ :	2,524
Feuchtegehalt x :	10 g/kg
Bezugs-O ₂ :	13,0%

Jahresbetriebsdauer:	8760 h
Jahresvolllaststunden:	4200 h

Zuluftmengen:

		m ³ _N /kgTS	m ³ _N /kgFS	kg/kgTS	kg/kgFS
erforderliche mind. Sauerstoffmenge:	O _{2min} =	0,8730	0,8083	1,2476	1,1550
Sauerstoffmenge bei λ :	O ₂ =	2,2035	2,0400	3,1489	2,9153
erforderliche mind. Luftmenge trocken:	I _{min,tr} =	4,1573	3,8488	5,3752	4,9763
erforderliche mind. Luftmenge feucht:	I _{min,f} =	4,2242	3,9107	5,4289	5,0261
Luftmenge trocken (Luftüberschuss):	I _{λ,tr} =	10,4930	9,7144	13,5669	12,5603
Luftmenge feucht (Luftüberschuss):	I _{λ,f} =	10,6618	9,8707	13,7026	12,6859

Abgasmengen:

		m ³ _N /kgTS	m ³ _N /kgFS	kg/kgTS	kg/kgFS
Kohlendioxid:	V _{CO₂} =	0,8281	0,7666	1,6371	1,5157
Schwefeldioxid:	V _{SO₂} =	0,0011	0,0010	0,0032	0,0030
Stickstoff aus Brennstoff:	V _{N₂} =	0,0061	0,0056	0,0076	0,0070
Stickstoff aus Verbrennungsluft:	V _{N₂} =	8,2895	7,6744	10,4180	9,6450
Wasserdampf aus Brennstoff H:	V _{H₂O} =	0,6104	0,5651	0,4906	0,4542
Wasserdampf aus Brennstoff-Feuchte:	V _{H₂O} =	0,0000	0,0923	0,0000	0,0742
Wasserdampf aus Luftfeuchte:	V _{H₂O} =	0,1688	0,1563	0,1357	0,1256
Überschüssiger Luftsauerstoff:	V _{O₂} =	1,3305	1,2318	1,9013	1,7602
Summe Abgasmenge feucht:	V _f =	11,2345	10,4932	14,5936	13,5850
Abgasmenge trocken:	V _t =	10,4553	9,6795	13,9673	12,9309
Sauerstoffanteil (Rauchgas f.):	O ₂ =	11,84%vol	11,74%vol	13,03%mass	12,96%mass
Sauerstoffanteil (Rauchgas tr.):	O ₂ =	12,73%vol	12,73%vol	13,61%mass	13,61%mass
Rauchgasmenge trocken, 13%O ₂ =		10,8138	10,0114	14,4463	13,3744

Tabelle D.3.: Verbrennungsrechnung für den Brennstoff Miscanthuspellets.

Projekt: *MISCANTHUS Pellets*

Brennstoffdaten:

Brennstoff	Br.-menge srm	WG %	Schüttdichte kgTS/Srm	Schüttdichte kgFS/Srm	Masse FS t	Masse TS t	Masse H ₂ O t
Holz+Rinde	100,0	7,68	162,8	176,3	17,63	16,28	1,35
WHG	0,0	35	162,8	250,5	0,00	0,00	0,00
WHG	0,0	40	162,8	271,3	0,00	0,00	0,00
IHG	0,0	40	162,8	271,3	0,00	0,00	0,00
Summe	100,0	7,68%			17,63	16,28	1,35
					100,00%	92,32%	7,68%

Brennstoffzusammensetzung:

C	47,998%	0,4800	kg/kgTS	0,4431	kg/kgFS	0,9
H	5,547%	0,0555	kg/kgTS	0,0512	kg/kgFS	0,1
O	43,894%	0,4389	kg/kgTS	0,4052	kg/kgFS	0,8
S	0,043%	0,0004	kg/kgTS	0,0004	kg/kgFS	0,0
N	0,220%	0,0022	kg/kgTS	0,0020	kg/kgFS	0,0
Rest:Ox+Cl+Met	2,298%	0,0230	kg/kgTS	0,0212	kg/kgFS	0,0
Summe	100,00%	1,0000	kg/kgTS	0,9232	kg/kgFS	

Luftüberschuss λ :	2,645
Feuchtegehalt x :	10 g/kg
Bezugs-O ₂ :	13,0%

Jahresbetriebsdauer:	8760 h
Jahresvolllaststunden:	4200 h

Zuluftmengen:

		m ³ _N /kgTS	m ³ _N /kgFS	kg/kgTS	kg/kgFS
erforderliche mind. Sauerstoffmenge:	O _{2min} =	0,8961	0,8272	1,2805	1,1821
Sauerstoffmenge bei λ :	O ₂ =	2,3701	2,1880	3,3869	3,1268
erforderliche mind. Luftmenge trocken:	I _{min,tr} =	4,2669	3,9392	5,5169	5,0932
erforderliche mind. Luftmenge feucht:	I _{min,f} =	4,3355	4,0026	5,5721	5,1441
Luftmenge trocken (Luftüberschuss):	I _{λ,tr} =	11,2860	10,4192	14,5922	13,4715
Luftmenge feucht (Luftüberschuss):	I _{λ,f} =	11,4675	10,5868	14,7381	13,6062

Abgasmengen:

		m ³ _N /kgTS	m ³ _N /kgFS	kg/kgTS	kg/kgFS
Kohlendioxid:	V _{CO₂} =	0,8896	0,8213	1,7587	1,6236
Schwefeldioxid:	V _{SO₂} =	0,0003	0,0003	0,0009	0,0008
Stickstoff aus Brennstoff:	V _{N₂} =	0,0018	0,0016	0,0022	0,0020
Stickstoff aus Verbrennungsluft:	V _{N₂} =	8,9159	8,2312	11,2053	10,3447
Wasserdampf aus Brennstoff H:	V _{H₂O} =	0,6168	0,5694	0,4957	0,4577
Wasserdampf aus Brennstoff-Feuchte:	V _{H₂O} =	0,0000	0,0956	0,0000	0,0768
Wasserdampf aus Luftfeuchte:	V _{H₂O} =	0,1816	0,1676	0,1459	0,1347
Überschüssiger Luftsauerstoff:	V _{O₂} =	1,4740	1,3608	2,1064	1,9446
Summe Abgasmenge feucht:	V _f =	12,0799	11,2477	15,7151	14,5850
Abgasmenge trocken:	V _t =	11,2816	10,4151	15,0735	13,9158
Sauerstoffanteil (Rauchgas f.):	O ₂ =	12,20%vol	12,10%vol	13,40%mass	13,33%mass
Sauerstoffanteil (Rauchgas tr.):	O ₂ =	13,07%vol	13,07%vol	13,97%mass	13,97%mass
Rauchgasmenge trocken, 13%O ₂ =		11,1890	10,3297	14,9499	13,8017

D. VERBRENNUNGSRECHNUNG DER EINGESETZTEN BRENNSTOFFE

Tabelle D.4.: Verbrennungsrechnung für den Brennstoff Holzpellets SCHWEIGHOFER.

Projekt: STROHPELLETSVERBRENNUNG Charge 2 -2007

Brennstoffdaten:

Brennstoff	Br.-menge srm	WG %	Schüttdichte kgTS/Srm	Schüttdichte kgFS/Srm	Masse FS t	Masse TS t	Masse H ₂ O t
Holz+Rind	100,0	5,56	162,8	172,4	17,24	16,28	0,96
WHG	0,0	35	162,8	250,5	0,00	0,00	0,00
WHG	0,0	40	162,8	271,3	0,00	0,00	0,00
IHG	0,0	40	162,8	271,3	0,00	0,00	0,00
Summe	100,0	5,56%			17,24	16,28	0,96
					100,00%	94,44%	5,56%

Brennstoffzusammensetzung:

C	45,48%	0,4548	kg/kgTS	0,4295	kg/kgFS	0,8
H	5,44%	0,0544	kg/kgTS	0,0514	kg/kgFS	0,1
O	40,42%	0,4042	kg/kgTS	0,3817	kg/kgFS	0,8
S	0,13%	0,0013	kg/kgTS	0,0012	kg/kgFS	0,0
N	0,49%	0,0049	kg/kgTS	0,0046	kg/kgFS	0,0
Rest:Ox+Cl+Met	8,040%	0,0804	kg/kgTS	0,0759	kg/kgFS	0,1
Summe	100,00%	1,0000	kg/kgTS	0,9444	kg/kgFS	

Luftüberschuss λ :	2,734
Feuchtegehalt x :	10 g/kg
Bezugs-O ₂ :	13,0%

Jahresbetriebsdauer:	8760 h
Jahresvolllaststunden:	4200 h

Zuluftmengen:

		m ³ _N /kgTS	m ³ _N /kgFS	kg/kgTS	kg/kgFS
erforderliche mind. Sauerstoffmenge:	O _{2min} =	0,8681	0,8198	1,2405	1,1715
Sauerstoffmenge bei λ :	O ₂ =	2,3733	2,2414	3,3916	3,2030
erforderliche mind. Luftmenge trocken:	I _{min,tr} =	4,1337	3,9039	5,3447	5,0475
erforderliche mind. Luftmenge feucht:	I _{min,f} =	4,2002	3,9667	5,3981	5,0980
Luftmenge trocken (Luftüberschuss):	I _{λ,tr} =	11,3016	10,6732	14,6124	13,7999
Luftmenge feucht (Luftüberschuss):	I _{λ,f} =	11,4834	10,8449	14,7585	13,9379

Abgasmengen:

		m ³ _N /kgTS	m ³ _N /kgFS	kg/kgTS	kg/kgFS
Kohlendioxid:	V _{CO2} =	0,8429	0,7961	1,6664	1,5738
Schwefeldioxid:	V _{SO2} =	0,0009	0,0008	0,0026	0,0025
Stickstoff aus Brennstoff:	V _{N2} =	0,0039	0,0037	0,0049	0,0046
Stickstoff aus Verbrennungsluft:	V _{N2} =	8,9283	8,4319	11,2208	10,5970
Wasserdampf aus Brennstoff H:	V _{H2O} =	0,6049	0,5712	0,4862	0,4591
Wasserdampf aus Brennstoff-Feuchte:	V _{H2O} =	0,0000	0,0692	0,0000	0,0556
Wasserdampf aus Luftfeuchte:	V _{H2O} =	0,1818	0,1717	0,1461	0,1380
Überschüssiger Luftsauerstoff:	V _{O2} =	1,5053	1,4216	2,1511	2,0315
Summe Abgasmenge feucht:	V _f =	12,0679	11,4661	15,6781	14,8620
Abgasmenge trocken:	V _t =	11,2812	10,6540	15,0458	14,2093
Sauerstoffanteil (Rauchgas f.):	O ₂ =	12,47%vol	12,40%vol	13,72%mass	13,67%mass
Sauerstoffanteil (Rauchgas tr.):	O ₂ =	13,34%vol	13,34%vol	14,30%mass	14,30%mass
Rauchgasmenge trocken, 13%O ₂ =		10,7976	10,1972	14,4008	13,6001

E. Ergebnisprotokolle Ascheschmelzverhalten

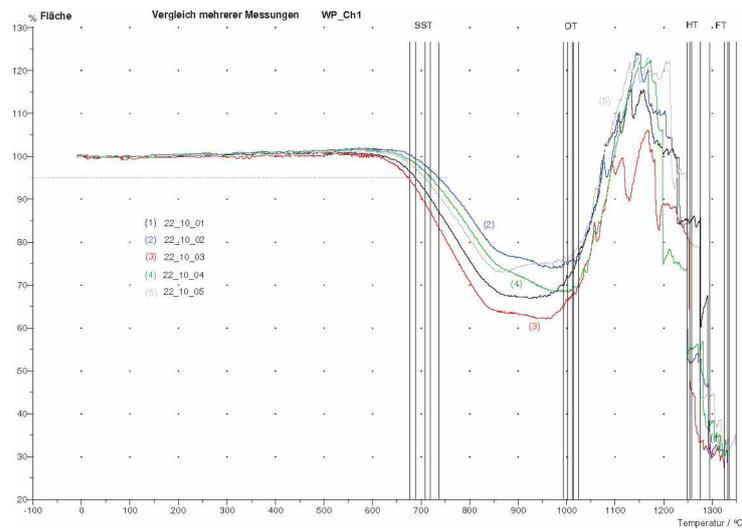


Abbildung E.1.: Änderung der Fläche während der Analyse des Schmelzverhaltens der Asche von Weizenstrohpellets Ch1 für fünf ausgewertete Proben mit Darstellung der einzelnen charakteristischen Temperaturen SST, DT, HT und FT.

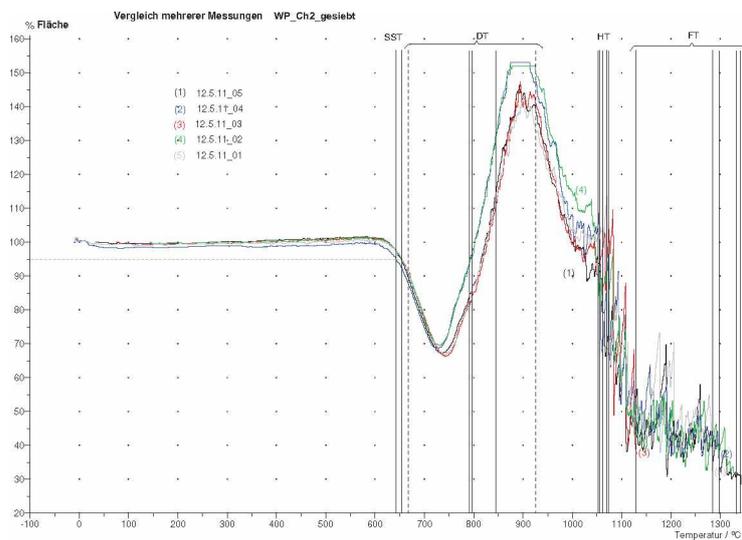


Abbildung E.2.: Änderung der Fläche während der Analyse des Schmelzverhaltens der Asche von Weizenstrohpellets Ch2-gesiebt für fünf ausgewertete Proben mit Darstellung der einzelnen charakteristischen Temperaturen SST, DT, HT und FT.

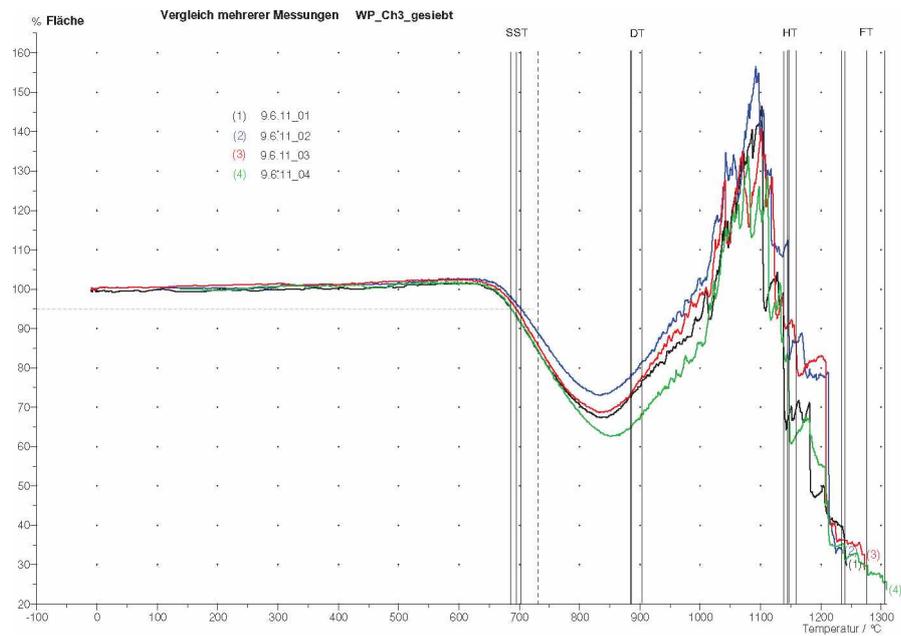


Abbildung E.3.: Änderung der Fläche während der Analyse des Schmelzverhaltens der Asche von Weizenstrohpellets Ch3-gesiebt für vier ausgewertete Proben mit Darstellung der einzelnen charakteristischen Temperaturen SST, DT, HT und FT.

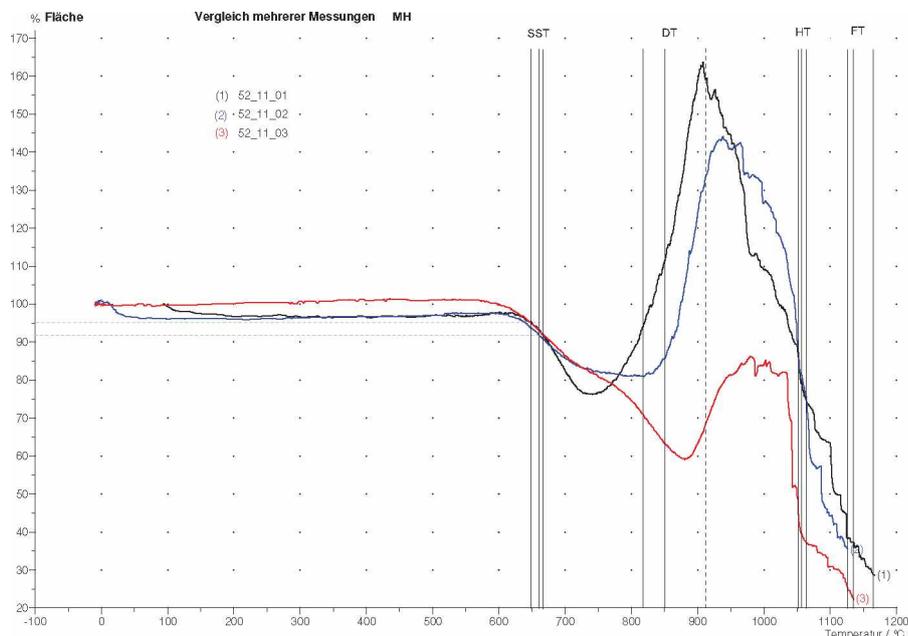


Abbildung E.4.: Änderung der Fläche während der Analyse des Schmelzverhaltens der Asche von Miscanthus Häckselgut für drei ausgewertete Proben mit Darstellung der einzelnen charakteristischen Temperaturen SST, DT, HT und FT.

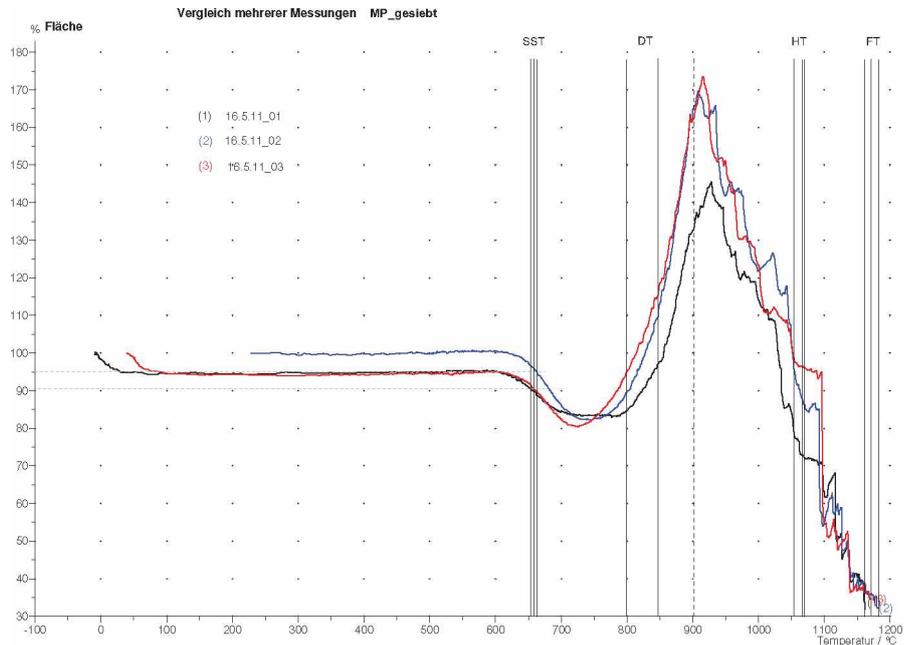


Abbildung E.5.: Änderung der Fläche während der Analyse des Schmelzverhaltens der Asche von Miscanthuspellets-gesiebt für drei ausgewertete Proben mit Darstellung der einzelnen charakteristischen Temperaturen SST, DT, HT und FT.

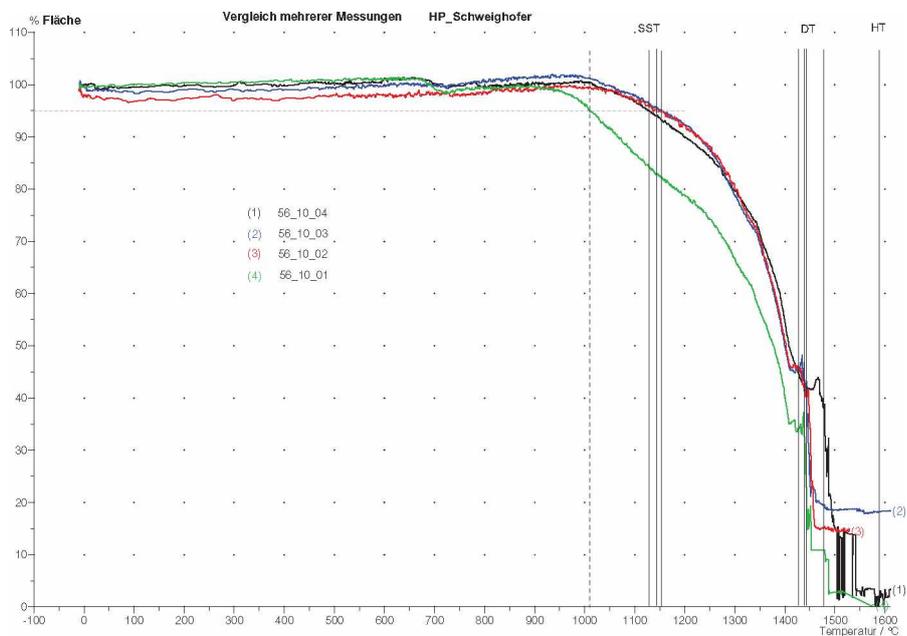


Abbildung E.6.: Änderung der Fläche während der Analyse des Schmelzverhaltens der Asche von Holzpellets SCHWEIGHOFER für vier ausgewertete Proben mit Darstellung der einzelnen charakteristischen Temperaturen SST, DT, HT und FT.

F. Stoffwerte von Gasen

Tabelle F.1.: Molare Masse, molares Normvolumen, Normdichte und Anzahl der Atome nach DIN 1871 [79].

		molare Masse M kg/kmol	molares Volumen V_{mn} m ³ /kmol	Dichte ρ_n kg/m ³	Anzahl der Atome				
					C m	H n	S p	O q	N r
Kohlenstoff	C	12,0110			1	0	0	0	0
Schwefel	S	32,0602			0	0	1	0	0
Stickstoff	N ₂	28,0134	22,403	1,2504	0	0	0	0	2
Wasserstoff	H ₂	2,0158	22,428	0,08988	0	2	0	0	0
Sauerstoff	O ₂	31,9988	22,392	1,4290	0	0	0	2	0
Argon (mit Neon)	Ar	39,9050	22,392	1,7821	0	0	0	0	0
Kohlendioxid	CO ₂	44,0098	22,261	1,9770	1	0	0	2	0
Schwefeldioxid	SO ₂	64,0590	21,856	2,9310	0	0	1	2	0
Wasserdampf	H ₂ O	18,0152	22,41383	0,80375	0	2	0	1	0
Kohlenmonoxid	CO	28,0104	22,400	1,2505	1	0	0	1	0
Methan	CH ₄	16,0426	22,360	0,7175	1	4	0	0	0
Acetylen	C ₂ H ₂	26,0378	22,226	1,1715	2	2	0	0	0
Äthylen	C ₂ H ₄	28,0536	22,245	1,2611	2	4	0	0	0
Äthan	C ₂ H ₆	30,0694	22,191	1,3550	2	6	0	0	0
Propylen, Propen	C ₃ H ₆	42,0804	21,998	1,9129	3	6	0	0	0
Propan	C ₃ H ₈	44,0962	21,928	2,0110	3	8	0	0	0
1,3-Butadien	C ₄ H ₆	54,0914	21,664	2,4968	4	6	0	0	0
1-Buten	C ₄ H ₈	56,1072	21,587	2,5991	4	8	0	0	0
n-Buten	C ₄ H ₁₀	58,1230	21,461	2,7083	4	10	0	0	0
iso-Butan	C ₄ H ₁₀	58,1230	21,550	2,6971	4	10	0	0	0
Ammoniak	NH ₃	17,0304	20,065	0,8488	0	3	0	0	1
Dicyan	C ₂ N ₂	52,0354	22,150	2,3492	2	0	0	0	2
Schwefelwasserst.	H ₂ S	34,0760	22,192	1,5355	0	2	1	0	0
Kohlenoxidsulfid	COS	60,0706	22,080	2,7206	1	0	1	1	0
Luft		28,9627	22,4005	1,29295					