



**Online-Identifikation von Brennstoffen und ihren kalorischen
Eigenschaften beim Betrieb einer stationären
Wirbelschichtfeuerungsanlage**

Dissertation
zur
Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
der Universität Rostock

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Florian Lange

Rostock 2007

Als Dissertation genehmigt von der
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik der Universität Rostock

Tag der Einreichung: 10. Juli 2007

Tag der Verteidigung: 28. November 2007

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Dieter Steinbrecht, Universität Rostock

Univ. Prof. Dr. techn. Hermann Hofbauer, Technische Universität Wien

Prof. i. R. Dr.-Ing. Dietmar Hein, Technische Universität München

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umwelttechnik der Universität Rostock.

Eine wissenschaftliche Arbeit in dem hier vorliegenden Umfang kann nie ohne die Hilfe einer ganzen Reihe von Personen entstehen. Bei allen diesen lauten und leisen Unterstützern bedanke ich mich herzlich.

Dabei gilt mein besonderer Dank den Kollegen des Lehrstuhls. Die stets angenehme Atmosphäre und der kollegiale Umgang mit einander haben die Arbeit in Rostock zu einer wahren Freude werden lassen, an die ich sicherlich noch lange gerne zurückdenken werde.

Ich bedanke mich herzlich bei Herrn Prof. Steinbrecht für die immer wieder fordernde und inspirierende Zusammenarbeit in Rostock. Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Hofbauer und Herrn Prof. Hein für die Übernahme der Gutachten.

Ganz besonders bedanke ich mich bei meiner Familie für die Unterstützung. Angefangen bei meinen Eltern und Geschwistern, die ihr grenzenloses Vertrauen in mich gesetzt haben, bis zu Wiebke und Philipp, die die vergangene Jahre tapfer ertragen haben und dabei das große Ziel nie aus den Augen verloren haben.

Hamburg, den 22. Januar 2008

Florian Lange

Inhaltsverzeichnis:

VORWORT	I
INHALTSVERZEICHNIS:.....	II
VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN	IV
VERZEICHNIS SYMBOLE UND FORMELZEICHEN	V
LATEINISCHE SYMBOLE	V
GRIECHISCHE UND KOMBINIERTE SYMBOLE.....	IX
CHEMISCHE KURZZEICHEN	X
VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN.....	XI
VERZEICHNIS DER TABELLEN.....	XIV
1. EINLEITUNG	1
2. UNTERSUCHUNG DES STANDES DER TECHNIK UND HERLEITEN DER BEARBEITUNGSAUFGABE UND DES LÖSUNGSWEGES	2
2.1. WIRBELSCHICHTFEUERUNG.....	2
2.2. BRENNSTOFFERKENNTUNG	10
2.3. REGELUNGSTECHNIK.....	15
2.4. ERKENNEN DER BEARBEITUNGSLÜCKEN UND HERLEITEN DER BEARBEITUNGSAUFGABE	20
3. ENTWICKELN DER BRENNSTOFFIDENTIFIKATION	22
3.1. UNTERScheidung von BRENNSTOFFEN	22
3.2. WELCHE UNTERScheidungsmerkmale KÖNNEN IM BETRIEB ERMITTELT WERDEN? ..	29
3.3. CO_{2MAX} UND SO_{2MAX} ZUR BRENNSTOFFIDENTIFIKATION	34
3.4. VERFAHRENSANSATZ/ VORAUSSETZUNGEN FÜR DAS ENTWICKELTE VERFAHREN	37
3.5. HERLEITUNG DES VERFAHRENS	39
3.6. SIMULATION DES IDENTIFIKATIONSVERFAHRENS/ ERKENNUNGSVERFAHRENS	56
3.7. HERLEITUNG DER BRENNSTOFFGRUPPEN	61
4. VERIFIKATION DER BRENNSTOFFERKENNTUNG	66
4.1. AUFBAU DER SWSF ROSTOCK.....	66

4.2. FUNKTIONSWEISE DER SWSF ROSTOCK	84
4.3. BETRIEBSPROGRAMM	92
4.4. VERIFIKATIONSVERSUCHE	94
5. VERSUCHSAUSWERTUNG	96
5.1. AUSWERTUNGSVERFAHREN	96
5.2. ERGEBNISSE DER VERSUCHSAUSWERTUNG	97
5.3. ERGEBNISSE DER BRENNSTOFFEINORDNUNG	110
6. GESAMTERGEBNIS	114
7. AUSBLICK	117
8. QUELLEN	120
9. ANHANG	124
9.1. ÜBERSICHT SPEZIFISCHE WÄRMEKAPAZITÄTEN VON BRENNSTOFFEN	124
9.2. BRENNSTOFFSCHLÜSSEL SIMULATIONSRECHNUNGEN	126
9.3. AUFBAU DER SIMULATIONSTABELLE	126
9.4. ERGEBNISSE DER SIMULATION	129
9.5. BESCHREIBUNG DER STANDARD-SENSOREN	132
9.6. VERBRENNUNGSRECHNUNG FÜR MUSTERBRENNSTOFF	137
9.7. UNTERSUCHUNG PETROLKOKS HOMS	141
9.8. ERGEBNISSE DER AUSWERTUNG (DIAGRAMME MIT KURZEN KOMMENTAREN)	142
SELBSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG	178
LEBENSLAUF	179
ZUSAMMENFASSUNG	181

Verzeichnis der Abkürzungen

<u>Zeichen</u>	<u>Bedeutung</u>
Auto	Automatik
auto	automatisch
BG	Brenngas
BM	Betriebsmodus
BRAM	Brennstoff aus Müll
BS	Brennstoff
DE	Dampferzeuger
DGL	Differentialgleichung
DIN	Deutsche Industrienorm
DWSF	d ruckaufgeladene W irbelschicht f euerung
EG	Erdgas
FC	Field Controller
H-EL	Heizöl extra leicht
IR	Infrarot
KfZ	Kraftfahrzeug
LUVO	Luftvorwärmer
man	manuell
MS	Microsoft
MVA	Müllverbrennungsanlage
NL	Niederlande
OLE	Object linking and embedding
OPC	OLE for P rocess C ontrol
OT	Oliventrester
PC	Personal Computer
PK	Petrolkoks
R&I-Schema	Rohrleitungs- und Installationsschema
RME	Rapsmethylester
RS	Rapsschrot
SL	Klärschlamm (Sludge)
sog.	so genannt
SPS	speicher p rogrammierbare Steuerung
SWSF	stationäre W irbelschicht f euerung
UV	Ultraviolett
VBA	Visual Basic for Applications
waf	wasser- und aschefrei
WÜ	Wärmeübertrager
ZWSF	z irkulierende W irbelschicht f euerung

Verzeichnis Symbole und Formelzeichen

Lateinische Symbole

<u>Zeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bedeutung</u>
a	kg A/ kg BS	Massenanteil Asche
A	m ²	Fläche
α	-	Korrekturfaktor zur Korrektur des Brennstoffmassenstromes feste Brennstoffe
c	kg C/ kg BS	Massenanteil Kohlenstoff
c	-	Konstante zur Berechnung eines Volumenstroms aus Schwingfrequenz
CO_2	Vol%	Kohlendioxidkonzentraion im Abgas
$CO_{2,mess}$	Vol%	im Abgas gemessene CO_2 -Konzentration
CO_{2max}	Vol%	maximales Kohlendioxid
$c_{p,mA}$	kJ A/ kgA K	mittlere spezifische Wärmekapazität der Asche
$c_{p,mADDlq}$	kJ/ kg K	mittlere spezifische Wärmekapazität flüssiges Additiv
$c_{p,mADDlq}$	kJ/ kg K	mittlere spezifische Wärmekapazität des Additivdampfes
$c_{p,mADDS}$	kJ/ kg K	mittlere spezifische Wärmekapazität festes Additiv
$c_{p,mAG}$	kJ/ kg K	mittlere spezifische Wärmekapazität Abgas
$c_{p,mL}$	kJ/ kg K	mittlere spezifische Wärmekapazität der Luft
$c_{pmADDlq}$	kJ ADD/ kgADD K	mittlere spezifische Wärmekapazität des flüssigen Additivs
c_{pmADDS}	kJ ADD/ kgADD K	mittlere spezifische Wärmekapazität des festen Additivs
c_{pmBG}	kJ/ kg BS K	mittlere spezifische Wärmekapazität des Brenngases
d_{i2}	mm	Innendurchmesser SWSF (Reaktor)
d_{i4}	mm	Innendurchmesser SWSF (Freeboard)
d_{is}	mm	Dicke der Isolationsschicht
f	Hz	Frequenz
F	As/ mol	Faradaykonstante
$f_{Eintr.}$	Hz	Frequenz des Brennstoffeinträgers
f_G	Hz	Grundfrequenz
f_W	Hz	Frequenz, mit der der Prallkörper im Vortex schwingt

h	kg H/ kg BS	Massenanteil Wasserstoff
h	mm	Höhe
H_U	kJ/ kg (kJ/ kg BS)	Heizwert
$H_{U,Sim}$	kJ/ kg BS	Heizwert aus Simulationsrechnung
$H_{U,Tab}$	kJ/ kg BS	tabellierter Heizwert
H_{UPKtr}	kJ/ kg PK	Heizwert des getrockneten Petrolkokses
h_V	kJ/ kg	spezifische Verdampfungsenthalpie
i	-	Zählvariable
I	A	elektrische Stromstärke
K	$m^3_N CO_2/ kg BS$	spezifisches Volumen des bei der Verbrennung entstehenden CO_2
k	W/ $m^2 K$	Wärmedurchgangskoeffizient
l	m^3_N Luft/ kg BS	spezifische Luftmenge
l	$m^3_N L/ kg BS$	spezifische Luftmenge
\dot{L}	$m^3_N L/ s, m^3_N L/ h$	Luftvolumenstrom
l_{min}	m^3_N Luft/ kg BS	minimaler spezifischer Luftbedarf des Brennstoffes
\dot{m}_A	kg/ s, kg/ h	Aschemassenstrom
\dot{m}_{ADDlq}	kg/ s, kg/ h	Massenstrom flüssiges Additiv
\dot{m}_{ADDs}	kg/ s, kg/ h	Massenstrom festes Additiv
\dot{m}_{AG}	kg/ s, kg/ h	Abgasmassenstrom
\dot{m}_{BS}	kg BS/ s, kg BS/ h	Brennstoffmassenstrom
\dot{m}_{BS}	kg/ s, kg/ h	Brennstoffmassenstrom
\dot{m}_{SW}	kg/ s, kg/ h	Massenstrom Sickerwasser
M_L	Nm	Lastmoment
\dot{m}_L	kg/ s, kg/ h	Luftmassenstrom
n	-	Zählvariable
n	kg N/ kg BS	Massenanteil Stickstoff
n_{ist}	min ¹	Ist-Drehzahl
n_{soll}	min ¹	Soll-Drehzahl
o	kg O/ kg BS	Massenanteil Sauerstoff
O_2	Vol%	Sauerstoffkonzentration im trockenen Abgas
O_2^*	Vol%	Dauerstoffkonzentration im feuchten Abgas
$O_{2,Luft}$	Vol%	in der Luft gemessene O_2 -Konzentration
$O_{2,mess}$	Vol%	im Abgas gemessene O_2 -Konzentration
o_{min}	$m^3_N O_2/ kg BS$	minimaler spezifischer Sauerstoffbedarf des Brennstoffes
P	kW	Leistung
P_{ab}	kW	abgeführte Leistung
p_{abs}	bar, kPa	Absolutdruck

p_{BS}	bar, kPa	Brennstoffdruck
$p_{O_2,AG}$	bar, kPa	Partialdruck Sauerstoff im Abgas
$p_{O_2,L}$	bar, kPa	Partialdruck Sauerstoff in Luft
P_{th}	kW, MW	thermische Leistung
P_V	kW	Verlustleistung
P_{zu}	kW	zugeführte Leistung
q	kW/ m ²	Querschnittsbelastung
\dot{Q}_A	kW	ausgetragene Leistung Asche
\dot{Q}_{ADDlq}	kW	eingetragene Leistung flüssiges Additiv
\dot{Q}_{ADDs}	kW	eingetragene Leistung festes Additiv
\dot{Q}_{AG}	kW	ausgetragene Leistung Abgas
$\dot{Q}_{BS,1}$	kW	Brennstoffwärmeleistung
$\dot{Q}_{BS,2}$	kW	energetische Brennstoffleistung
\dot{Q}_{D0}	kW	Leistung zum Erwärmen des flüssigen Additivs
\dot{Q}_{D1}	kW	Verdampfungsleistung des flüssigen Additivs
\dot{Q}_{D2}	kW	Leistung zur Überhitzung des Additivdampfes
\dot{Q}_L	kW	Lufteleistung
\dot{Q}_N	kW	Nutzleistung
\dot{Q}_V	kW	Verlustleistung
R	J/ mol K	molare Gaskonstante
s	kg S/ kg BS	Massenanteil Schwefel
s	kJ/ kgBS	Streuung des Heizwertes
SO_{2max}	Vol%	maximales Schwefeldioxid
T	K	Temperatur
t	s, min	Zeit
t_{Mess}	s	Messzeit
t_{Sig}	s	Signalzeit
t_Z	s, min	Zykluszeit
t_{Zykl}	s	Zykluszeit
U	V	elektrische Spannung
\dot{V}	m ³ / s, m ³ / h	Volumenstrom
$v_{AG,tr}$	m ³ _N AG/ kg BS	spezifisches trockenes Abgasvolumen
v_{CO2}	m ³ _N CO ₂ / kg BS	spezifisches CO ₂ -Volumen
v_f	m ³ _N AG/ kg BS	spezifisches feuchtes Abgasvolumen
v_{H2O}	m ³ _N H ₂ O/ kg BS	spezifisches Wasserdampfvolumen
v_{N2}	m ³ _N N ₂ / kg BS	spezifisches N ₂ -Volumen
v_{O2}	m ³ _N O ₂ / kg BS	spezifisches Sauerstoffvolumen

v_{SO_2}	$\text{m}^3_{\text{N}} \text{ SO}_2 / \text{ kg BS}$	spezifisches SO_2 -Volumen
$v_{tr,min}$	$\text{m}^3_{\text{N}} \text{ AG} / \text{ kg BS}$	spezifisches minimales trockenes Abgasvolumen
$\dot{V}_{WL,N}$	$\text{m}^3_{\text{N}} \text{ L} / \text{s}, \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ L} / \text{h}$	normierter Wirbelluftvolumenstrom
w	$\text{kg W} / \text{ kg BS}$	Massenanteil Wasser
w	m/s	Leerrohrgeschwindigkeit
x_i	$\text{kg i} / \text{ kg BS}$	Massenanteil einer Brennstoffkomponente
y_i	$\text{m}^3_{\text{N}} \text{ i} / \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ BS}$	Volumenanteile, Molanteile eines Brenngases
y_{N2}	$\text{m}^3_{\text{N}} \text{ N}_2 / \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ Luft}$	Stickstoffkonzentration der Verbrennungsluft
$y_{O2,Luft}$	$\text{m}^3_{\text{N}} \text{ O}_2 / \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ Luft}$	Sauerstoffkonzentration der Verbrennungsluft

Griechische und kombinierte Symbole

Zeichen	Einheit	Bedeutung
Δh	kJ/ kg	Enthalpiedifferenz
$\Delta H_{U,rel}$	%	relative Abweichung des Heizwertes
Δn	min ¹	Drehzahldifferenz
ΔT	K	Temperaturdifferenz
ϑ	°C	Temperatur
ϑ_A	°C	Aschetemperatur
ϑ_{ADDlq}	°C	Temperatur flüssiges Additiv
ϑ_{ADDs}	°C	Temperatur festes Additiv
ϑ_{AG}	°C	Abgastemperatur
ϑ_B	°C	Bezugstemperatur für Enthalpieberechnungen
ϑ_{BS}	°C	Brennstofftemperatur
ϑ_{BS}	°C	Brennstofftemperatur
ϑ_K	°C	Temperatur des Keramikrohres im Festelektrolytsauerstoffsensor
ϑ_L	°C	Lufttemperatur
ϑ_O	°C	Oberflächentemperatur
ϑ_U	°C	Umgebungstemperatur
ϑ_{WS}	°C	mittlere Temperatur der SWSF
ϑ_{WS}	°C	Wirbelschichttemperatur
ϑ_{WSMW}	°C	mittlere Temperatur der SWSF
λ	-	Luftzahl
ρ_{O2}	Vol%	Sauerstoffkonzentration Messgas
σ	-	minimaler Sauerstoffbedarf pro eingebrachten Kohlenstoff
ρ_1	kg/ m ³	Schüttdichte des unbekannten festen Brennstoffes
ρ_0	kg/ m ³	Schüttdichte des bekannten festen Brennstoffes (Vergleichsbrennstoff)
Δp	bar, kPa	Differenzdruck
μ_r	-	Permeabilitätszahl

Chemische Kurzzeichen

<u>Zeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bedeutung</u>
C		Kohlenstoff
CH_4		Methan
CN		Kohlenstoff-Stickstoff Verbindungen
CO		Kohlenmonoxid
CO_2		Kohlendioxid
H		Wasserstoff, elementar
H_2		Wasserstoff
H_2O		Wasser
HN		Wasserstoff-Stickstoff Verbindungen
N		Stickstoff
N_2		Stickstoff (Luft)
NO		Stickstoffoxid
NO_2		Stickstoffdioxid
NO_X		Stickoxide
O		Sauerstoff
O_2		Luftsauerstoff
S		Schwefel
SO_2		Schwefeldioxid

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Fluidisation einer Schüttung	3
Abbildung 2: Übersicht Wirbelschichttypen.....	7
Abbildung 3: Beispiel Regelkreis	16
Abbildung 4: Beispielsystem mit Kreisbezeichnungen	17
Abbildung 5: Regelkreis komplett	17
Abbildung 6: Lösungsschema für Regelaufgaben [35].....	17
Abbildung 7: Ostwald-Diagramm für vollkommene Verbrennung [49]	26
Abbildung 8: CO_{2max} -Verlauf für verschiedene bekannte Brennstoff-Zusammensetzungen (lfd. Nr.)	35
Abbildung 9: Systemgrenzen für die Leistungsbilanz	38
Abbildung 10: Betrachtetes System (schematisch).....	44
Abbildung 11: Darstellung „Kreisverfahren“	56
Abbildung 12: Gruppierung der Brennstoffe	63
Abbildung 13: Brennstoffgruppen 1 und 2	64
Abbildung 14: Brennstoffgruppen 3 und 4	65
Abbildung 15: R&I-Schema SWSF Rostock.....	67
Abbildung 16: Prinzipieller Aufbau des SWSF-Reaktors.....	68
Abbildung 17: Ausbildung Wirbelstraße im Fluid.....	76
Abbildung 18: Prinzipieller Aufbau des Festkörperelektrolyt-Sensors (ZIROX-Sonde)	77
Abbildung 19: Datenweg an der SWSF Rostock	79
Abbildung 20: Aufbau Bussystem [39].....	81
Abbildung 21: Verlauf des Differenzdruckes [50].....	89
Abbildung 22: Heizwertermittlung Erdgas 070124	100
Abbildung 23: Heizwertermittlung Erdgas 061218	101
Abbildung 24: Heizwertbestimmung Rapsschrot 070201	103
Abbildung 25: Heizwertbestimmung Rapsschrot 061024	104
Abbildung 26: Heizwertermittlung Petrolkoks 060926	108
Abbildung 27: Heizwertermittlung Petrolkoks 060912	109
Abbildung 28: Ergebnisse in der Brennstoffmatrix	111
Abbildung 29: Brennstoffmatrix mit Erdgas.....	112
Abbildung 30: Brennstoffmatrix mit Rapsschrot, Petrolkoks, Oliventrester und Sludge.....	113

Abbildung 31: Ergebnisse der Simulationsrechnung feste/ flüssige Brennstoffe ohne LUVO (Legende: Anhang 9.2).....	130
Abbildung 32: Ergebnisse der Simulationsrechnung feste/ flüssige Brennstoffe mit LUVO (Legende: Anhang 9.2).....	130
Abbildung 33: Ergebnisse der Simulationsrechnung gasförmige Brennstoffe ohne LUVO (Legende: Anhang 9.2).....	131
Abbildung 34: Ergebnisse der Simulationsrechnung gasförmige Brennstoffe mit LUVO (Legende: Anhang 9.2).....	131
Abbildung 35: Aufbau der Messküvetten NGA 2000 MLT [45].....	133
Abbildung 36: Prinzipieller Aufbau des Sensors [45]	135
Abbildung 37: Prinzipieller Aufbau Sauerstoffsensor (angelehnt an [29]).....	136
Abbildung 38: 060906 EG1 auto	142
Abbildung 39: 060906 EG2 auto	143
Abbildung 40: 060906 EG3 auto	144
Abbildung 41: 060926 EG1 auto	145
Abbildung 42: 061130 EG1 man	146
Abbildung 43: 061212 EG1 auto	147
Abbildung 44: 061212 EG2 SW auto	148
Abbildung 45: 061212 EG3 SW auto	149
Abbildung 46: 061212 EG4 SW man	150
Abbildung 47: 061212 EG5 SW	151
Abbildung 48: 061218 EG1 man	152
Abbildung 49: 070110 EG1 man	153
Abbildung 50: 070117 EG1 auto/ man	155
Abbildung 51: 070124 EG1 auto	156
Abbildung 52: 070124 EG2 auto	157
Abbildung 53: 070124 EG3 auto	158
Abbildung 54: 061024 RS1 man.....	159
Abbildung 55: 061130 RS1 man.....	160
Abbildung 56: 061130 RS2 man.....	161
Abbildung 57: 061218 RS1 man.....	162
Abbildung 58: 061218 RS2 man.....	163
Abbildung 59: 070110 RS1 man.....	164

Abbildung 60: 070110 RS1 Harnstoff man.....	165
Abbildung 61: 070110 RS2 man.....	166
Abbildung 62: 070110 RS2 Harnstoff man.....	167
Abbildung 63: 070201 RS1 auto	168
Abbildung 64: 070201 RS2 man.....	169
Abbildung 65: 060912 PK1 man.....	170
Abbildung 66: 060912 PK2 man.....	171
Abbildung 67: 061209 PK3 man.....	172
Abbildung 68: 060912 PK4 man.....	173
Abbildung 69: 060912 PK5 man.....	174
Abbildung 70: 060926 PK1 man.....	175
Abbildung 71: 060926 PK2 man.....	176

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Einteilung der Brennstoffe nach Dubbel [25]	23
Tabelle 2: Kennzahlen zur Brennstoffbeschreibung [25]	23
Tabelle 3: Auswahl an Verfahren für die Elementaranalyse von Brennstoffen.....	29
Tabelle 4: Legende zur Abbildung 8.....	36
Tabelle 5: Brennstoffwärmen edler Brennstoffe.....	46
Tabelle 6: spezifische Wärmekapazitäten	47
Tabelle 7: Spezifische Wärmekapazität des „Ersatzgases“.....	48
Tabelle 8: Fallunterscheidung Summand 1 Bilanzgleichung.....	49
Tabelle 9: Spezifische Wärmekapazität Asche	51
Tabelle 10: Berechnung der Verlustleistung.....	53
Tabelle 11: Vergleich der Verlustleistungen.....	54
Tabelle 12: Übersicht Brennstoffe der Simulationsrechnung	58
Tabelle 13: Übersicht Prozessbedingungen Simulation.....	58
Tabelle 14: Übersicht relative Abweichungen Simulationsrechnung	59
Tabelle 15: Schlüssel für Abbildung 12, Abbildung 13, Abbildung 14.....	63
Tabelle 16: Übersicht Brennstoffgruppen	65
Tabelle 17: Übersicht über die Hauptgruppen der SWSF Rostock.....	66
Tabelle 18: Übersicht über die gemessenen Größen	75
Tabelle 19: Übersicht Prozessführung	79
Tabelle 20: Übersicht Versuche zur Brennstoffidentifikation	96
Tabelle 21: Übersicht Tabellenwerte der untersuchten Brennstoffe [48], [38].....	97
Tabelle 22: Übersicht mittlere Versuchsergebnisse	98
Tabelle 23: Übersicht Versuche mit Erdgas.....	99
Tabelle 24: Übersicht Versuche mit Rapsschrot	102
Tabelle 25: Übersicht Versuche mit Petrolkoks.....	105
Tabelle 26: Organische Trockensubstanz in den Petrolkoks-Aschen	106
Tabelle 27: Spezifische Wärmekapazitäten fester Brennstoffe [24]	124
Tabelle 28: Spezifische Wärmekapazitäten flüssiger Brennstoffe [24]	125
Tabelle 29: Spezifische Wärmekapazität des „Ersatzgases“.....	125
Tabelle 30: Brennstoffschlüssel flüssige/ feste Brennstoffe der Simulation.....	126
Tabelle 31: Brennstoffschlüssel gasförmige Brennstoffe Simulation.....	126

Tabelle 32: Stoffe im Magnetfeld [32].....	135
Tabelle 33: Elementaranalyse H-EL	137

1. Einleitung

Ein Leben unter menschenwürdigen Bedingungen ist ein Grundbedürfnis des Menschen. Hierzu gehört neben ausreichend Nahrung auch eine feste warme Zuflucht. Zur Erfüllung dieser Bedürfnisse setzt der Mensch seine Arbeitskraft ein. Durch das Bearbeiten eines Feldes mit den eigenen Händen oder durch eine feste Beschäftigung, mit deren Entlohnung dann Nahrung erworben werden kann, liefert die Arbeitskraft einem Menschen direkt oder indirekt Nahrung. Genau so geschieht es mit der Zuflucht. Entweder sie wird mit den Händen erbaut und mit selbst hergestelltem Brennstoff geheizt oder man erwirbt sie mit der Entlohnung einer Arbeit.

Sammelt man den notwendigen Brennstoff selber, dann ist klar, woher die Wärme kommt. In den höheren Stufen der Industrialisierung ist die Herkunft von Wärme und Strom in einem Haus (warme Zuflucht) nicht immer klar. Der Nutzer vergisst, dass auch für den „Strom aus der Steckdose“ in den meisten Fällen eine thermische Umsetzung eines Brennstoffes erfolgt.

Diese Energieversorgung basiert bis heute hauptsächlich auf den Primärenergieträgern Kohle, Öl, Gas und Kernbrennstoffen. In verschiedenen Prognosen zeichnet sich ein Ende der Reichweiten dieser Energieträger in den kommenden 200 Jahren ab. Dabei nimmt der Bedarf der Weltbevölkerung an Strom und Wärme, besonders durch das Wirtschaftswachstum im asiatischen Raum, deutlich zu. Zur Erhaltung der Lebensqualität in der industrialisierten Welt und zur Steigerung der Lebensqualität in der nicht industrialisierten Welt müssen neue Energieträger erschlossen und nutzbar gemacht werden. Sinnvoll wäre die Einführung von Kreisläufen, in denen nicht verwertbare Rückstände (z.B. Industrieabfälle, Hausmüll) zur Bereitstellung von Energie nutzbar gemacht werden oder die Verwendung von regenerativen Energieträgern wie Sonne, Wind und Pflanzen.

Zur Bereitstellung von Strom und Wärme wird auf thermische Wege zurückgegriffen. Hierfür müssen entsprechende Feuerungssysteme bereitgestellt werden. Man kann dabei wie bisher die Feuerungssysteme an den verwendeten Energieträger anpassen oder „Breitbandfeuerungen“ verwenden. Ein solches innovatives Feuerungssystem steht bereits heute in Form der blasenbildenden stationären Wirbelschichtfeuerung zur Verfügung. Blasenbildende Wirbelschichtfeuerungen eignen sich für den Betrieb mit den unterschiedlichsten Brennstoffen. Da-

Bei kann die Verwendung von z.B. gasförmigen und festen Brennstoffen in ein und derselben Feuerungsanlage parallel oder nacheinander erfolgen. Hierin liegt einer der großen Vorteile bei der Verwendung von Wirbelschichtfeuerungen.

Die Verwendung eines breiten Brennstoffbandes stellt besondere Herausforderungen an die Prozessautomatisierung. Bei der Verwendung von herkömmlichen Systemen zur Automatisierung des Feuerungsbetriebes muss die Prozessleittechnik an jeden neuen Brennstoff angepasst werden. Diese Arbeit ist zeitintensiv und verzögert den Einsatz der Feuerung.

Daher soll die Prozessleittechnik einer Stationären Wirbelschichtfeuerung (SWSF) soweit modifiziert werden, dass wechselnde Brennstoffe erkannt und daraus die notwendigen Schalthandlungen abgeleitet werden.

Als Ergebnis dieses Entwicklungsweges steht ein Feuerungssystem, das sowohl für die umweltgerechte Entsorgung von Abfällen als auch für die Verwendung von biogenen Brennstoffen aller Art geeignet ist.

2. Untersuchung des Standes der Technik und herleiten der Bearbeitungsaufgabe und des Lösungsweges

2.1. Wirbelschichtfeuerung

Zur Einordnung der Wirbelschichttechnologie wird hier eine Übersicht über die geschichtliche Entwicklung, die verschiedenen Typen und die zukünftigen Entwicklungen gegeben.

Unter einer Wirbelschicht versteht man nach [10] „[...] eine Feststoffschüttung“, die „durch ein von unten durchströmendes Fluid (Gas oder Flüssigkeit) aufgelockert und in Schwebefestigkeit gehalten“ wird. Dabei verändern sich die Eigenschaften der Schüttung zu denen einer hochviskosen Flüssigkeit.

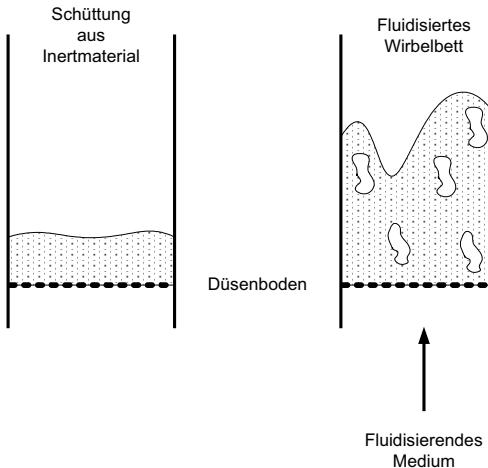


Abbildung 1: Fluidisation einer Schüttung

Die Wirbelschichttechnologie wurde in den 1920er Jahren zur Vergasung von Braunkohle entwickelt [51]. Heutzutage wird sie in der chemischen Industrie/ Verfahrenstechnik und in der Verbrennungstechnologie angewendet.

Das wesentliche Kennzeichen ist das Wirbelbett. Das Material des Bettes kann an den Reaktionen, die innerhalb der Wirbelschicht ablaufen, teilnehmen (Kohlevergasung, Trocknung) oder als Inertmaterial und als Speichermedium dienen (Verbrennungsreaktionen).

Innerhalb einer Wirbelschicht können verschiedene chemische und physikalische Prozesse ablaufen. Die Anwendungen reichen von dem Rösten sulfidischer Erze zur Gewinnung von Schwefelsäure bis zu der Verbrennung von aus Biomasse erzeugtem Brenngas in Wirbelschichtfeuerungsanlagen [27]. Weiterhin können Mischungs- und Trocknungsvorgänge innerhalb einer fluidisierten Schicht ablaufen [27].

Da sich das Bearbeitungsfeld der vorliegenden Arbeit im Bereich der Feuerungstechnik befindet, wird im Folgenden die Wirbelschicht als Feuerung näher betrachtet.

Zunächst werden die Vor- und Nachteile von Wirbelschichten im Bereich der Feuerungstechnik untersucht. Eine Übersicht hierzu liefert [50].

Bei der thermischen Umsetzung von Brennstoffen kommt es neben den Verbrennungsprodukten CO_2 und H_2O zur Bildung von SO_2 , NO_x und Asche, die mit dem Rauchgas an die Umgebung abgegeben werden. In entsprechenden Vorschriften sind für die verschiedenen Brenn-

stoffe Grenzwerte für diese Luftschatdstoffe vorgegeben. Zur Vermeidung/ Verminderung der Schadstoffe gibt es zwei Bereiche von Maßnahmen: primäre Maßnahmen, die bereits bei der Verbrennung des Brennstoffe angewendet werden, und sekundäre Maßnahmen, die nach dem Verbrennungsprozess auf die entstehenden Rauchgase einwirken.

Die Schadstoffe bilden sich bei der Verbrennung nach verschiedenen Mechanismen. Schwefeldioxid entsteht durch die Oxidation von im Brennstoff enthaltenem Schwefel. Das dabei entstehende SO_2 bildet mit Wasserdampf bei der Kondensation aus den Abgasen Schwefelsäure, die sich schädigend auf den Prozess und die Umwelt auswirkt.

Stickoxide (NO_X) bilden sich nach drei verschiedenen Mechanismen. Thermisches NO_X bildet sich bei Temperaturen $T > 1300$ K. Promptes NO_X entsteht aus dem Luftstickstoff an Flammenfronten. Brennstoff- NO_X bildet sich aus organischen HN - und CN -Verbindungen im Brennstoff. Das entstehende NO_X reagiert in der Atmosphäre zu Ozon und Salpetersäure weiter.

Aschen sind die mineralischen Anteile der verwendeten Brennstoffe. Sie werden nach der Verbrennung aus dem Feuerungsraum ausgetragen und, z.B. im Straßenbau, weiterverwendet oder deponiert.

Wirbelschichtfeuerungen zeichnen sich dadurch aus, dass die Luftschatdstoffe durch primäre Maßnahmen reduziert werden können. Hierfür wird das Wirbelbett genutzt. Die Reaktionsbedingungen innerhalb des Wirbelbettes lassen sich bei einer Wirbelschichtfeuerung sehr genau einstellen: Für eine Reaktion kann das Wirbelbett innerhalb enger Grenzen (Temperatur, Druck, Reaktionszeit) sicher betrieben werden. Hieraus ergibt sich der weite Nutzungsbereich einer Wirbelschichtfeuerung: Die Reaktionsbedingungen können an ein breites Brennstoffband angepasst werden.

Für die Entschwefelung der Abgase werden Additive in dem Bett eingespeichert, die mit dem entstehenden SO_2 zu Gips weiterreagieren. Der Gips wird durch geeignete Maßnahmen (Bettmanagement) aus dem Wirbelbett abgeschieden.

Durch die „niedrige“ Betriebstemperatur von Wirbelschichtfeuerungen und die flammenlose Verbrennung entfallen zwei der drei Bildungsmechanismen für NO_X (thermisches und promptes NO_X). Die Entstehung des Brennstoff- NO_X kann in einer Wirbelschichtfeuerung durch Primärmaßnahmen reduziert werden. Durch die Verwendung von Additiven oder die gestufte Luftzugabe werden die NO_X -Emissionen verringert.

Die bei der Verbrennung entstehende Asche wird auf zwei Wegen abgeschieden: Aschepartikel, die nicht leicht genug sind, damit sie mit dem Rauchgas aus der SWSF ausgetragen werden, verbleiben im Bett. Dort kumuliert sich der Ascheanteil über die Betriebsdauer. Durch das bereits erwähnte Bettmanagement wird das Wirbelbett von diesen Anreicherungen befreit. Aschepartikel, die mit dem Rauchgas aus der Anlage ausgetragen werden, können über einen Zyklon oder andere Filtereinrichtungen abgeschieden werden.

Durch die zur Anwendung kommenden Primärmaßnahmen zur Rauchgasreinigung fällt der Anlagenumfang einer Wirbelschichtfeuerung deutlich kleiner und damit weniger kostenintensiv aus als z.B. eine vergleichbare Rost- oder Staubfeuerung.

In dem thermischen Arbeitsbereich der Wirbelschichtfeuerung ist nicht mit dem Problem der Ascheerweichung zu rechnen. Das Verflüssigen der Asche tritt bei den meisten Brennstoffen erst ab Temperaturen von $\vartheta > 1100$ °C auf. Dennoch ist es bei der Verwendung von biogenen Brennstoffen in einer Wirbelschichtfeuerung angeraten, die Ascheerweichungstemperatur vor dem Einsatz zu ermitteln. Diese charakteristische Temperatur kann bei Brennstoffen dieser Gruppe bereits im Bereich von $\vartheta = 800...900$ °C, also genau dem bevorzugten Betriebsbereich der Wirbelschichtfeuerung, liegen. Wenn solch ein Brennstoff zum Einsatz kommt, muss die Reaktionstemperatur gezielt reduziert werden.

Ein weiterer Vorteil der Wirbelschichttechnologie ist das breite Brennstoffband, das in einer Wirbelschichtfeuerung zum Einsatz kommen kann. In der Feuerung können feste, hochviskose, flüssige und gasförmige Brennstoffe verwendet werden. Üblicherweise wird die Feuerung für die Verwendung eines Brennstoffes ausgelegt. Es sind jedoch auch Kombinationen aus mehreren Brennstoffen gleicher oder unterschiedlicher Aggregatzustände denkbar. Die Verwendung kann dabei nacheinander, je nach Anfallen, oder in Kombination erfolgen. Durch die „Energiespeicherung“ im Bettmaterial reagiert die Wirbelschichtfeuerung unempfindlich

gegenüber Brennstoffschwankungen. Besonders wegen dieser Eigenschaft kann eine Wirbelschichtfeuerung für die Umsetzung von heterogenen Brennstoffen wie Brennstoff aus Müll (BRAM) genutzt werden.

Bei einer energetischen Nutzung einer Wirbelschichtfeuerung kommen zwei weitere positive Eigenschaften zum Tragen: die hohe Energiedichte der Wirbelschichtfeuerung und die hohen Wärmeübertragungskoeffizienten bei der Wärmeauskopplung aus dem Wirbelbett.

Die hohe Energiedichte führt zu kompakten Anlagen. Kompakte Anlagen benötigen geringe Investitionskosten. Für die Auskopplung von Nutzleistung eignet sich das Wirbelbett am besten. Durch die Verwendung von Tauchheizflächen, die direkt in das fluidisierte Bett eintauchen, kann Nutzleistung ausgekoppelt werden. Dabei erfolgt die Wärmeübertragung vom „Fluid“ der heißen Bettpartikel an die Wärmeübertragerfläche durch Partikel- und Gaskonvektion sowie Strahlung. Bei dieser Art der Wärmeübertragung sind die Wärmeübertragungskoeffizienten größer als bei der Übertragung durch Gaskonvektion.

Diesen Vorteilen stehen jedoch auch Nachteile gegenüber: Für die Fluidisation des Wirbelbettes muss ausreichend Energie aufgewendet werden. Die entsprechenden Verdichter fallen größer aus als z.B. Saugzuggebläse bei Rostfeuerungen. Hierdurch erhöhen sich der Investitionsaufwand und die benötigte Leistung (Eigenverbrauch) im Betrieb.

Ein weiterer Nachteil, dem Wirbelschichtfeuerungen unterliegen, ist die starke mechanische Beanspruchung aller Einbauten im Reaktor. Durch die andauernde abrasive Belastung kommt es schnell zum Verschleiß der eingesetzten Bauteile. Dabei werden die Bauteile, die direkt in die Schicht eintauchen, stärker belastet als die Wand des Reaktors. Durch entsprechend höheren Materialeinsatz in den belasteten Bereichen werden die notwendigen Standzeiten erreicht.

Die Entwicklung der Wirbelschichttechnologie für den Einsatz in Feuerungen begann in Deutschland in den 1960er Jahren. Auf der Suche nach Alternativen zu der zur damaligen Zeit populären Atomenergie, begann man die Wirbelschichttechnologie zu erforschen. Dabei zeigten sich schnell die beschriebenen Vorteile, die eine Nutzung in der Energietechnologie sinnvoll machen.

Wirbelschichtfeuerungen werden nach verschiedenen Kriterien eingeteilt:

Nach dem Betriebsdruck

Wirbelschichtfeuerungen können bei atmosphärischem Druck oder im Überdruck betrieben werden.

Nach dem Materialumlauf

In Wirbelschichtfeuerungen verbleibt das Inertmaterial entweder im Reaktor und wird dort fluidisiert (stationäre Wirbelschichtfeuerung) oder das Material wird pneumatisch in einem Umlauf (intern/ extern) gefördert (zirkulierende Wirbelschichtfeuerung).

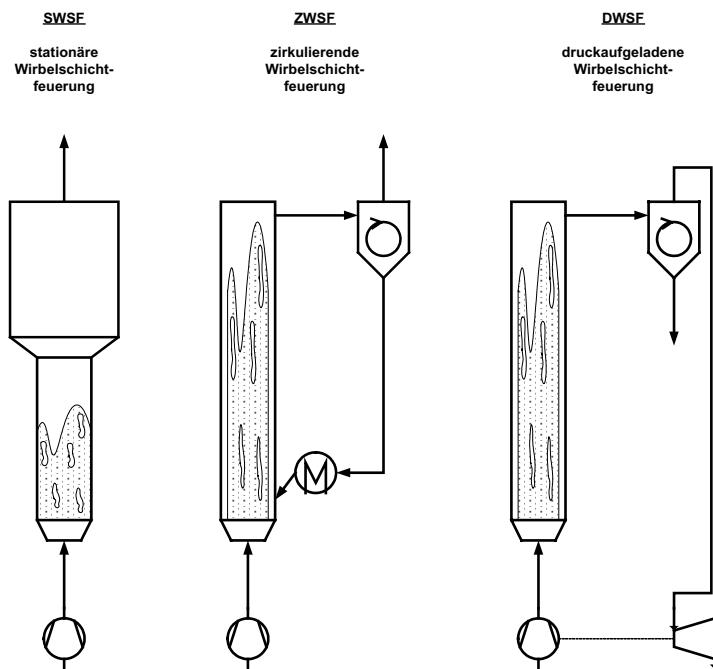


Abbildung 2: Übersicht Wirbelschichttypen

Bei der Verwendung von Wirbelschichtfeuerungen in der Kraftwerkstechnik wurde die Blockleistung, ausgehend von der SWSF, immer weiter gesteigert. Die höchsten Blockleistungen werden beim Einsatz der DWSF erreicht.

In einer stationären Wirbelschichtfeuerung (SWSF) befindet sich das fluidisierte Bettmaterial immer im Reaktor. Die Verbrennung findet innerhalb der Wirbelschicht statt. SWSF werden mit thermischen Leistungen von $P_{th} = 10 \dots 150 \text{ MW}$ hergestellt [56]. Ein wirtschaftlicher Einsatz lohnt sich im Leistungsbereich von $P_{th} = 200 \text{ kW} \dots 20 \text{ MW}$ [50]. In diesem Bereich beträgt die Querschnittsbelastung $q = 0,5 \dots 1,5 \text{ MW/m}^2$. Ein Beispiel für eine solche ausgeführte

te Anlage ist die Klärschlammverbrennungsanlage VERA der Hamburger Stadtentwässerung [26].

In einer zirkulierenden Wirbelschichtfeuerung (ZWSF) befindet sich das Bettmaterial in einem ständigen Umlauf durch die Anlage. Die Feuerung wird so betrieben, dass ständig Bettmaterial aus der Wirbelschicht ausgetragen wird. Nach dem Verlassen der eigentlichen Schicht führt der Materialumlauf durch den „Riser“. In dem dann folgenden Zyklon werden aus dem Rauchgas die mitgeführten Bettpartikel abgeschieden. Das abgeschiedene Bett wird in den Reaktor zurückgeführt. ZWSF werden mit thermischen Leistungen von P_{th} 50...400 MW hergestellt [56]. Ein wirtschaftlicher Einsatz lohnt sich im Bereich von P_{th} 10...500 MW [50]. In diesem Bereich beträgt die Querschnittsbelastung q 6...10 MW/ m². Eine solche Anlage wird von der Bewag im Kraftwerk Moabit in Berlin betrieben [50].

Die beiden bisher genannten Typen von Wirbelschichtfeuerungen werden mit atmosphärischem Druck betrieben. Dabei zeigt sich eine deutliche Steigerung der Blockleistung beim Übergang von der SWSF zur ZWSF. Eine weitere Leistungssteigerung wird durch die Verbrennung unter Druck in einer Wirbelschichtfeuerung möglich. In einem Prozess mit einer druckaufgeladenen Wirbelschichtfeuerung (DWSF) nimmt die Wirbelschicht den Platz einer Brennkammer eines offenen Gasturbinenprozesses ein. Dieses bringt neben dem Vorteil einer höheren Leistungsdichte (q 10...30 MW/ m²) [50] auch einen erhöhten Feuerungswirkungsgrad und geringere NO_x -Emissionen [25]. Bei Anlagen dieser Bauart müssen alle Feststoffe aus dem heißen Rauchgas abgeschieden werden. Feststoffpartikel, die mit hoher Geschwindigkeit auf die Turbinenschaufeln treffen, verringern die Standzeiten der Turbine sonst deutlich. Genau hier liegen die aktuell zu lösenden Probleme.

Der bisher beschriebene Weg der Entwicklung der Wirbelschichtfeuerung zielt auf eine immer größere Blockleistung. Mit diesen hohen Leistungen kann die Wirbelschicht sinnvoll in der Energie-/ Kraftwerkstechnik verwendet werden. Neben dieser Entwicklungsrichtung existiert noch eine weitere Entwicklungslinie.

Mit der Wirbelschichtfeuerung steht ein Feuerungssystem zur Verfügung, das ein breites Band von Brennstoffen umweltverträglich thermisch verwerten kann. Dabei ist es nicht not-

wendig, dass die verwendeten Brennstoffe stets dieselben definierten Eigenschaften aufweisen. Schwankungen in den Brennstoffeigenschaften (Feuchte, Heizwert, Inertanteil) können durch die Speicherfähigkeit des Verfahrens kompensiert werden. Hieraus ergibt sich ein weiteres Einsatzgebiet von Wirbelschichtfeuerungen: Sie können sehr effektiv bei der Verbrennung von Sonderbrennstoffen eingesetzt werden. Unter „Sonderbrennstoffen“ sollen dabei alle Brennstoffe verstanden werden, die nicht in die Gruppe der heizwertreichen Gase, Erdöle und Kohlen gehören. „Sonderbrennstoffe“ sind Brennstoffe wie heizwertarme Gase, Teerschlämme, Klärschlämme, schwefelhaltige Erdölrestprodukte und schadstoffbelastete Getreide. Alle diese Brennstoffe können gar nicht oder nur unter Problemen in den „klassischen“ Feuerungen verwendet werden.

Der Schwerpunkt bei der Verwendung der genannten Sonderbrennstoffe liegt dabei auf der umweltgerechten Entsorgung. Wenn dabei auch noch Energie in einer leicht weiterverwertbaren Form (Wärme, Strom) bereitgestellt werden kann, so ist das ein positiver Nebeneffekt. Daher liegt das Hauptaugenmerk bei der Entwicklung von Wirbelschichtverfahren zur Verwertung von Sonderbrennstoffen nicht auf hohen Wirkungsgraden bei der Energieausnutzung, sondern in der Umweltverträglichkeit der Entsorgung.

Am Lehrstuhl für Umwelttechnik der Universität Rostock findet die oben beschriebene Entwicklung statt. Neben der Untersuchung zahlreicher Sonderbrennstoffe auf ihre Verwendbarkeit in einer Wirbelschichtfeuerung ist es gelungen, die Entsorgung von heizwertarmen Deponiegasen bis zur Serienreife zu entwickeln. Eine entsprechende Prototypenanlage wird seit 2005 auf einer Deponie in Mecklenburg-Vorpommern betreut.

Da der Schwerpunkt auf der umweltverträglichen Entsorgung der genannten Problemstoffe liegt, ist eine große Anlagenleistung nicht notwendig. Daher zielt die Entwicklung auf Anlagen kleiner bis mittlerer Leistung, die den Sonderbrennstoff am Ort der „Entstehung“ verwertern können. Das dafür geeignetste Verfahren ist die SWSF.

2.2. **Brennstofferkennung**

Im Zuge der Feuerungsentwicklung durchliefen die verwendeten Systeme eine rasante Leistungssteigerung. Angefangen von den Großwasserraumkesseln mit ihren Rostfeuerungen über die ersten Wasserrohrkessel mit Wander-, Ketten- und Schürrosten bis hin zu den aktuell verwendeten Wasserrohrkesseln mit Staubfeuerungen wurden Feuerungssysteme mit immer größeren Feuerungsleistungen entwickelt. Initialisiert wurde dieser Entwicklungsweg durch die Forderung nach immer größeren Dampferzeugern für immer größere Kraftwerksblöcke.

Für solche Feuerungen werden nach wie vor „edle“ Brennstoffe, wie Steinkohle, Braunkohle, Erdöl und seine Raffinationsprodukte und Erdgas bevorzugt. Die Eigenschaften solcher Brennstoffe sind bereits vor der Verwendung bekannt und über weite Strecken homogen. Zur Lösung von Entsorgungsproblemen ging man in den vergangenen 20 Jahren dazu über, heizwertreiche Fraktionen von Müll in Feuerungsanlagen thermisch zu verwerten. Ausgehend von dieser Entwicklung und den absehbaren Reichweitengrenzen der klassischen „edlen“ Brennstoffe werden immer neue „Sonderbrennstoffe“ für die thermische Nutzung entdeckt und erschlossen. Diesen Brennstoffen ist gemeinsam, dass eine Verbrennung bis dato wirtschaftlich kaum lohnend erschien. Sei es, weil sich die Gewinnung sehr aufwendig gestaltet oder weil die Brennstoffauf- und -nachbereitung zeitintensiv und teuer ist. Sie zeichnen sich durch Inhomogenitäten und schwankende Zusammensetzungen aus.

Damit diese Art von Brennstoff bei der Verwendung in Feuerungssystemen richtig bilanziert werden kann, ist eine vorausgehende Analyse notwendig. Solche Analysen sind zeitaufwendig, teuer und, bedingt durch die inhomogene Zusammensetzung des Brennstoffes, nur sehr schwer repräsentativ durchzuführen. Es gibt daher, ausgehend von der Müllverbrennungs-technik, Bestrebungen, den Heizwert eines Brennstoffes (Müll) im Betrieb der Feuerung zu ermitteln.

Hierfür gibt es bis jetzt vier grundlegend unterschiedliche Ansätze, die sich im Zeitraum ihrer Verfügbarkeit von der Veränderung bis zu einem detektierten Ergebnis (Laufzeiten) deutlich unterscheiden:

Der erste Ansatz besteht in einer Bilanzierung eines an die Feuerung angehängten Dampferzeugers. Über die Dampfparameter kann rückwirkend über eine Leistungsbilanz, im Zusammenhang mit den technischen Parametern des Dampferzeugers (Wirkungsgrad) der Heizwert des verwendeten Brennstoffes berechnet werden. Dieser Weg ist jedoch träge. Änderungen des Lastzustandes werden erst erfasst, wenn sich die Änderung auch in der Dampfproduktion niederschlägt. Bedingt durch ihre großen Massen verhalten sich Dampferzeuger bei solchen Lastwechseln sehr träge. Die Informationen über den eingesetzten Brennstoff stehen erst verzögert zur Verfügung.

Der zweite und dritte Ansatz laufen deutlich schneller ab. Dieses sind:

- die „Online-Bilanzierung“ nach Beckmann/ Horeni und
- die „Inverse Verbrennungsrechnung“ nach Dohmann/ Starke mit den Erweiterungen von Urban/ Seeger.

Das Verfahren der Online-Bilanzierung nach Beckmann/ Horeni wird in verschiedenen Quellen vorgestellt [2], [3], [30]. Es wurde im Rahmen von Untersuchungen zum Wirkungsgrad von Müllverbrennungsanlagen [2] entwickelt. Das Ziel dieser Verfahrensentwicklung ist es, ein Werkzeug zur Optimierung von Müllverbrennungsanlagen zu schaffen, bei dem aus den an der Anlage gemessenen Werten der Zustand der Gesamtanlage dargestellt werden kann. Die Ergebnisse von Veränderungen an der Prozessführung werden auf diese Weise schneller sichtbar und können einfacher bewertet werden. Dabei wird der Müllverbrennungsprozess in seine Teilprozesse zerlegt, die dann getrennt betrachtet und über Übergangsbedingungen miteinander verknüpft werden. Mögliche Teilprozesse sind die Feuerung, der Dampferzeuger, der LUVO und die Abgasbehandlung. Für alle diese Teilprozesse werden für die einzelnen Ströme die zugehörigen Massen-, Stoff- und Energiebilanzen aufgestellt. Dabei werden die durch die Leittechnik bereitgestellten Messwerte genutzt, um die zur Beschreibung benötigten Bilanzen aufzustellen. Für den einzelnen Teilprozess sind solche Bilanzen nur mit Hilfe der genannten Übergangsbedingungen geschlossen lösbar.

Das Bilanzierungsprogramm ist gezielt modular aufgebaut, damit es an vielen Müllverbrennungsanlagen verwendet werden kann. Dabei wird die Nachstellung/ Abbildung der betrachteten Anlage durch die Verwendung von vorbereiteten Modulen erleichtert. Die Berechnungen basieren auf den an der Anlage erfassten Daten (Leittechnik). Diese ohnehin zur Verfü-

gung stehenden Daten werden über entsprechende Software dem Bilanzierungsprogramm zur Verfügung gestellt. Aus den Messwerten können neben dem Heizwert des Brennstoffes noch Brennstoffmassenströme und Anlagenwirkungsgrade bestimmt werden.

Exemplarisch wird hier die Berechnung des Brennstoffheizwertes dargestellt. Bei der betrachteten Anlage handelt es sich um eine Rostfeuerung zur Müllverbrennung mit vorgeschalteter Luftvorwärmung. Die Abgase werden in einem nachgeschalteten Kessel zur Dampferzeugung genutzt:

Zunächst wird aus dem Abgasmassenstrom, dem Luftmassenstrom aus dem LUVO, dem Brennstoffmassenstrom Müll und dem Brennstoffmassenstrom Sekundärbrennstoff der Luftmassenstrom, der in die Feuerung eintritt, berechnet. Im zweiten Schritt wird der Massenstrom des reagierenden Brennstoffes aus einer Bilanz um Feuerung und Dampferzeuger berechnet. Der dritte Berechnungsschritt ermittelt aus vorgegebenen Asche- und Flugstaubanteilen des Brennstoffes die zugehörigen Massenströme (Asche/ Schlacke, Flugstaub), die die Feuerung verlassen.

Im vierten Schritt wird der Gesamtmassenstrom des Mülls ermittelt. Danach wird der LUVO bilanziert, um so den von der vorgewärmten Luft eingeschleppten Enthalpiestrom zu errechnen. Nachdem so alle notwendigen Größen zur Bilanzierung der Feuerung bereitgestellt werden, wird im sechsten Berechnungsschritt aus der Bilanz der Feuerung der Heizwert des verwendeten Brennstoffes bestimmt.

Neben der Heizwertbestimmung über die Energiebilanz liefert das Verfahren die Möglichkeit, die Brennstoffzusammensetzung über eine entsprechende Bilanzierung zu ermitteln. Anschließend kann über eine Näherungsformel der Heizwert des Brennstoffes ermittelt werden [30]. Beide Wege werden derzeit parallel angewendet.

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in seinem modularen Aufbau. Das Verfahren kann durch diesen Aufbau schnell an weitere Anlagen angepasst werden. Dabei wird bei der Anbindung an die Prozessleittechnik auf eingeführte Verfahren des Datentransportes zurückgegriffen (OPC). Hierdurch erhält man ein flexibles Verfahren, das bei Bedarf schnell an weiteren Anlagen zum Einsatz kommen kann. Durch die Formulierung von allgemeinen Zusammenhängen

gen bei der Beschreibung der einzelnen Untersysteme ist zu vermuten, dass das Verfahren auch an anderen Anlagen als an Müllverbrennungsanlagen einsetzbar ist.

Das Verfahren der Online-Bilanzierung wird an verschiedenen Müllverbrennungsanlagen in der Praxis erprobt (MVA Schwandorf, Burgkirchen, Coburg und Augsburg).

Das Ziel der inversen Verbrennungsrechnung ist es, aus dem Rauchgas einer Anlage zu erkennen, „[...] welcher Brennstoff in welcher Menge mit welchem Heizwert [...]“ [20] verwendet wird. Dazu werden Ersatzbrennstoffe aus den den Heizwert bestimmenden Bestandteilen Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff gebildet. Zur Veranschaulichung werden die Ersatzbrennstoffe in einem dreieckigen Diagramm dargestellt. In den Ecken dieses Diagramms finden sich jeweils die reinen Komponenten. Zu jedem so erstellten Mischbrennstoff wird dann aus der bekannten Mischung der so genannte „bezogene molare Heizwert“ berechnet. Dabei wird der untere Heizwert mit der Molmasse und der Anzahl der Atome eines Moleküls verrechnet.

Dieser Wert ergibt eine Raumkoordinate oberhalb der durch die Brennstoffmischungen aufgespannten Ebene. Anhand dieser Berechnungen kann nun eine empirische Gleichung ermittelt werden, die diese Ebene beschreibt. Als Variable gehen in diese Gleichung die Molanteile der Grundbrennstoffe ein (C, H, O). Über die Annahme, dass in den meisten betrachteten Stoffen das molare Kohlenstoff-/ Wasserstoffverhältnis $C/H \approx 2/3$ ist, kann nun aus den gemessenen Konzentrationen im Abgas der bezogene Heizwert und damit der Heizwert des verwendeten Brennstoffes ermittelt werden. Mit dem Heizwert kann dann die Feuerungsleistung bestimmt werden.

Die Untersuchungen von Urban und Seeger [54] beschäftigen sich ebenfalls mit dem Verfahren der inversen Verbrennungsrechnung. Hier werden weiterführende Untersuchungen zu dem angenommenen Verhältnis Kohlenstoff/ Wasserstoff durchgeführt und die Einflüsse der Elemente Schwefel, Stickstoff und Chlor auf den Heizwert und die Heizwertbestimmung untersucht. Die Untersuchungen erfolgen zum einen in einer Technikumsanlage und zum anderen in einer Müllverbrennungsanlage.

Als Ergebnis dieser Untersuchungen liegt ein Verfahren vor, mit dem aus den gemessenen Konzentrationen im Abgas der Heizwert des verwendeten Brennstoffes bestimmt werden kann. Die ermittelten Heizwerte zeigen eine gute Übereinstimmung mit den aus dem angeschlossenen Dampfprozess ermittelten Heizwerten.

Beide Veröffentlichungen sprechen davon, dass das Verfahren bei der Anwendung von fossilen Brennstoffen deutlich an Genauigkeit verliert. Fossile Brennstoffe werden in Müllverbrennungsanlagen für die Stützfeuerung verwendet. Als Grund wird dafür angegeben, dass das angenommene Verhältnis Kohlenstoff/ Wasserstoff C/ H 0,66 oder korrigiert C/ H 0,6 typisch für Brennstoffe aus Siedlungsabfall ist. Durch die Zusammensetzung der Abfälle ergibt sich diese Konstante.

Der Einfluss der fossilen Brennstoffe kann berücksichtigt werden, in dem die Einflüsse dieser Brennstoffe aus dem Abgas herausgerechnet werden.

Das Verfahren der inversen Verbrennungsrechnung basiert auf den theoretischen Ansätzen der Verbrennungsrechnung. Dabei mussten für das Verfahren umfangreiche Vorausberechnungen durchgeführt werden. Da das Verfahren für die Verwendung an Müllverbrennungsanlagen entwickelt wurde, ist es nicht ohne weiteres auf andere Feuerungssysteme übertragbar. Wie bereits genannt, stimmt bei anderen Brennstoffen die Annahme des C/ H-Verhältnisses nicht mehr.

Ein weiteres Verfahren, in dem der Heizwert eines verwendeten Brennstoffes berechnet wird, stellt Fellner in [21] vor. Bei dem Verfahren geht es vornehmlich darum, CO_2 -Emissionen, die aus einer fossilen Quelle stammen, zu identifizieren. Hierbei wird in einem Algorithmus aus den folgenden an der Anlage ermittelten Messwerten der Anteil der fossilen CO_2 -Emissionen bestimmt. Die Entwicklung dieses Verfahrens wurde von den Betreibern österreichischer Müllverbrennungsanlagen angeregt, damit sie einerseits nachweisen können, ob der bereitgestellte elektrische Strom aus hochvergüteter Biomasse stammt und in welchem Maße CO_2 -Zertifikate für den Betrieb einer Müllverbrennungsanlagen benötigt werden. Solche Zertifikate werden bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen, die nicht wie Biomasse treibhausneutral sind, benötigt.

Für das Verfahren werden die folgenden Messwerte benötigt:

- die verbrannte Abfallmenge,
- die Menge der mitverbrannten Zusatzbrennstoffe (H-EL, Erdgas),
- die Massen der Rückstände (Schlacken, Aschen, Filterkuchen),
- das trockene Rauchgasvolumen,
- die trockene Rauchgaszusammensetzung,
- die Dampfproduktion,
- die Dampfparameter im DE (Druck, Temperatur),
- die Speisewassertemperatur,
- der Kesselwirkungsgrad.

Mit Hilfe der genannten Werte kann dann der CO_2 -Anteil aus fossilen Brennstoffen ermittelt werden. Als Nebenprodukt wird über den Dampferzeuger der Heizwert des verwendeten Brennstoffes ermittelt.

Das Verfahren von Fellner hat nicht das primäre Ziel, den Heizwert des verwendeten Brennstoffes zu ermitteln. Der Heizwert wird in dem Berechnungsalgorithmus als „Nebenprodukt“ errechnet. Dabei wird eine Kombination aus der ersten hier beschriebenen Methode (Bilanzierung DE) und der Verwendung von Näherungsformeln für die Heizwertbestimmung angewendet. Für die Bestimmung des Heizwertes eines unbekannten Brennstoffes ist dieses Verfahren daher nicht geeignet.

2.3. Regelungstechnik

Die Regelungstechnik ist der Bereich der Ingenieurwissenschaften, der sich damit befasst, einen Prozess in einem bestimmten Betriebszustand zu halten. Dabei findet man regelungstechnische Vorgänge nicht nur in Bereichen der Technik, sondern in allen Bereichen des Lebens (Beschleunigen Abbremsen eines Kfz, Erhitzen von Mahlzeiten, Temperieren von Räumen,...).

Zur Lösung eines regelungstechnischen Problems wird das betrachtete reale System zunächst beschrieben. Hierzu wird es in Teilsysteme mit bestimmten definierten Eigenschaften zerlegt.

Anhand des folgenden Beispiels der Drehzahlregelung eines Elektromotors werden die Terminologie und Systembeschreibung der Regelungstechnik vorgestellt.

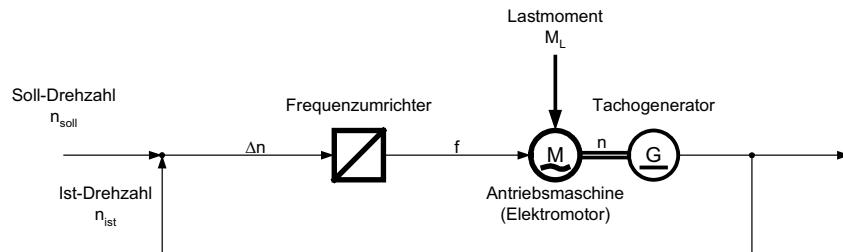


Abbildung 3: Beispiel Regelkreis

In dem betrachteten System (Abbildung 3) wird die Drehzahl einer elektrischen Antriebsmaschine konstant gehalten. Für den Betrieb des Systems wird eine Soll-Drehzahl n_{soll} vorgegeben. Dieser Wert wird mit der aktuellen Ist-Drehzahl n_{ist} verglichen. Die Drehzahldifferenz Δn wird in einen geeigneten Frequenzumrichter eingespeist, der aus ihr einen gerichteten Wechselstrom mit variierender Frequenz f macht. Durch die Variation der Frequenz kann die Drehzahl des Elektro-Drehstrommotors gestellt werden. Der mit der eingestellten Drehzahl laufende Elektromotor treibt einen Tachogenerator zur Messung der Drehzahl an.

Da es sich um eine Antriebsmaschine handelt, kann das System von außen durch verschiedene auftretende Lastmomente M_L gestört werden.

Das hier beschriebene System lässt sich dabei in zwei Untersysteme einteilen:

Das System aus Motor und Tachogenerator. Dieses System wird von außen beeinflusst und soll mit einer vorgegebenen Drehzahl arbeiten. In der Regelungstechnik wird dieser Teil als „Regelstrecke“ bezeichnet.

Das System Frequenzumrichter. Dieses Untersystem soll aus den eingehenden Informationen über den Zustand der Regelstrecke eine Ausgangsgröße erzeugen, die die Regelstrecke unabhängig von äußeren Einflüssen im vorgegebenen Zustand hält. In der Regelungstechnik wird dieser Teil als „Regeleinrichtung“ bezeichnet.

Diese beiden Teilsysteme werden in der Abbildung 4 dargestellt.

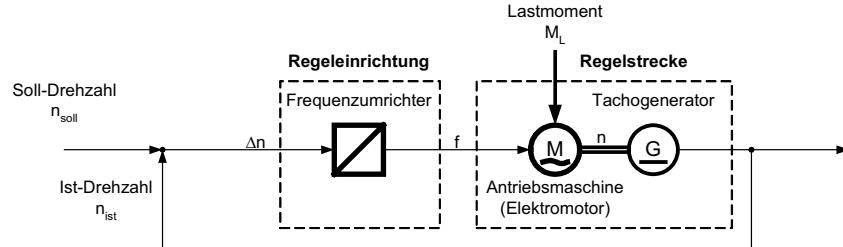


Abbildung 4: Beispielsystem mit Kreisbezeichnungen

Das so entstandene Bild des Regelkreises wird weiter abstrahiert. Mit den in der Regelungstechnik gebräuchlichen Bezeichnungen für die Informationen, die in dem Regelkreis verwendet werden, ergibt sich die Abbildung 5 gezeigte abstrakte Darstellung des Kreises.

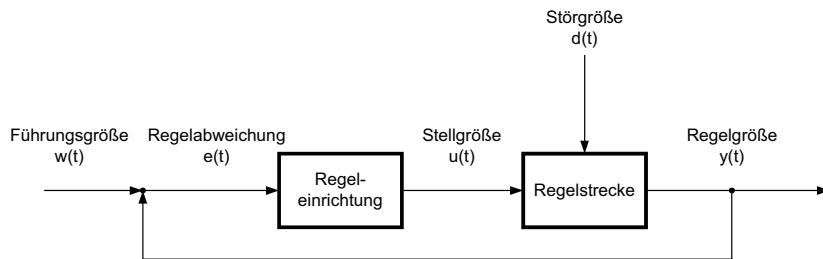


Abbildung 5: Regelkreis komplett

Anhand der Abbildung erschließt sich jetzt auch der Unterschied zwischen der Regelung und der Stellung:

Bei der Regelung eines Systems kommt es immer zu einer Rückführung und einem Vergleich der Regelgröße mit der Führungsgröße. Im Beispiel ist das die Rückführung der Ist-Drehzahl und der Vergleich mit der Soll-Drehzahl. Bei einer Stellung entfällt die Rückführung.

Damit ein Regelkreis die gestellte Aufgabe der Regelung erfüllen kann, muss der Regler an die Regelstrecke angepasst werden. Für eine solche Anpassung nennt Lunze in [35] drei Lösungswege:

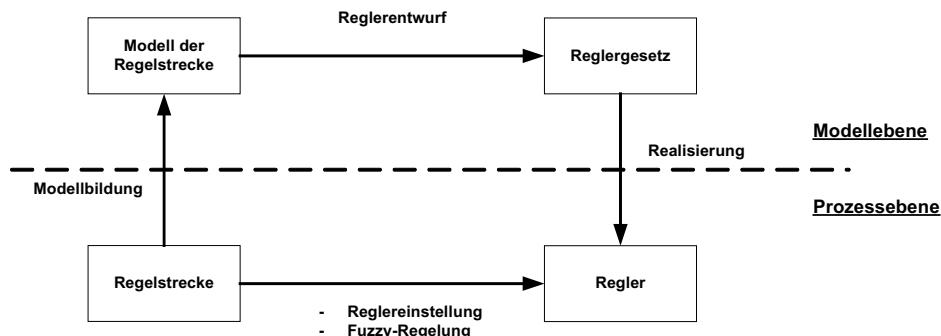


Abbildung 6: Lösungsschema für Regelaufgaben [35]

1. Reglerentwurf
2. Reglereinstellung
3. Fuzzy-Regelung

Der klassische Weg der Lösung einer Regelungsaufgabe ist der Reglerentwurf. Hierfür wird der in Abbildung 6 dargestellte Algorithmus abgearbeitet. Nach der Analyse des Prozesses wird er aus der Prozessebene in die Modellebene überführt. Dort wird er mit den Mitteln der Regelungstechnik abstrahiert und ein beschreibendes Modell entwickelt. Die Beschreibung erfolgt im Zeitbereich, d.h. es werden die zeitlichen Abhängigkeiten der Ausgänge von den Eingängen ermittelt. Nachdem auf diese Weise eine das System beschreibende Differentialgleichung ermittelt wurde, werden die Randbedingungen für den zu entwerfenden Regler festgelegt. Aus den Randbedingungen und dem Modell wird dann das Reglergesetz abgeleitet, das den Zusammenhang zwischen der Regelabweichung und der Stellgröße herstellt.

Je nach dem Aufbau der Regelstrecke gibt es eine Vielzahl von zur Verfügung stehenden Möglichkeiten, das Reglergesetz aufzubauen: ein Reglergesetz, das aus der Regelabweichung eine entsprechende Stellgröße berechnet, ineinander verschachtelte Reglergesetze (kaskadierte Regler), die aus verschiedenen Regelabweichungen nacheinander eine Stellgröße berechnen oder in das Reglergesetz integrierte Modelle (DGL) des Prozesses.

Durch die Rücktransformation in die Prozessebene wird aus dem Reglergesetz dann ein entsprechend verwendbares Bauteil.

Zu diesem klassischen Weg der Lösung einer regelungstechnischen Aufgabe gibt es zwei Alternativen:

Mit Hilfe der Reglereinstellung wird ein bereits in der Prozessebene vorhandener Regler durch Experimente eingestellt. Hierzu muss der Regelkreis jedoch physisch vorhanden sein. Eine Einstellung des Reglers in der Simulation gestaltet sich schwierig.

Für die Reglereinstellung gibt es eine Reihe von so genannten „Einstellregeln“: Die Einstellregeln nach Ziegler/ Nichols und Chien, Hrones und Reswick [7]. Das Vorgehen bei der prak-

tischen Einstellung ist dabei immer gleich: Der Regelkreis wird in Schwingungen versetzt und aus den dann gemessenen Periodendauern lassen sich die benötigten Konstanten des Reglergesetzes mit Hilfe der Einstellregeln ableiten (Parametrierung).

Eine weitere Möglichkeit der Lösung einer Regleraufgabe besteht in der Verwendung eines „Fuzzy-Logik“ Reglers. Unter „Fuzzy-Logik“ wird dabei eine „unscharfe“ Logik verstanden. Bei Reglern dieses Typs wird das Reglertypus nicht durch eine Formel dargestellt, sondern durch eine Reihe von Entscheidungsanweisungen, die miteinander verknüpft werden [7]. Die dafür verwendeten beschreibenden Regeln entsprechen dabei nicht der streng mathematischen Beschreibung eines Vorganges, sondern der menschlichen Beschreibung. So wird auf diese Weise die Temperatur eines Körpers nicht durch ihre thermodynamisch eindeutige Temperatur beschrieben, sondern durch Begriffe wie „warm“, „wärmer“ und „kälter“. Mit Hilfe der „Fuzzy-Logik“ können schwierige Regelungsaufgaben unter Verwendung von menschlichen Erfahrungen gelöst werden.

Moderne rechnergestützte Verfahren zum Reglerentwurf basieren auf der Beschreibung des Zustandsraumes mit Hilfe von Matrizen. Dabei wird das System mit Hilfe einer Matrix aus DGL beschrieben. Diese Matrix wird über Vektoren beeinflusst. Durch Verfahren der Polplatzierung oder der optimal robusten Regelung können Regler entworfen werden.

Eine weitere Methode, die zur Lösung von Regelungsaufgaben ergänzend herangezogen werden kann, ist die Verwendung von so genannten „Beobachtern“. Hierbei handelt es sich um Berechnungsvorschriften, mit deren Hilfe Größen, die zur Bewertung des Systemzustandes benötigt werden, aus den am Prozess gemessenen Größen berechnet werden können. Solch ein Beobachter kann in einem Regelkreis eingesetzt werden: Ein Beobachter kann in Form eines Modells parallel zu der Regelstrecke verwendet werden. Dabei besteht die Gefahr, dass nicht alle Störungen, die an der Regelstrecke angreifen, auch in dem Modell erfasst werden können.

2.4. Erkennen der Bearbeitungslücken und herleiten der Bearbeitungsaufgabe

Der in den vorherigen Kapiteln beschriebene Stand der Technik lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Mit der stationären Wirbelschichtfeuerung (SWSF) steht ein modernes, umweltschonendes Feuerungssystem zur Verwendung von vielen unterschiedlichen Brennstoffen zur Verfügung. Der deutliche Vorteil des Systems liegt in seiner eindeutig begrenzten Reaktionszone. Innerhalb dieser Reaktionszone können sehr genau definierte Bedingungen eingestellt werden, die es ermöglichen, eine saubere Verbrennung zu erreichen. Weiterhin kann das bei der Verbrennung entstehende Rauchgas durch Primärmaßnahmen entsprechend den geltenden Vorschriften gereinigt werden. Die Verwendung von Wirbelschichtfeuerungen zur Entsorgung von Problemstoffen und die gleichzeitige energetische Nutzung dieser Brennstoffe (z.B. von heizwertarmen Gasen oder Teerschlämmen) in dezentralen Feuerungen ist also anzustreben.

Damit eine solche Nutzung wirtschaftlich möglich ist, muss der Prozess soweit automatisiert werden, dass er mit einem minimalen Personalaufwand betrieben werden kann. Dazu gehört der automatische beobachtungsfreie Betrieb über weite Strecken. Neben der Zustandsüberwachung der Anlage muss ein automatisches Betriebssystem dabei die Regelung der Anlage sicherstellen. Die verwendeten Regelalgorithmen müssen so flexibel angelegt werden, dass sie auch Schwankungen in der Brennstoffqualität erkennen und den Anlagenbetrieb daran anpassen können.

Die Regelungstechnik stellt hierfür verschiedene Konzepte bereit. Bei der Verwendung von herkömmlichen Regelalgorithmen müssen diese so erstellt werden, dass sie sich nach dem Auslösen eines entsprechenden Signals selber parametrieren können. Entsprechende industrielle Regelbausteine sind Stand der Technik und in Rostock bereits an verschiedenen Versuchsständen eingesetzt worden. Hierbei ergibt sich das Problem, wann eine Parametrierung auszulösen ist. Da eine solche Anlage über weite Strecken ohne Personal betrieben werden soll, muss eine Möglichkeit geschaffen werden, eine solche „Reglerparametrierung“ anhand von Prozessdaten auszulösen.

Weiterhin stellt die Regelungstechnik die Verwendung von so genannten Beobachtern bereit. Innerhalb eines solchen Beobachters kann ein entsprechendes verfahrenstechnisches Modell des Verbrennungsprozesses ablaufen (Verbrennungsrechnung). Für die Modellrechnung in einem solchen Beobachter werden umfangreiche Parameter über den Prozess benötigt. Dabei können geometrische Abmessungen, Verlustleistungen oder Förderkennlinien von Fördersystemen leicht in der Planungsphase einer Anlage gewonnen werden und in die Beobachter-Algorithmen integriert werden. Es werden ebenfalls umfangreiche Informationen über den verwendeten Brennstoff und seine kalorischen Eigenschaften benötigt. Die Gewinnung solcher Informationen an einer Anlage im beobachtungsfreien Betrieb gestaltet sich außerordentlich schwierig. Für eine manuelle Beprobung steht kein Personal zur Verfügung und automatisierte Analysengeräte erhöhen den finanziellen Investitionsaufwand erheblich.

Zwar existieren die dargestellten Lösungen zur Gewinnung der Heizwerte (Beckmann, Urban) und den Zusammensetzungen, sie sind jedoch entweder nur für die Verwendung an Müllverbrennungsanlagen geeignet oder nicht für die Verwendung in einer Verbrennungsrechnung/ Modellrechnung ausgelegt.

Damit ergibt sich die folgende Bearbeitungsaufgabe:

Für die Automatisierung einer stationären Wirbelschichtfeuerungsanlage soll ein Verfahren entwickelt werden, das aus den Rauchgasen der Anlage Schlüsse auf die kalorischen Eigenschaften der verwendeten Brennstoffe zulässt. Dabei sollen Kriterien gefunden werden, die es ermöglichen, einen Wechsel des verwendeten Brennstoffes zu diagnostizieren. Mit dieser Information soll entweder eine automatische Parametrierung des verwendeten Regelungsbausteines ausgelöst oder eine interne Umschaltung zwischen verschiedenen Parametersätzen für die Betriebsführung der Anlage veranlasst werden. Der gewählte Weg hängt dabei von der technischen Ausrüstung der betrachteten Verbrennungsanlage ab.

Weiterhin sollen aus dem Abgas der Feuerung so viele Informationen über den verwendeten Brennstoff gewonnen werden, dass in einem später zu entwickelnden Beobachter eine Vorausberechnung der Verbrennung in Echtzeit möglich wird und so das Systemverhalten/ Feuerungsverhalten vorausgesagt und beeinflusst werden kann.

3. Entwickeln der Brennstoffidentifikation

3.1. Unterscheidung von Brennstoffen

In der vorliegenden Arbeit wird ein Verfahren zur Brennstoffidentifikation im laufenden Prozess vorgestellt. Zur Identifikation und Einordnung des verwendeten Brennstoffes sollen dabei Kennzahlen zum Einsatz kommen. Der Vorteil ist, dass für viele Brennstoffe bereits Kennzahlen existieren. Wenn sie dann am laufenden Prozess ermittelt werden können, brauchen sie für eine Einordnung des Brennstoffes lediglich mit bereits vorliegenden Kennzahlen verglichen zu werden. Durch dieses Vorgehen vereinfacht sich die Anwendung des Verfahrens deutlich. Bei der Neueinführung von Kennzahlen müssten diese erst definiert, verifiziert und für viele Brennstoffe ermittelt werden.

Nach der Brennstoffidentifikation werden durch weitere Berechnungen alle notwendigen Informationen zur Durchführung einer Verbrennungsrechnung gesammelt.

Für die Bezeichnung „Kennzahl“ finden sich in der Literatur eine Reihe von Definitionen. Nach dem „Lexikon Technologie“ [37] sind Kennzahlen „Zahlen, meist Verhältniszahlen, welche Sachverhalte, Ergebnisse und/ oder Zielstellungen ausdrücken und deren Vergleichbarkeit verbessern.“ In der Technik finden sich eine Reihe von Anwendungen, bei denen Kennzahlen zur Anwendung kommen (z.B. die Reynoldszahl als dimensionslose Geschwindigkeit).

Die einfachste Einteilung für Brennstoffe ist eine Unterteilung nach dem Aggregatzustand und ihrer Herkunft.

Tabelle 1: Einteilung der Brennstoffe nach Dubbel [25]

Herkunft	Aggregatzustand	Fest	Flüssig	Gasförmig
natürlich ^{a)}	Steinkohle, Braunkohle, Torf, Holz	Rohöl und seine Destillate	Erdgas	
künstlich ^{b)}	Schwel- und Hochtemperaturkokks, Briketts, Holzkohle	Teeröl, Schieferöl	Schwel-, Koks-, Stadt-, Generator-, Wasser-, Spalt- und Synthesegas	
Abfälle	Haus- und Industriemüll, Klärschlamm, pflanzliche Abfälle	Altöl, Sulfit- und Sulfatablauge	Klär-, Rest- und Gichtgas, Abgase	

Im Dubbel [25] findet man für die Brennstoffe in den verschiedenen Aggregatzuständen eine Reihe von Kennzahlen, die den jeweiligen Brennstoff beschreiben. Durch solch eine Beschreibung eines Brennstoffes kann dieser mit anderen Brennstoffen verglichen werden. Anhand von charakteristischen Eigenschaften und Kennzahlen kann ein Brennstoff im Blindversuch identifiziert und in die bestehenden Brennstoffgruppen und Normen eingeordnet werden. Sein energetischer Wert kann ermittelt und bewertet werden. Über die Parameter lassen sich weiterhin Informationen über die Behandlung und Einsatzfähigkeit des Brennstoffes gewinnen (z. B. Gefahrenklasse, Temperaturbereiche).

Tabelle 2: Kennzahlen zur Brennstoffbeschreibung [25]

Nr.	feste Brennstoffe	flüssige Brennstoffe	gasförmige Brennstoffe
1.	Heiz-/ Brennwert	(Heizölsorten)	Heiz-/ Brennwert
2.	maximales CO₂	chemische Zusammensetzung	Wobbezahl
3.	Schüttgewicht	Flammpunkt	maximales CO₂
4.	Zünd-/Explosionsgrenzen	Gefahrenklasse	chemische Zusammensetzung
5.	Asche / Schmelzverhalten	Heiz-/ Brennwert	Zünd-/Explosionsgrenzen
6.	Verschmutzungseinflüsse	Siedebereich	
7.	Schlackenviskosität	Viskosität, Stockpunkt	
8.	Elementaranalyse	Verkokungsneigung	
9.	chemische Zusammensetzung	maximales CO₂	
10.		chemische Zusammensetzung	
11.		Zünd-/Explosionsgrenzen	

Das hier hergeleitete Verfahren zur Brennstoffidentifikation im laufenden Prozess soll in einem breiten Brennstoffband zur Anwendung kommen. Hieraus ergibt sich eine erste einschränkende Randbedingung bei der Betrachtung der bereits zur Verfügung stehenden Kennzahlen:

Für die Brennstoffidentifikation können nur solche Kennzahlen verwendet werden, die für alle drei Aggregatzustände von Brennstoffen definiert sind.

Betrachtet man die Tabelle 2, so erkennt man, dass für die Brennstoffe in den einzelnen Gruppen der Aggregatzustände jeweils eine Reihe von Kennzahlen zur Verfügung stehen. Die Anzahl der verwendbaren Kennzahlen reduziert sich deutlich, wenn man nur solche heranzieht, die die Randbedingung erfüllen und sich in allen drei Gruppen wieder finden. Dieses sind

- der Heiz-/ Brennwert,
- das maximale CO_2 (SO_2),
- die chemische Zusammensetzung/ Elementaranalyse und
- die Zündtemperatur.

Im Folgenden werden die verbliebenen Kennzahlen vorgestellt.

Heizwert

In der DIN 51 900 [14] wird der Heizwert wie folgt definiert: „Heizwert ist die bei der Verbrennung frei werdende Wärme, wenn die Verbrennungsgase bis auf die Temperatur abgekühlt werden, bei der Brennstoff und Luft zugeführt werden. Das Wasser ist im Rauchgas als Gas enthalten.“

Der Heizwert ist ein Maß für die in einem Brennstoff gespeicherte chemische Energie. Dabei erfolgt die Energiespeicherung in Form von C-H und C-C Bindungen [8]. Die Energiefreisetzung erfolgt bei den betrachteten Brennstoffen durch Oxidation. Dabei werden der im Brennstoff enthaltenen Kohlenstoff und Wasserstoff mit Luft oxidiert. Bei dem Heizwert handelt es sich um einen Brennstoffkennwert, der den Energieinhalt bezogen auf die Brennstoffmasse angibt.

Die Bestimmung von Heizwerten ist in der DIN 51 900 geregelt [14]. Hier werden normierte experimentelle Verfahren zu seiner Bestimmung beschrieben. Die gebräuchlichste Methode ist die Bestimmung des Heizwertes mit Hilfe eines Kalorimeters. Dabei wird eine kleine Probenmenge des zu untersuchenden Brennstoffes verbrannt und die Wärmeaufnahme eines

Wasserbades gemessen (adiabatisches Verfahren). Aus den Temperaturerhöhungen kann dann der Heizwert berechnet werden. Das Verfahren liefert den Heizwert des betrachteten Brennstoffes sehr genau. Das größte Problem bei diesem Verfahren besteht, besonders bei inhomogenen Brennstoffen, in der repräsentativen Beprobung des Brennstoffes.

Der Heizwert eines Brennstoffes verändert sich mit dem Wasser- und Ascheanteil. Mit dem Heizwert wird der wahre energetische Wert eines vorliegenden Brennstoffes angegeben.

Theoretisch ist es möglich, aus einer bekannten Zusammensetzung eines Brennstoffes seinen Heizwert zu berechnen. Hierzu muss jedoch die genaue molekulare Zusammensetzung des Brennstoffes bzw. seiner Teilkomponenten bekannt sein. Solch eine Ermittlung der Bestandteile lässt sich für Gase relativ einfach durchführen. Mittels Gaschromatographie können die Einzelkomponenten eines Brenngases und ihre Volumenanteile ermittelt werden (qualitative/quantitative Analyse). Mit diesen Informationen kann der Heizwert des Gases berechnet werden. Für den berechneten Heizwert des Gases erhält man nach [49]:

$$H_u = \sum_i^n y_i \cdot H_{ui} \quad (1)$$

Bei der Untersuchung von festen und flüssigen Brennstoffen ist es einfacher, eine Elementaranalyse durchzuführen. Sie ermittelt die Massenanteile von C, H, N und S ohne Rücksicht auf die chemischen Bindungen. Aus den so gewonnenen Anteilen von C, H, N, S und O kann der Heizwert nicht exakt berechnet werden. Für die näherungsweise Berechnung des Heizwertes liegen für ausgewählte Brennstoffe empirisch ermittelte und experimentell verifizierte Näherungsformeln vor [6][25].

$$H_u = 33,9 \cdot c + 121,4 \cdot \left(h - \frac{o}{8} \right) + 10,5 \cdot s - 2,44 \cdot w \quad (2)$$

Maximales CO_2 , SO_2

Zusätzlich zu dem in den Quellen [25] genannten maximalen CO_2 wird hier auch das maximal entstehende SO_2 betrachtet. Durch die Reaktion mit Sauerstoff entstehen bei der Verbrennung aus dem Brennstoff-Kohlenstoff CO_2 und dem Brennstoff-Schwefel SO_2 . Die dabei entste-

henden Mengen beider Komponenten hängen davon ab, ob eine vollständige Verbrennung vorliegt und bei welchem Luftverhältnis die Verbrennung stattfindet. Die maximalen Werte CO_{2max} und SO_{2max} entstehen bei einer Verbrennung mit dem Luftverhältnis $\lambda = 1$. Da die entstehende Menge ausschließlich von dem im Brennstoff enthaltenen Kohlenstoff bzw. Schwefel abhängt, handelt es sich bei den beiden Werten um Brennstoffkennzahlen.

Beide Kennzahlen können auf zwei verschiedenen Wegen berechnet werden. Da sich die Vorgehensweisen für CO_{2max} und SO_{2max} gleichen, wird das CO_{2max} beispielhaft beschrieben. Die Bestimmung des CO_{2max} -Wertes ist in [49] dargestellt worden und wird hier nur in Auszügen wiedergegeben.

Die Bestimmung von CO_{2max} kann analytisch erfolgen. Hierbei wird der Wert aus einer Verbrennungsrechnung des Brennstoffes bestimmt. Damit die Verbrennungsrechnung durchgeführt werden kann, wird die Elementaranalyse/ Brenngasanalyse des Brennstoffes benötigt. Für das Luftverhältnis $\lambda = 1$ wird dann der CO_{2max} -Wert des Brennstoffes berechnet.

Die Bestimmung von CO_{2max} kann außerdem experimentell erfolgen. Dabei wird der CO_{2max} -Wert eines Brennstoffes aus den im Abgas einer Feuerung gemessenen Konzentrationen von O_2 und CO_2 berechnet. Die Basis für diese Berechnung ist das Ostwald-Diagramm:

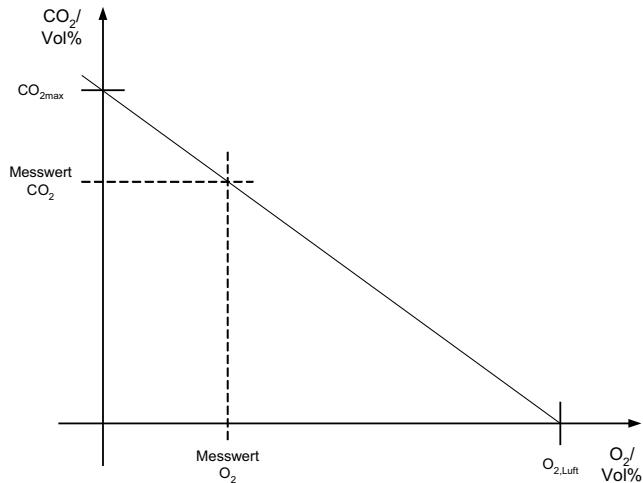


Abbildung 7: Ostwald-Diagramm für vollkommene Verbrennung [49]

Im Ostwald-Diagramm werden die Beziehungen zwischen O_2 , CO und CO_2 bei der Verbrennung eines Stoffes dargestellt. Es kann die vollkommene und die unvollkommene Verbrennung dargestellt werden. Die im Diagramm dargestellten Größen hängen linear zusammen. Das Diagramm wird durch die Sauerstoffkonzentration der Verbrennungsluft auf der Abszisse

und durch den Brennstoffkennwert CO_{2max} auf der Ordinate begrenzt. Diese beiden Punkte werden durch die „Gerade der vollständigen Verbrennung“ verbunden [49]. Bei der Berechnung des CO_{2max} -Wertes aus dem gezeigten Ostwald-Diagramm geht man davon aus, dass die Verbrennung vollständig erfolgt. Dann ergibt sich aus der Abbildung 7 die folgende Strahlensatzgleichung:

$$\frac{CO_{2,mess}}{CO_{2max}} = \frac{O_{2,Luft} - O_{2,mess}}{O_{2,Luft}} \quad (3)$$

Umgeformt nach CO_{2max} erhält man:

$$CO_{2,max} = CO_{2,mess} \cdot \frac{O_{2,Luft}}{O_{2,Luft} - O_{2,mess}} \quad (4)$$

Die gleichen Berechnungen sind auch für die unvollständige Verbrennung möglich. Die Gleichung (4) erweitert sich dann um einen Term für die Kohlenmonoxidkonzentration:

$$CO_{2,max} = \left(\frac{2 \cdot O_2 - CO}{2 \cdot (O_{2,Luft} - O_2) + CO \cdot (1 - O_{2,Luft})} + 1 \right) \cdot \frac{(CO_2 + CO)}{(1 - 0,5 \cdot CO)} \quad (5)$$

Die entsprechende Herleitung findet sich in [49]. Entsteht das CO bei der Verbrennung in Konzentrationen unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte, kann mit der Gleichung (4) ohne Beeinflussung der Genauigkeit gerechnet werden.

Mit Hilfe der Gleichung (4) kann aus den gemessenen O_2 - und CO_2 -Konzentrationen der CO_{2max} -Wert des verwendeten Brennstoffes berechnet werden. Da die Verbrennung eines Stoffes kein deterministischer Prozess ist, sondern stochastisch abläuft, schwanken die benötigten Messwerte und der daraus berechnete CO_{2max} -Wert. Ein nach der Gleichung (4) berechneter Wert ist lediglich ein Momentanwert. Um den CO_{2max} -Wert des verwendeten Brennstoffes experimentell zu bestimmen, ist es daher notwendig, die aus einer größeren Zahl von Einzelmessungen berechneten CO_{2max} -Werte zu mitteln [49]. Hierfür gilt die folgende Gleichung:

$$CO_{2,\max} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n CO_{2,\max,i} \quad (6)$$

Die Berechnung des $SO_{2\max}$ -Wertes erfolgt analog.

Chemische Zusammensetzung/ Elementaranalyse

Die Beschreibung eines Brennstoffes kann ebenfalls über seine Zusammensetzung erfolgen. Die Zusammensetzung kann dabei als chemische Zusammensetzung oder Elementaranalyse vorliegen [1].

Die chemische Zusammensetzung bietet sich zur Beschreibung eines Stoffes an, bei dem alle chemischen Verbindungen, aus denen der Stoff besteht, ermittelbar und ihre Eigenschaften bekannt sind. Das trifft insbesondere für Brenngase zu. Mittels Gaschromatographie kann eine Probe qualitativ und quantitativ auf ihre Zusammensetzung untersucht werden. Bei der Beschreibung eines Brennstoffes über die chemische Zusammensetzung beziehen sich die Angaben auf die Volumenanteile (Moleanteile) des Brenngases ($[y_i] \text{ m}^3 \text{ N i/ m}^3 \text{ N BS}$).

Die Elementaranalyse zur Beschreibung eines Brennstoffe bietet sich immer dann an, wenn er aus sehr vielen, schwer zu ermittelnden und teilweise unbekannten chemischen Verbindungen besteht. Das trifft besonders auf feste und flüssige Brennstoffe zu. Hier bietet sich eine Beschreibung des Stoffes durch die Massenanteile seiner brennbaren und nicht brennbaren Elemente an. Die Konzentrationsangaben der Komponente i beziehen sich dann auf die Masse des Brennstoffes ($[x_i] \text{ kg i/ kg BS}$).

Dabei besteht ein Brennstoff aus den brennbaren Bestandteilen C , H_2 und S und den nicht brennbaren Bestandteilen N , O , Asche und Wasser [49]. Für die Bestimmung dieser Anteile eines Brennstoffes gibt es eine Reihe von Verfahren. Für alle diese Verfahren muss der Brennstoff normgerecht beprobt werden. Anschließend können dann die Brennstoffproben auf die Mengen der brennbaren und nicht brennbaren Bestandteile untersucht werden. Bis auf den Sauerstoff können alle genannten Bestandteile direkt ermittelt werden. Der Sauerstoff wird indirekt aus den ermittelten Massenanteilen berechnet.

Tabelle 3: Auswahl an Verfahren für die Elementaranalyse von Brennstoffen

Nr.	Bestandteil	DIN	Verfahren
	fester Brennstoff		
1.	Aschegehalt (Ascheanteil)	51719	Veraschung und Wägung
2.	Wassergehalt (Wasseranteil)	51718	
3.	C, H ₂ (Anteile)	51721	gravimetrische Bestimmung von CO ₂ , H ₂ O aus Brennstoffasche
4.	N ₂ (Anteil)	51722 T1	aufschließen von N ₂ und titrieren
5.	S (Anteil)	51724 T1, T2	Verbrennung, Eschka Verfahren
	flüssiger Brennstoff		
6.	Aschegehalt (Ascheanteil)	DIN EN ISO 6245	Veraschung und Wägung
7.	Wassergehalt (Wasseranteil)	51777	Verfahren nach Fischer
8.	C, H ₂ (Anteile)	51721	gravimetrische Bestimmung von CO ₂ , H ₂ O aus Brennstoffasche
9.	N ₂ (Anteil)		
10.	S (Anteil)	51400	vielfache Verfahren normiert

In den Titeln der benannten DIN-Normen wird von „Gehalten“ gesprochen. Für die Verwendung in der Verbrennungsrechnung werden jedoch die „Anteile“ einer Komponente benötigt. Beide unterscheiden sich in der Bezugsgröße: Anteile beziehen sich auf die Gesamtmasse, Gehalte z.B. auf die Trockenmasse.

Zündtemperatur

Von den physikalischen Eigenschaften, die die einzelnen Brennstoffe beschreiben, taucht nur die Zündtemperatur in allen drei Aggregatzuständen auf.

Die Zündtemperatur wird in der DIN 51 794 [13] definiert als „die niedrigste Temperatur, bei der sich ein Stoff“ in Luft „selbst entzündet“.

3.2. Welche Unterscheidungsmerkmale können im Betrieb ermittelt werden?

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist es, eine Brennstoffidentifikation zu entwickeln, die direkt in die Prozessführung eingebunden wird. Das bedeutet, dass die benötigten Berechnungsergebnisse innerhalb eines zum Prozess passenden Zeitraumes zur Verfügung stehen müssen. Für die Brennstoffidentifikation stehen die im vorherigen Kapitel beschriebenen Kennzahlen zur Verfügung.

Der Begriff „Echtzeitbetrieb“ wird in der DIN 44 300 [12] definiert:

„Unter Echtzeitbetrieb versteht man den Betrieb eines Rechnersystems, bei dem die Programme zur Verarbeitung anfallender Daten ständig betriebsbereit sind, derart, dass die Verarbeitungsergebnisse innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne verfügbar sind. Die Daten können je nach Anwendungsfall nach einer zufälligen Verteilung oder zu bestimmten Zeiten anfallen.“

Umgangssprachlich wird „Echtzeit“ immer mit „sehr schnell“ in Verbindung gebracht. Bei der Betrachtung der Definition fällt jedoch auf, dass hier keine konkreten Zeiten genannt werden. Es werden vielmehr Zeitspannen definiert, innerhalb derer die Ergebnisse einer Datenverarbeitung für die Weiterverwendung vorliegen. Solche Zeitspannen ergeben sich aus dem betrachteten System und können von wenigen Millisekunden im Bereich der Bewegungskontrolle bis zu Sekunden im Bereich von Fertigungsprozessen reichen [23].

Aus der Definition lassen sich Kriterien ableiten, die ein System erfüllen muss, damit es im „Echtzeitbetrieb“ verwendet wird. Für die Überprüfung der Kennzahlen zur Brennstoffidentifikation werden die Bestimmungsverfahren zur Ermittlung der Kennzahlen als solche Systeme angesehen. Es wird überprüft, ob die Verfahren die Bedingungen für den Echtzeitbetrieb erfüllen.

Die Kernaussage der Definition in der DIN ist, dass in einem Echtzeitsystem die Ergebnisse einer Datenverarbeitung nach einer vorher festgelegten Zeitspanne zur Verfügung stehen. Von Wörn [57] wird dieses Kriterium mit „Rechtzeitigkeit“ bezeichnet. Es finden sich keine Angaben über die Dauer einer solchen Zeitspanne. Zur Überprüfung, ob es sich bei einem Rechnersystem zur Überwachung eines Prozesses um ein Echtzeitsystem handelt, ist es daher notwendig, zunächst eine für den Prozess charakteristische Zeitspanne festzulegen. Die Festlegung der Zeitspanne muss mit besonderer Aufmerksamkeit erfolgen, da durch eine unüberlegte Wahl jeder Prozess als ein Echtzeitprozess definiert werden kann.

Zunächst wird eine sinnvolle Zeitspanne für den betrachteten Wirbelschicht-Verbrennungsprozess definiert. Die zu verwendende Zeitspanne orientiert sich an den Prozessgrößen, die sich „schnell“ ändern. Aus der Größe, die sich am schnellsten ändert und noch in der Prozessüberwachung sicher erfasst, sichtbar und nutzbar gemacht werden soll, ergibt sich die für die Überprüfung zu verwendende Zeitspanne. Die Bedingung für eine sichere

Erfassung eines Signals ist, dass die Datenerfassung mindestens mit der doppelten Frequenz des zu erfassenden Ereignisses erfolgt. Nur so kann sichergestellt werden, dass alle Änderungen der betrachteten Prozessgröße dargestellt werden.

Für die Ermittlung der Zeitspanne werden am SWSF-Prozess „schnelle“ zeitliche Änderungen und Abläufe gesucht. Solche Änderungen finden sich in der Änderung der Wirbelluftmenge, der Brenngasmenge, die über den Brenngasverdichter gefördert wird, Schwankungen des Druckverlustes über der Wirbelschicht und bei der Verweilzeit eines Brennstoffes in der Wirbelschicht.

Die schnellste zeitliche Änderung der genannten veränderlichen Größen tritt bei der Schwanlung des Druckabfalls über der Wirbelschicht auf. Für den Prozess selber ist es wichtig, diese Größe zu überwachen und zu bewerten (siehe dazu Kapitel 4.2). Daher wird die Frequenz der Druckschwankungen als Ansatzpunkt für die Festlegung der „Zeitspanne“ zur Überprüfung der Echtzeitfähigkeit herangezogen. Aus der Auswertung bereits durchgeföhrter Versuche zeigt sich, dass das Drucksignal etwa mit einer Grundfrequenz von $f_G = 0,5 \text{ Hz}$ schwingt, d.h. es ändert sich etwa alle $t = 2 \text{ s}$.

Hieraus ergibt sich als prozessrelevante Zeitspanne $t_Z = 1 \text{ s}$. Mit dieser Erfassungsrate muss eine Datenerfassung arbeiten, damit jede relevante Änderung in dem Druckabfall über der fluidisierten Wirbelschicht erfasst werden kann. Nach der Definition für den „Echtzeitbetrieb“ müssen innerhalb dieses Zeitraumes alle notwendigen Berechnungen abgeschlossen sein und die Ergebnisse für die weitere Verwendung zur Verfügung stehen.

Nachdem die prozessrelevante Zeitspanne nun feststeht, werden die im vorherigen Kapitel vorgestellten Kennzahlen auf ihre Verwendbarkeit überprüft.

Heiz-/ Brennwert

Für die vorgestellten Verfahren zur Ermittlung des Heizwertes eines Brennstoffes werden entweder Proben des Brennstoffes oder seine Elementaranalyse/ Zusammensetzung benötigt. Bezuglich der zur Verfügung stehenden Zeitspanne ergeben sich hieraus zwei Probleme: Selbst wenn die Verfahren soweit automatisiert werden, dass sie ohne Bedienung durch Personal auskommen, dauert eine repräsentative Probennahme und -aufbereitung länger als die

zur Verfügung stehende Zeitspanne. Bereits vor der Durchführung der Heizwert-Ermittlung erkennt man, dass die Bestimmung des Heizwertes mit Hilfe der genormten Verfahren nicht echtzeitfähig ist.

Das zweite Problem ergibt sich in der Heizwertbestimmung nach dem Verfahren der DIN 51 900. Geht man davon aus, dass im Vorwege eine repräsentative Beprobung möglich ist, und die Probe zum Zeitpunkt der Brennstoffverwendung analysiert wird, dann dauern die beschriebenen Ermittlungsverfahren deutlich länger als die zur Verfügung stehende Zeitspanne. Bei der Verwendung eines Bombenkalorimeters wird die zur Verfügung stehende Zeit weit überschritten.

Auch die Berechnung des Heizwertes aus der Elementaranalyse eines festen/ flüssigen Brennstoffes oder die Berechnung des Heizwertes aus der Zusammensetzung eines Brenngases kann nicht innerhalb der zur Verfügung stehenden Zeitspanne geschehen. Das Problem bei diesem Verfahren ergibt sich nicht aus dem Berechnungsalgorithmus, sondern aus den hierfür benötigten Informationen. Die Analyse der Zusammensetzung eines Stoffes beansprucht deutlich mehr Zeit als die zur Verfügung stehende Zeitspanne.

Bei der Verwendung der Zykluszeit von $t_Z = 1$ s kann der Heizwert und die Elementaranalyse/ Analyse als Kenngröße für den verwendeten Brennstoff nicht in Echtzeit ermittelt werden.

Maximal entstehendes CO_2 und SO_2

Für die Berechnung der CO_{2max} - und SO_{2max} -Werte werden die zur Prozessüberwachung durchgeföhrten Messungen der Abgaszusammensetzung verwendet. Diese Werte stehen kontinuierlich zur Verfügung und können zu jeder Zeit für Berechnungen verwendet werden. Für die Berechnung wird eine festgelegte Anzahl von Berechnungsschritten durchgeführt. Die Ergebnisse stehen nach Ablauf einer festgelegten Zeit zur Verfügung. Hierdurch ist das Kriterium der Rechtzeitigkeit erfüllt.

Zündtemperatur

Auf die Bestimmung der Zündtemperatur treffen dieselben Einschränkungen zu wie auf die Ermittlung des Heizwertes. Der Brennstoff muss für die Ermittlung repräsentativ beprobt und anschließend die Zündtemperatur im Experiment ermittelt werden. Alle diese Tätigkeiten sind

nicht in der zur Verfügung stehenden Zykluszeit von $t_Z = 1$ s durchführbar. Damit scheidet die Zündtemperatur als Brennstoffkennzahl, die in Echtzeit ermittelt werden kann, aus.

Das zweite Kriterium, das aus der Definition des „Echtzeitbetriebes“ abgeleitet werden kann, besagt, dass alle eingehenden Daten verarbeitet werden. Hierzu ist es notwendig, dass das betrachtete System entweder einen echten Parallelbetrieb realisiert und Daten nebeneinander verarbeitet oder durch eine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit die Daten so schnell bearbeitet, dass sie quasi parallel verarbeitet werden. Wörn [57] bezeichnet dieses Kriterium als „Gleichzeitigkeit“. Mit dieser Forderung wird erreicht, dass innerhalb der im ersten Kriterium geforderten Zeitspanne alle Daten verarbeitet werden. Bei Systemen, die z.B. Fertigungsstraßen betreuen, werden innerhalb der charakteristischen Zeitspanne sehr viele Berechnungen zur Regelung, Stellung und Überwachung des Prozesses benötigt. Alle diese Berechnungen müssen innerhalb einer charakteristischen Zeitspanne parallel durchgeführt werden. Es würde z.B. den Betriebsablauf einer solchen Fertigungsstraße massiv stören, wenn Stellinformationen für Manipulatoren erst nach Ablauf der Zykluszeit dort eintreffen und das zu bearbeitende Werkstück bereits an der nächsten Bearbeitungsstation liegt.

Von den in Kap 3.1 genannten Kennzahlen sind nur noch das CO_{2max} bzw. SO_{2max} verblieben. Beide Kennzahlen werden direkt durch das Betriebsprogramm aus Messwerten berechnet. Parallel dazu werden in jedem Programmdurchlauf mehrere Berechnungen nacheinander durchgeführt (Umrechnungen von Signalen, Mittelwerte, Streuungen, Überprüfung von Grenzwerten, Stellwerte,...). Am Ende eines Programmdurchlaufes des Betriebsprogramms der SWSF stehen diese Werte für die Weiterverwendung zur Verfügung. Damit wird für die Berechnung der CO_{2max} -/ SO_{2max} - Werte auch das zweite Kriterium der Definition erfüllt.

Das dritte Kriterium für den Echtzeitbetrieb ist, dass alle erforderlichen Daten erfasst werden. Dabei ist es unerheblich, ob die Daten zufällig oder in einer vorbestimmten Reihenfolge anfallen.

Die Bestimmung der CO_{2max} -/ SO_{2max} - Werte erfolgt im Betriebsprogramm der SWSF Rostock. Hier erfolgt die Datenerfassung über Sensoren, die an das Bussystem angeschlossen sind. Durch die Funktion des Bussystems, die in Kap 4.1 eingehend erklärt wird, ist sicherge-

stellt, dass in einem Buszyklus alle Sensoren abgefragt werden. Hierdurch stehen nach einem Busdurchlauf dem Betriebsprogramm alle notwendigen Daten zur Verfügung.

Die Kennwerte CO_{2max} und SO_{2max} erfüllen alle drei Kriterien für den Echtzeitbetrieb. Sie können für eine Echtzeitidentifikation des Brennstoffes herangezogen werden.

Die Ergebnisse einer Datenverarbeitung, die in einem Echtzeitsystem erfolgt, sind somit voraussagbar: Wenn man alle Eingangsdaten kennt, sind die Berechnungsergebnisse der Datenverarbeitung und der Zeitpunkt, zu dem sie bereitstehen, vorhersagbar.

3.3. CO_{2max} und SO_{2max} zur Brennstoffidentifikation

Aus dem vorherigen Kapitel ergibt sich, dass sich lediglich die Werte CO_{2max} und SO_{2max} für die Verwendung in einem Echtzeitverfahren zur Brennstoffidentifikation verwenden lassen.

Für die Verwendung von SO_{2max} muss im Betrieb das entstehende SO_2 gemessen werden. Da es im Vergleich zu CO_2 normalerweise in deutlich geringeren Konzentrationen entsteht, ist die Verwendung von SO_{2max} immer mit einer Unsicherheit behaftet. Hinzu kommt, dass bei der Verwendung von schwefelhaltigen Brennstoffen in Wirbelschichtfeuerungen eine Entschwefelung des Abgases direkt im Reaktor vorgenommen wird (in situ). So würde man nur die verbleibende SO_2 -Konzentration im Abgas messen. Die Entschwefelung der Rauchgase erfolgt bei Wirbelschichtfeuerungen direkt im Reaktor mit Hilfe von Additiven. Damit die Grenzwerte für die Emission von SO_2 sicher erreicht werden, muss das Additiv in einem überstöchiometrischen Verhältnis in den Reaktor eingebracht werden. Die Menge an eingebrachtem Additiv lässt also keine Rückschlüsse auf die gebildete Menge SO_2 zu. Die Verwendung von SO_{2max} scheidet somit bei der Verwendung des Verfahrens an Wirbelschichtfeuerungen aus.

Bei anderen Verbrennungsverfahren, bei denen die Rauchgase in nachgeschalteten Prozessen gereinigt werden (Sekundärmaßnahmen), kann das SO_{2max} zur Brennstoffidentifikation mit herangezogen werden.

Im vorherigen Kapitel wurde gezeigt, dass der CO_{2max} -Wert formal für ein Echtzeitverfahren verwendet werden kann. Im Folgenden wird die praktische Verwendbarkeit untersucht.

Hierzu werden die CO_{2max} -Werte von Brennstoffen, deren Elementaranalysen am Lehrstuhl vorliegen (siehe Anhang 9.2), über eine Verbrennungsrechnung berechnet. Die Information des maximalen CO_2 bezieht sich auf den trockenen Brennstoff. Eine Aussage über im Brennstoff enthaltene Feuchtigkeit und ihre Auswirkungen kann nicht getroffen werden. In Abbildung 8 kann man den Verlauf der aus vorliegenden Elementaranalysen berechneten CO_{2max} -Werte erkennen. Dabei werden die aus der Analyse berechneten Werte ihrer Größe nach sortiert. Es zeigt sich, dass die berechneten Werte teilweise sehr dicht zusammen liegen. Aus der Graphik ist ersichtlich, dass mit CO_{2max} lediglich eine Unterscheidung von gasförmigen und festen/ flüssigen Brennstoffen möglich ist. An der Übergangsstelle gibt es im Verlauf der CO_{2max} -Werte einen deutlichen Sprung. Die CO_{2max} -Werte der letzten Brennstoffe ($n > 85$) liegen über der theoretischen Grenze des CO_{2max} -Wertes bei der Verbrennung in Luft ($CO_{2max} = 21 \text{ Vol\%}$). Die hier dargestellten Brennstoffe mit Ordnungszahlen $n > 85$ enthalten so viel Sauerstoff, dass ein CO_{2max} -Wert oberhalb von $CO_{2max} = 21 \text{ Vol\%}$ erreicht werden kann (z.B. reines Kohlenmonoxyd: $CO_{2max} = 34,7 \text{ Vol\%}$).

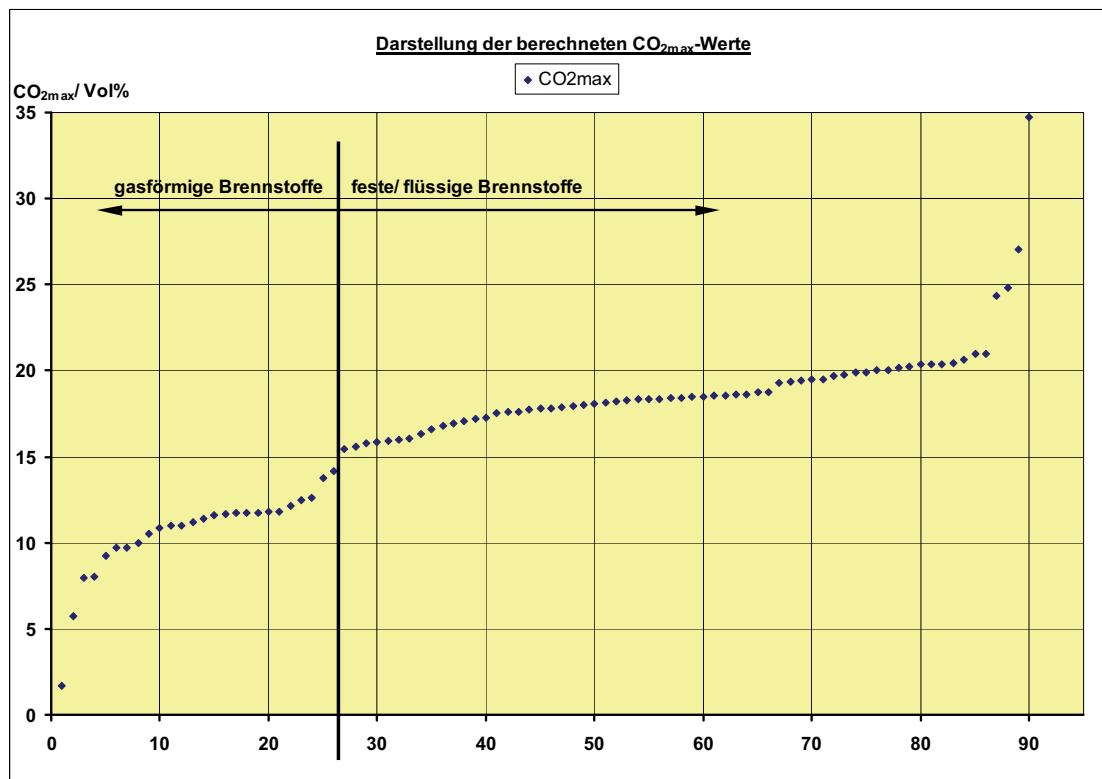


Abbildung 8: CO_{2max} -Verlauf für verschiedene bekannte Brennstoff-Zusammensetzungen (lfd. Nr.)

Tabelle 4: Legende zur Abbildung 8

Nr.	Bezeichnung	Nr.	Bezeichnung	Nr.	Bezeichnung
1.	Luft Nullmessung	31.	Crambeöl	61.	Strohpellets
2.	Gasmischung 10% CH ₄ - 90% N ₂	32.	Rapsööl	62.	Mix Weizenstroh und Korn
3.	Gasmischung 20% CH ₄ - 80% N ₂	33.	Sommer-Leindotter-Öl	63.	Waldholzpellets
4.	Erdgas Brandenburg 7	34.	Hausmüll-Siebdurchgang (3) max.40mm	64.	Gasflammkohle
5.	Gasmischung 30% CH ₄ - 70% N ₂	35.	Klärschlamm Homs 1	65.	Hausmüll-Siebüberlauf
6.	Erdgas Brandenburg 1	36.	Klärschlamm Homs 2	66.	Rohbraunkohle
7.	Erdgas Brandenburg 1a	37.	Tiermehl (Bayern)	67.	Weizenstroh
8.	Gasmischung 40% CH ₄ - 60% N ₂	38.	Leindotter-Pellets	68.	Reisstroh
9.	Gasmischung 50% CH ₄ - 50% N ₂	39.	BRAM	69.	Anthrazit
10.	Gasmischung 60% CH ₄ - 40% N ₂	40.	Klärschlamm Eurawasser	70.	Kaffee-Häutchen
11.	Erdgas Brandenburg 4	41.	Faulschlamm Eurawasser Rostock	71.	pelletierte Kaffeehäutchen
12.	Erdgas Brandenburg 3	42.	Tierschlamm Rostock	72.	Pferdemist, feucht
13.	Gasmischung 70% CH ₄ - 30% N ₂	43.	BRAM Bad Doberan	73.	Misanthus 1
14.	Gasmischung 80% CH ₄ - 20% N ₂	44.	Holzpellets - 3	74.	Hähnchenmist
15.	Gasmischung 90% CH ₄ - 10% N ₂	45.	Holzpellets - 2	75.	Misanthus 2
16.	Erdgas Mecklenburg-Vorpommern 2	46.	Holzpellets - 6	76.	TMH 1018
17.	Testbrennstoff	47.	Rohschlamm Eurawasser Rostock	77.	TMH 1011
18.	Gasmischung 100% CH ₄ - 0% N ₂	48.	Holzpellets - 1	78.	Misanthus (einjährig)
19.	Methan	49.	Holzpellets - 5	79.	Pellets Zuckerhirse
20.	Erdgas Rußland	50.	Kompostierungs Rückstand Güstrow	80.	Misanthus (zweijährig)
21.	Erdgas Mecklenburg-Vorpommern 1	51.	Weidenpellets	81.	Mischprobe Schilfgras
22.	Erdgas NL	52.	Strohpellets 1	82.	TMH 10 19
23.	Erdgas Brandenburg 6	53.	Weizenkorn	83.	Hirse
24.	Erdölbegleitgas Nigeria	54.	Strohpellets 2	84.	Holz, trocken
25.	Propan	55.	Holzpellets - 4	85.	Mais, Großbeeren 1992
26.	Prüfgas 2	56.	Strohpellets - 1	86.	Kohlenstoff
27.	H-EL	57.	Petroloks Homs, Syrien	87.	Erdgas Brandenburg 5
28.	Rapsmethylester (RME)	58.	Hausmüll-Siebüberlauf (2) max.40mm	88.	Erdgas Brandenburg 3
29.	Tierfett	59.	Pferdemist und Sägespäne 1	89.	Pferdemist feucht
30.	BRAM Bremen	60.	Pferdemist und Sägespäne 2	90.	reines Kohlenmonoxid

Erschwerend kommt bei dem Verfahren hinzu, dass die hier gezeigten Werte anhand der Elementaranalysen berechnet wurden. Für die Brennstofferkennung an der Wirbelschichtanlage soll die Berechnung von CO_{2max} im Prozess mit den an der Anlage gemessenen Werten ablaufen. Hierdurch wird es zu Schwankungen bei der Berechnung kommen. Die Berechnungsergebnisse der CO_{2max} -Werte aus den Messdaten werden mit einer Streuung auftreten, so dass eine eindeutige Zuordnung des Wertes zu einem bestimmten Brennstoff nicht möglich ist.

Die Unterscheidung von gasförmigen und festen/ flüssigen Brennstoffen reicht nicht aus, um eine echtzeitfähige Brennstofferkennung zu realisieren. Zusätzlich zu dem dargestellten CO_{2max} -Wert wird mindestens ein weiterer Wert benötigt, der den verwendeten Brennstoff beschreibt. Diese Information soll ebenfalls durch Messungen und darauf basierenden Berechnungen gewonnen werden (Echtzeitverfahren). Mit zwei vorhandenen Informationen zu dem verwendeten Brennstoff kann eine zweidimensionale „Brennstoffmatrix“ aufgespannt werden. Hierin lassen sich dann die Brennstoffe einordnen.

3.4. Verfahrensansatz/ Voraussetzungen für das entwickelte Verfahren

Wie in den vorherigen Kapiteln gezeigt, eignen sich die bisher genannten physikalischen Eigenschaften und Kennzahlen nicht zur Verwendung in einem Echtzeitverfahren. Die einzigen Kennzahlen, die sich für ein Echtzeitverfahren eignen (CO_{2max} , SO_{2max}), reichen nicht aus, um einen Brennstoff eindeutig zu identifizieren. Es wird also mindestens noch eine weitere Kennzahl benötigt, mit der der verwendete Brennstoff identifiziert werden kann.

Als zweite Kenzahl zur Brennstoffidentifikation wird der Heizwert herangezogen. Die Verwendung des Heizwertes bietet zwei Vorteile:

Heizwerte sind bereits für eine große Anzahl von Brennstoffen ermittelt worden. In einschlägigen Tabellenbüchern finden sich Zahlenwerte für Standardbrennstoffe. Für eine Reihe von „Sonderbrennstoffen“ wurden die Heizwerte am Lehrstuhl bestimmt.

Der Heizwert beschreibt den wahren energetischen Wert des Brennstoffes. Hierbei werden Brennstoffverdünnungen, wie sie aus dem Asche- und Wasseranteil des Brennstoffes entstehen, genau so berücksichtigt, wie der durch die Verdampfung des Wasseranteiles nicht nutzbare Energieanteil des Brennstoffes.

Für die Ermittlung des Heizwertes aus dem Brennstoffabgas wird die Leistungsbilanz des Reaktors herangezogen.

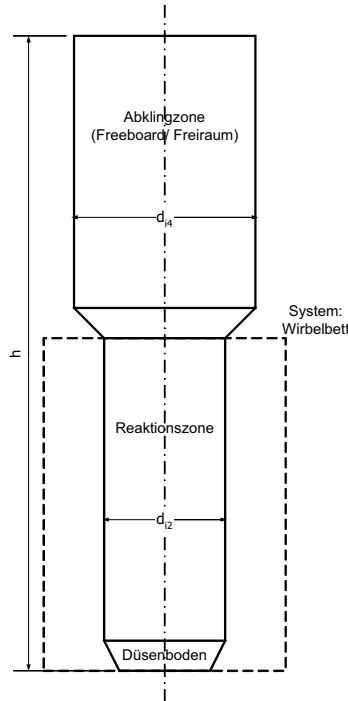


Abbildung 9: Systemgrenzen für die Leistungsbilanz

Bei dem betrachteten System handelt es sich um ein offenes, stationär durchströmtes System. Aus der Verwendung dieses Systems ergeben sich die Randbedingungen für die Anwendung des Verfahrens zur Brennstoffidentifikation.

1. Randbedingung: Systemgrenzen

Damit das Verfahren zur Brennstoffidentifikation angewendet werden kann, muss der Brennstoffumsatz ausschließlich innerhalb des betrachteten Systems erfolgen. Aus dem System darf kein unverbrannter Brennstoff austreten und an anderen Stellen innerhalb der Anlage weiter reagieren. In solch einem Fall reicht die Beschreibung des Prozesses mit einem Einzonenmodell nicht mehr aus. Für die Beschreibung wird dann mindestens ein Zweizonenmodell benötigt. Für die Verwendung eines solchen Mehrzonenmodells ist es notwendig, die Übergangsbedingungen zwischen den Zonen zu definieren und die Leistungsströme zwischen den einzelnen Zonen zu erfassen.

2. Randbedingung: Stationarität

Für die Berechnung des Heizwertes aus der Leistungsbilanz muss sich die betrachtete Anlage in einem stationären Betriebszustand befinden. Zum Zeitpunkt der Berechnung dürfen keine Leistungsströme in einen „Leistungsspeicher“ fließen, da solche internen Ströme von dem

verwendeten System nicht berücksichtigt werden können. Erst wenn alle Speicherungsvorgänge abgeschlossen sind, kann der Heizwert nach dieser Methode berechnet werden.

3.5. Herleitung des Verfahrens

Als Basis für die Berechnung des Heizwertes dient die Verbrennungsrechnung. Die Verbrennungsrechnung für einen bekannten Brennstoff kann auf mindestens drei verschiedenen Wegen durchgeführt werden:

1. statistische Verbrennungsrechnung
2. exakte Verbrennungsrechnung
3. dimensionslose exakte Verbrennungsrechnung

Das Verfahren der statistischen Verbrennungsrechnung soll hier nicht verwendet werden und wird nicht weiter betrachtet. Für die exakte Verbrennungsrechnung wird die Elementaranalyse benötigt. Da diese hier nicht vorliegt, scheidet auch dieses Verfahren aus. Es bleibt die dimensionslose exakte Verbrennungsrechnung. Dabei handelt es sich um ein Verfahren der Verbrennungsrechnung, das von Boie entwickelt wurde [6]. Hierbei werden die Gleichungen zur Berechnung der Verbrennung auf den Kohlenstoffgehalt im Brennstoff bezogen. Durch die Verwendung der Bezugsgröße „Kohlenstoffgehalt“ lassen sich eine Reihe von dimensionslosen Kennzahlen ableiten, mit denen dann eine Verbrennungsrechnung durchgeführt werden kann. Mit Hilfe der Kennzahlen lässt sich die Verbrennungsrechnung auch von den Verbrennungsprodukten zum Brennstoff durchführen.

Mit der Annahme, dass für die meisten natürlichen Brennstoffe die Beziehung

$$\frac{v_{AG,tr,min}}{l_{min}} \approx 1 \quad (7)$$

gilt, kann ein Formelsatz hergeleitet werden, mit dem der Heizwert des verwendeten Brennstoffes näherungsweise bestimmt werden kann.

Für das Luftverhältnis λ gilt nach [6], Formel (5.6):

$$\lambda = 1 + \left(\frac{CO_{2,\max}}{CO_{2,mess}} - 1 \right) \cdot \frac{\nu_{AG,tr,min}}{l_{\min}} \quad (8)$$

Mit der in Gleichung (7) getroffenen Annahme vereinfacht sich die Gleichung (8), so dass das Luftverhältnis λ aus der trockenen Abgaskonzentration von CO_2 und dem berechneten $CO_{2,\max}$ -Wert bestimmt werden kann. Man erhält dann den folgenden vereinfachten Ausdruck:

$$\lambda = \frac{CO_{2,\max}}{CO_{2,mess}} \quad (9)$$

Mit diesem näherungsweise berechneten λ kann die näherungsweise Berechnung des Heizwertes durchgeführt werden. Der dafür benötigte Formelsatz wird nachfolgend allgemeingültig hergeleitet.

Mit dem Luftverhältnis und den im trockenen Abgas gemessenen Konzentrationen von CO_2 und O_2 kann nun der minimale Sauerstoffbedarf pro eingebrachten Kohlenstoff bestimmt werden. Diese Größe ist dimensionslos und wird in [6] mit σ bezeichnet. Aus der Gleichung (8.5) in [6] kann σ nach einer Umstellung zu der folgenden Gleichung bestimmt werden:

$$\sigma = \frac{O_2}{CO_2 \cdot (\lambda - 1)} \quad (10)$$

Für die weiteren Berechnungen zur Bestimmung des Heizwertes, wird die spezifische in die Anlage eingebrachte Luftmenge benötigt. Hierfür gilt:

$$l = \frac{\dot{L}}{\dot{m}_{BS}} \quad (11)$$

Dabei ist \dot{L} der Luftvolumenstrom und \dot{m}_{BS} der Brennstoffmassenstrom, der in die Anlage eingebracht wird. Für die Berechnung des Heizwertes müssen die Messwerte in den Normzustand umgerechnet werden.

Aus der spezifischen Luftmenge l aus Gleichung (11) und σ aus Gleichung (10) kann dann nach der Gleichung (6.3) aus [6] das spezifische CO_2 -Volumen bei der Verbrennung (K) berechnet werden. Die Ausgangsgleichung lautet:

$$l = 4,76 \cdot \lambda \cdot K \cdot \sigma \quad (12)$$

Nach der Umstellung nach K erhält man den Ausdruck:

$$K = \frac{l}{4,76 \cdot \lambda \cdot \sigma} \quad (13)$$

K ist das bei der Verbrennung entstehende spezifische CO_2 -Volumen. In der Verbrennungsrechnung wird das spezifische CO_2 -Volumen über den folgenden Ausdruck bestimmt [6]:

$$K = 1,867 \cdot c = v_{CO_2} \quad (14)$$

Nach [6], Formel (6.1) kann jetzt aus den bereits berechneten Werten der minimale spezifische Sauerstoffbedarf für den verwendeten Brennstoff ermittelt werden. Für o_{min} gilt:

$$o_{min} = K \cdot \sigma \quad (15)$$

Allgemein kann jetzt die minimale spezifische Luftmenge l_{min} mit Hilfe der Sauerstoffkonzentration in der Verbrennungsluft $y_{O2,Luft}$ berechnet werden:

$$l_{min} = \frac{o_{min}}{y_{O2,Luft}} \quad (16)$$

Für die Berechnung des Heizwertes des verwendeten Brennstoffes werden die Abgasvolumina benötigt. Bei den berechneten Abgasvolumina handelt es sich um spezifische Volumina, die auf die Brennstoffmasse bezogen werden.

Für das spezifische trockene Abgasvolumen $v_{AG,tr}$ erhält man aus der Definitionsgleichung für die CO_2 -Konzentration im trockenen Abgas den Ausdruck

$$v_{AG,tr} = \frac{v_{CO_2}}{CO_2} = \frac{K}{CO_2} \quad (17)$$

Mit dem so berechneten spezifischen trockenen Abgasvolumen kann jetzt das spezifische minimale trockene Abgasvolumen bestimmt werden. Den Ansatz hierfür liefert die Formel (5.11) aus [6]. Hier wird das (spezifische) „[...]“ trockene Abgasvolumen aus Sauerstoff-Messdaten [...]“ berechnet. Dabei wird

$$v_{AG,tr} = v_{AG,tr,min} \cdot \frac{O_{2,Luft}}{O_{2,Luft} - O_2} \quad (18)$$

nach $v_{AG,tr,min}$ umgestellt und man erhält den Ausdruck:

$$v_{AG,tr,min} = \frac{v_{AG,tr}}{\frac{O_{2,Luft}}{O_{2,Luft} - O_2}} \quad (19)$$

Für die Berechnung der Stoffwerte im Abgas wird das spezifische Volumen des feuchten Abgases benötigt, in das das spezifische Volumen des Wasserdampfes im Abgas eingeht. Für die Bestimmung müssen simultan die Sauerstoffkonzentrationen im „feuchten“ und im „trockenen“ Abgas gemessen werden, gilt für v_{H_2O} nach [6], Formel (5.15):

$$v_{H_2O} = v_{AG,tr,min} \cdot \frac{O_2 - O_2^*}{O_2^*} \quad (20)$$

Zusammen mit dem spezifischen trockenen Abgasvolumen ergibt sich damit das spezifische (feuchte) Abgasvolumen zu

$$v_f = v_{AG,tr} + v_{H_2O} \quad (21)$$

Damit stehen jetzt alle benötigten Daten zur Bestimmung des Heizwertes des verwendeten Brennstoffes zur Verfügung.

Herleiten der Berechnungsgleichung:

Für die Berechnung des Heizwertes wird nachfolgend das System „Reaktor“ betrachtet. Hierbei handelt es sich um ein stationär durchströmtes System. Es besteht aus der fluidisierten Schicht. Innerhalb der Wirbelschicht erfolgt der gesamte Energieumsatz. Es liegt voraussetzungsgemäß keine Nachverbrennung im Freeboard vor.

Der Bilanzkreis mit den relevanten Energieströmen ist in Abbildung 10 dargestellt. Ein vergleichbarer Bilanzkreis wird in [49] zur Berechnung der adiabaten Verbrennungstemperatur eingeführt. Bei der SWSF Rostock handelt es sich um ein reales System. Daher wird bei der Systembetrachtung ein Term zur Beschreibung der Verluste eingeführt. Hierbei handelt es sich um Wärmeverluste über die Reaktorwandung. Wirbelschichtfeuerungen werden zur Umwandlung und Bereitstellung von Energie verwendet. Dazu wird Nutzleistung aus dem System ausgekoppelt (z.B. über Tauchheizflächen). Zur Beschreibung dieses Vorganges wird die Leistungsbilanz um einen Term für Nutzleistung ergänzt.

Aus der Abbildung 10 kann die folgende Leistungsbilanz aufgestellt werden:

$$\dot{Q}_{BS,1} + \dot{Q}_{BS,2} + \dot{Q}_L + \dot{Q}_{ADD_s} + \dot{Q}_{ADD_{lq}} - \dot{Q}_{D0} - \dot{Q}_{D1} - \dot{Q}_{D2} - \dot{Q}_{AG} - \dot{Q}_A - \dot{Q}_V - \dot{Q}_N = 0 \quad (22)$$

In Gleichung (22) werden die Terme aus der Abbildung 10 eingefügt. Die Bezugstemperatur soll $\vartheta_B = 0^\circ\text{C}$ betragen. Dadurch können in den Termen zur Leistungsberechnung die gemessenen Celsius-Temperaturen direkt verwendet werden. Danach wird die Gleichung vereinfacht und nach der energetischen Brennstoffleistung umgestellt.

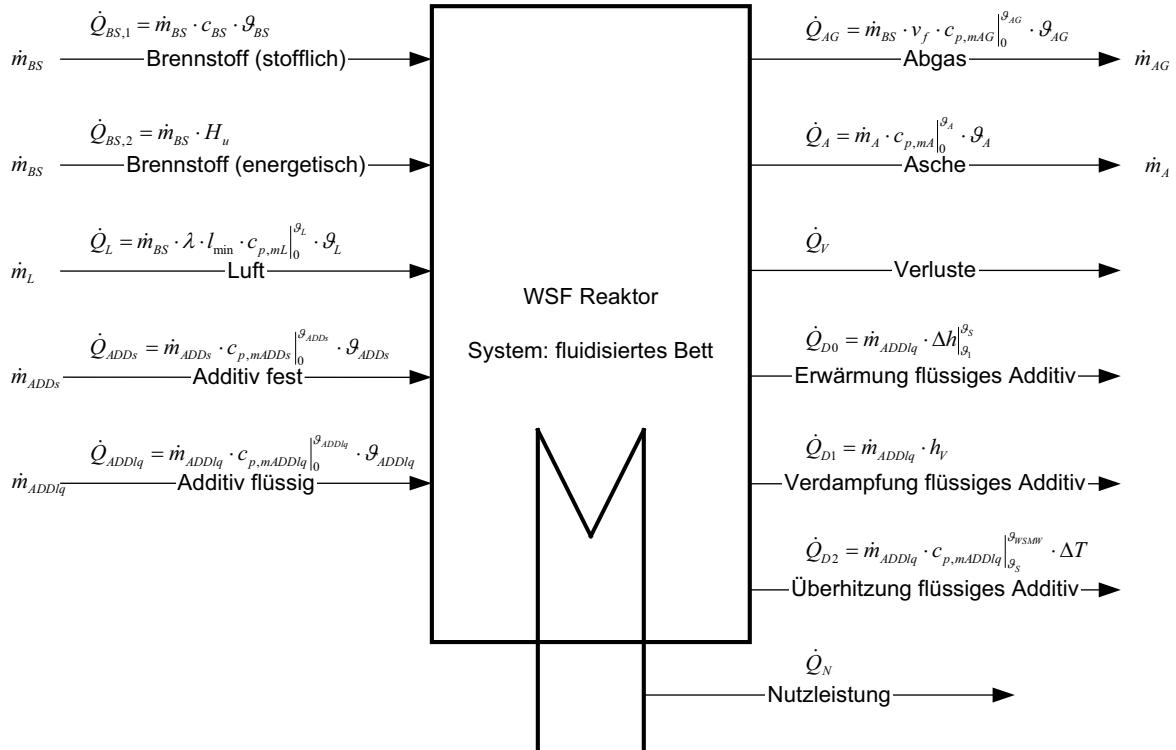


Abbildung 10: Betrachtetes System (schematisch)

Man erhält damit den folgenden Ausdruck:

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{BS} \cdot H_u = & \\
 - \dot{m}_{BS} \cdot c_{BS} \cdot \vartheta_{BS} - \dot{m}_{BS} \cdot \lambda \cdot l_{\min} \cdot c_{p,m,L} \cdot \vartheta_L - \dot{m}_{ADDs} \cdot c_{p,m,ADDs} \cdot \vartheta_{ADDs} - & \\
 \dot{m}_{ADDlq} \cdot c_{p,m,ADDlq} \cdot \vartheta_{ADDlq} + & \\
 \dot{m}_{ADDlq} \cdot \Delta h + \dot{m}_{ADDlq} \cdot \Delta h_V + \dot{m}_{ADDlq} \cdot c_{p,m,ADDlq} \cdot \Delta T + & \\
 \dot{m}_{BS} \cdot v_f \cdot c_{p,m,AG} \cdot \vartheta_{AG} + \dot{m}_A \cdot c_{p,m,A} \cdot \vartheta_A + \dot{Q}_V + \dot{Q}_N &
 \end{aligned} \tag{23}$$

Für die Simulationsrechnung und die Programmierung im Betriebsprogramm der SWSF werden die Polynome aus [49] zur Berechnung der Enthalpie der einzelnen Komponenten verwendet. Daher wird die Gleichung (23) so umgeformt, dass dort die Enthalpien verwendet werden. Weiterhin wird an der Anlage der Wirbelluftvolumenstrom direkt gemessen. Der Messwert wird ebenfalls eingesetzt:

$$\begin{aligned}
 & \dot{m}_{BS} \cdot H_u = \\
 & -\dot{m}_{BS} \cdot c_{BS} \cdot \vartheta_{BS} - && \text{Summand 1} \\
 & \dot{V}_{WL} \cdot h_{WL} - && \text{Summand 2} \\
 & \dot{m}_{ADDs} \cdot c_{pm,ADDs} \cdot \vartheta_{ADDs} - && \text{Summand 3} \\
 & \dot{m}_{ADDlq} \cdot c_{pm,ADDlq} \cdot \vartheta_{ADDlq} + && \text{Summand 4} \\
 & \dot{m}_{ADDlq} \cdot \Delta h + && \text{Summand 5} \\
 & \dot{m}_{ADDlq} \cdot \Delta h_V + && \text{Summand 6} \\
 & \dot{m}_{ADDlq} \cdot c_{pm,ADDlq} \cdot \Delta T + && \text{Summand 7} \\
 & \dot{m}_{BS} \cdot v_f \cdot h_{AG} + && \text{Summand 8} \\
 & \dot{m}_A \cdot c_{pm,A} \cdot \vartheta_A + && \text{Summand 9} \\
 & \dot{Q}_V + && \text{Summand 10} \\
 & \dot{Q}_N && \text{Summand 11}
 \end{aligned} \tag{24}$$

Die Summanden 2 (Luft) und 8 (Abgas) werden mit den oben berechneten Größen bestimmt. Es werden Bestimmungsgleichungen für die Summanden 1, 3, 4, 5, 6, 7, 9 und 10 benötigt.

Summand 1: Wärmeinhalt des Brennstoffes

Der Wärmeinhalt des verwendeten Brennstoffes kann bei einem unbekannten Brennstoff nicht in Echtzeit bestimmt werden. Hierfür wird die spezifische Wärmekapazität des Brennstoffes benötigt, die wie der betrachtete Brennstoff unbekannt ist. Bei bekannten gasförmigen Brennstoffen kann dieser Wert aus der Zusammensetzung und der Brennstofftemperatur berechnet werden. Für feste/ flüssige Brennstoffe kann für die spezifische Wärmekapazität ein (z.B. vom Wasseranteil im Brennstoff abhängiger) Ersatzwert angenommen werden. Bei den vorliegenden Berechnungen soll jedoch der Heizwert eines unbekannten Brennstoffes bestimmt werden. Es liegen also keine a priori Informationen über dessen Zusammensetzung vor.

Zur Lösung dieses Problems werden die Brennstoffe in zwei Gruppen unterteilt: heizwertreiche Brennstoffe und heizwertarme Brennstoffe. Heizwertreiche Brennstoffe sind die „klassischen“ für die Energiebereitstellung verwendeten Brennstoffe wie Erdgas, Öl und Kohle. Heizwertarme Brennstoffe sind Brennstoffe, die erst in neuerer Zeit für die Energiebereitstellung verwendet werden wie nachwachsende biogene Brennstoffe, Müll oder heizwertarme Gase. Beide Gruppen werden innerhalb der Energiebilanz unterschiedlich behandelt.

Heizwertreiche Brennstoffe:

Für die Bewertung des Einflusses des Wärmeinhaltes wird dieser mit dem Heizwert verglichen. Die notwendigen Berechnungen finden sich in der Tabelle 5. Es werden exemplarisch die Brennstoffe Erdgas und Heizöl extra leicht (H-EL) betrachtet. Beide Brennstoffe werden mit und ohne Vorwärmung untersucht.

Tabelle 5: Brennstoffwärmen edler Brennstoffe

Nr.	Brennstoff	Heizwert	spezifische Wärme-kapazität	Brennstoff-temperatur	spez. Enth. eingetr.	Verhältnis
		kJ/ kgBS	kJ/ kg K	°C	kJ/ kgBS	%
1.	H EI	42700	2,07	25	51,75	0,12
2.	H EL	42700	2,07	150	310,50	0,73
3.	Erdgas	45360	1,97	25	49,26	0,11
4.	Erdgas	45360	2,39	300	717,28	1,58

Die bei beiden Brennstoffen verwendeten Vorwärmungen sind aus üblichen Vorwärmtemperaturen ausgewählt.

Es zeigt sich, dass bei beiden Brennstoffen selbst bei der Brennstoffvorwärmung das Verhältnis Brennstoffwärme zu Heizwert (Spalte „Verhältnis“) deutlich unter 2 % liegt. Man kann also bei der Verwendung von Brennstoffen dieser Gruppe die mit dem Brennstoff eingetrage-ne Brennstoffwärme bei der Bilanzierung zur Berechnung des Heizwertes vernachlässigen. Der dabei entstehende Fehler wird in dem Näherungsverfahren zur Brennstoffidentifikation billigend in Kauf genommen. Die Vorwärmung wird in der Tabelle nur zur theoretischen Ab-schätzung der Brennstoffwärme eingeführt. Bei der Verwendung eines solchen edlen Brennstoffes, ist es nicht notwendig, ihn vorzuwärmen.

Heizwertarme Brennstoffe:

Die Brennstoffe dieser Gruppe weisen einen deutlich kleineren Heizwert auf als die Brennstoffe der vorherigen Gruppe. Für die Bilanzierung des Systems kann hier die Brennstoffwärme nicht vernachlässigt werden. Bei der Verwendung von Brennstoffen dieser Gruppe wird die Brennstoffwärme besonders bei gasförmigen Brennstoffen gezielt erhöht (Vorwärmung), um die Verbrennung des Brennstoffes zu ermöglichen. Da bei dem Verfahren zur Brennstoffidentifikation keine a priori Informationen über den verwendeten Brennstoff vorliegen, wird für die Bilanzierung mit gemittelten spezifischen Wärmekapazitäten gearbeitet. Die Unterscheidung erfolgt nach dem Aggregatzustand des Brennstoffes. Für jeden Aggregat-

zustand wird dabei aus den tabellierten Wärmekapazitäten bekannter Brennstoffe ein Mittelwert gebildet. Dieser Mittelwert wird dann für die überschlägige Berechnung der Brennstoffwärme verwendet. Eine solche „ungenaue“ Methode kann für ein Näherungsverfahren, wie das beschriebene, verwendet werden. Das Verfahren erhebt nicht den Anspruch, den Heizwert eines unbekannten Brennstoffes bis auf den tabellierten Wert bestimmen zu können.

Für die festen und flüssigen Brennstoffe werden für die Mittelung die spezifischen Wärmekapazitäten aus [24] entnommen. Mit diesen Werten erhält man nach der Mittelwertbildung die in Tabelle 6 dargestellten Ergebnisse. Die Randbedingungen für die ursprünglichen Quellenwerte lauten dabei: $0 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \vartheta_{BS} \leq 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und $p_{BS} = 1,0123 \text{ bar}$.

Tabelle 6: spezifische Wärmekapazitäten

Nr.	Brennstoffgruppe	spezifische Wärme-kapazität kJ/ kgK
1.	feste heizwertarme Brennstoffe	1,62
2.	flüssige heizwertarme Brennstoffe	2,11

Mit Hilfe dieser Werte kann der Wärmeeintrag der festen und flüssigen Brennstoffe näherungsweise in der Bilanzgleichung berücksichtigt werden.

Für die heizwertarmen Gase wird ebenfalls ein Ersatzwert für die spezifische Wärmekapazität ermittelt. Dabei wird mit einer „Ersatzgasmischung“ aus Methan und Stickstoff gearbeitet. Zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität wird die Gasmischung in verschiedenen Zusammensetzungen und bei verschiedenen Vorwärmtemperaturen untersucht.

Tabelle 7: Spezifische Wärmekapazität des „Ersatzgases“

Nr.	Gasmischung		Vorwärm-temperatur	spezifische Enthalpie	Dichte der Gas-mischung	spezifische Enthalpie	spezifische Wärme-kapazität d. Gas-mischung
	CH ₄	N ₂					
	m ³ _N CH ₄ / m ³ _N BG	m ³ _N N ₂ / m ³ _N BG	°C	kJ/ m ³ _N BG	kg/ m ³ _N BG	kJ/ kgBG	kJ/ kgBG K
1.	0,20	0,80	100	136,67	1,1439	119,48	1,19
2.	0,20	0,80	200	278,76	1,1439	243,69	1,22
3.	0,20	0,80	300	427,25	1,1439	373,51	1,25
4.	0,15	0,85	100	134,88	1,1706	115,23	1,15
5.	0,15	0,85	200	274,05	1,1706	234,12	1,17
6.	0,15	0,85	300	418,44	1,1706	357,47	1,19
7.	0,10	0,90	100	133,09	1,1972	111,17	1,11
8.	0,10	0,90	200	269,34	1,1972	224,98	1,12
9.	0,10	0,90	300	409,62	1,1972	342,15	1,14
						MW	1,17

Für die Berechnung einer mittleren spezifischen Wärmekapazität des betrachteten Ersatzgases werden Mischungen von 20 Vol% CH₄/ 80 Vol% N₂ bis 10 Vol% CH₄/ 90 Vol% N₂ untersucht. Dabei wird das Gas im Bereich ϑ_{BG} 100...300 °C vorgewärmt. In der Tabelle 7 werden die Ergebnisse dieser Berechnungen dargestellt. Es zeigt sich, dass die mittlere spezifische Wärmekapazität des Ersatzgases im Bereich von c_{pmBG} 1,25...1,11 kJ/ kgBG K liegt. Die Mittelung ergibt einen Wert von c_{pmBG} 1,17 kJ/ kgBG K.

Mit den hier ermittelten Werten für die spezifische Wärmekapazität kann der Wärmeinhalt des verwendeten Brennstoffes näherungsweise bestimmt werden. In den Berechnungsalgorithmen des Prozessleitprogramms und in der Versuchsauswertung werden Kriterien für die Umschaltung zwischen dem heizwertreichen und heizwertarmen Brennstoff und zwischen den Aggregatzuständen benötigt.

Zur Unterscheidung der Aggregatzustände werden die gewählten Brennstoffeinräger verwendet. Diese Unterscheidung kann bei allen Brennstoffen angewendet werden. Für die Unterscheidung der heizwertarmen und reichen Brennstoffe werden unterschiedliche Kriterien herangezogen:

Bei gasförmigen Brennstoffen erfolgt die Unterscheidung über die Brennstofftemperatur vor dem Eintritt in die SWSF. Liegt diese oberhalb von $\vartheta_{BG} \geq 100$ °C, dann wird der Brennstoff erwärmt. Da diese Praxis nur bei heizwertarmen Brennstoffen angewendet wird, muss die

Brennstoffwärme in der Bilanzierung berücksichtigt werden. Die Unterscheidung des Brennstoffes kann durch das Prozessführungssystem getroffen werden.

Für die festen und flüssigen Brennstoffe kann diese Entscheidung nicht durch das Prozessführungssystem getroffen werden. Brennstoffe dieser Gruppe werden im allgemeinen nicht vorwärmt. Hier muss eine Entscheidung durch den Anlagenfahrer getroffen werden. Zusätzlich zu dem auszuwählenden Brennstoffförderer muss der Brennstoff eingeteilt werden (heizwertarm/ -reich).

Die möglichen auftretenden Fälle werden in der folgenden Tabelle noch einmal zusammenfasst:

Tabelle 8: Fallunterscheidung Summand 1 Bilanzgleichung

Nr.	Brennstoff	Unterscheidung	Aggregatzustand	Unterscheidung	Berücksichtigung in Bilanzgleichung
1.	heizwertreich		gasförmig	gewählter Förderer	nein
2.	heizwertreich		fest/ flüssig	gewählter Förderer	nein
3.	heizwertarm	Vorwärmtemperatur	gasförmig	gewählter Förderer	ja
4.	heizwertarm	manuell	fest/ flüssig	gewählter Förderer	ja

Summand 3: Wärmeinhalt des festen Additivs

Für die Bilanzierung der mit einem festen Additiv in das betrachtete System eingetragenen Leistung werden die spezifische Wärmekapazität c_{pmADDs} und die Temperatur des Additivs beim Eintritt in das System benötigt. Zusammen mit dem Massenstrom des Additivs ergibt sich die eingeschleppte Leistung. Die benötigten Werte können vor der Verwendung bestimmt werden. Für die während der Versuchsläufe verwendeten Additive wird zunächst eine mittlere spezifische Wärmekapazität von $c_{pmADDs} = 1,1 \text{ kJ/ kgK}$ angenommen. Als Eintrittstemperatur wird die im Technikum herrschende Temperatur von $\vartheta_U = 25^\circ\text{C}$ verwendet. Der benötigte Massenstrom wird während der Versuche durch Wägung ermittelt.

Summand 4: Wärmeinhalt des flüssigen Additivs

Dieselben Werte, die für die Bilanzierung des festen Additivs benötigt werden, werden auch für die Bilanzierung des flüssigen Additivs benötigt. Dabei kann es sich bei dem flüssigen Additiv sowohl um ein echtes Additiv zur Reduzierung eines Schadstoffes in den Rauchgasen

eines Brennstoffes handeln (z.B. Ammoniakwasser) oder um flüssige Schadstoffe ohne eigenen Heizwert, die lediglich mit verbrannt werden (z.B. Sickerwasser). Der wesentliche Bestandteil dieser flüssigen Additive ist zunächst Wasser. Dementsprechend wird die spezifische Wärmekapazität mit $c_{pmADDlq} = 4,18 \text{ kJ/ kgK}$ angenommen (Wert für Wasser bei $\vartheta = 20^\circ\text{C}$). Für alle weiteren Berechnungen mit flüssigem Additiv werden ebenfalls die entsprechenden Werte für Wasser verwendet. Die Temperatur der flüssigen Additive ergibt sich aus einer Messung während des Versuches.

Summand 5: Leistung zum Erwärmten des flüssigen Additivs bis zur Siedelinie

Das eingebrachte flüssige Additiv wird im Verlauf seiner Verwendung zunächst bis zur Siedetemperatur erwärmt (Summand 5), dann verdampft (Summand 6) und danach der Dampf auf die Temperatur des Wirbelbettes überhitzt (Summand 7). Unter der Annahme, dass die verwendeten Additive hauptsächlich auf Wasser basieren, kann für die Berechnung der Erwärmungsleistung die Näherungsformel zur Berechnung der Enthalpie von Wasser aus [49] herangezogen werden. Mit der Enthalpiedifferenz und dem Massenstrom des flüssigen Additivs steht die benötigte Leistung zur Erwärmung des Additivs zur Verfügung.

Summand 6: Leistung zum Verdampfen des flüssigen Additivs

Die Verdampfungsleistung des flüssigen Additivs ergibt sich aus dem Massenstrom des flüssigen Additivs und der Verdampfungsenthalpie von Wasser ($h_V = 2256,9 \text{ kJ/ kg}$ [55]) bei einem Druck von $p_{abs} = 1,013 \text{ bar}$ und einer Verdampfungstemperatur von $\vartheta = 100^\circ\text{C}$.

Summand 7: Leistung zum Überhitzen des Dampfes des flüssigen Additivs

Nachdem das flüssige Additiv verdampft wurde, wird der Dampf innerhalb der Wirbelschicht bis auf die Wirbelschichttemperatur überhitzt. Für die Berechnung der Überhitzungsleistung des Dampfes des flüssigen Additivs werden Näherungsformeln aus [49] verwendet. Mit Hilfe der Ausdrücke kann die spezifische Wärmekapazität für einen bestimmten Temperaturbereich berechnet werden. Zusammen mit der Temperaturdifferenz von Wirbelschichttemperatur und Siedetemperatur des Additivs ergibt sich dann die benötigte Überhitzungsleistung. Für die Berechnungen wird erneut der Massenstrom des flüssigen Additivs verwendet.

Summand 9: Mit der ausgetragenen Asche abgeführte Leistung

Mit der Asche wird aus dem System ebenfalls Leistung abgeführt. Unter Asche wird hier eine Mischung aus der Brennstoffasche, die bei der thermischen Umsetzung des Brennstoffes freigesetzt wird, und Staub aus zerriebenem Bettmaterial verstanden. In der Asche kann sich z.B. auch Gips aus einer in situ Entschwefelung befinden. Die Leistung ergibt sich aus dem Massenstrom der Asche und der Enthalpie der ausgetragenen Asche. Der Massenstrom wird im Versuch durch die Entaschung des Zylinders der SWSF und Wägung ermittelt. Für die spezifische Wärmekapazität wird ein Mittelwert aus den spezifischen Wärmekapazitäten der wesentlichen Aschenbestandteile verwendet. In [24] findet man die folgenden Tabellenwerte für die Aschebestandteile:

Tabelle 9: Spezifische Wärmekapazität Asche

Nr.	Bezeichnung	spezifische Wärme- kapazität kJ/kg K
1.	Gips	1,10
2.	Sand	0,80
3.	Kalkstein	0,91
	MW	0,94

Um die spezifische Wärmekapazität physikalisch richtig zu ermitteln, müssen die Werte der einzelnen Komponenten mit dem Massenanteil der einzelnen Komponenten an der Gesamtasche gewichtet werden. Da eine Untersuchung der Asche während des Betriebes nicht möglich ist, wird im Folgenden mit einer mittleren spezifischen Wärmekapazität von $c_{pmA} = 1 \text{ kJ/kg K}$ gerechnet.

Summand 10: Verlustleistung

Für die Bestimmung der Verlustleistung der SWSF wird zunächst ein technisch exakter Lösungsweg gewählt. Für die Berechnung der Verlustleistung wird der Wärmedurchgang durch die Grenzen des Bilanzkreises bestimmt.

Als Ansatz hierfür wird die Gleichung für den Wärmestrom

$$\dot{Q}_V = \sum (k \cdot A \cdot \Delta T) \quad (25)$$

verwendet.

Die Parameter Wärmedurchgangskoeffizient k und die Oberfläche A des betrachteten Systems werden aus den Konstruktionsunterlagen ermittelt. Die Verlustleistung ergibt sich damit zu der Funktion $\dot{Q}_v = f(\Delta T)$. Die Funktion wird in dieser Form in den ersten Simulationsrechnungen und Versuchen an der SWSF verwendet.

Bei der Erprobung des Berechnungsweges in Simulationsrechnungen ergeben sich unter Verwendung der abgeleiteten Funktion für die Verlustleistung gute Ergebnisse für die Berechnung des Heizwertes des verwendeten Brennstoffes.

Bei den Versuchsauswertungen zeigt sich, dass die verwendete Funktion für die Verlustleistung nicht den realen Verhältnissen an der Anlage entspricht. Es werden Verlustleistungen berechnet, die deutlich unter den wahren Werten liegen.

Im Rahmen der Versuchsauswertung wird daher die Verlustleistung der SWSF Rostock anhand eines bekannten Brennstoffes ermittelt. Hierfür wird Erdgas der Stadtwerke Rostock verwendet. Für diesen Brennstoff liegt die Analyse am Institut vor [48].

Zur Bestimmung der Verlustleistung werden reale Betriebspunkte betrachtet. Ein solcher Betriebspunkt ist für einen gasförmigen Brennstoff durch die folgenden Werte gekennzeichnet:

- Brennstoff (Analyse, Heizwert)
- Temperatur der eintretenden Wirbelluft
- Temperatur des eintretenden Brenngases
- Reaktionsumsatz im SWSF-Reaktor
- Volumenstrom des Brenngases
- Temperatur und Zusammensetzung des entstehenden Abgases

Anhand dieser Daten werden über Modellrechnungen die zugeführten und die abgeführten spezifischen Enthalpien bestimmt. Aus der Differenz der spezifischen Enthalpien und der durch den Volumen-/Massenstrom bei der Betriebstemperatur der Wirbelschicht zugeführten Brennstoffenergie ergibt sich die Verlustleistung der Anlage. Für die so ermittelte Verlustleistung können jetzt die wichtigsten Einflussgrößen bestimmt werden.

Tabelle 10: Berechnung der Verlustleistung

Nr.	V_{WL}°	V_{WL}°	V_{BG}°	h_{zu}	h_{ab}	$\Delta h = h_{ab} - h_{zu}$	P_V
	$m^3 \text{ Luft/ h}$	$m_N^3 \text{ Luft/ h}$	$m_N^3 \text{ BG/ h}$	$\text{kJ/ } m^3 \text{ N BG}$	$\text{kJ/ } m^3 \text{ N BG}$	$\text{kJ/ } m^3 \text{ N BG}$	kW
1.	107	134	5,4	38392	29430	8962	13,44
2.	123	155	4,9	52976	39916	13060	17,78
3.	116	146	4,2	55194	43691	11503	13,42
4.	119	153	4,7	52903	40801	12102	15,80
5.	100	131	3,8	54607	43073	11534	12,18
6.	115	148	4,4	54084	42083	12002	14,67
7.	140	177	5,3	53963	41799	12165	17,91
8.	173	215	6,2	54956	43314	11642	20,05

Die Tabelle 10 zeigt die Ergebnisse der Verlustleistungsberechnung. Die Verlustleistung wird am deutlichsten von dem Wirbelluftvolumenstrom $\dot{V}_{WL,N}$ beeinflusst.

Aus den in Tabelle 10 ermittelten Verlustleistungen wird eine Funktion der Form $\dot{Q}_V = f(\dot{V}_{WL,N})$ erstellt. Mit einem polynomischen Ansatz 2. Ordnung erhält man aus dem vorliegenden Datenmaterial für die Verlustleistung die Funktion:

$$\dot{Q}_V = -0,0011 \cdot \dot{V}_{WL,N}^2 + 0,4844 \cdot \dot{V}_{WL,N} - 31,3 \quad (26)$$

Diese Funktion bildet die Verlustleistung der SWSF Rostock als eine Funktion der wichtigsten Einflussgröße ab (Wirbelluftvolumenstrom). Sie wurde aus den Messwerten von Versuchsfahrten bei der Standard-Betriebstemperatur von $\vartheta_{WS} = 860 \text{ }^{\circ}\text{C}$ approximiert. Dabei wurde ein polynomischer Ansatz 2. Ordnung gewählt, der die wahren physikalischen Verhältnisse an der Anlage befriedigend widerspiegelt. In der Funktion wird nur der Wirbelluftvolumenstrom berücksichtigt. Die wesentliche Triebkraft für das Auftreten von Verlustleistungen im Bereich des betrachteten Systems ist die Temperaturdifferenz zwischen dem fluidisierten Bett und der Umgebung. Um diesen wesentlichen Einfluss bei der Berechnung der Verlustleistung mit einzubeziehen, wird die Funktion um einen Korrekturfaktor erweitert:

$$\dot{Q}_V = \left(-0,0011 \cdot \dot{V}_{WL,N}^2 + 0,4844 \cdot \dot{V}_{WL,N} - 31,3 \right) \cdot \frac{\vartheta_{WS} - \vartheta_U}{\vartheta_{WSSOLL} - \vartheta_U} \quad (27)$$

Mit der Funktion werden die Simulationen und die Versuchsauswertungen erneut berechnet. Es zeigt sich, dass die Verlustleistungen nun in Bereichen liegen, die sich auch mit Hilfe der spezifischen Enthalpien bestimmen lassen. Eine Gegenüberstellung der Werte findet sich in der Tabelle 11.

Tabelle 11: Vergleich der Verlustleistungen

Nr.	P _V (Enth.)		P _V (Funkt.)	
	kW	kW	kW	kW
1.	12,18		13,28	
2.	13,42		15,92	
3.	13,44		12,81	
4.	14,67		16,30	
5.	15,80		17,06	
6.	17,78		17,27	
7.	17,91		19,98	
8.	20,05		22,00	

Der hier gewählte Ansatz eines Polynoms zweiten Grades mit einem Korrekturfaktor ist ein erster Versuch zur Beschreibung der Verlustleistung. In wieweit sich die Verlustleistung durch ein Polynom höheren Grades oder einen anderen Ansatz genauer beschrieben ließe, muss noch untersucht werden.

Summand 11: Nutzleistung

Das Verfahren der Brennstofferkennung wird hier allgemeingültig hergeleitet. Für eine gewerblich genutzte SWSF ergeben sich zwei Aufgaben: die Beseitigung von Problemstoffen und die Bereitstellung von Energie/ Nutzleistung (Strom, Prozesswärme). Daher wird in die Leistungsbilanz ein Term für die Nutzleistung eingeführt.

An der SWSF Rostock wird die Nutzbarkeit von verschiedenen Brennstoffen untersucht. Dabei ist es nicht notwendig, Nutzleistung aus der Anlage auszukoppeln. Daher wird der Nutzleistungsterm für die meisten Versuche

$$\dot{Q}_N = 0 \quad (28)$$

gesetzt. Eine Ausnahme bilden hier die jüngsten Versuche zur in situ Reduzierung von Stickoxiden. Hierbei werden flüssige Additive in den Reaktor eingedüst. Damit die dafür verwendete Eintragslanze keinen Schaden durch die Temperatur im Wirbelbett nimmt, wird die Lan-

ze mit Wasser gekühlt. Diese Wasserkühlung entspricht einer Auskopplung von Nutzleistung mit Hilfe von Tauchheizflächen aus dem Wirbelbett. Die dabei ausgekoppelte Leistung wird durch den Massenstrom des Kühlwassers und den Temperaturanstieg berechnet und direkt in der Leistungsbilanz verwendet.

Anpassung der Kennlinie des Eintragssystems für feste Brennstoffe

Bei der Gleichung (25) handelt es sich um die Leistungsbilanz des betrachteten Systems. In die Leistungsbilanz geht der Brennstoffmassenstrom \dot{m}_{BS} ein. Zur Bestimmung des Brennstoffmassenstromes werden die Kennlinien der an der SWSF Rostock verwendeten Eintragsvorrichtungen aufgenommen und als Funktionen hinterlegt ($\dot{m}_{BS} = f(f_{E\text{intr.}})$). Bei der Verwendung von festen Brennstoffen ergibt sich das Problem, dass theoretisch für jeden neuen Brennstoff eine neue Förderkennlinie aufgenommen werden muss. Dieses Problem kann durch die Anpassung der Kennlinie des Schneckenförderers beseitigt werden. Nach der Gleichung

$$\dot{m}_{BS1} = \frac{\rho_1}{\rho_0} \cdot a \cdot f \quad (29)$$

aus [4] lässt sich der Massenstrom eines unbekannten festen Brennstoffes aus der Schüttdichte der beiden Brennstoffe berechnen.

Diese Gleichung wird für die Nachrechnung der Versuche verwendet. Für die Berechnung des Massenstromes muss lediglich die Schüttdichte des neuen Brennstoffes bekannt sein. Diese kann einfach über Mensur und Waage bestimmt werden.

Über den hier dargestellten Weg kann der Heizwert des verwendeten Brennstoffes aus den an der SWSF durchgeführten Messungen in Echtzeit ermittelt werden. Damit stehen für die Brennstoffeinordnung die beiden Größen CO_{2max} und H_U zur Verfügung.

3.6. Simulation des Identifikationsverfahrens/ Erkennungsverfahrens

Bevor das Verfahren zur Brennstoffidentifikation am „heißen“ Prozess erprobt wird, wird rechnergestützt abgeschätzt, ob das Verfahren verwendbare Ergebnisse liefern wird. Für diese Abschätzung wird ein „Kreisverfahren“ programmiert, mit dem im Hinweg eine Verbrennungsrechnung für einen bekannten Brennstoff durchgeführt wird. Mit den Ergebnissen der Verbrennungsrechnung wird dann im Rückweg die Brennstoffidentifikation durchgeführt.

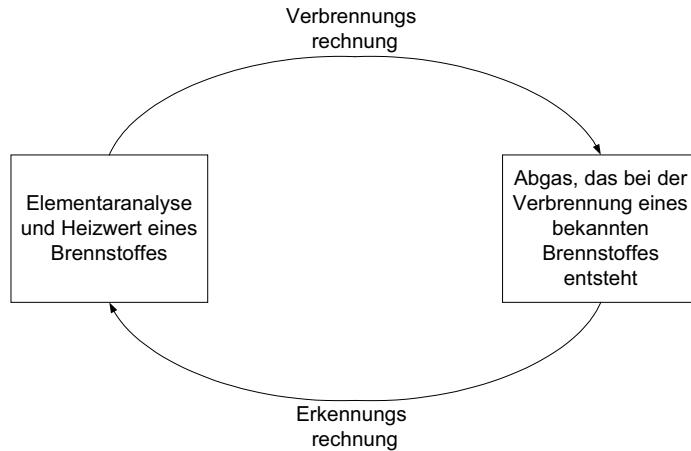


Abbildung 11: Darstellung „Kreisverfahren“

Solche Simulationsrechnungen sind Stand der Technik. Sie werden immer dann verwendet, wenn Experimente am realen Objekt zu teuer, zu zeitaufwendig oder zu gefährlich sind [37]. Darüber hinaus können mit dem Mittel der Simulationsrechnung verschiedene Lösungsansätze kostengünstig und schnell auf ihre Anwendbarkeit untersucht werden. Auf diese Weise kann vor dem eigentlichen Experiment eine Vorauswahl getroffen werden.

Unter diesen Gesichtspunkten wird das Verfahren zur Brennstoffidentifikation von dem Einsatz an der SWSF rechnerisch untersucht. Hierbei werden Probleme des Verfahrens identifiziert und beseitigt.

Für die Verfahrenssimulation wird eine MS-Excel Mappe erstellt. Dabei werden sowohl die normalen mathematischen Funktionen genutzt als auch die Möglichkeiten der Programmiersprache Visual Basic for Applications (VBA). MS-Excel gehört zwar nicht zu den in der Simulationstechnologie eingeführten Systemen, wie MATLAB® & SIMULINK von The Mathworx Inc., bietet aber mit seinen Berechnungs- und Programmiermöglichkeiten eine ausreichende Basis, um das SWSF-System nachzubilden.

Die Tabelle setzt sich aus verschiedenen Tabellenblättern zusammen, die im Anhang 9.3 aufgelistet werden.

Mit Hilfe dieser Tabelle werden Simulationsrechnungen zur Bestimmung des verwendeten Brennstoffes durchgeführt. Dabei geht man folgendermaßen vor:

1. Eintragen der Brennstoffkenngrößen: Elementaranalyse/ Analyse, Heizwert aus Laboranalyse
2. Eintragen der konstruktiven Daten der betrachteten SWSF: Geometrie, Werkstoffe
3. Eintragen der Prozessrandbedingungen: Wirbelluftvolumenstrom, Lufttemperatur, Brennstofftemperatur, Solltemperatur, Startwert für Brennstoffmassenstrom
4. Berechnen des notwendigen Brennstoffmassenstroms
5. Auswerten der Ergebnisse, insbesondere der Ergebnisse zur Brennstofferkennung

Für die theoretische Verfahrensüberprüfung wurden Brennstoffe, von denen die Elementaranalysen/ Analysen am Lehrstuhl vorliegen, ausgewertet. Bei den meisten Brennstoffen handelt es sich um Sonderbrennstoffe, die im Rahmen von Verwendbarkeitsuntersuchungen am Lehrstuhl verwendet wurden.

Für die Verfahrenssimulation wurden für alle Brennstoffe die gleichen Prozessbedingungen gewählt. Hierbei ist zu beachten, dass insbesondere die Solltemperatur der Wirbelschicht bei der realen Verbrennung Begrenzungen durch die Brennstoffeigenschaften unterliegt. So muss sie immer unterhalb der Ascheerweichungstemperatur des Brennstoffes liegen, da es sonst zu Verbackungen innerhalb der SWSF kommt. Ein ordnungsgemäßer Betrieb ist dann nicht mehr möglich.

Tabelle 12: Übersicht Brennstoffe der Simulationsrechnung

Nr.	Brennstoff	Nr.	Brennstoff
1.	BRAM	31.	Kaffee Häutchen
2.	Crambeöl	32.	Kaffee Häutchen, pelletiert
3.	Erdgas Brandenburg 1	33.	Kakaoschoten
4.	Erdgas Brandenburg 2	34.	Klärschlamm Eurawasser
5.	Erdgas Brandenburg 3	35.	Klärschlamm Homs
6.	Erdgas Brandenburg 3	36.	Kompostierungs Rückstand Güstrow
7.	Erdgas Brandenburg 4	37.	Leindotter Pellets
8.	Erdgas Brandenburg 5	38.	Mais, Großbeeren 1992
9.	Erdgas Brandenburg 6	39.	Mix Weizenstroh & Korn
10.	Erdgas Brandenburg 7	40.	Petrolkoks Homs, Syrien
11.	Erdgas Mecklenburg Vorpommern 1	41.	Pferdemist, feucht
12.	Erdgas Mecklenburg Vorpommern 2	42.	Pferdemist/ Sägespäne
13.	Erdgas Mecklenburg Vorpommern 3	43.	Rapsmethylester (RME)
14.	Erdgas NL	44.	Rapsöl
15.	Erdgas Rußland	45.	Rapschrot
16.	Erdgas Stadtwerke Rostock 2004	46.	Reisstroh
17.	Erdölbegleitgas Nigeria	47.	Rohschlamm Eurawasser Rostock
18.	Faulschlamm Eurawasser Rostock	48.	Sommer Leindotter Öl
19.	Hähnchenmist, Dänemark	49.	Strohpellets
20.	Hanfschäben	50.	Strohpellets 1
21.	Hausmüll Siebdurchgang (3) max.40mm	51.	Strohpellets 2
22.	Hausmüll Sieüberlauf	52.	Teerschlamm Rostock
23.	Hausmüll Sieüberlauf (2) max.40mm	53.	Tierfett
24.	H EL n. DIN 51603	54.	Tiermehl (Bayern)
25.	Holz, trocken	55.	Waldholzpellets
26.	Holzpellets 1	56.	Weidenpellets
27.	Holzpellets 2	57.	Weizenkorn
28.	Holzpellets 3	58.	Weizenstroh
29.	Holzpellets 4	59.	Weizenstroh
30.	Holzpellets 5	60.	

Die Randbedingungen werden aus den Betriebszuständen der SWSF im Rahmen des Versuchsbetriebes am Lehrstuhl abgeleitet. Sie lauten:

Tabelle 13: Übersicht Prozessbedingungen Simulation

Nr.	Bezeichnung	Wert		Einheit
		ohne LUVO	mit LUVO	
1.	Solltemperatur	850	850	°C
2.	Wirbelluftvolumenstrom	130	130	m_N^3 Luft/ h
3.	Lufttemperatur	40	350	°C
4.	Brennstofftemperatur	25	25	°C

Zusätzlich zu den dargestellten Randbedingungen wird davon ausgegangen, dass sich der Prozess in einem stationären Zustand befindet.

Die Veranschaulichungen der Simulationsergebnisse finden sich im Anhang 9.4. In den Abbildungen werden die Ergebnisse der Simulationsrechnungen mit den bekannten Brennstoffen graphisch dargestellt. Dabei werden die Brennstoffe nach ihrem Aggregatzustand getrennt. Feste/ flüssige Brennstoffe und gasförmige Brennstoffe bilden jeweils eine Gruppe. Für jede Gruppe wird ein Diagramm erzeugt, in dem über dem CO_{2max} -Wert der Heizwert H_U aufge-

tragen wird. In einem zweiten Diagramm wird über den CO_{2max} -Werten die relative Abweichung der beiden Heizwerte dargestellt.

Mit den dargestellten Randbedingungen ergeben sich die folgenden Ergebnisse für die Simulationsrechnungen:

Tabelle 14: Übersicht relative Abweichungen Simulationsrechnung

Nr.	Brennstoff	relative Heizwert-abweichung /%	Nr.	Brennstoff	relative Heizwert-abweichung /%
1.	BRAM	-1,14	29.	Holzpellets - 5	-2,85
2.	Crambeöl	-0,57	30.	Kaffee-Häutchen	-2,98
3.	Erdgas Brandenburg 1	-6,63	31.	Kaffee-Häutchen, pelletiert	-2,40
4.	Erdgas Brandenburg 2	-5,84	32.	Kakaoschoten	-2,68
5.	Erdgas Brandenburg 3	-4,58	33.	Klärschlamm Eurawasser	-2,42
6.	Erdgas Brandenburg 3	-7,88	34.	Klärschlamm Homs	-0,85
7.	Erdgas Brandenburg 4	-2,37	35.	KompostierungsRückstand Güstrow	-1,53
8.	Erdgas Brandenburg 5	-7,61	36.	Leindotter-Pellets	-1,62
9.	Erdgas Brandenburg 6	-1,22	37.	Mais,Großbeeren 1992	-2,76
10.	Erdgas Brandenburg 7	-16,29	38.	Mix WHeizenstroh&Korn	-2,16
11.	Erdgas Mecklenburg-Vorpommern 1	-4,77	39.	Petrolkoks Homs, Syrien	0,01
12.	Erdgas Mecklenburg-Vorpommern 2	-4,91	40.	Pferdemist / Sägespäne	-4,37
13.	Erdgas Mecklenburg-Vorpommern 3	-4,91	41.	Pferdemist, feucht	-4,83
14.	Erdgas NL	-1,42	42.	Rapsmethylester (RME)	-0,55
15.	Erdgas Rußland	-0,51	43.	Rapsöl	-0,60
16.	Erdgas Stadtwerke Rostock 2004	-0,61	44.	Rapsschrot	-1,93
17.	Erdölbegleitgas Nigeria	-0,78	45.	Reisstroh	1,74
18.	Hähnchenmist, Dänemark	-2,90	46.	Sommer-Leindotter-Öl	-0,60
19.	Hanfschäben	-2,60	47.	Strohpellets	-2,35
20.	Hausrück-Siebdurchgang (3) max.40mm	-0,20	48.	Strohpellets 1	-2,13
21.	Hausrück-Siebüberlauf	-1,91	49.	Strohpellets 2	-2,11
22.	Hausrück-Siebüberlauf (2) max.40mm	-1,80	50.	Teerschlamm Rostock	-2,54
23.	H-EI n. DIN 51603	-0,34	51.	Tierfett	-0,52
24.	Holz, trocken	-3,15	52.	Tiermehl (Bayern)	-1,36
25.	Holzpellets - 1	-1,69	53.	Walzholzpellets	-1,98
26.	Holzpellets - 2	-1,71	54.	Weidenpellets	-1,86
27.	Holzpellets - 3	-1,56	55.	Weizenkorn	-2,39
28.	Holzpellets - 4	-2,41	56.	Weizenstroh	-0,31

Basis für die Berechnung ist dabei der im Labor ermittelte Heizwert. Für die relative Abweichung gilt:

$$\Delta H_U = \frac{H_{U,Sim} - H_{U,Tab}}{H_{U,Tab}} \cdot 100\% \quad (30)$$

Die Verwendung dieser Berechnungsvorschrift führt dazu, dass mit der relativen Abweichung nicht nur der Zahlenwert des in der Simulation bestimmten Heizwertes bewertet wird, sondern auch die Lage zum tabellierten Heizwert kenntlich gemacht wird. Bleibt z.B. der simulierte Heizwert unterhalb des tabellierten Heizwertes, dann wird das durch das negative Vorzeichen der relativen Abweichung kenntlich gemacht.

Bei der Auswertung der Simulationsrechnungen zeigt sich eine gute Übereinstimmung der über die Brennstoffidentifikation bestimmten Heizwerte mit den im Labor bestimmten Heizwerten. Die mittlere Abweichung der in der Simulation berechneten Heizwerte von den Laborwerten beträgt $\Delta H_{U,rel}$ -2,6 %. Die in der Simulation ermittelten Heizwerte liegen fast alle unterhalb der Laborwerte. Nach Gleichung (30) ergeben sich dadurch die negativen Werte für die relativen Abweichungen.

Ein möglicher Grund für die Lage der berechneten Heizwerte ist die Vernachlässigung der eingeschleppten Enthalpie des Brennstoffes in der Berechnungsgleichung der Simulationsrechnung. Hierdurch wird die durch die Brennstoffmasse eingetragene Leistung in das System bei der Berechnung nicht berücksichtigt. Da es hier lediglich darum geht, die Verwendbarkeit des Brennstoffidentifikations-Verfahrens abzuschätzen, kann diese Vereinfachung hier zunächst getroffen werden.

In den Darstellungen erkennt man für gasförmige und feste/ flüssige Brennstoffe eine Gruppierung der Brennstoffe. Ähnliche Brennstoffe liegen in gleichen Bereichen der Diagramme. Beispiele hierfür finden sich in Abbildung 31: Flüssige Brennstoffe wie H-EL und RME finden sich in den gleichen Diagrammbereichen wieder.

Durch die Verwendung von zwei Kenngrößen lassen sich jetzt Brennstoffe unterscheiden. Beispiele hierfür finden sich in Abbildung 31: BRAM und Tierfette haben nahezu identische CO_{2max} -Werte ($CO_{2max} \approx 15,8$ Vol%). Eine Unterscheidung über diesen Wert allein wäre nicht möglich. Durch die zusätzliche Verwendung des Heizwertes werden die Stoffe eindeutig unterscheidbar. Gleches gilt in derselben Abbildung für Pferdemist (Nr. 59) - Hausmüll (Nr. 58)- Petrolkoks (Nr. 57) mit einem CO_{2max} -Wert von ca. 18,4 Vol%. Auch bei den Gasen finden sich solche Beispiele: Im Bereich $CO_{2max} \approx 12,6$ Vol% findet man Brenngase mit verschiedenen Heizwerten.

Bei kleinen Heizwerten zeigt sich eine größere Differenz zwischen den Laborwerten und dem aus der Verbrennung ermittelten Heizwert.

Betrachtet man die Abweichungen der Heizwerte (Tabelle 14) zeigt sich, dass die Abweichungen der meisten Heizwerte in einem Intervall von 0 ... 10 % liegen. Das sollte als Eingangsgröße für eine Brennstoffidentifikation im laufenden Prozess ausreichend sein.

3.7. Herleitung der Brennstoffgruppen

Mit der Wirbelschichttechnik steht ein Feuerungssystem zur Verfügung, das ein breites Band von Brennstoffen verbrennen kann. Diese besondere Fähigkeit der SWSF stellt erhöhte Anforderungen an die Prozessführung. Die Prozessführung muss so ausgerichtet sein, dass sie die unterschiedlichen Brennstoffe erkennt und daraus entsprechende Schalthandlungen ableiten kann. Dieses kann z.B. die Veränderung von Betriebsparametern passend zu dem augenblicklich verwendeten Brennstoff sein. Die wesentlichen Größen, die dabei verändert werden müssen, sind:

- Solltemperatur
- Änderung von Reglereinstellungen (z.B. Verstärkungsfaktoren)
- Änderung von Grenzwerten (Alarme, Emissionsgrenzen,...)

Wenn diese Parameter für alle verwendeten Brennstoffe angepasst werden sollen, ergibt sich ein nicht unerheblicher Arbeitsaufwand. Daher müssen die zu verändernden Parameter eingeschränkt werden.

Hierzu gibt es im Wesentlichen zwei Ansätze: Bei ausreichend großen Anlagen, die mit Beaufsichtigungspersonal betrieben werden, kann das Bedienpersonal Grundeinstellungen verändern. So kann z.B. die Solltemperatur in Abhängigkeit von dem verwendeten Brennstoff variiert werden.

Der zweite Ansatz ergibt sich aus den Erfahrungen, die am Lehrstuhl im Zuge der Betreuung einer SWSF, die heizwertarme Gase entsorgt, gesammelt wurden. Die Anlage wird als Anlage im beobachtungsfreien Betrieb fernüberwacht betrieben. Über den Betriebszeitraum nahmen die brennbaren Anteile im Brennstoff „Deponiegas“ und damit der Heizwert deutlich ab. Über den gesamten Betriebszeitraum wird die Anlage mit demselben Regler betrieben. Der Regler wurde im Einfahrbetrieb einmal parametriert und danach nicht mehr verändert. Seitdem erfüllt er alle an ihn gestellten Anforderungen.

Anhand dieser Erfahrungen liegt die Vermutung nahe, dass Brennstoffe mit ähnlichen Eigenschaften mit demselben Regler betrieben werden können. Für eine praktische Anwendung

sind zwei Schritte notwendig: Im Vorfeld müssen entsprechende Brennstoffgruppen zur Einordnung eines vorhandenen Brennstoffes definiert werden. Dann muss die verwendete Prozessleittechnik in der Lage sein, einen verwendeten Brennstoff in eine solche Gruppe einzutragen. Dann kann die Prozessleittechnik der Feuerung selbstständig auf die für die Gruppe hinterlegten Betriebsparameter zurückgreifen. Mit dieser Annahme kann der Arbeitsaufwand bei einem Brennstoffwechsel deutlich verringert werden.

Damit eine solche Zuordnung erfolgen kann, muss zunächst untersucht werden, ob überhaupt die Möglichkeit besteht, Brennstoffe eindeutig und unterscheidbar zu gruppieren.

In den vorherigen Kapiteln wurde ein Verfahren zur Brennstoffidentifikation hergeleitet, das im Wesentlichen auf dem Heizwert eines Brennstoffes und seinem CO_{2max} -Wert basiert. Mit Hilfe dieser beiden charakteristischen Werte kann, wie bereits gezeigt, eine Brennstoffmatrix aufgespannt werden.

Mit den bereits für die Simulation verwendeten Brennstoffen wird überprüft, ob in der gewählten Darstellungsart Brennstoffgruppierungen identifiziert werden können. Man erhält die folgende Abbildung:

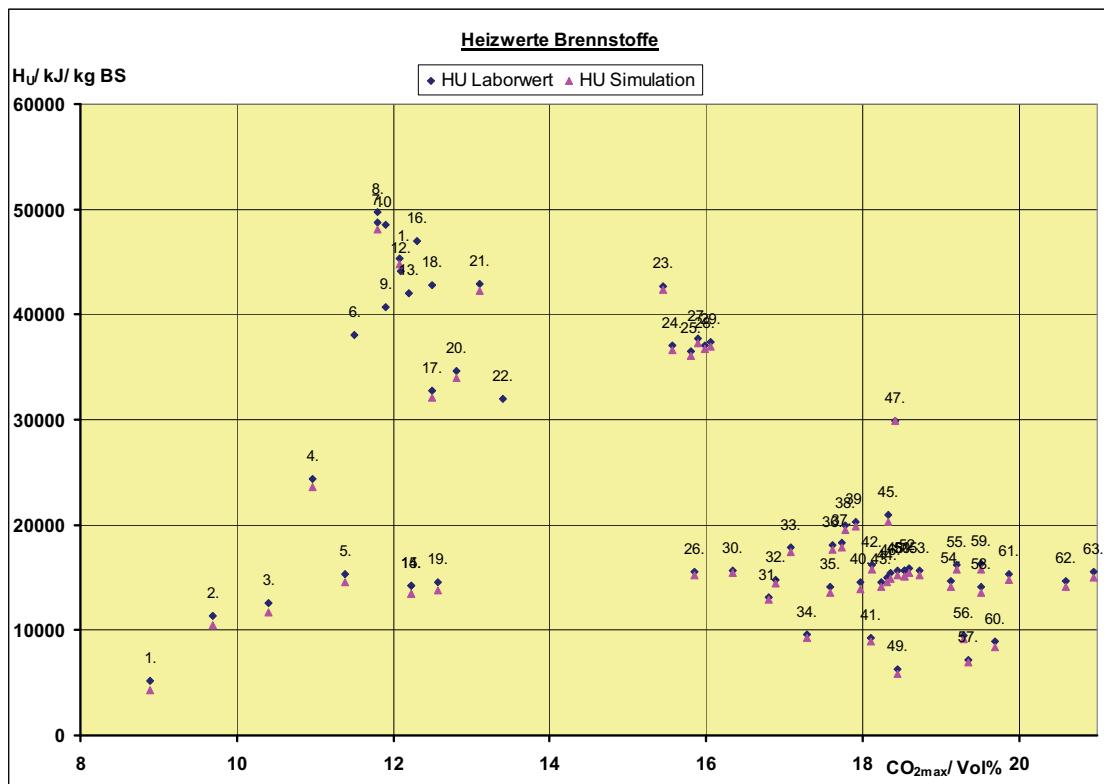


Abbildung 12: Gruppierung der Brennstoffe

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit sind die Brennstoffe hier nur als Nummern angegeben.

Tabelle 15: Schlüssel für Abbildung 12, Abbildung 13, Abbildung 14

Nr.	Brennstoff	Nr.	Brennstoff
1.	Erdgas Brandenburg 7	33.	Leindotter-Pellets
2.	Erdgas Brandenburg 1	34.	Klärschlamm Eurawasser
3.	Erdgas Brandenburg 2	35.	Teerschlamm Rostock
4.	Erdgas Brandenburg 4	36.	Rapschrot
5.	Erdgas Brandenburg 3	37.	Holzpellets - 3
6.	Niederlande	38.	Holzpellets - 2
7.	Erdgas Rußland	39.	Holzpellets - 1
8.	Italien (Off-Shore)	40.	Holzpellets - 5
9.	Deutschland	41.	KompostierungsRückstand Güstrow
10.	Großbritannien (Off-Shore)	42.	Weidenpellets
11.	Erdgas Stadtwerke Rostock 2004	43.	Weizenkorn
12.	USA	44.	Strohpellets 2
13.	Russland	45.	Holzpellets - 4
14.	Erdgas Mecklenburg-Vorpommern 2	46.	Strohpellets 1
15.	Erdgas Mecklenburg-Vorpommern 3	47.	Petrolkoks Homs, Syrien
16.	Norwegen (Off-Shore)	48.	Hausmüll-Siebüberlauf (2) max.40mm
17.	Erdgas NL	49.	Pferdemist / Sägespäne
18.	Algerien	50.	Strohpellets
19.	Erdgas Mecklenburg-Vorpommern 1	51.	Mix Weizenstroh&Korn
20.	Erdgas Brandenburg 6	52.	Waldholzpellets
21.	Erdölbegleitgas Nigeria	53.	Hausmüll-Siebüberlauf
22.	Frankreich	54.	Kakaoschoten
23.	H-EL n. DIN 51603	55.	Hanschäben
24.	Rapsmethylester (RME)	56.	Weizenstroh
25.	Tierfett	57.	Reisstroh
26.	BRAM	58.	Kaffee-Häutchen
27.	Crambeöl	59.	Kaffee-Häutchen, pelletiert
28.	Rapsöl	60.	Pferdemist, feucht
29.	Sommer-Leindotter-Öl	61.	Hähnchenmist, Dänemark
30.	Hausmüll-Siebdurchgang (3) max.40mm	62.	Holz, trocken
31.	Klärschlamm Homs	63.	Mais,Großboeren 1992
32.	Tiermehl (Bayern)		

Die Abbildung lässt vermuten, dass es in dieser Darstellungsweise tatsächlich zur Gruppierung von Brennstoffen kommt. Diese Brennstoffe werden in Gruppen zusammengefasst:

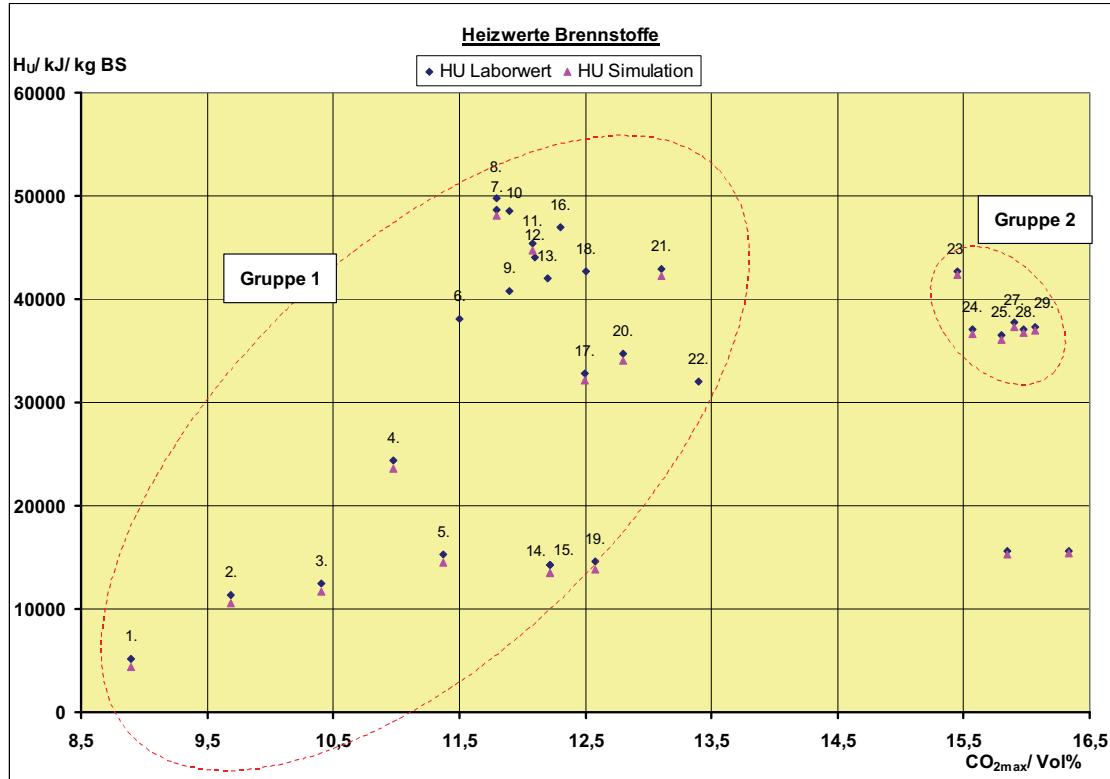


Abbildung 13: Brennstoffgruppen 1 und 2

Für die Gruppierung der Brennstoffe werden insgesamt vier Gruppen eingeführt. In Abbildung 13 werden alle gasförmigen Brennstoffe zur Gruppe 1 und alle flüssigen Brennstoffe (Öle) zur Gruppe 2 zusammengefasst.

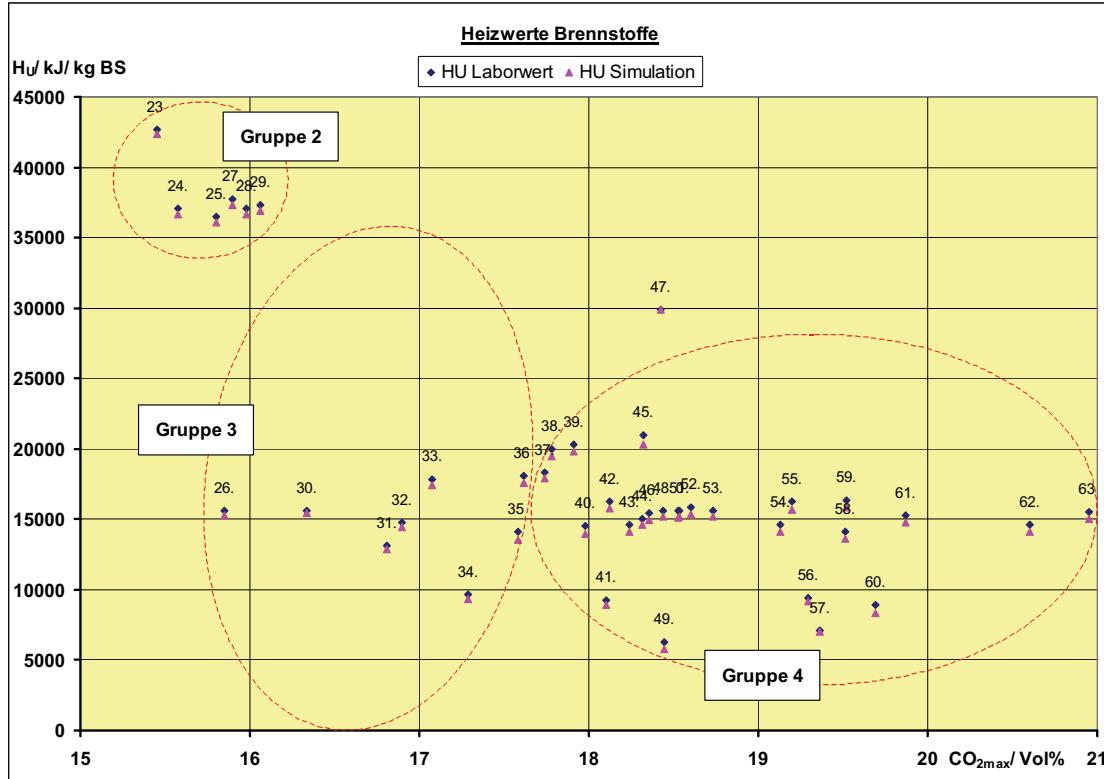


Abbildung 14: Brennstoffgruppen 3 und 4

Der Bereich zwischen CO_{2max} 15...21 Vol% gliedert sich in zwei weitere Gruppen. In der Gruppe 3 befinden sich feste Brennstoffe mit einem hohen Ascheschmelzpunkt. Alle Brennstoffe dieser Gruppe können bei einer Temperatur von ϑ 850...870 °C verbrannt werden, ohne dass es zur Ascheerweichung und somit zur unzulässigen Aufwachsungen und Verbackungen im Wirbelbett kommt.

In der Gruppe 4 finden sich feste Brennstoffe, die einen niedrigen Ascheschmelzpunkt aufweisen und bei einer niedrigeren Temperatur als ϑ 800 °C verbrannt werden müssen.

Zusammenfassend erhält man die folgenden Brennstoffgruppen:

Tabelle 16: Übersicht Brennstoffgruppen

Nr.	Brennstoffgruppe	Beschreibung	Soll-temperatur / °C
1.	gasförmige Brennstoffe	gasförmige Brennstoffe aller Art	852
2.	flüssige Brennstoffe	flüssige Brennstoffe, Mineralölprodukte, Pflanzenöle	852
3.	feste Brennstoffe mit hohem Ascheschmelzpunkt	Mineralölreste, Trester, Industrieschlämme	852
4.	feste Brennstoffe mit niedrigem Ascheschmelzpunkt	nachwachsende Rohstoffe	790

Die hier getroffene Einordnung ist lediglich ein erster Schritt. Zur Untermauerung dieser Brennstoffgruppierung sind weitreichende Untersuchungen zu den Brennstoffen notwendig. Insbesondere müssten sie mit einer größeren Datenbasis erneut durchgeführt werden. Neben den theoretischen Betrachtungen zu dem Entstehen der charakteristischen Größen wie der Ascheerweichungstemperatur müssten umfangreiche Experimente durchgeführt werden. Da sich diese Arbeit mit der Brennstoffidentifikation befasst, wird die Untersuchung zur Brennstoffgruppierung hier beendet.

4. Verifikation der Brennstofferkennung

4.1. Aufbau der SWSF Rostock

Anlagenaufbau, R&I-Schema

Für die Untersuchung von Brennstoffen in der Wirbelschichtverbrennung und dem Verhalten von „Problemstoffen“ in der Wirbelschicht, steht dem Lehrstuhl für Umwelttechnik der Universität Rostock ein stationäre, blasenbildende Wirbelschichtfeuerung kleiner Leistung zur Verfügung (SWSF). Die SWSF besteht aus den folgenden Hauptgruppen:

Tabelle 17: Übersicht über die Hauptgruppen der SWSF Rostock

Hauptgruppe	Reaktor	Anlagen und Aggregate der Peripherie	Messwerterfassung/ Prozessführung
Untergruppen	1. Reaktor	1. Verdichter Luft	1. Thermoelemente
		2. Verdichter Brenngas	2. Druckmessdosen
		3. Pumpe hochviskose Brennstoffe	3. Volumenstromsensor
		4. Pumpe flüssige Brennstoffe	4. Konzentrationen Abgas feucht
		5. Schneckenförderer feste Brennstoffe	5. Konzentrationen Abgas trocken
		6. Schneckenförderer Additive	6. Bussystem
		7. Einspritzdüsenkühlung	7. Prozessrechner
		8. Lanze zum Klärschlammteintrag	8. Soft SPS
		9. Lanze zum Stickerwassereintrag	
		10. Wärmeübertrager (2x)	
		11. Zyklon	
		12. Zündbrenner	

Zur Verdeutlichung des Verfahrens wird das Rohrleitungs- und Installations- Schema (R&I-Schema) in Abbildung 15 dargestellt.

Online-Identifikation von Brennstoffen und ihren kalorischen Eigenschaften beim Betrieb einer stationären Wirbelschichtfeuerungsanlage

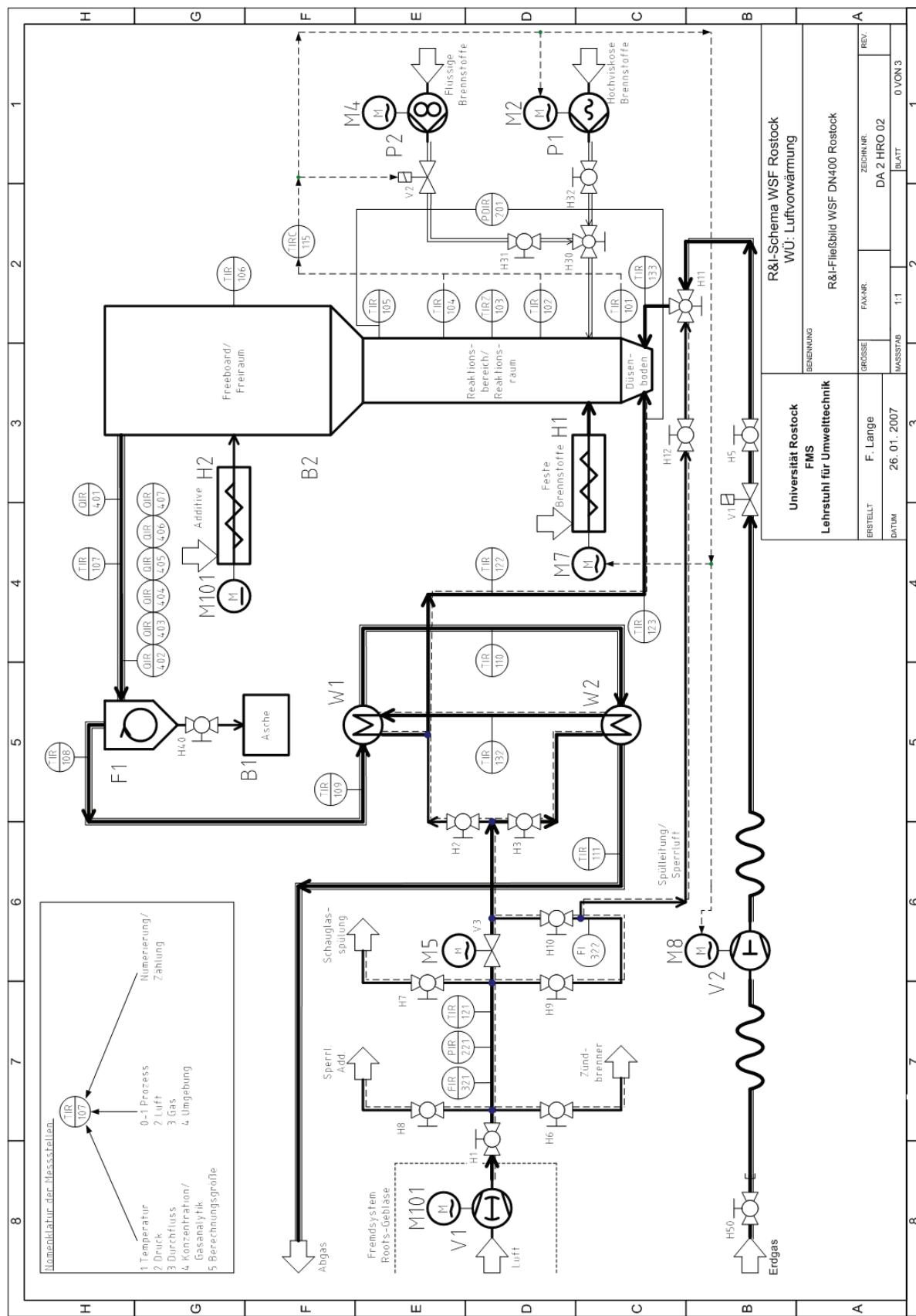


Abbildung 15: R&I-Schema SWSF Rostock

Die SWSF Rostock befindet sich im Technikum des Lehrstuhls für Umwelttechnik der Universität Rostock. Die Anlage ist dort fest installiert.

Reaktor

Das Kernstück der SWSF-Anlage bildet ein Rohrreaktor, der sich in eine Reaktionszone und eine Abklingzone (Freeboard) mit einem sich erweiternden Querschnitt unterteilt.

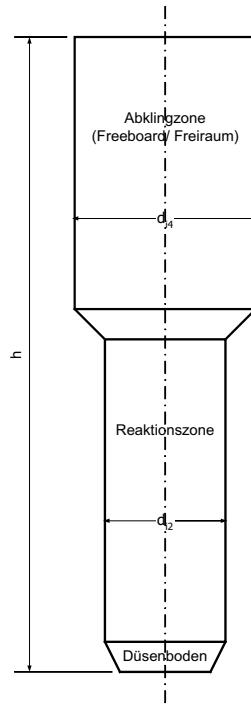


Abbildung 16: Prinzipieller Aufbau des SWSF-Reaktors

Der Behälter ist eine geschweißte zylindrische Konstruktion aus hochwarmfesten Edelstahl (Materialnummer: 1.48.41). Er unterteilt sich in die Bereiche Düsenboden, Reaktionszone und Abklingzone (Freeboard/ Freiraum). Die beiden oberen Teile des Reaktorgefäßes, Reaktionszone und Freeboard (Freiraum), sind miteinander verschweißt. Der Düsenboden ist an den Reaktor angeflanscht.

Das Reaktor steht auf einem Fuß, der fest mit dem Hallenboden verbunden ist. In der Ausführung, die in dem Technikum der Universität aufgestellt ist, hat der Reaktorbehälter eine Höhe von $h = 5100$ mm. Der Innendurchmesser beträgt im Reaktionsteil $d_{i2} = 400$ mm und erweitert sich im Freeboard auf $d_{i4} = 1000$ mm. Bedingt durch die feste Lagerung im unteren Teil des Reaktors, dehnt sich das Reaktorgefäß im Betrieb nach oben aus. Daher sind alle Anbauteile im oberen Teil des Reaktors mit Kompensatoren zur Aufnahme der Dehnungen versehen.

Der Reaktor ist in verschiedenen Höhen mit auf dem Umfang liegenden Durchführungen versehen. Über die Durchführungen werden Stoffe in das System eingebracht (Stutzen für Brennstoffzufuhr, Luftzufuhr, Additivzufuhr,...), Messungen des Systemzustandes durchgeführt (Temperaturen, Drücke, Konzentrationen,...) und eine visuelle Überwachung der Verbrennung in verschiedenen Ebenen ermöglicht.

Das Abgas verlässt den Reaktor durch einen in radialer Richtung angebrachten Flansch im Freeboard (Freiraum). Von hier aus gelangt es in den Abgastrakt.

Das gesamte Reaktorgefäß ist wärmegedämmt. Die Wärmedämmung erfüllt dabei zwei Aufgaben: Sie stellt sicher, dass die Verlustleistung der SWSF klein gehalten wird und dass es im Betrieb nicht zu Verletzungen durch die heiße Oberfläche kommt ($\vartheta_o > 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ohne Dämmung).

Die Wärmedämmung des Reaktors besteht aus einer $d_{is} = 175 \text{ mm}$ starken Schicht des Wärmedämmmaterials „Superwool 607 Blanket“ [53] und einer Verkleidung aus Edelstahl-Folie. Die Dicke der Dämmsschicht nimmt im Bereich des Düsenbodens bis auf $d_{is} = 25 \text{ mm}$ ab.

Anlagen und Aggregate der Peripherie

Für den Betrieb der SWSF Rostock sind in der Peripherie der Anlage eine Reihe von Aggregaten notwendig. Sie werden in der Tabelle 17 genannt und im Folgenden kurz vorgestellt.

Verdichter Luft

Der Luftverdichter hat die Aufgabe, die für die Fluidisation des Wirbelbettes und die Verbrennung benötigte Luft bereitzustellen. Für diese Aufgabe wird an der SWSF Rostock ein Roots-Gebläse der Fa. Aerzener Maschinenfabrik verwendet. Es wird über einen Keilriemen von einem Elektromotor angetrieben. Der Motor kann in zwei Drehzahlstufen geschaltet werden.

Im Betrieb liefert das Roots-Gebläse Luft mit einem fest eingestellten Überdruck von $p_{Ü} = 0,5 \text{ bar}$. Der für den Betrieb der SWSF benötigte Wirbelluftvolumenstrom wird über ein Ventil vor der SWSF eingestellt. Die von dem Verdichter bereitgestellte Luftmenge, die nicht in der SWSF benötigt wird, wird über ein Sicherheitsüberströmventil abgeführt und in dem

Verdichter im Kreis gefahren. Aus der Prozessführung heraus wird das System „Luftverdichter“ an der SWSF Rostock nicht überwacht.

Die Wirbelluft wird über ein System von Düsen, die in den Düsenboden montiert sind, in den Reaktor eingetragen. Die Düsen stehen senkrecht auf einem Hosenrohr. Sie sind zur besseren Austauschbarkeit auf die senkrecht stehenden Rohre aufgeschraubt.

Verdichter Gas

Mit dem Brenngas -Verdichter wird Erdgas aus dem Leitungsnetz der Stadtwerke Rostock über Rohrleitungssysteme in den Reaktor eingebracht. Die Druckerhöhung muss dabei so groß sein, dass der Gegendruck der fluidisierten Wirbelschicht und die Druckverluste des Rohrleitungssystems überwunden werden können.

Für die Verdichtung des Brenngases wird ein einstufiger Kolbenverdichter verwendet, der von einem Drehstrommotor ($P = 1,5 \text{ kW}$) über einen Keilriemen angetrieben wird. Um verschiedene Brenngasmengen fördern zu können, wird die Drehzahl des Antriebsmotors über einen Frequenzumrichter variiert.

Für die Drucküberwachung wird der Druck auf der Saugseite und auf der Druckseite des Verdichters herangezogen. Zum Schutz des Systems, das das Brenngas bereitstellt (Leitungsnetz), wird auf der Saugseite eine Unterdrucküberwachung realisiert. Zum Schutz des Verdichters bei verstopften Gasdüsen, geschlossenen Ventilen oder Leitungen wird die Druckseite auf einen Überdruck überwacht. Weiterhin wird der Nennstrom des Antriebsmotors überwacht.

Beim Ansprechen einer der Druck- oder der Überstromsicherung wird der Verdichter abgeschaltet. Nach einer am Prozessrechner aufgelaufenen Fehlermeldung kann der Verdichter erst nach Quittierung und Beseitigung des Fehlers wieder in Betrieb genommen werden.

Das verdichtete Erdgas wird über ein System von Brenngasdüsen, die im Düsenboden neben den Luftpüsen angeordnet sind, in den Reaktor eingebracht. Auch diese Düsen sind auf senkrecht stehenden Rohren aufgeschraubt.

Für die Untersuchung von alternativen Brenngasen besteht die Möglichkeit, einzelne Gasflaschen oder Flaschenbatterien, in denen das zu untersuchende Gas bereitgestellt wird, an das Gasdüsensystem anzuschließen. Der benötigte Gas-Massenstrom wird über die Druckminderer der Gasflaschen eingestellt.

Pumpe hochviskose Brennstoffe

Die Pumpe für hochviskose Brennstoffe dient dem Eintrag dieser Brennstoffe in die Wirbelschichtanlage (nicht Newton'sche Fluide!). Die Brennstoffe werden mit einer Exzenterorschneckenpumpe aus einem Vorratsbehälter in die Wirbelschicht gefördert. Die Pumpe wird von einem drehzahlstellbaren Drehstrommotor direkt angetrieben ($P = 0,55 \text{ kW}$). Die Drehzahlstellung wird über einen Frequenzumrichter realisiert.

Nachdem der Druck in dem hochviskosen Brennstoff über die Pumpe erhöht wurde, wird er über eine wassergekühlte Eintragsdüse in das fluidisierte Wirbelbett eingetragen. Die Kühlung der Eintragsdüse ist notwendig, damit der Brennstoff nicht bereits vor dem Eintragen so weit erhitzt wird, dass eine Crack-Reaktion in den Transportleitungen einsetzt. Bei zu hoher Temperatur kommt es infolge einer solchen Reaktion zu Verkokungen und Aufwachsungen, die die Eintragsdüse verstopfen.

Die Pumpe für den Eintrag der hochviskosen Brennstoffe wird über eine analoge Druckanzeige auf der Druckseite der Pumpe überwacht. Hier erkennt man, ob die Brennstoffdüse durchlässig ist oder ob eine Verstopfung vorliegt. Die Stromaufnahme des Antriebsmotors wird über den Frequenzumrichter überwacht.

Pumpe flüssige Brennstoffe

Für den Eintrag flüssiger Brennstoffe in die SWSF steht ein System aus Zahnradpumpe ($P = 0,11 \text{ kW}$) und Regelventil zur Verfügung. Aus einem Vorratsbehälter fördert die Zahnradpumpe den Brennstoff über die mit den hochviskosen Brennstoffen gemeinsam genutzte Düse in die fluidisierte Wirbelschicht. Zur Reglung des Brennstoffstromes wird ein elektrisch ansteuerbares Stellventil verwendet.

Das System für den Eintrag von flüssigen Brennstoffen muss manuell freigeschaltet werden (Ventile, Kugelhähne). Danach kann der Brennstoffstrom über das Regelventil aus der Prozessüberwachung gestellt werden.

Schneckenförderer feste Brennstoffe

Zum Eintrag von festen Brennstoffen wird ein System aus einem Schneckenförderer mit Vorratsbehälter und Schleusensystem verwendet, das die Druckdifferenz zwischen dem atmosphärischen und dem Betriebsdruck der WS überwindet. Das System trägt den Brennstoff im unteren Teil des fluidisierten Wirbelbettes in das System ein. Dabei können sowohl Schüttgüter als auch pelletierte Güter mit Hilfe des Fördersystems in das Wirbelbett eingetragen werden.

Für den Transport des Brennstoffes in das fluidisierte Bett wird eine Schnecke mit Seele verwendet. Dabei stehen Schnecken mit verschiedenen Steigungen für verschiedene Brennstoffe zur Auswahl. Die Eintragsschnecke endet in dem Wirbelbett. Die Schnecke wird über eine Kette durch einen Getriebemotor angetrieben. Der Motor kann über einen Frequenzumrichter in der Drehzahl gestellt werden.

Im laufenden Betrieb wird die Eintragsvorrichtung über die Stromaufnahme des Motors überwacht. Zu hohe Stromaufnahme, z.B. infolge Verstopfung, verursacht eine Abschaltung.

Schneckenförderer feste Additive

Der Eintrag von festen Additiven in die SWSF Rostock kann auf verschiedenen Wegen erfolgen. Eine Möglichkeit stellt der Additivförderer am Freeboard dar. Mit Hilfe dieses Systems werden Additive in Form von Schüttgütern direkt in den Reaktor eingetragen. Bei dem System handelt es sich um einen Schneckenförderer mit einer seelenlosen Schnecke und einem Vorratsbehälter. Die Schnecke wird über einen Keilriemen von einem Gleichstrommotor ($P = 0,18 \text{ kW}$) angetrieben. Es besteht die Möglichkeit, die Drehzahl des Motors zu stellen.

Weitere Möglichkeiten des Additiveintrages sind die Beimengung des Additivs zu einem festen Brennstoff. Das Gemisch wird dann über die Festbrennstoffschncke in den Reaktor gefördert. Flüssige Additive können über die unten beschriebene Sickerwasserlanze in den Reaktor eingebracht werden.

Kühlung der Eintragsdüse

Für den Eintrag von hochviskosen und flüssigen Brennstoffen steht eine gemeinsame Eintragsdüse zur Verfügung. Beide Eintragseinrichtungen sind an die Düse angeschlossen. Vor der Verwendung muss der entsprechende Eintragsweg freigeschaltet werden. Die Düse wird mit einem Zwangsumlauf wassergekühlt. Die an der Düse aufgenommene Wärme wird über einen Wasser-Luft-Wärmeübertrager an die Hallenluft abgegeben.

Lanze zum Klärschlamm eintrag

Für den Eintrag von pumpfähigen Klärschlämmen steht eine Eintragslanze zur Verfügung. Das System ist nicht permanent an der SWSF Rostock montiert, es wird bei Bedarf nachgerüstet. Für den Eintrag von Klärschlamm wird die Reaktoröffnung verwendet, die im Anfahrbetrieb für den Zündbrenner verwendet wird. Die Lanze wird in dieser Öffnung so montiert, dass sie mit der Wand des Reaktionsraumes abschließt. Der Klärschlamm wird dann mit einer Exzentrerschneckenpumpe radial in das fluidisierte Wirbelbett eingetragen.

Bei der Förderung von Klärschlamm wird die Lanze nicht über ein zusätzliches System gekühlt. Wenn keine Förderung von Klärschlamm stattfindet, wird die Lanze mit Sperrluft beaufschlagt. Hierdurch wird eine Verstopfung durch das Bettmaterial verhindert und die Kühlung der Lanze gewährleistet.

Lanze zum Sickerwassereintrag (wassergekühlt)

Für den Eintrag von verunreinigten Wässern, z.B. Deponie-Sickerwasser, steht an der SWSF eine wassergekühlte Eintragslanze zur Verfügung. Das Wassereintragssystem wird nur bei Bedarf an der SWSF montiert. Der Eintrag geschieht über die Reaktoröffnung, die im Anfahrbetrieb für den Zündbrenner verwendet wird.

Die Lanze wird über einen offenen Kühlkreislauf gekühlt.

Wärmeübertrager

Zur Nutzung der im Abgas enthaltenen Energie sind an der SWSF zwei Wärmeübertrager installiert. Die Wärmeübertrager sind als geschweißte Stahlkonstruktionen ausgeführt. Je nach

Schaltung im Abgastrakt wird die im Abgas enthaltene Wärme zur Vorwärmung der Wirbel-
luft und/ oder zur Vorwärmung eines gasförmigen Brennstoffes verwendet.

Die Wärmeübertrager funktionieren nach dem Kreuz-Gegenstrom-Prinzip. Sie sind zur Reini-
gung und Inspektion mit entsprechenden Öffnungen auf der Unterseite versehen.

Zur Verringerung der Verluste sind die beiden Wärmeübertrager mit demselben Isolationsma-
terial wie der Reaktor der SWSF Rostock isoliert und mit Edelstahlfolie verkleidet.

Zyklonabscheider

Im Abgastrakt ist unmittelbar nach dem Freeboard ein heißgehender Zyklonabscheider im
Abgasweg installiert. Der Abscheider erfüllt zwei Aufgaben: Er soll das im Reaktor zu Staub
zerriebene Bettmaterial und die Brennstoffasche aus dem Abgas abscheiden.

An den Zyklonabscheider ist ein Auffangbehälter montiert, mit dem die Zyklonasche so auf-
gefangen werden kann, dass sie nicht in die Umgebungsluft und das Technikum gelangt. Der
Auffangbehälter ermöglicht während des Betriebes Entnahmen von Proben und Wägungen.

Zündbrenner

Für den Anfahrvorgang der SWSF Rostock wird ein Propangasbrenner verwendet. Der Bren-
ner dient in diesem Betriebszustand als sichere Zündquelle. Er gewährleistet, dass das für den
Startvorgang verwendete Erdgas über dem leicht fluidisierenden Wirbelbett zündet und sich
nicht unverbrannt in der Anlage sammelt oder an die Umgebung abgegeben wird.

Der Zündbrenner wird durch einen dafür vorgesehenen Zugang in die Wirbelschicht einge-
führt. Bei dem Brenner handelt es sich um einen modifizierten Vormischbrenner. Damit dem
Brenner im montierten Zustand ausreichend Sauerstoff zugeführt wird, wurde er mit einer
unabhängigen Luftzufuhr versehen. Die Versorgung erfolgt an der SWSF über den Wirbel-
luftverdichter. Die Luft wird vor dem Stellventil für die Wirbelluft abgenommen. Hierdurch
wird der Brenner von der eingestellten Wirbelluftmenge entkoppelt.

Anlagen zur Prozessführung und Messwerterfassung

Messwerterfassung

Zur Erfassung des Betriebszustandes und zur Überwachung der Anlage werden an der SWSF Rostock die prozessrelevanten Größen gemessen. Dabei werden die folgenden physikalischen Größen erfasst:

Tabelle 18: Übersicht über die gemessenen Größen

Nr.	physikalische Größe	Messprinzip
1.	Temperaturen im Prozess	Seebeck Effekt
2.	Drücke im Prozess	Piezoresistiv
3.	Volumenstrom	Wirbelfrequenz Durchflussmessung
4.	Konzentrationen feuchtes Abgas	Festkörper Sensor
5.	Konzentrationen trockenes Abgas	verschiedene optische Messverfahren

Im Folgenden werden die gemessenen Größen, Verfahren und die verwendeten Sensoren kurz vorgestellt. Dabei wird ebenfalls überprüft, ob die verwendeten Sensoren die Bedingungen für den Echtzeitbetrieb (verg. Kapitel 3.2) erfüllen. Als die für den Prozess charakteristische Zeitspanne wird dort $t = 1 \text{ s}$ festgelegt. Diese Zeit ergibt sich aus der schnellsten am Prozess auftretenden Änderung, die noch erfasst werden muss. Für die Messung der physikalischen Größen ist es wichtig, dass die Sensoren die benötigte Information innerhalb dieser Zeitspanne zur Verfügung stellen können. Es wird also eine beschreibende Größe „Signaldauer“ definiert, als die Zeit, die es nach dem Eintreten eines Ereignisses dauert, bis eine veränderte Messgröße erfasst ist und für die Weiterverarbeitung zur Verfügung steht. Für die verwendeten Sensoren ergibt sich die Gleichung:

$$t_{\text{Sig}} = t_{\text{Mess}} + t_{\text{Zykl}} \quad (31)$$

Zunächst werden die Sensoren betrachtet. Dabei wird hier der Schwerpunkt auf die für die SWSF wichtigen Sensoren gelegt. Die Standard-Sensoren, wie Thermoelemente, Druckaufnehmer und Konzentrationsmessungen im trockenen Abgas werden im Anhang 9.5 beschrieben.

Volumenströme

Zur Überwachung des Betriebes der SWSF wird der Volumenstrom der Wirbelluft gemessen. Hierfür wird eine Wirbelfrequenz- (VORTEX-) Durchflussmessung verwendet.

Die Wirbelfrequenz-Durchflussmessung beruht auf dem Verhalten von Fluiden, die gegen einen Prallkörper strömen. Bei der Umströmung des Prallkörpers kommt es zu periodischen Schwankungen im Strömungsfeld. Diese Schwankungen machen sich z.B. in Druckschwankungen und Geschwindigkeitsschwankungen im Fluid bemerkbar. Es kommt zum Ablösen von Wirbeln (Karman'sche Wirbelstraße). Wenn die Ein- und Auslaufstrecke der Messung entsprechend lang ist, werden die Wirbel gleichmäßig wechselseitig abgelöst, es bildet sich eine so genannte „Wirbelstraße“ aus.

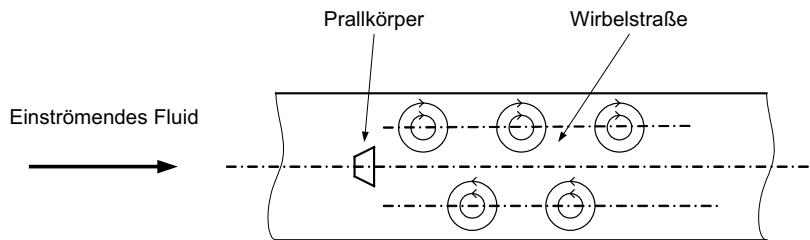


Abbildung 17: Ausbildung Wirbelstraße im Fluid

Das Ablösen der Wirbel bedeutet einen Energieabtransport von dem Wirbelkörper. Hierdurch greift eine Kraft an den Prallkörper an und versetzt diesen in Schwingungen. Die Frequenz dieser Schwingungen wird über eine Proportionalitätskonstante mit dem Volumenstrom des Mediums verknüpft [29]:

$$\dot{V} = c \cdot f_w \quad (32)$$

Das Verfahren zeichnet sich durch eine Reihe von Vorteilen aus:

Es ist weitgehend unabhängig von den physikalischen Eigenschaften des betrachteten Mediums.

Es eignet sich gleichermaßen für flüssige und gasförmige Medien.

Mit dem Sensor sind zuverlässige Volumenstrom-Messungen in einem weiten Messbereich (deutlich größer als mit Drosselgeräten, z.B. Normblende) möglich.

Der verwendete Sensor hat keine beweglichen Teile in dem betrachteten Medium. Er unterliegt somit nur geringem mechanischem Verschleiß.

Es können mit dem Verfahren auch Fluide ohne elektrische Leitfähigkeit untersucht werden.

Der größte Nachteil des Verfahrens liegt in der Notwendigkeit, lange Ein- und Auslaufstrecken vor und nach dem Sensor zu installieren.

Die Frequenz, mit der der Prallkörper schwingt, wird über einen piezoelektrischen Aufnehmer an die Auswerteelektronik weitergeleitet. Dort wird das Signal in einen Volumenstrom umgerechnet. Bei der Anwendung des Verfahrens ist zu beachten, dass der Sensor den Betriebs-Volumenstrom des betrachteten Mediums liefert. Für die Umrechnung in einen anderen Bezugszustand sind daher bei gasförmigen Medien noch weitere Messungen am Fluid notwendig (Temperatur, Druck).

Konzentrationen feuchtes Abgas

Zur Überwachung der Verbrennungsreaktion wird die Sauerstoffkonzentration im Abgas gemessen. Hierbei kommt ein Festkörperelektrolyt-Sauerstoffsensor zum Einsatz.

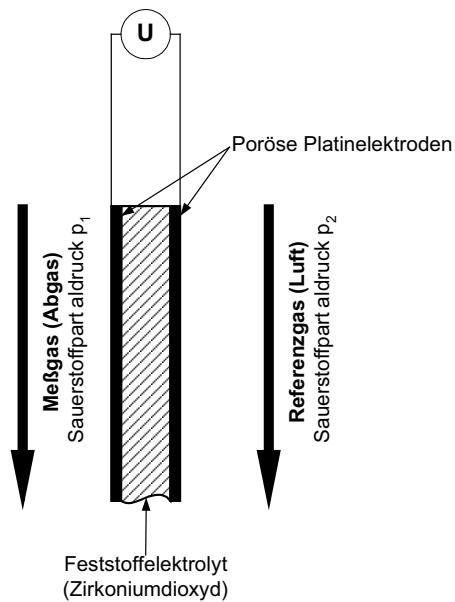


Abbildung 18: Prinzipieller Aufbau des Festkörperelektrolyt-Sensors (ZIROX-Sonde)

Kernstück des Sensors ist ein Keramikrohr. Das Keramikrohr hat die Eigenschaft, nach Überschreiten einer Grenztemperatur Sauerstoff-Ionen zu leiten. Die Leitfähigkeit beginnt bei einer Temperatur von $\vartheta_K = 350 \text{ }^\circ\text{C}$. Eine ausreichend große Leitfähigkeit zur Messung der Sauerstoffkonzentration stellt sich ab einer Temperatur von $\vartheta_K = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ein. Das Keramikrohr ist von porösen Platinelektroden eingefasst.

Im Betrieb werden die beiden Seiten der Sonde mit verschiedenen Gasen beaufschlagt: mit dem Messgas (Abgas) und einem Referenzgas (Luft). Bedingt durch die unterschiedlichen Partialdrücke des Sauerstoffes in den beiden Gasen beginnt die Keramik die Sauerstoff-Ionen zu leiten. Hierdurch bildet sich eine Spannung zwischen den Platinelektroden, die über einen Spannungsmesser gemessen werden kann. Über entsprechende Umrechnungen kann das Spannungssignal für die Messung des Sauerstoffes im Abgas verwendet werden.

Die Anordnung der Platinelektroden mit der Keramik entspricht einem galvanischen Element. Die Spannung, die das Element abgibt, genügt der Nernst'schen Gleichung [58]:

$$U = \frac{R \cdot T}{4 \cdot F} \cdot \ln\left(\frac{p_{O2,L}}{p_{O2,AG}}\right) \quad (33)$$

Unter der Voraussetzung, dass auf beiden Seiten des Keramikrohres nahezu derselbe Druck herrscht, kann der Partialdruck des Sauerstoffs äquivalent zur Volumenkonzentration betrachtet und verwendet werden. Es ergibt sich die folgende Bestimmungsgleichung:

$$\varphi_{O2} = 20,64 \cdot e^{\left(-46,42 \frac{U}{T}\right)} \quad (34)$$

In der praktischen Ausführung des Sensors wird er an eine Versorgungs- und Auswerteeinheit angeschlossen. Hierin befinden sich die Referenzgasversorgung, die Sensorüberwachung und die Einrichtungen zur Beheizung der Keramik (Sonde) [58].

Vor der Messung ist keine Aufbereitung des Abgases notwendig. Es wird direkt der Sauerstoffanteil im feuchten Abgas gemessen. Feststoff-Sauerstoffsensoren sind sehr robuste Sensoren, die eine geringe Querempfindlichkeit gegenüber anderen Abgaskomponenten aufweisen. Mit diesen Sensoren ist es möglich, den Sauerstoffanteil im Abgas in Echtzeit zu bestimmen.

Feststoff-Sauerstoffsensoren werden an Industriefeuerungen und in der Automobiltechnik eingesetzt.

Prozessführung

Die Aufgabe der Prozessführung der SWSF Rostock besteht darin, den Wirbelschicht-Verbrennungsprozess zu überwachen und die Funktion der Anlage (einschließlich Sicherheitsfunktionen) zu gewährleisten. Dazu sind verschiedene Teilaufgaben zu erfüllen. Anhand des „Datenweges“ an der SWSF Rostock werden die Aufgaben erläutert und die verwendeten Systeme vorgestellt.

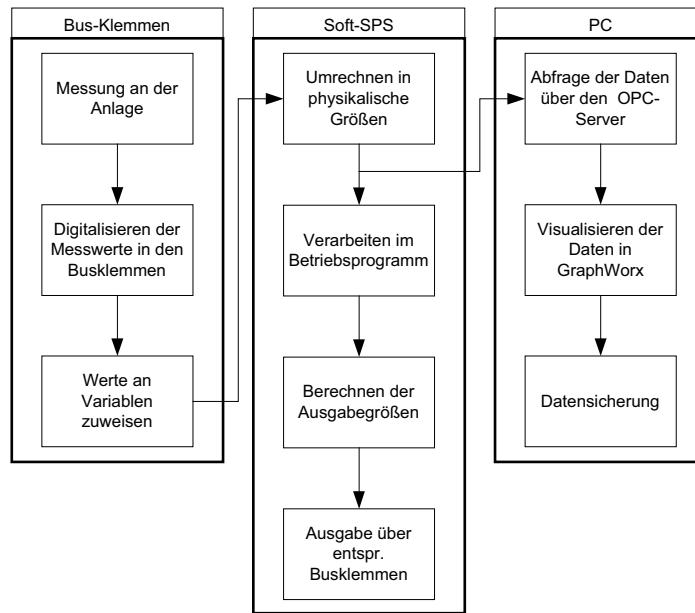


Abbildung 19: Datenweg an der SWSF Rostock

Das System zur Prozessführung gliedert sich in drei Teilsysteme: das Bus-System, den Field Controller und den Prozessrechner. Das Kernstück der Prozessführung ist der Field Controller. Hierbei handelt es sich um einen Prozessrechner, der mit einer eigenen Programmiersprache programmiert werden kann. Mit dem Prozessrechner sind über den Bus Ein- und Ausgänge verbunden (analog, digital). Der Field Controller befindet sich in Form einer Einschubkarte in einem weiteren Prozessrechner. Über entsprechende Schnittstellen werden Daten von der SPS an den Prozessrechner weitergegeben und können dort mit Standardanwendungen weiterverarbeitet und gespeichert werden.

Tabelle 19: Übersicht Prozessführung

Nr.	Bennung	Aufgabe
1.	Bussystem Interbus	Anbinden von Sensoren und Aktoren
2.	Anschaltbaugruppe/ Soft SPS	Abarbeiten des Betriebsprogramms der SWSF Rostock
3.	Prozessrechner	Visualisierung des Prozesses, Datensicherung

Für die Prozessführung an der SWSF Rostock werden Bauteile und Systeme verwendet, die auch gewerblich in der Industrie verwendet werden. Das komplette System setzt sich aus den in Tabelle 19 genannten Teilsystemen zusammen.

Bussystem

Unter einem Bussystem versteht man nach [37]: Ein „Sammelleitungssystem, an das mehrere Einheiten (Sender und/ oder Empfänger), die durch Adressierung aktiviert werden, räumlich dezentralisiert anschließbar sind.“

An der SWSF Rostock wird des System „Interbus“ der Fa. Phoenix Contact verwendet. Dabei handelt es sich um ein Feldbussystem, das seit 1983 durch Phoenix Contact entwickelt und weiterentwickelt wird [34]. Ziel der Entwicklung war, einen echtzeitfähigen Sensor-Aktor-Bus zu entwickeln. Das System wurde 1987 auf der Hannover Messe vorgestellt. Seitdem ist das verwendete offene Protokoll in der DIN 19 258 und der EN 50 254 normiert worden.

Das System besteht aus spezialisierten Busklemmen, die eine Reihe von Aufgaben übernehmen können (analoge Ein-/ Ausgänge, digitale Ein-/ Ausgänge, potentialfreie Kontakte, ...). An der SWSF Rostock werden die Klemmen in der Form für Schaltschrankmontage verwendet. Es werden auch Klemmen angeboten, die direkt ohne zusätzliches Gehäuse an einer Anlage verwendet werden können. Zur besseren Integrierbarkeit auch in bereits bestehende Anlagen, die andere Bus-Systeme verwenden (CAN, Modbus,...), stehen Klemmen zur Verfügung, die unterschiedliche Bussysteme miteinander verbinden können. Zur Erleichterung der Installationsaufgaben stehen industrietaugliche Funk-Module zur Verfügung.

Die Busklemmen erfüllen die folgenden Teilaufgaben an der SWSF Rostock:

Anbinden der Sensoren an das Prozessleitsystem (analoge Eingänge)

Anbinden der Aktoren an das Prozessleitsystem (analoge, digitale Ausgänge)

Weitergabe von Start/ Stopp Befehlen an untergeordnete System wie Frequenzumrichter

Anschaltbaugruppe/ Soft SPS

Der Field Controller ist das Kernstück der Prozessführung an der SWSF-Anlage. Dieses Bauteil vereinigt zwei wichtige Funktionen: Es stellt den Bus-Master zur Verfügung und bildet die Funktionalität einer SPS (speicherprogrammierbaren Steuerung) nach.

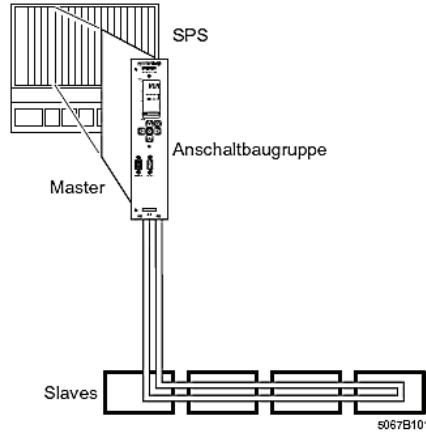


Abbildung 20: Aufbau Bussystem [39]

Der Bus-Master oder die Anschaltbaugruppe koordiniert die Kommunikation mit den angeschlossenen Busklemmen (Slaves). Er sendet Daten an die Busklemmen und empfängt Daten von den Busklemmen. Die Daten werden dabei in so genannten „Datenworten“ versendet. Dabei wird ein Datenwort der Reihe nach an alle Busteilnehmer gesendet. Dem jeweiligen Busteilnehmer (Busklemme) sind in diesem Datenwort bestimmte Bereiche zugewiesen, aus denen er lesen kann (z.B. Parametrierungsinformationen) und in die er schreiben kann (z.B. Messwerte).

Die Informationen, die über die Anschaltbaugruppe gesammelt werden, werden dann der Software-SPS zur Verfügung gestellt. Hier wird das Betriebsprogramm der SWSF Rostock umgesetzt.

In der Steuerungstechnik gibt es zwei deutlich voneinander abweichende Ansätze zur Lösung einer Steuerungsaufgabe: Die Verbindungs-Programmierung und die Speicher-Programmierung.

Die Verbindungsprogrammierung ist die herkömmliche Methode zur Lösung von Steuerungsaufgaben. Unter einer Steuerungsaufgabe werden Beeinflussungen von technischen Prozessen verstanden. Dieses können Start- und Stopp-Signale für Maschinen oder Auf- und Zu-Signale für Ventile und Schieber sein. Mit Hilfe von elektromechanischen Bauteilen (Schütze, Re-

lais), die mit Kabeln miteinander verbunden sind, werden Schaltanweisungen umgesetzt. Dabei erfolgt die Befehlsübermittlung über Kabel. Schaltreihenfolgen oder Schaltbedingungen werden durch die Verbindung der Bauteile untereinander erreicht. Hieraus leitet sich die Bezeichnung der Programmierungsart ab.

Die Methode der Verbindungsprogrammierung in Steuerungsaufgaben hat in den vergangenen Jahren an Bedeutung verloren. Mit der Verfügbarkeit von immer kleineren, leistungsfähigeren und kostengünstigeren Mikroprozessoren etabliert sich ein neues Prinzip für die Lösung von Steuerungsaufgaben: die speicherprogrammierte Steuerung (SPS).

Bei dieser Methode zur Lösung von Steuerungsaufgaben erfolgt die Programmierung nicht mehr durch physisch vorhandene Kabel, sondern durch ein Programm, das in einem Mikroprozessor abgearbeitet wird. Der Mikroprozessor steht dabei über Ein- und Ausgänge mit der Anlage in Verbindung.

Bedingt durch die Funktionsweise werden Signale in einer verdrahtungsprogrammierten Steuerung parallel verarbeitet. Ein elektrisches Signal, das an einem Eingang ansteht, steht zeitgleich auch an allen direkt mit dem Eingang verbundenen Punkten der Schaltung an.

In einer speicherprogrammierten Steuerung wird das Steuerungsprogramm im Mikroprozessor in Schritten abgearbeitet. Bedingt durch diese Verfahren werden Signale nacheinander verarbeitet. Man spricht von serieller Signalverarbeitung. Das kann bei einer großen Anzahl von zu verarbeitenden Signale zu zeitlichen Verzögerungen führen. Da moderne Mikroprozessoren mit einer sehr hohen Bearbeitungsgeschwindigkeit funktionieren, tritt dieser Nachteil der speicherprogrammierten Steuerung zunehmend in den Hintergrund.

Der wesentliche Vorteil der speicherprogrammierten Steuerung liegt in ihrer Flexibilität. Mit einer gleich bleibenden elektro-mechanischen Installation können allein durch eine Veränderung des Steuerungsprogramms neue Steuerungsaufgaben gelöst werden. Dieser Vorteil kommt besonders zum Tragen, wenn eine Steuerungsaufgabe gelöst werden soll, bei der verschiedene Rezepte abgearbeitet werden müssen. Durch einen „einfachen“ Programmwechsel, kann ein neues Produkt hergestellt werden.

Das Steuerungsprogramm einer SPS wird immer wieder vom Anfang bis zum Ende durchlaufen. Die Programmierung von speicherprogrammierbaren Steuerungen ist durch entsprechende Normen geregelt (IEC-61131-3, [17]). Für die Programmierung können graphische und textbasierte Programmiersprachen verwendet werden, die gleichwertig nebeneinander stehen.

Prozessrechner

Der Prozessrechner der SWSF-Anlage hat drei wesentliche Aufgaben:

Er stellt das Gehäuse und den elektrischen Anschluss für den Field Controller zur Verfügung.

Der Rechner dient der Visualisierung des Wirbelschichtprozesses und Bedienung der SWSF-Anlage.

Der Rechner dient der Sicherung der Betriebsdaten und Messwerte.

Der an der SWSF Rostock verwendete Field Controller befindet sich als Einschubkarte in dem Prozessrechner. Über den verwendeten Steckplatz erfolgt die elektrische Versorgung des Field Controller und die Kommunikation mit dem Prozessrechner. Für den Betrieb der Anlage wird ausschließlich das Betriebsprogramm benötigt, das im Field Controller läuft. Der Vorteil dieser Kombination liegt in der Entkopplung von Rechenvorgängen. Der Prozess wird über den Mikroprozessor im Field Controller betrieben. Der Prozessrechner steht für erweiterte Aufgaben zur Verfügung. Theoretisch kann der Prozessrechner ausfallen, ohne den Betrieb der SWSF zu beeinflussen.

Eine weitere Aufgabe des Prozessrechners ist die Visualisierung und Bedienung des Prozesses. Für diese Aufgaben müssen Daten zwischen dem Field Controller und dem Prozessrechner ausgetauscht werden. Der Field Controller und der Prozessrechner kommunizieren über den so genannten OPC-Server miteinander. Hierbei handelt es sich um eine Software, die Daten von dem Field Controller abfragt und als Server anderen Anwendungen zur Verfügung stellt (z.B. der Visualisierungssoftware). OPC bedeutet „**OLE for process control**“ (bzw „**Object linking and embedding for process control**“) und basiert auf den Microsoft Mechanismen COM/ DCOM für die Datenkommunikation. Mit Hilfe dieser Verfahren werden in MS-Systemen die Verwendung von Daten einer Anwendung in einer anderen Anwendung (OLE)

und die Kommunikation von einzelnen Prozessen in Rechnernetzwerken (COM/ DCOM) geregelt [36].

OPC ist ein eingeführter Standard in der Automatisierungstechnik. Es handelt sich dabei um einen freien Standard, der durch die OPC-Foundation gepflegt wird [40]. Bei der Programmierung des Field Controller durch PC Worx wird eine OPC-Konfigurationsdatei erzeugt. Hier werden die Daten spezifiziert, die der OPC-Server vom Field Controller abfragen darf. Dabei werden die Daten aus dem Field Controller ausgelesen und durch den OPC-Server auf Variant-Datentypen abgebildet [41]. Die Werte dieser Zustandsdaten werden durch den OPC-Server ausgelesen.

Die vom OPC-Server bereitgestellten Daten werden in der Visualisierung des Prozesses verwendet. Die Visualisierung geschieht mit der Standardsoftware GraphWorx32 von Iconics. Über die Visualisierung wird der Anlagenzustand dargestellt, Schalthandlungen für den Betrieb der Anlage ausgeführt und die Betriebsdaten gesichert.

Die Sicherung der Betriebsdaten erfolgt ebenfalls über die Visualisierungsoberfläche. Hierfür wurde am Lehrstuhl für Umwelttechnik der Universität Rostock ein entsprechendes Programm geschrieben [5]. Mit Hilfe von VBA-Programmen werden die angezeigten Daten (Messwerte, Zustandsdaten, Fehlermeldungen) in eine Textdatei geschrieben. Für die Auswertung der Versuchsfahrten wird die Textdatei in eine Tabelle übertragen. Mit Hilfe der üblichen Möglichkeiten von Tabellenkalkulationsprogrammen kann ein Versuch dann rechnerisch und graphisch ausgewertet werden.

4.2. Funktionsweise der SWSF Rostock

Die SWSF Rostock ist eine stationäre, blasenbildende Wirbelschichtfeuerung kleiner Leistung. Mit der Anlage werden verschiedenste Brennstoffe auf ihre Verwendbarkeit in einer Wirbelschichtfeuerung untersucht. Das primäre Ziel bei diesen Untersuchungen ist es, zu zeigen, dass auch mit problematischen Brennstoffen eine Verbrennung nach den geltenden Emissionsverordnungen möglich ist [BImSchG, TA-Luft,...]. Neben den verfahrenstechnischen Untersuchungen an der SWSF Rostock werden ökonomische Untersuchungen zum Be-

trieb der SWSF durchgeführt. An erster Stelle steht dabei immer die Frage nach der Rentabilität beim Betrieb einer Wirbelschichtfeuerung kleiner Leistung, die nicht mit Regelbrennstoffen betrieben wird.

Aus den Versuchen werden Verfahren zum Betrieb von Wirbelschichtfeuerungen mit problematischen Brennstoffen abgeleitet. Es werden Verfahren zur Abgasnachbehandlung im Reaktor einer Wirbelschichtfeuerung entwickelt und Kriterien für den beobachtungsfreien automatischen Betrieb abgeleitet und erprobt. Die Auswertung der Versuche hat eine Betriebsphilosophie für den Betrieb von Wirbelschichtfeuerungen kleiner Leistungen ergeben, die hier vor gestellt wird.

Die Betriebsphilosophie gliedert sich dabei in zwei Hauptpunkte:

Die Betriebsweise einer Wirbelschichtfeuerung kleiner Leistung und
die Überwachungsaufgaben, die erfüllt werden müssen, damit die vorgegebene Betriebsweise eingehalten wird.

Die Betriebsweise für Wirbelschichten kleiner Leistung setzt sich aus den folgenden Punkten zusammen:

Für einen gewählten Betriebspunkt wird eine feste Wirbelluftmenge gewählt. Beim Betrieb an diesem Betriebspunkt wird die Wirbelluftmenge nicht mehr verändert.

Diese Betriebsweise steht im Gegensatz zu üblichen Fahrweisen von Feuerungen. Dort wird die Verbrennungsluftmenge variiert. Eine Veränderung der Wirbelluftmenge bei einer Wirbelschichtfeuerung ist theoretisch möglich. Die Luft wird bei dieser Feuerungsart jedoch für zwei Aufgaben benötigt, daher ist eine variable Wirbelluftmenge nicht ohne weiteres realisierbar. Die Wirbelluft dient der Fluidisation des Wirbelbettes *und* der Bereitstellung des für die Verbrennung notwendigen Sauerstoffes. Bei einer Variation der Wirbelluft, wie bei anderen Feuerungsarten, steigt der Überwachungsaufwand stark an. Dieses würde die Kosten für die Anlage (Sensoren, Aktoren) deutlich ansteigen lassen. Ein wirtschaftlicher Betrieb der SWSF wäre dann nicht mehr möglich. Daher wird dieses Verfahren bei Wirbelschichtfeuerungen kleiner Leistung nicht verwendet.

Die Verbrennung des Brennstoffes erfolgt vollständig in dem fluidisierten Wirbelbett.

Die Verwendung eines Wirbelbettes für die Brennstoffumsetzung ermöglicht es, die Rahmenbedingungen für die Verbrennung sehr genau einzustellen (Druck, Temperatur, Reaktionszeit,...). Die Verbrennung erfolgt in einem geometrisch durch die Bett Höhe und den Reaktordurchmesser definierten Bereich. Durch die homogenen Eigenschaften des Wirbelbettes lässt sich der Reaktionsbereich geometrisch und energetisch sehr genau beschreiben.

Die lange Verweildauer des Brennstoffes in dem Wirbelbett gewährleistet die vollständige Umsetzung. Hieraus ergibt sich auch die, im Vergleich zu Rostfeuerungen oder Staubfeuerungen, niedrige Betriebstemperatur von $\vartheta = 780 \dots 880^{\circ}\text{C}$. Die Variation der geometrischen Ausdehnung der Wirbelschicht ermöglicht die Verwendung vieler Brennstoffe. Die notwendige Verweilzeit kann z.B. durch die Schichthöhe eingestellt werden.

Aus den niedrigen Betriebstemperaturen ergibt sich ein günstiges Schadstoffverhalten der Abgase. So ist die Bildung von Stickoxiden (NO_x) in dem Bereich der Betriebstemperatur deutlich reduziert. Thermische Stickoxide bildet sich erst ab Temperaturen von $T > 1300\text{ K}$ und spontanes NO_x wird vornehmlich in Flammenfronten gebildet. Die Wirbelschicht-Verbrennung erfolgt jedoch flammenlos bei einer Temperatur unterhalb der Bildungstemperatur.

Die Speichereigenschaften des Wirbelbettes werden mehrfach genutzt: Zum einen wird der Brennstoff in der Wirbelschicht fein verteilt. Die Verbrennung setzt durch die Vielzahl von Zündquellen an vielen Stellen in der Schicht ein. Zum anderen können in das Bett Additive eingespeichert werden, mit denen eine Rauchgasreinigung bereits im Reaktor, quasi bei der Verbrennung (in situ), erfolgen kann.

Die Speichereigenschaften des Bettes werden auch zum Ausgleich von Heizwertschwankungen des Brennstoffes oder ungleichmäßiger Brennstoffförderung genutzt. Hierdurch kommt es nicht sofort zu einer Temperaturveränderung im Wirbelbett. Diese Eigenschaft ist besonders bei der Verwendung von heterogenen Brennstoffen, wie Brennstoff aus Müll (BRAM), von Interesse.

Wenn die Verbrennung nur zu einem Teil im Wirbelbett ablaufen würde, gingen viel der hier aufgezählten Vorteile verloren. Bei einer Verbrennung außerhalb der Schicht degradierte man das fluidisierte Bett zu einer Art „variablem Rost“. Der Ort der Reaktion würde sich aus einer genau definierten Zone in den gesamten Reaktor verschieben. Die Verbrennung würde nicht in solch einer homogenen Form ablaufen. Es käme zu Temperaturgradienten innerhalb der Reaktionszone.

Durch die Verbrennungsverlagerung aus dem Bett heraus würde die Verweilzeit des Brennstoffes in der Reaktionszone deutlich kürzer. Damit der Brennstoff dennoch vollständig umgesetzt würde, müsste die Reaktionstemperatur erhöht werden. Eine höhere Reaktionstemperatur beeinflusst jedoch die Bildung der Luftsabdstoffe NO_X , SO_2 in negativer Weise. Eine umfangreichere Abgasnachbehandlung würde notwendig werden.

Zusätzlich zu der notwendigen erhöhten Reaktionstemperatur würde die Verbrennung jetzt nicht mehr flammenlos ablaufen. Mit der Verbrennung in Flammen erhöht sich auch die Bildung von spontanem NO_X .

Bei einer Verbrennung oberhalb der Wirbelschicht könnten die Speichereigenschaften des Wirbelbettes nicht mehr in dem Maße genutzt werden. Diese Eigenschaften sind jedoch die Voraussetzung für die Abgasbehandlung direkt bei der Verbrennung. Sollten in dieser Variante Brennstoffe verbrannt werden, die eine Abgasnachbehandlung notwendig machen, müsste diese in einer zusätzlichen nachgeschalteten Reinigungsanlage erfolgen.

Bei der Verbrennung in der Wirbelschicht wird der Brennstoff direkt in das heiße fluidisierte Bett eingebracht.

Diese Forderung ergibt sich aus den physikalischen Eigenschaften einiger verwendeter Brennstoffe und der oben genannten Forderung, dass die gesamte Energieumsetzung in dem fluidisierten Wirbelbett erfolgt. Das Wirbelbett aus inertem Material (Sandpartikel) hat im fluidisierten Zustand die gleichen Eigenschaften wie ein viskoses Fluid. Es gelten daher die Gesetzmäßigkeiten des archimedischen Prinzips. In einem fluidisierten Bett kann ein Stoff also schweben, absinken oder auftreiben. Um den Umsatz eines Brennstoffes, der im fluidi-

sierten Bett aufschwimmt, in der Wirbelschicht zu gewährleisten, wird der Brennstoff unten in das Wirbelbett eingebracht. So wird er während des Aufschwimmens in der Wirbelschicht vollständig umgesetzt werden.

Die hier dargestellten Punkte beschreiben die Eckpunkte der am Lehrstuhl für Umwelttechnik entwickelten Betriebsweise für stationäre Wirbelschichtfeuerungen kleiner Leistung. Die technische Umsetzung dieser Betriebsweise muss für die einzelne Anwendung einer solchen Feuerung zugeschnitten werden.

Neben der vorgestellten Betriebsweise sind zur Erfüllung der Betriebsphilosophie eine Reihe von Überwachungsaufgaben zu erfüllen. Die Überwachungsaufgaben werden in [50] in vier Prioritätsebenen eingeteilt:

1. Erfassung des Fluidisationszustandes der Anlage.
2. Sicherung der energetischen Bilanz im SWSF-Reaktor.
3. Erfassung der betriebssicheren Reaktionsführung.
4. Erfassung und Beeinflussung der Emissionen.

Damit eine Wirbelschichtfeuerung bestimmungsgemäß funktionieren kann, müssen die Ebenen kontinuierlich der Reihe nach überprüft werden. Jeder Überprüfungsdurchlauf erfolgt von der Ebene 1 zur Ebene 4. Nur wenn die vorherige Prioritätsebene erfüllt ist, wird die folgende Ebene überprüft. So lange die Bedingungen in allen Ebenen erfüllt werden, wird die SWSF weiter betrieben.

Die Überwachung des Fluidisationszustandes der Wirbelschichtfeuerung ist die Basisüberwachung der Anlage. Nur wenn wirklich ein fluidisiertes Bett aus Inertmaterial vorhanden ist, kann in diesem Bett auch Brennstoff umgesetzt werden. Zur Überwachung des Fluidisationszustandes werden an der SWSF Rostock zwei Größen verwendet: die in den Reaktor eingebrachte Wirbelluftmenge und die Druckdifferenz über der Wirbelschicht. Für eine sinnvolle Überwachung des Fluidisationszustandes ist es notwendig, beide Signale auszuwerten.

Die Wirbelluftmenge wird über das in Kapitel 4.1 beschriebene Volumenstrommessgerät ermittelt. Durch die Messung des Volumenstromes ist bekannt, ob überhaupt Luft in den Reak-

tor gefördert wird. Der Wirbelluftvolumenstrom reicht jedoch allein nicht aus, um sicher zu ermitteln, ob es im Reaktor zur Fluidisation des inerten Materials kommt. Durch die Bildung von partikelfreien Strömungskanälen im inerten Material kann auch Luft durch den Reaktor strömen, ohne dass es zur Fluidisation des Bettmaterials kommt. Zum sicheren Detektieren der Bettfluidisation werden die Fluktuationen des Differenzdruckes über der Schicht benötigt.

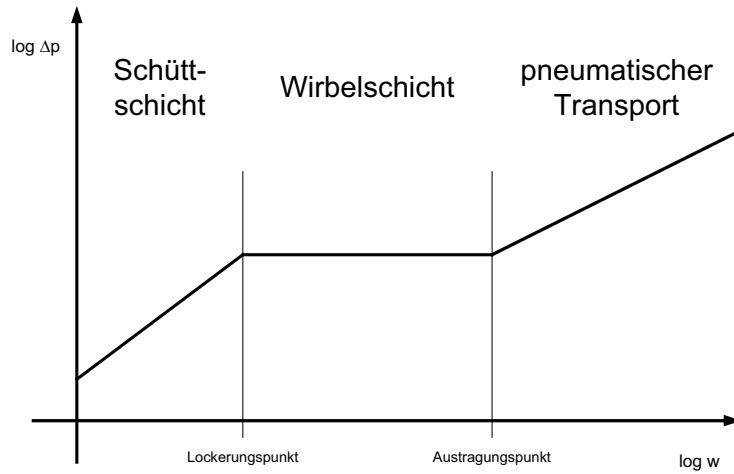


Abbildung 21: Verlauf des Differenzdruckes [50]

Der Differenzdruck über der Wirbelschicht wird nach dem in Anhang 9.5 beschriebenen Verfahren gemessen. In Abhängigkeit von der Leerrohrgeschwindigkeit w ergibt sich der in Abbildung 21 dargestellte charakteristische Verlauf des Differenzdruckes. Im Betriebspunkt der SWSF stellt sich ein konstanter Druckverlust über der Wirbelschicht ein. Das dargestellte Betriebsdiagramm gilt für eine konstante Masse Bettmaterial. An der Anlage in Rostock erfolgt die Messung des Differenzdruckes jedoch über den Düsenboden und die fluidisierte Schicht (verg. Abbildung 15, PDIR 201). Man misst daher bei der Differenzdruckmessung auch den Druckverlust über den Wirbelluftdüsen.

Beim Eintragen der Luft in das fluidisierte Bett kommt es zur charakteristischen Blasenbildung in der Wirbelschicht. Die Luftblasen steigen durch das fluidisierte Bett auf und platzen an der Oberfläche. Durch das dabei mitgerissene Bettmaterial, das wieder in das Bett zurückfließt, kommt es zu Druckstößen. Die Druckstöße überlagern dem Differenzdrucksignal eine zufällige Komponente. Das Signal schwankt im Normalbetrieb zufällig zwischen einem Minimum und einem Maximum. Diese zufälligen Schwankungen werden für die Überwachung der Bettfluidisation verwendet. Solange das Differenzdrucksignal mit diesen zufälligen Schwankungen überlagert ist, wird das Bettmaterial fluidisiert.

Durch eine falsche Betriebsführung kann es im Reaktor zu Sintererscheinungen des Bettmaterials kommen. Ein solcher Fehler kündigt sich im Verhalten des Differenzdrucksignals an. Durch die Sinterung kleben die Bestandteile des Bettmaterials aneinander. Es entwickelt sich ein „Pfropf“ im Reaktor. In dem gesinterten Bettmaterial können keine Luftblasen mehr aufsteigen und platzen. Dementsprechend nehmen die zufälligen Druckschwankungen des Differenzdrucksignals ab. Die zufälligen Druckschwankungen sind ein Indiz für das Vorhandensein eines fluidisierten Wirbelbettes.

Für die Überwachung der Prioritätsebene 1 werden der Wirbelluftvolumenstrom und der Differenzdruck über der Wirbelschicht ausgewertet. Nur wenn Wirbelluft geliefert wird und zufällige Druckschwankungen über der Wirbelschicht auftreten, ist das Inertmaterial im Reaktor fluidisiert und die Bedingung der Prioritätsebene 1 erfüllt.

In der zweiten Prioritätsebene wird die energetische Bilanz der SWSF überwacht. In dieser Ebene wird die Verbrennungsreaktion kontrolliert. Diese Überwachungsaufgabe kann auf zwei Wegen an der SWSF Rostock erfüllt werden.

Bei der SWSF Rostock handelt es sich um ein stationär durchströmtes System (verg. Kapitel 3.5). Für das System wurde dort bereits eine Leistungsbilanz erstellt. Über die Leistungsbilanz wird dort der Heizwert des verwendeten Brennstoffes ermittelt. Nachdem der Heizwert bestimmt ist, kann das Verfahren zur Überprüfung der Leistungsbilanz verwendet werden. Hierzu muss die Summe aller eingehenden Leistungen gleich der Summe aller ausgehenden Leistungen sein.

$$\sum P_{zu} - \sum P_{ab} = 0 \quad (35)$$

Die Bedingung, die in Gleichung (35) genannt wird, kann über das Betriebsprogramm überprüft werden. Von dort aus können dann entsprechende Maßnahmen zur Prozessführung eingeleitet werden. Dieses Verfahren ist an der SWSF Rostock jedoch noch nicht praktisch umgesetzt.

Zur Überprüfung der Prioritätsebene 2 wird an der SWSF Rostock die mittlere Wirbelschichttemperatur ϑ_{WSMW} verwendet. Durch die eingebrachten und ausgetragenen Leistungen stellt

sich jeweils immer genau ein Betriebszustand ein. Der Betriebszustand ist dabei durch den Wirbelluftvolumenstrom, den Brennstoffmassenstrom, die Wirbelschichttemperatur und durch die Abgaszusammensetzung charakterisiert. Die Messwerte verändern sich in einem einmal eingestellten Gleichgewichtszustand nicht mehr signifikant. Diese Tatsache wird zur Überwachung des energetischen Zustandes der SWSF verwendet.

Durch die homogenisierende Wirkung des Bettmaterials ist die mittlere Wirbelschichttemperatur den geringsten Schwankungen unterworfen. Daher wird diese Größe zur Überwachung des energetischen Zustandes verwendet. Damit sich die SWSF in einem energetisch ausgeglichenen Zustand befindet, muss die Wirbelschichttemperatur konstant sein.

In der Prioritätsebene 3 wird die betriebssichere Reaktionsführung überwacht. Hiermit wird sichergestellt, dass die Verbrennungsreaktion an dem vorgesehenen Ort innerhalb des Reaktors und im energetischen Gleichgewicht stattfindet. Nur wenn diese Bedingung erfüllt ist, können die Vorteile der Wirbelschichtverbrennung vollständig ausgenutzt werden. Mit Hilfe der Überwachung und den daraus abgeleiteten Eingriffen in den Prozess wird sichergestellt, dass die Betriebspolitik für Wirbelschichten kleiner Leistung erfüllt wird.

Zur Überwachung des Reaktionsortes werden die Temperaturverteilung innerhalb der Wirbelschicht und die Wirbelschichttemperatur im Verhältnis zur Freeboardtemperatur kontrolliert.

Im Regelbetrieb der SWSF bildet sich durch die homogenisierende Wirkung des Bettmaterials kein deutliches Temperaturprofil innerhalb der Wirbelschicht heraus. Alle in der Wirbelschicht gemessenen Temperaturen liegen innerhalb eines Intervalls von $\vartheta_{WSMW} \pm 0,5$ K. Eine Verlagerung des Reaktionsbereiches lässt sich anhand des Ausbildens eines Temperaturprofils über der Höhe der Wirbelschicht erkennen. Es kommt zu einer Auskühlung in den unteren Bereichen der Schicht und zu einem Temperaturanstieg im oberen Bereich der Schicht. Wenn in diesem Betriebszustand keine Gegenmaßnahmen eingeleitet werden, kommt es zu einem Herauswandern der Reaktionszone aus der Wirbelschicht. Das führt zu einem Anstieg der Freeboard-Temperatur. Im Extremfall findet ein großer Anteil der Verbrennung im Freeboard statt. Die Freeboardtemperatur wird dann deutlich größer als die Betttemperatur. Die Wirbelschicht arbeitet nur noch als „thermische Brennstoffaufbereitung“.

Zur Kontrolle der Reaktion wird der Sauerstoff im feuchten Abgas überwacht. Ein stationärer Betriebspunkt ist durch eine nahezu konstante Sauerstoffkonzentration gekennzeichnet. Kommt es zu Abweichungen im Betrieb (mehr/weniger Brennstoff; mehr/ weniger Wirbelluft), so erkennt man das am schnellsten an der Veränderung der Sauerstoffkonzentration im Abgas. Eine Veränderung der Reaktionsbedingungen bewirkt immer eine Veränderung der Reaktionsergebnisse. Durch die Überwachung der Sauerstoffkonzentration können solche abweichenden Betriebsbedingungen frühzeitig erkannt werden.

Die aus der Überwachung der Größen der „Prioritätsebene 3“ gewonnenen Informationen werden für die Steuerung und Regelung der SWSF verwendet.

In der Prioritätsebene 4 werden die Ergebnisse der Verbrennung überwacht. Jede Verbrennungsanlage muss den einschlägigen Emissionsschutzgesetzen genügen. Damit die Grenzwerte eingehalten werden, müssen die Abgase entweder entsprechend nachbehandelt werden (Staub-, Rostfeuerungen) oder bereits bei der Verbrennung gereinigt werden (SWSF). Damit nachgewiesen werden kann, dass die SWSF die Grenzwerte einhält, bzw. um die Reinigung der Abgase im Reaktor zu überwachen, werden die Konzentrationen verschiedener Komponenten der Abgase der SWSF gemessen. Mit Hilfe der Messwerte kann dann die Abgasnachbehandlung z.B. durch die Zugabe von Additiven eingeleitet werden.

Die hier genannte Betriebsweise und die Betriebsüberwachung in den vier Prioritätsebenen stellt den derzeitigen Stand der Technik bei dem Betrieb von stationären Wirbelschichtfeuerungen kleiner Leistung dar. In Experimenten an der Universität Rostock und in Feldversuchen wurde erfolgreich nachgewiesen, dass damit ein kommerziell und ökologisch erfolgreicher Betrieb einer SWSF möglich ist.

4.3. Betriebsprogramm

Das Betriebsprogramm der SWSF Rostock ist das Programm, das von dem Mikroprozessor des Field Controller abgearbeitet wird. Ein vergleichbares Programm kommt an der Wirbelschichtfackel (SWSF) Rönkendorf zum Einsatz, an der die „Betreiberphilosophie“ im Dauerbetrieb getestet wird. Das dort eingesetzte Programm wurde vom Verfasser aus dem hier dar-

gelegten Programm abgeleitet und modifiziert. Es läuft seit mehr als zwei Jahren zuverlässig und gewährleistet einen vollautomatischen und fernüberwachten Betrieb der mit hoher Verfügbarkeit laufenden Anlage.

Die Aufgabe der dort verwendeten Wirbelschichtfeuerung ist es, heizwertarme Deponiegase umweltverträglich zu entsorgen. Dabei wird auf eine Wirbelschichtanlage der gleichen Bauart wie in Rostock zurückgegriffen. Die Anlage in Rönkendorf wurde an den speziellen Anwendungsfall entsprechend angepasst. So steht in Rönkendorf lediglich ein Brennstoffeintragssystem zur Verfügung.

Die Funktionen der beiden Betriebsprogramme sind über weite Strecken gleich. Sie wurden aus Gründen der vereinfachten Programmwartung vereinheitlicht. Zu dem an der Anlage in Rönkendorf verwendeten Betriebsprogramm liegt bereits eine Programmdokumentation nach DIN 66 230 vor. Dort finden sich die wesentlichen Angaben zu den Programmkenndaten, zur Datenverarbeitung und der Programmanwendung [15]. Für eine eingehende Beschäftigung mit dem Betriebsprogramm wird auf diese Dokumentation verwiesen. Die grundlegenden Zusammenhänge und Aufgaben des Betriebsprogramms werden an dieser Stelle kurz zusammengefasst.

Das Betriebsprogramm dient der Erfüllung von zwei Aufgabenkomplexen:

1. Die Überwachung des Wirbelschichtverbrennungsprozesses.
2. Die Überwachung der verwendeten Apparate und Geräte.

In dem Teilbereich der Prozessüberwachung wird durch das Betriebsprogramm sichergestellt, dass die bereits beschriebene Betriebsphilosophie umgesetzt wird. Hierzu werden die charakteristischen Größen Wirbelluftvolumenstrom, Wirbelschichttemperatur und Sauerstoffkonzentration im Abgas verarbeitet. Durch die Ermittlung von Grenzwerten und Tendenzen stellt das Programm sicher, dass die Vorgaben aus der Betriebsphilosophie eingehalten werden. In den Bereich der Prozessüberwachung fällt auch der Betrieb der Anlage in den verschiedenen Betriebsmodi: Stopp, Hand und Automatik. Im Betriebsmodus Automatik wird die Wirbelschichttemperatur mit einer vorgegebenen Solltemperatur verglichen und aus der Differenz ein Stellsignal für die Brennstoffförderer errechnet. Hierdurch wird der benötigte Brennstoff-

massenstrom in die SWSF eingetragen. Die Berechnungen erfolgen in einem externen Regelbaustein, der über Standardsignale an die Prozessautomatisierung angebunden ist.

In dem durch den Anlagenfahrer gewählten Betriebsmodus (BM) werden die über die Bedienoberfläche eingegebenen Stellsignale entweder direkt (BM Hand) oder über Umrechnungen (BM Auto) an den Prozess weitergegeben.

Der zweite Aufgabenkomplex beinhaltet die Überwachung der verwendeten Apparate und Geräte, so dass die durch die Hersteller vorgegebenen Einsatzgrenzen nicht überschritten werden. Weiterhin wird in diesem Teil des Betriebsprogramms die Funktion der Sensoren überwacht.

Die Ergebnisse der Überwachung der beiden Programmteile führen zu einer Bewertung des Gesamtzustandes der Anlage und zu einer Entscheidung, ob alle Bedingungen für den bestimmungsgemäßen Betrieb erfüllt sind. Sollte das nicht der Fall sein, dann wird die Anlage aus dem Betriebsprogramm heraus in den betriebssicheren Zustand überführt. Hierzu wird die Brennstoffzufuhr unterbrochen und die Anlage nachgelüftet.

4.4. Verifikationsversuche

Das Ziel der Verifikation ist es, nachzuweisen, dass das theoretisch hergeleitete Verfahren zur Bestimmung des Heizwertes eines verwendeten Brennstoffes sinnvolle/ plausible Ergebnisse liefert. Hierzu wird in zwei Schritten vorgegangen:

1. Der erste Schritt ist die bereits im Kapitel 3.6 beschriebene Simulation des Verfahrens.
2. Der zweite Schritt ist die Untersuchung des Verfahrens im Test.

Zum Funktionsnachweis des Verfahrens wurden an der SWSF Verifikationsversuche durchgeführt. Die dafür durchgeführten Versuche hatten zwei Aufgaben:

1. Zunächst wird in Kalt- und Heißversuchen sichergestellt, dass alle Berechnungen korrekt durchgeführt werden.

2. Nachdem die Berechnungen plausible Ergebnisse liefern, wird das Verfahren auf verschiedene Brennstoffe angewendet.

Für jeden Versuchslauf ergibt sich damit die konkrete Versuchsaufgabe:

In einem heißen Versuchslauf an der SWSF soll das Verfahren zur Online-Identifikation der kalorischen Eigenschaften des verwendeten Brennstoffes erprobt werden.

Alle Verifikationsversuche wurden an der Universität Rostock durchgeführt. Dabei wurde die SWSF in ihrer oben beschriebenen Konfiguration verwendet.

Der Versuchsablauf ist dabei immer gleich:

Anfahren der SWSF, herstellen der „Versuchsbereitschaft“.

Nach dem Erreichen eines stationären Betriebspunktes wird dieser für die Dauer von $t > 30 \dots 60$ min gehalten. Parallel dazu erfolgt die Ermittlung der kalorischen Eigenschaften des Brennstoffes.

Bei Versuchsläufen mit anderen Zielsetzungen (z.B. Schadstoffreduzierung) läuft die Brennstofferkennung im Hintergrund mit. Anhand der aufgezeichneten Messwerte werden die kalorischen Eigenschaften des verwendeten Brennstoffes in der Versuchsauswertung ermittelt.

Nach dem Versuchende wird die Anlage entsprechend der Betriebsanleitung außer Betrieb genommen.

Die Betriebspunkte, bei denen die Brennstoffidentifikation dabei erprobt wird, richten sich nach dem verwendeten Brennstoff. Insgesamt wurden die folgenden Versuche zur Brennstoffidentifikation durchgeführt:

Tabelle 20: Übersicht Versuche zur Brennstoffidentifikation

Nr.	Datum	Brennstoff	Bemerkungen
1.	060509	Erdgas, Rapsschrot	Funktionsprobe Brennstoffidentifikation
2.	060530	Erdgas	Funktionsprobe Brennstoffidentifikation
3.	060705	Hanfschäben	Brennstoffidentifikation
4.	060825	Erdgas	Brennstoffidentifikation
5.	060906	Erdgas, Petrolkoks	Brennstoffidentifikation
6.	060912	Erdgas, Petrolkoks	Brennstoffidentifikation
7.	060926	Erdgas, Petrolkoks	Brennstoffidentifikation
8.	061011	Erdgas, Petrolkoks	Brennstoffidentifikation
9.	061017	Oliventrester, Raffinerieschlamm	Brennstoffidentifikation
10.	061024	Rapsschrot	Brennstoffuntersuchung
11.	061130	Rapsschrot und Harnstoff	Brennstoffuntersuchung
12.	061212	Erdgas und Sickerwasser	Brennstoffuntersuchung
13.	061218	Rapsschrot und Harnstoff	Brennstoffuntersuchung
14.	070110	Rapsschrot und Ammoniumwasser	Brennstoffuntersuchung
15.	070117	Erdgas	Brennstoffuntersuchung
16.	070124	Erdgas, Weizen	Untersuchung Regler
17.	070201	Erdgas, Rapsschrot	Untersuchung Regler

Für die Verifikation der Brennstoffidentifikation werden sowohl Versuche ausgewertet, die zur Überprüfung des Verfahrens durchgeführt wurden, als auch Versuche, die im Rahmen von Brennstoffuntersuchungen am Lehrstuhl durchgeführt wurden. Die Auswertung der Versuche erfolgt im folgenden Kapitel.

5. Versuchsauswertung

5.1. Auswertungsverfahren

Das Auswertungsverfahren für die praktische Überprüfung des Verfahrens zur Brennstoffidentifikation unterteilt sich in zwei Teile:

Zunächst werden die Messungen der Versuchsfahrten ausgewertet. Hierbei werden aus den Messwerten und den Massen- und Energiebilanzen für die jeweilige Versuchsfahrt der Heizwert, der maximale CO_2 -Wert und der minimale spezifische Luftbedarf berechnet. Die aus den Messwerten bestimmten brennstofftechnischen Werte werden dann mit den tabellierten Werten verglichen. Diese Werte dienen als Basis für die Berechnungen der Abweichungen. Die Basiswerte werden dabei im Labor bestimmt und aus den Analysen/ Elementaranalysen durch eine Verbrennungsrechnung ermittelt.

Für die Auswertung werden die verwendeten Brennstoffe getrennt betrachtet. Für jeden Brennstoff wird eine Tabelle mit den Ergebnissen der einzelnen Versuchsfahrten erstellt. Die charakteristischen Verhaltensweisen werden zusätzlich in Form von Diagrammen erläutert. Dabei werden für jeden Brennstoff nur die jeweils besten/ schlechtesten Versuchsfahrten in diesem Teil der Arbeit ausgewertet. Zur Verbesserung der Lesbarkeit finden sich die Diagramme der verbleibenden Versuchstage, zusammen mit jeweils kurzen Anmerkungen, im Anhang 9.8.

Im zweiten Teil der Versuchsauswertung werden der im Versuch ermittelte Heizwert und der CO_{2max} -Wert in die in Kapitel 3.7 hergeleitete Brennstoffmatrix eingeordnet und mit den Ergebnissen der Simulationsrechnung (Kapitel 3.6) und den aus der Elementaranalyse berechneten Werten verglichen.

Aus den im Zeitraum der Experimente durchgeföhrten Untersuchungen und aus dem Betriebsregime der SWSF Rostock ergibt sich die Mischung der verwendeten Brennstoffe.

5.2. Ergebnisse der Versuchsauswertung

Als Ausgangsgrößen für die Versuchsauswertung ergeben sich aus der Verbrennungsrechnung, die in Tabelle 21 dargestellten Größen.

Tabelle 21: Übersicht Tabellenwerte der untersuchten Brennstoffe [48], [38]

Nr.	Brennstoff	Heizwert		min. Luftmenge
		H_u kJ/ kg BS	CO_{2max} Vol%	
1.	Erdgas	45794	12,1	12,0
2.	Rapsschrot	18086	17,6	5,1
3.	Perolkoks	34960	18,0	8,7
4.	Oliventrester	16417	19,3	4,3
5.	Klärschlamm	18619	16,9	4,9

Für einen Überblick über die Ergebnisse der Experimente werden alle Versuchsfahrten des jeweiligen Brennstoffes ausgewertet und die Ergebnisse in der Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 22: Übersicht mittlere Versuchsergebnisse

Nr.	Brennstoff	Heizwert	rel. Abweichung	max. CO ₂	rel. Abweichung	min. Luftmenge	rel. Abweichung
		H _U	H _U rel	CO _{2max}	CO _{2max} rel	I _{min}	I _{min} rel
		kJ/ kg BS	%	Vol%	%	m ³ / kgBS	%
1.	Erdgas	44858	-2,3	10,8	-12,1	11,8	17,6
2.	Rapsschrot	17756	-2,2	16,7	-7,2	4,6	-14,2
3.	Perolkoks	37692	12,4	18,5	2,0	9,8	10,4
4.	Oliventrester	26157	37,1	17,7	-9,1	6,5	33,2
5.	Klärschlamm	7113	-161,8	15,9	-1,6	1,6	-216,2

Bei den dargestellten Größen handelt es sich um die Mittelwerte aller Versuchsfahrten und ihre absoluten Abweichungen bezogen auf die Tabellenwerte. Daneben werden die relativen Abweichungen zu den tabellierten Werten mit angegeben. Die Berechnung erfolgt nach der in Gleichung (30) dargestellten Methode (Vorzeichen \cong Abweichungsrichtung).

Die meisten Versuche wurden mit den Brennstoffen Erdgas, Rapsschrot und Petrolkoks durchgeführt. Die Versuche mit den Brennstoffen Oliventrester und Klärschlamm umfassten jeweils nur zwei Versuchsfahrten, bei denen im Wesentlichen die Verwendbarkeit des Brennstoffes in einer SWSF nachgewiesen werden sollte. Im Zuge dieser Versuche wurden keine echten stationären Betriebszustände erreicht. Die Messwerte und ihre Darstellung erfolgen hier nur wegen der Vollständigkeit. Daher liegt der Schwerpunkt bei der Versuchsauswertung bei den drei ersten Brennstoffen.

Erdgas

Bei dem Brennstoff Erdgas handelt es sich um einen so genannten „edlen“ Brennstoff. Es steht in großen Mengen für die Energiebereitstellung zur Verfügung. Erdgas hat den Vorteil, dass es sich einfach transportieren und in eine Wirbelschichtfeuerung einbringen lässt. Der Brennstoff kann als homogen bezeichnet werden.

Tabelle 23: Übersicht Versuche mit Erdgas

Nr.	Versuchstag	Brennstoff	Heizwert	Abwei-		rel. Abwei-	max. CO ₂	Abwei-		rel. Abwei-	min. Luft-	Abwei-	rel. Abwei-
				H _U	ΔH _U			H _U rel	CO _{2max}				
				kJ/ kg BS	kJ/ kg BS	%		%				m ³ / kgBS	%
1.	Tabellenwerte	EG	45793,8	0,0	0,0		12,1	0,0	0,0	9,8	0,0	0,0	
2.	Simulation	EG	45083,0	-710,8	-1,6		12,1	0,0	0,2	9,7	-0,1	-0,5	
3.	Simulation	EG LUVO	44726,5	-1067,3	-2,4		12,1	0,0	0,2	9,7	-0,1	-0,5	
4.	060906	EG1 auto	44539,4	-1254,4	-2,8		10,4	-1,7	-16,0	12,0	2,3	18,9	
5.	060906	EG2 auto	44655,7	-1138,0	-2,5		10,3	-1,8	-17,1	12,1	2,3	19,2	
6.	060906	EG3 auto	44531,0	-1262,8	-2,8		10,6	-1,4	-13,4	11,7	2,0	16,7	
7.	061130	EG1 man	46902,5	1108,7	2,4		10,8	-1,2	-11,4	11,9	2,1	17,8	
8.	061212	EG1 auto	44670,7	-1123,1	-2,5		10,7	-1,4	-12,6	11,6	1,9	16,0	
9.	061212	EG2 SW auto	45627,4	-166,4	-0,4		11,0	-1,0	-9,4	11,9	2,2	18,4	
10.	061212	EG3 SW auto	47616,1	1822,3	3,8		11,2	-0,8	-7,3	11,9	2,1	17,8	
11.	061212	EG4 SW auto	48134,6	2340,8	4,9		11,3	-0,8	-7,0	11,8	2,1	17,7	
12.	061212	EG5 SW auto	48708,7	2914,9	6,0		11,3	-0,8	-6,7	11,8	2,0	17,0	
13.	061218	EG1 man	43882,2	-1911,6	-4,4		11,0	-1,0	-9,4	11,8	2,0	17,1	
14.	070110	EG1 man	43243,4	-2550,4	-5,9		10,7	-1,3	-12,4	11,3	1,6	14,0	
15.	070117	EG auto	46085,7	291,9	0,6		10,2	-1,8	-17,7	12,1	2,3	19,2	
16.	070124	EG1 auto	44113,5	-1680,3	-3,8		10,6	-1,4	-13,5	11,8	2,1	17,6	
17.	070124	EG2 auto	46127,1	333,3	0,7		10,6	-1,5	-13,8	11,9	2,1	18,0	
18.	070124	EG3 auto	47215,8	1422,0	3,0		10,6	-1,4	-13,5	12,1	2,3	19,1	

Mit Erdgas wurden 15 auswertbare Versuchsfahrten durchgeführt. Die große Anzahl der Versuche resultiert daraus, dass Erdgas der An- und Warmfahrbrennstoff der SWSF ist.

Es zeigt sich, dass der ermittelte Heizwert des Erdgases in einem Intervall von -2550...+2915 kJ/ kgBS um den tabellierten Wert liegt. Das entspricht einer relativen Abweichung von 5,9...6 %. Damit wird der Heizwert des Erdgases mit dem Verfahren zur Brennstoffidentifikation sehr genau getroffen. Ein möglicher Grund für die Abweichungen des ermittelten Heizwertes liegt in der vorliegenden Brenngasanalyse und damit der Bezugsbasis. Die Analyse der Stadtwerke Rostock [48] gibt die Mittelwerte des Jahres 2004 an (H_U 40,807 MJ/ m³). Die Zusammensetzung des Erdgases ist veränderlich. In derselben Quelle werden Schwankungsbreiten für die charakteristischen Bestandteile des Erdgases angegeben.

Der CO_{2max} -Wert wird in einem Intervall von -1,8...-0,8 Vol% ermittelt (relative Abweichung: -17,7...-6,7%). Für die minimale spezifische Luftpumpe wird eine Abweichung von 1,6...2,3 m³NL/ kgBS ermittelt (relative Abweichung: 14...19,2%).

Abbildung 22 zeigt den typischen Verlauf eines ermittelten Heizwertes. Dabei werden der im Versuch ermittelte Heizwert, der tabellierte Heizwert, die mittlere Wirbelschichttemperatur und die Drehzahl des Brennstoffeintragssystems (~ Brennstoffmassenstrom) mit dargestellt.

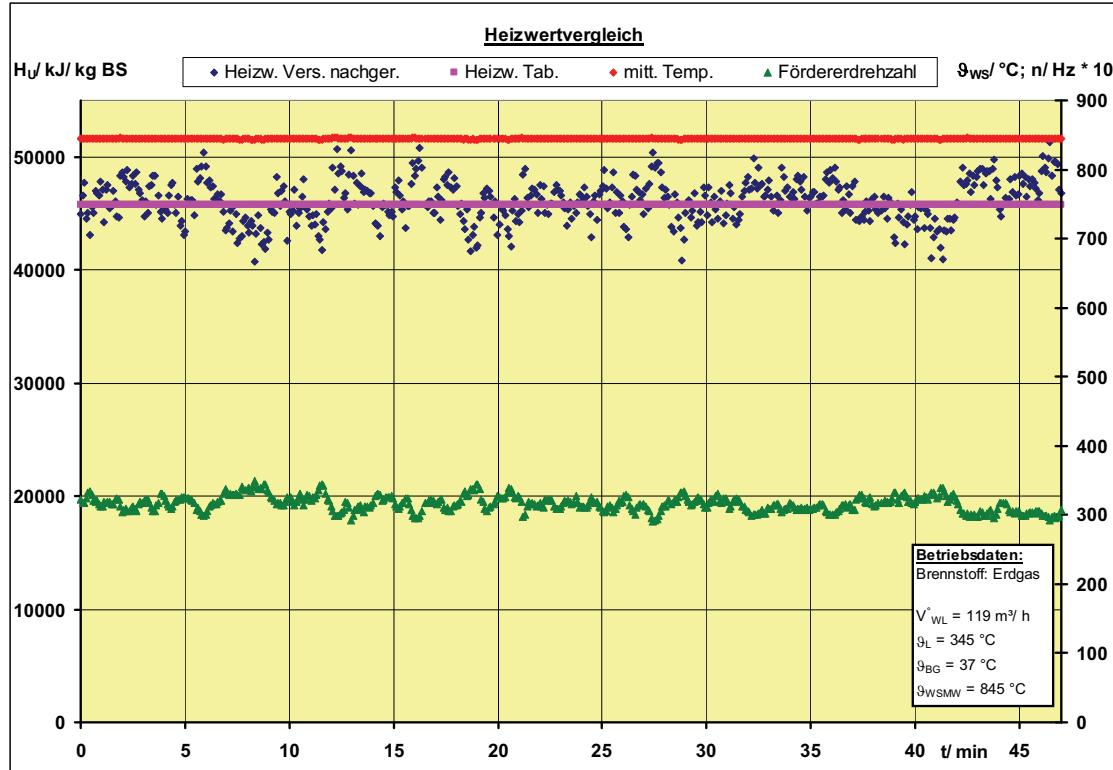


Abbildung 22: Heizwertermittlung Erdgas 070124

Der dargestellte Versuch wurde im Betriebsmodus Automatik gefahren. Man erkennt, dass die Wirbelschichttemperatur über den Versuch konstant gehalten wird. Die Momentanwerte des Heizwertes schwanken um den tabellierten Heizwert. An dem dargestellten Verlauf des bestimmten Heizwertes kann man ein charakteristisches Verhalten des Berechnungsalgorithmus erkennen: Die Heizwertberechnung erfolgt nach dem Ausdruck

$$H_U = \frac{\dot{Q}_{BS}}{\dot{m}_{BS}} \quad (36)$$

Durch die Quotientenbildung bei der Berechnung des Heizwertes geht der Brennstoffmassenstrom umgekehrt proportional in die Berechnung mit ein. Eine Erhöhung des Brennstoffmassenstromes bewirkt damit direkt eine Verminderung des berechneten Heizwertes und umgekehrt. Dieses Verhalten wird sich in allen Versuchen wiederfinden.

Einen weiteren charakteristischen Verlauf der bestimmten Größen zeigt die Abbildung 23:

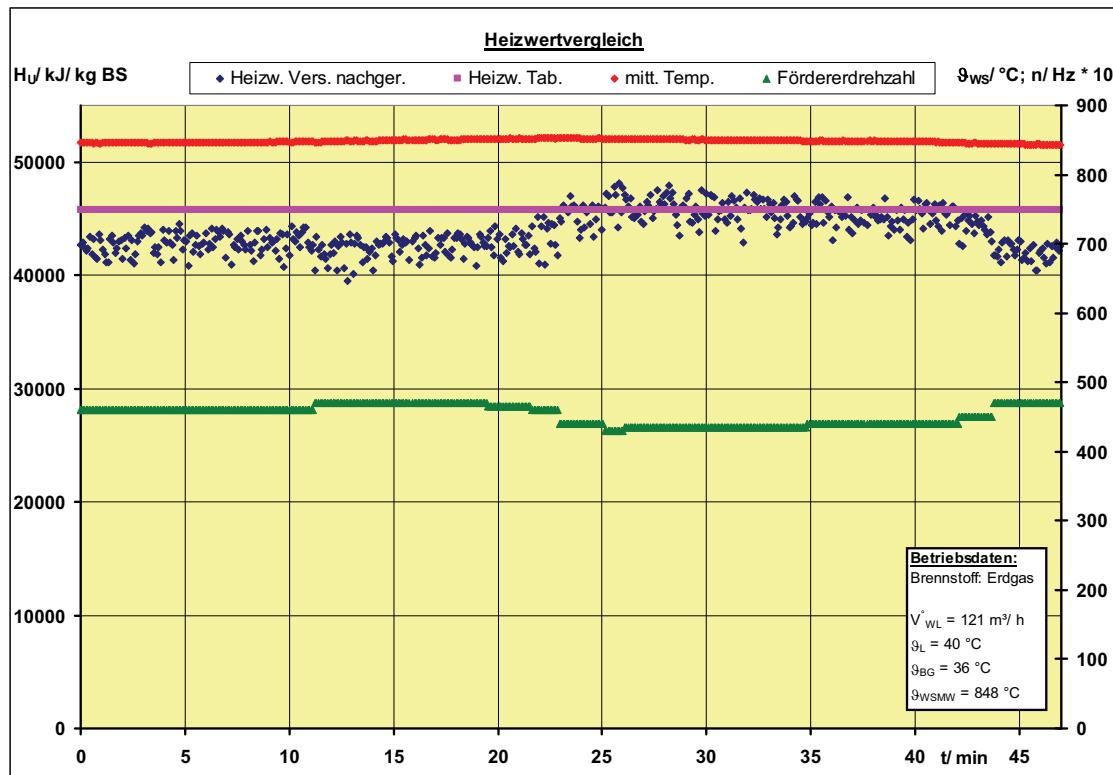


Abbildung 23: Heizwertermittlung Erdgas 061218

Hier zeigt sich erneut die Gegenläufigkeit des berechneten Heizwertes und des Drehzahlsignals des Förderers. Von $t = 20 \dots 45$ min wird die Drehzahl zunächst stark verringert und danach langsam wieder angehoben. Diese Variation der Drehzahl findet sich invertiert in dem berechneten Heizwert wieder. Weiterhin fällt auf, dass das Drehzahlsignal hier viel gleichmäßiger erscheint als in dem vorher betrachteten Versuch. Solch eine „Vergleichsmäßigung“ tritt immer dann auf, wenn die Anlage von Hand gefahren wird. Das langsame Verstellen der Fördererdrehzahl (nur kleine Änderungen) wirkt sich auch vergleichmäßigend auf den berechneten Heizwert aus. Er springt mit kleineren Amplituden als im vorherigen Versuch. Die Schwankungen bei der Heizwertberechnung ergeben sich hier nur noch aus dem Pulsieren des fluidisierten Bettes. In der Abbildung 22 kommen zu den Erscheinungen des fluidisierten Bettens noch die Einflüsse des variierenden Brennstoffmassenstromes hinzu.

Rapsschrot

Rapsschrot ist das feste Restprodukt, das bei der Entölung von Raps übrig bleibt. Es wird als Futtermittel in der Viehhaltung weiterverwendet. Je nach dem angewendeten Entölungsverfahren weist Rapsschrot unterschiedliche Anteile von Restölen auf. Das für die Versuche verwendete Rapsschrot stammt aus der Ölmühle Hamburg. Für die Versuche an der SWSF liegt

liegt das Rapsschrot als rieselfähiges Schüttgut vor. In den Versuchen zeigt sich, dass der Brennstoff mit den in Rostock vorhandenen Fördereinrichtungen sehr gut ohne weitere Modifikationen (Pelletierung, Anmaischung) in die SWSF eingebracht werden kann.

Tabelle 24: Übersicht Versuche mit Rapsschrot

Nr.	Versuchstag	Brennstoff	Heizwert	Abwei-chung		rel. Abwei-chung H _U rel	max. CO ₂	Abwei-chung		rel. Abwei-chung CO _{2max} rel	min. Luft-menge	Abwei-chung		rel. Abwei-chung l _{min} rel
				H _U	ΔH _U			CO _{2max}	ΔCO _{2max}			l _{min}	Δl _{min}	
				kJ/ kg BS	kJ/ kg BS			%	Vol%			m ³ / kgBS	m ³ / kgBS	
1.	Tabellenwerte	RS	18086,0	0,0	0,0		17,6	0,0	0,0		5,1	0,0	0,0	
2.	Simulation	RS	17737,1	-348,9	-2,0		17,6	0,0	0,0		5,1	0,0	0,0	
3.	Simulation	RS LUVO	17605,1	-480,9	-2,7		17,6	0,0	0,0		5,1	0,0	0,0	
4.	061024	RS man	15940,3	-2145,7	-13,5		16,0	-1,7	-10,4		3,2	-1,9	-60,8	
5.	061130	RS1 HS man	19322,6	1236,6	6,4		10,9	-6,7	-60,9		3,2	-1,9	-59,1	
6.	061130	RS2 man	19482,7	1396,7	7,2		17,3	-0,3	-1,8		5,3	0,2	3,0	
7.	061218	RS1 man	17300,5	-785,5	-4,5		17,8	0,2	0,9		4,8	-0,3	-5,3	
8.	061218	RS2 HS man	17294,1	-791,9	-4,6		17,6	0,0	-0,1		4,8	-0,3	-6,9	
9.	070110	RS1 man	16423,9	-1662,1	-10,1		17,4	-0,3	-1,5		4,7	-0,4	-7,7	
10.	070110	RS1 NH3 man	17486,4	-599,6	-3,4		17,5	-0,2	-1,0		5,0	-0,1	-2,4	
11.	070110	RS2 man	18043,2	-42,8	-0,2		17,3	-0,3	-1,6		4,9	-0,2	-3,4	
12.	070110	RS2 NH3 man	17882,1	-203,9	-1,1		17,3	-0,3	-1,9		5,1	0,0	-0,6	
13.	070201	RS auto	18109,1	23,1	0,1		17,6	-0,1	-0,4		4,8	-0,3	-6,7	
14.	070201	RS man	17866,5	-219,5	-1,2		17,5	-0,1	-0,5		4,8	-0,3	-5,9	

Mit dem Brennstoff Rapsschrot wurden insgesamt 10 auswertbare Versuche durchgeführt. Die Versuche wurden im Wesentlichen im Betriebsmodus Hand gefahren. Zum Abschluss der Versuchsreihe wurde ein Versuch im Betriebsmodus Automatik durchgeführt. Bei der Auswertung der Versuche fällt auf, dass die größten Abweichungen der bestimmten Werte in den ersten Versuchen auftreten.

In den Versuchen wird der Heizwert des Brennstoffes in einem Intervall von -2146...1397 kJ/ kgBS um den Tabellenwert ermittelt. Dieses Intervall entspricht einer relativen Abweichung von 13,5...7,2 %.

Die übrigen brennstofftechnischen Werte weisen Abweichungen derselben Größenordnung auf. So liegt der CO_{2max}-Wert in einem Intervall von -6,7...0,2 Vol% (relative Abweichung: -60,9...0,9%) um den ermittelten Tabellenwert und die minimale spezifische Luftmenge in einem Intervall von 1,9...0,2 m³N/ kgBS (relative Abweichung: -60,8...3,0 %). Dabei sind die jeweils unteren Grenzen der CO_{2max}- und l_{min}-Werte jeweils Ausreißer. Die mittleren Werte liegen deutlich darüber.

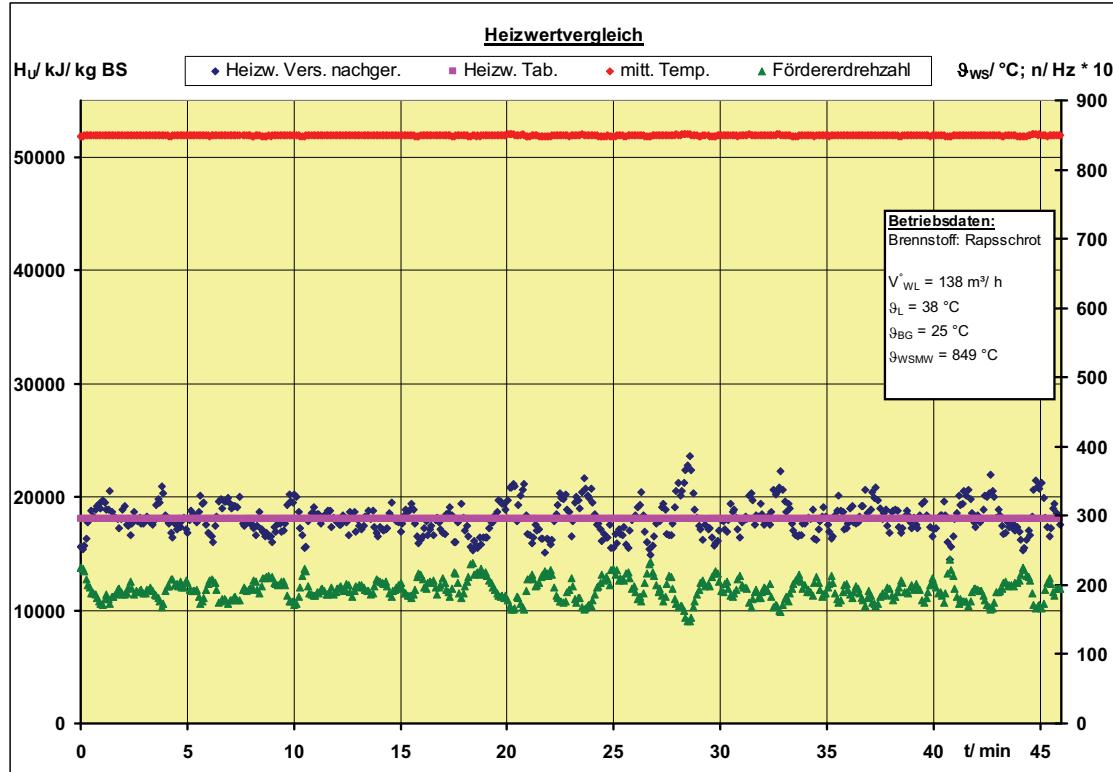


Abbildung 24: Heizwertbestimmung Rapsschrot 070201

In Abbildung 24 wird der Verlauf des im Versuch ermittelten Heizwertes für Rapsschrot gezeigt. Der Versuch lief dabei im Betriebsmodus Automatik. Man erkennt auch hier deutlich die Schwankungen des Drehzahlsignals, die durch das Stellsignal des Reglers ausgelöst werden. Der berechnete Heizwert verläuft gegenläufig zu den Drehzahlenschwankungen. In diesem Versuch hat der ermittelte Heizwert eine Streubreite von 1422 kJ/kgBS.

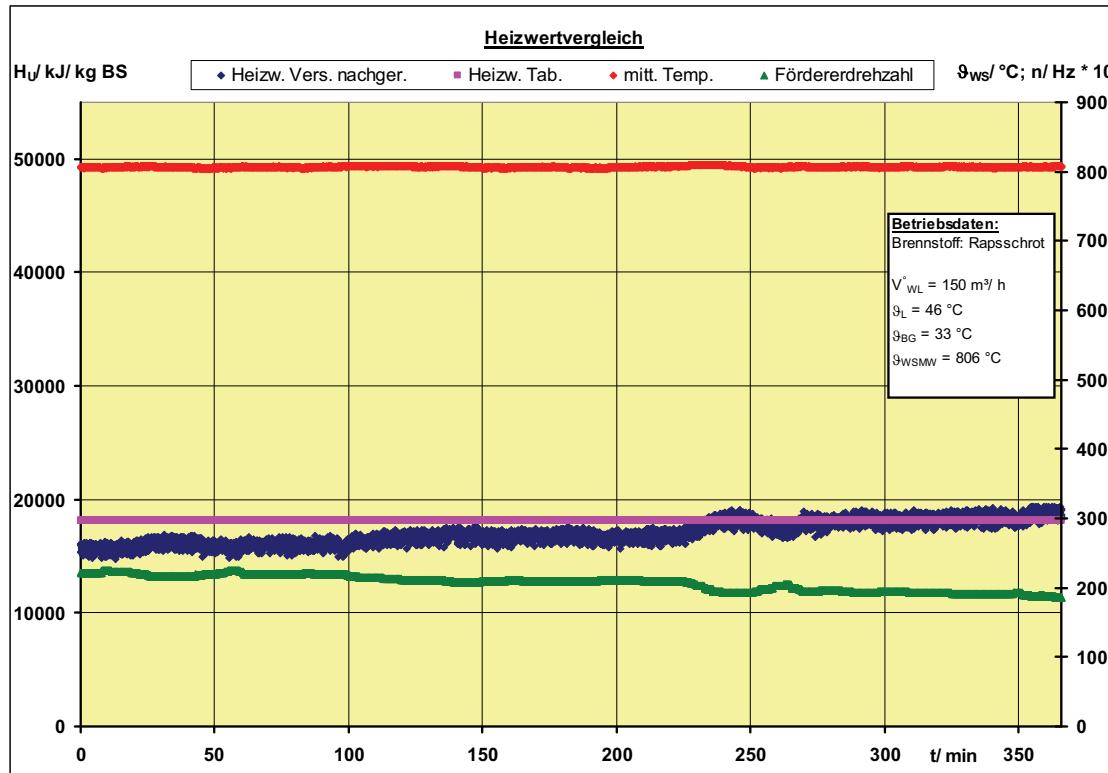


Abbildung 25: Heizwertbestimmung Rapsschrot 061024

Die Abbildung 25 zeigt den Verlauf der Heizwertbestimmung des ersten Versuches, der mit dem Brennstoff Rapsschrot durchgeführt wurde. Die Wirbelschichttemperatur ist über die gesamte Versuchsdauer konstant. Die Feuerungsanlage ist also scheinbar in einem stationären Zustand. Über die Versuchsdauer wird der Brennstoffmassenstrom immer weiter reduziert. Entsprechend dem Zusammenhang mit dem Heizwert erhöht sich der berechnete Heizwert über die Versuchsdauer immer weiter.

Ein solcher Verlauf des Drehzahlsignals bedeutet, dass zum Erreichen der Solltemperatur mit fortschreitender Versuchsdauer weniger Brennstoff benötigt wird. Ein solches Verhalten der Feuerung entspricht dem Aufladen von Leistungsspeichern im System. Zunächst wird mit dem Brennstoff die Wirbelschichttemperatur gehalten und parallel dazu Leistungsspeicher im System aufgeladen (z.B. Reaktorgefäß, Leitungen, Isolierung, ...). Nachdem diese Speicher beladen sind, wird lediglich der Brennstoffmassenstrom zum Halten des Betriebszustandes benötigt.

Anhand des gleichmäßigen Drehzahlsignals erkennt man in der Abbildung 25, dass die Anlage im Betriebsmodus Hand gefahren wurde. Dementsprechend sind dem berechneten Heizwert nur Schwankungen des fluidisierten Wirbelbettes aufgeprägt.

Petrolkoks

Petrolkoks ist ein Erdölrestprodukt, das bei der Erdölverarbeitung in Raffinerien anfällt. Je nach der Herkunft des verarbeiteten Öls weist er unterschiedliche Konzentrationen von Schwefel, Mineralien und anderen Inhaltsstoffen auf. Der in den Versuchen untersuchte Petrolkoks liegt als fester Brennstoff vor. Petrolkoks ist ein stark inhomogener Brennstoff. Der Petrolkoks kann ohne weitere Modifikationen nur schwer in die SWSF eingebracht werden. Der Brennstoff neigt nach einer bestimmten Versuchsdauer zu Aufwachsungen und Verklebungen, die eine stetige Förderung mit den in Rostock vorhanden Fördereinrichtungen nicht mehr möglich machen.

Tabelle 25: Übersicht Versuche mit Petrolkoks

Nr.	Versuchstag	Brennstoff	Heizwert	Abwei-chung	rel. Abwei-chung	max. CO ₂	Abwei-chung	rel. Abwei-chung	min. Luftmenge	Abwei-chung	rel. Abwei-chung
			H _U	ΔH _U	H _U rel	CO _{2max}	ΔCO _{2max}	CO _{2max} rel	l _{min}	Δl _{min}	l _{min} rel
			kJ/ kg BS	kJ/ kg BS	%	Vol%	Vol%	%	m ³ / kgBS	m ³ / kgBS	%
1.	Tabellenwerte	PK	34960,0	0,0	0,0	18,0	0,0	0,0	8,7	0,0	0,0
2.	Simulation	PK	32777,9	-2182,1	-6,7	18,0	0,0	0,0	8,7	0,0	0,1
3.	Simulation	PK LUVO	32704,9	-2255,1	-6,9	18,0	0,0	0,0	8,7	0,0	0,1
4.	060912	PK1 man	35844,5	884,5	2,5	18,5	0,5	2,6	9,1	0,4	3,9
5.	060912	PK2 man	39460,2	4500,2	11,4	18,7	0,7	3,9	9,8	1,1	11,3
6.	060912	PK3 man	39021,6	4061,6	10,4	19,0	1,0	5,5	9,9	1,2	11,8
7.	060912	PK4 man	38596,6	3636,6	9,4	19,3	1,3	6,7	10,0	1,2	12,5
8.	060912	PK5 man	38037,8	3077,8	8,1	19,6	1,6	8,4	10,0	1,2	12,3
9.	060926	PK1 man	39415,7	4455,7	11,3	18,4	0,5	2,5	10,7	2,0	18,3
10.	060926	PK2 man	38223,7	3263,7	8,5	18,7	0,8	4,1	10,8	2,1	19,0

Mit dem Brennstoff Petrolkoks wurden sechs Versuche durchgeführt. Dabei dienten die Versuche am 060912 dazu, zu testen, ob sich der Brennstoff in der SWSF verwenden lässt. Im Verlauf der ersten beiden Betriebspunkte wurde ein stabiler Betrieb eingestellt. Ab dem dritten Betriebspunkt veränderten sich die Fördereigenschaften des Brennstoffes, eine stetige Förderung war danach nicht mehr möglich.

Die Versuche liefern einen berechneten Heizwert, der von dem Tabellenwert abweicht. Der Tabellenwert beträgt $H_U = 34960 \text{ kJ/ kgBS}$ [38]. Alle in den Versuchen ermittelten Heizwerte liegen deutlich über diesem Wert. Im Mittel wird für den Heizwert $H_U = 38371 \text{ kJ/ kgBS}$ ermittelt. Dieses entspricht einer Gesamtabweichung von 8,8 % vom tabellierten Heizwert. Der CO_{2max} -Wert, der in den Versuchen ermittelt wurde, liegt maximal um 1,6 Vol% oberhalb des tabellierten Wertes (relative Abweichung: 8,4 %). Die minimale spezifische Luftmenge liegt

um maximal $2,1 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{kgBS}$ über dem tabellierten Wert. Die Wertebereiche für die brennstofftechnischen Werte CO_{2max} und l_{min} liegen dabei in vergleichbaren Bereichen wie für die beiden vorher genannten Brennstoffe. Der Heizwert zeigt eine deutliche wiederkehrende Abweichung vom tabellierten Heizwert. Hierfür können mehrere Gründe in Betracht kommen:

Nichteinhalten der Verfahrensbedingung.

Da der im Versuch ermittelte Heizwert eine deutliche Abweichung von den tabellierten Heizwerten aufweist, wurde die Asche der Versuchstage untersucht. In der Tabelle 26 werden die dabei ermittelten Anteile an organischer Trockensubstanz in der Asche dargestellt.

Tabelle 26: Organische Trockensubstanz in den Petrolkoks-Aschen

Nr.	Versuchs-tag	organische
		Trocken-substanz
		%
1.	060912	5,484
2.	060926	4,73

Diese Brennstoffmenge, die nicht an der Reaktion in der Wirbelschicht teilnimmt, wird in den Auswerterechnungen durch die Einführung eines Feuerungswirkungsgrades nach [49] bewertet. Durch den Feuerungswirkungsgrad reduziert sich die durch das Verfahren ermittelte Brennstoffleistung. Hieraus resultiert eine Verringerung des ermittelten Heizwertes. Der berechnete Wert liegt jedoch immer noch deutlich oberhalb der tabellierten Werte, so dass anzunehmen ist, dass noch weitere Gründe für die Abweichung vorliegen.

Die Ermittlung des Heizwertes eines inhomogenen Brennstoffes.

Eine Bestimmung des Heizwertes im Labor gestaltete sich wegen der Inhomogenität des Brennstoffes sehr schwierig. Bei der Verwendung eines Bombenkalorimeters zur Heizwertbestimmung werden nur wenige Gramm als Brennstoffprobe eingewogen. Somit ist es schwierig, eine repräsentative Probe für eine Brennstoffcharge zusammenzustellen. Dieses ist der wahrscheinlichste Grund für die Diskrepanz zwischen dem im Labor ermittelten Heizwert und dem im Versuch bestimmten. Der in Rostock angelieferte Brennstoff wurde als rieselfähiger Brennstoff in einem Kornspektrum von wenigen mm bis zu Blöcken mit einem Durchmesser im Bereich von cm angeliefert. Der Brennstoff konnte daher nicht repräsentativ geprüft werden. Die aus den Proben im Labor ermittelten Kennwerte sind daher nicht repräsentativ und mit größter Vorsicht zu verwenden.

Die Ermittlung des Heizwertes nach der hier vorgestellten Methode zur Heizwertbestimmung liefert durch die umgesetzte Menge Brennstoff eine breitere Datenbasis zur Bestimmung des Heizwertes.

Lagerung des Brennstoffes vor der Verwendung.

Vor der Verwendung des Brennstoffes in der SWSF wurde der Brennstoff eingelagert. Bei dieser Lagerung kann sich der Brennstoff durch die Aufnahme und Abgabe von Wasser verändern. Da der Heizwert den wahren energetischen Wert eines Brennstoffes beschreibt, verändert er sich mit einem veränderlichen Wassergehalt. Im Versuch wurde ein höherer Heizwert als im Labor ermittelt. Das bedeutet, dass der Brennstoff während der Lagerung Wasser abgegeben haben muss. Von der Beprobung bis zur Verwendung des Brennstoffes wurde dieser in einem verschlossenen Fass gelagert. Bei dieser Art der Lagerung ist es unwahrscheinlich, dass sich der Wassergehalt in solch einem Maße verändert hat.

Vor den Versuchen wird der zu verwendende Brennstoff ausgewogen und in offenen Eimern im Technikum des Lehrstuhls bereitgestellt. Unter den klimatischen Verhältnissen des Sommers 2006 (im Technikum herrschten im Versuchsbetrieb Temperaturen von $\vartheta > 30^{\circ}\text{C}$) ist es durchaus denkbar, dass bei diesem Bewegen und Vorhalten des Brennstoffes eine Trocknung stattgefunden hat.

Zur Überprüfung dieses Ansatzes wird der Heizwert des Brennstoffes in Abhängigkeit des Wasseranteiles berechnet. Mit den Labordaten ergibt sich für den trockenen Brennstoff ein Heizwert von $H_{UPK_r} = 34711 \text{ kJ/kgBS}$. Dieser Wert liegt immer noch deutlich unterhalb des im Versuch ermittelten Heizwertes.

Es ist zu vermuten, dass die Abweichung bei der Heizwertberechnung durch eine Kombination aller drei Punkte erfolgt. Durch die starke Inhomogenität wurden keine repräsentative Beprobung durchgeführt. Im Rahmen der Brennstoffbereitstellung für die Versuche erfolgte eine nicht dokumentierte Trocknung des Brennstoffes. Die Reaktion erfolgt nicht, wie in den Bedingungen für den Einsatz des Verfahrens gefordert, ausschließlich innerhalb des Systems „Wirbelschicht“.

Instationärer Betriebspunkt

Bei den Versuchen mit dem Brennstoff Petrolkoks kam es immer wieder zu Problemen mit der Brennstoffförderung. Es ist also möglich, dass die Versuchsfahrten und Messfahrten in einem nicht stationären Betriebspunkt abgelaufen sind. Gemäß den Verfahrensvoraussetzungen (verg. Kapitel 3.4) muss sich eine betrachtete Anlage in einem stationären Betriebspunkt befinden. Es dürfen keine Leistungen zur Beladung/ Entladung von Speichern anfallen.

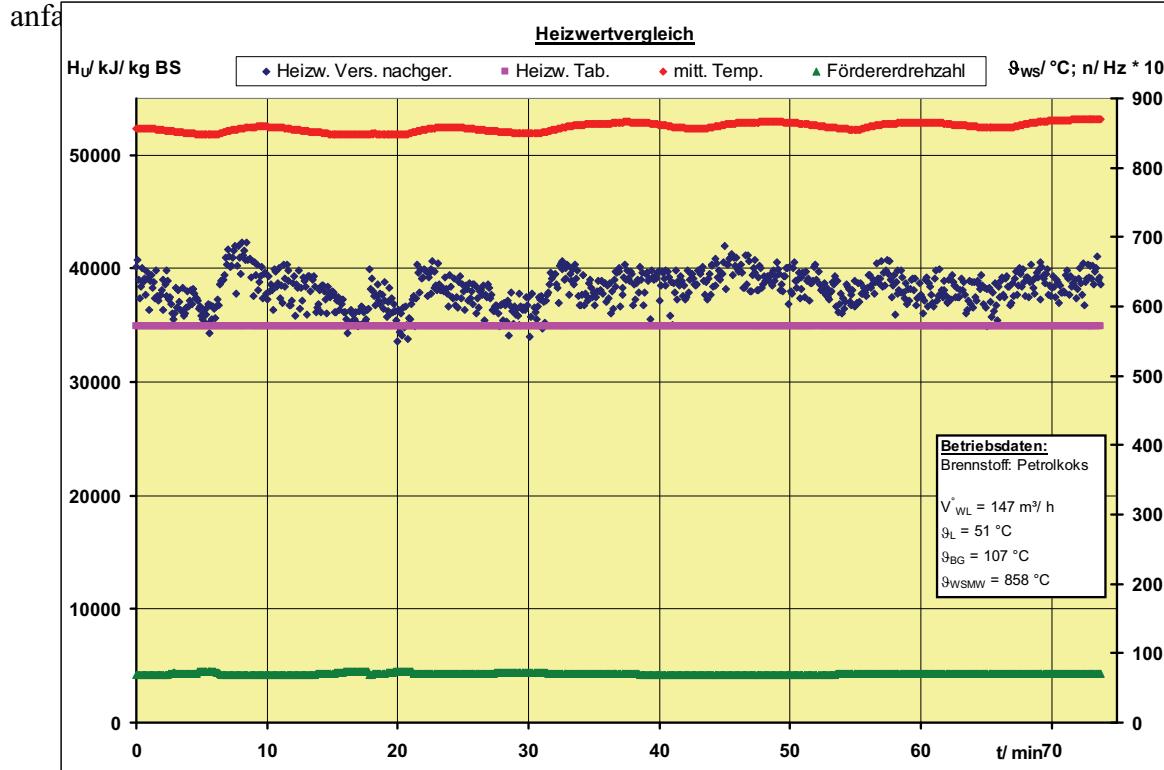


Abbildung 26: Heizwertermittlung Petrolkoks 060926

Die Abbildung 26 zeigt den Heizwertverlauf des besten Versuches mit Petrolkoks. Man erkennt, dass sich die Anlage in einem stationären Betriebspunkt befindet. Die Wirbelschichttemperatur ist nahezu konstant. Sie schwankt in einem schmalen Bereich. Diese Schwankung ergibt sich aus dem verwendeten Betriebsmodus. Die SWSF wurde im Betriebsmodus Hand gefahren. Man erkennt das an dem gleichmäßigen Verlauf des Drehzahlsignals und dem sich daraus ergebenden Heizwertverlauf mit geringen Schwankungen (Fluidisation). In diesem Versuch ergibt sich für den Heizwert ein Zahlenwert von $H_U = 38224 \text{ kJ/kgBS}$.

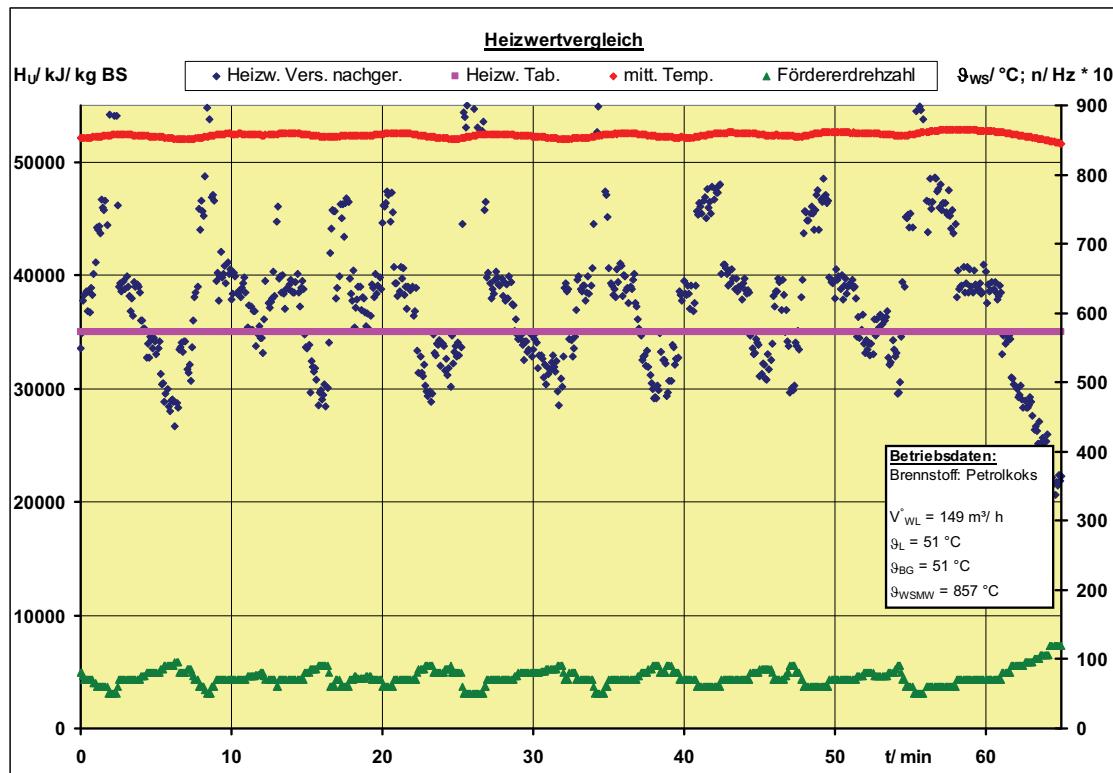


Abbildung 27: Heizwertermittlung Petrolkoks 060912

In der Abbildung 27 wird der Verlauf eines ermittelten Heizwertes bei einem Versuch mit unstetiger Förderung gezeigt. Deutlich kann der gegenläufige Zusammenhang zwischen Heizwert und dem Brennstoffmassenstrom erkannt werden. In diesem Versuch musste zum Halten der Wirbelschichttemperatur der Brennstoffmassenstrom ständig verändert werden. Es war nicht möglich, einen stationären Betriebspunkt wie in dem oben gezeigten Versuch einzustellen. Der mittlere in diesem Versuch ermittelte Heizwert liegt bei $H_U = 38038 \text{ kJ/kg BS}$.

Oliventrester/ Klärschlamm

Für diese beiden Brennstoffe wurden lediglich Untersuchungen zur Verwendbarkeit in der SWSF durchgeführt. Für eine eingehende Untersuchung dieser beiden Brennstoffe standen sie nicht in ausreichenden Mengen zur Verfügung. Mit den zur Verfügung stehenden Brennstoffmengen gelang es zwar, die vorgegebenen Temperaturen in der SWSF zu halten, die dabei ermittelten Heizwerte wiesen jedoch solch starke Abweichungen von den tabellierten Werten auf, dass sie hier zwar dargestellt werden, aber nicht in die Auswertung miteinbezogen werden.

Für den Oliventrester wird ein deutlich höherer Heizwert ermittelt als der Laborwert (H_U 26054 kJ/ kgBS). Die Abweichung beträgt 37 %. Eine solche massive Veränderung im Vergleich zu dem Laborwert kann nur durch eine Veränderung des Brennstoffes während der Lagerung eintreten.

Genau der umgekehrte Fall ist bei dem Klärschlamm eingetreten. Hier wird der im Labor bestimmte Heizwert deutlich unterschritten (H_U 6980 kJ/ kgBS). Das entspricht einer Abweichung von 167 %!

Für beide Brennstoffveränderungen lässt sich hier keine Begründung finden. Da beide Brennstoffe am selben Versuchstag untersucht wurden, haben sie die gleiche Lagerungsdauer von der Beprobung für die Heizwertermittlung bis zur Verwendung. Eine mögliche Quelle für solche Veränderungen des Heizwertes kann die Aufnahme bzw. Abgabe von Feuchtigkeit sein. Jedoch sind die Größenordnungen der Veränderungen nicht nachvollziehbar.

Beide Brennstoffe zeigen bei der Bestimmung des CO_{2max} -Wertes Abweichungen, die unter 10 % liegen. Die Abweichungen für l_{min} liegen bei 33 % für Oliventrester und 170 % für Klärschlamm. Für eine weitere Verwendung sind diese Abweichungen viel zu hoch.

5.3. Ergebnisse der Brennstoffeinordnung

Das Ziel des Verfahrens zur Brennstoffidentifikation ist neben der Gewinnung der brennstofftechnischen Daten eines Brennstoffes, die Einordnung des Brennstoffes in die Brennstoffmatrix aus CO_{2max} und H_U (verg. Kapitel 3.7.). Alle bisher gewonnenen Daten über die untersuchten Brennstoffe werden in die Brennstoffmatrix eingetragen (Tabellenwerte, Ergebnisse der Simulationen, Versuchsergebnisse).

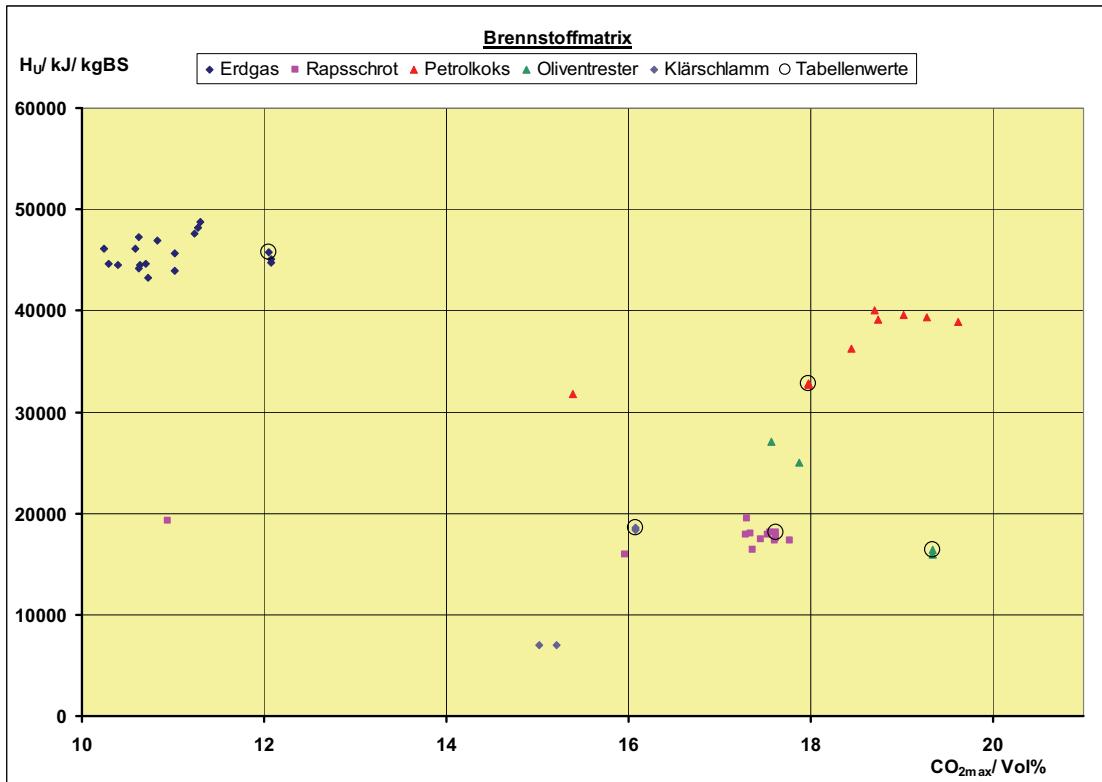


Abbildung 28: Ergebnisse in der Brennstoffmatrix

Man erhält die Brennstoffmatrix aus Abbildung 28. Hier erkennt man, dass sich die Heizwerte für Erdgas, Rapsschrot und Petrolkoks gruppieren. Idealerweise würden sich die Heizwerte um den Tabellenwert (eingekreist) gruppieren. Wie bereits in den vorherigen Kapiteln gezeigt wurde, gibt es bei den einzelnen Versuchsauswertungen teilweise erhebliche Abweichungen bei den im Versuch bestimmten Heizwerten und $\text{CO}_{2\text{max}}$ -Werten. Hieraus resultieren die Abweichungen in der Brennstoffmatrix.

Zusätzlich werden die Ergebnisse in die Brennstoffmatrix aus Kapitel 3.7 eingefügt. Für Erdgas erhält man das folgende Bild (Abbildung 29):

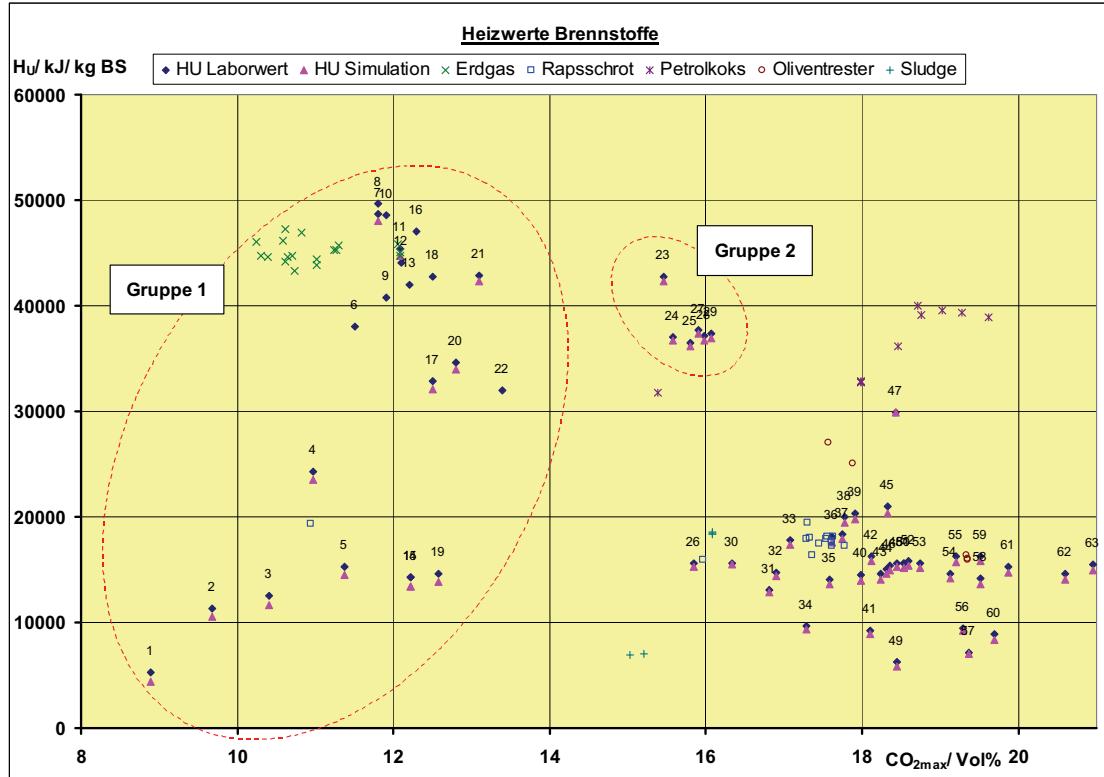


Abbildung 29: Brennstoffmatrix mit Erdgas

Man erkennt, dass die brennstofftechnischen Werte, die für das Erdgas ermittelt wurden, eine Einordnung im Bereich der Gruppe 1 (gasförmige Brennstoffe) ermöglichen. Durch die Abweichungen bei der Ermittlung der Brennstoffkennwerte verschiebt sich die Einordnung innerhalb der Gruppe in Richtung eines niedrigeren $\text{CO}_{2\max}$ -Wertes. Wegen der Größe der Gruppe 1 kann diese Verschiebung vernachlässigt werden.

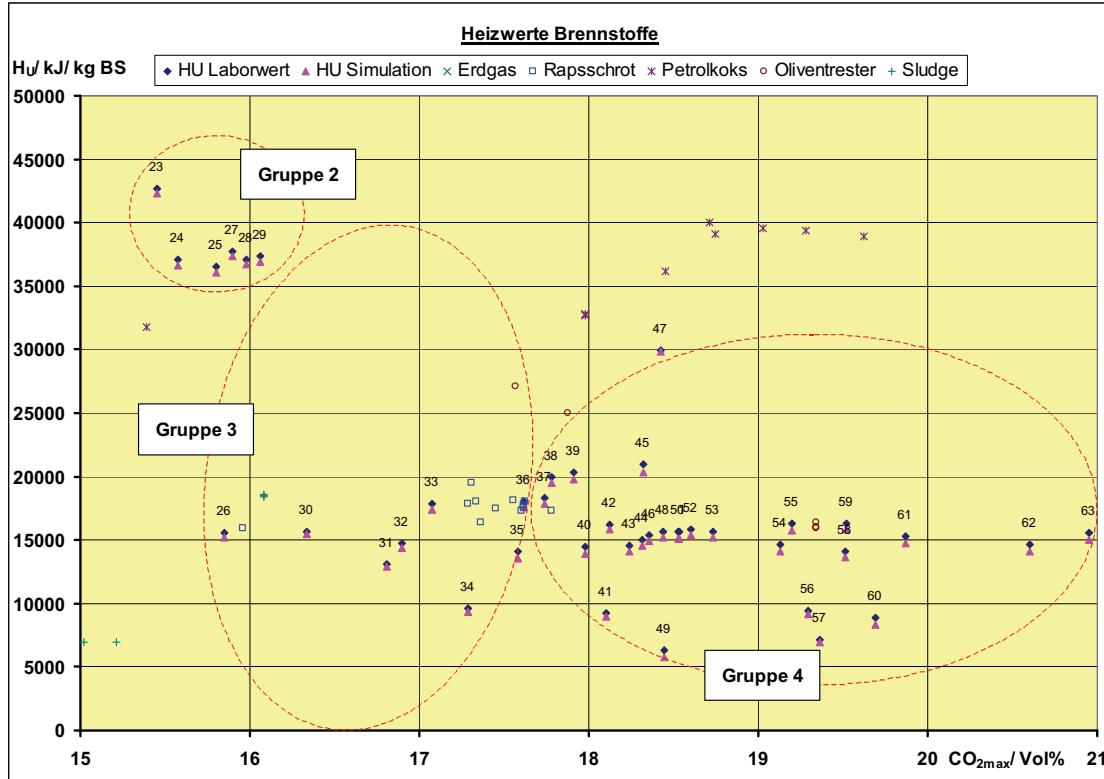


Abbildung 30: Brennstoffmatrix mit Rapsschrot, Petrolkoks, Oliventrester und Sludge

Die Abbildung 30 zeigt die Versuchsergebnisse eingeordnet in die Brennstoffmatrix. Dabei zeigen sich gute Übereinstimmungen für den Rapsschrot. Er wird der Gruppe 3 (feste Brennstoffe mit hoher Ascheerweichungstemperatur) zugeordnet. Wie bereits bei der Versuchsauswertung festgestellt, erfolgt durch die zu gering ermittelten CO_{2max}-Werte eine Verschiebung innerhalb der Gruppe.

Durch die abweichende Ermittlung des Heizwertes des Petrolkoks wird er zunächst in keine Gruppe eingeordnet. Als Vergleichswert dient hier der in den Simulationen ermittelte Datenpunkt 47. Hierbei handelt es sich ebenfalls um Petrolkoks derselben Quelle. Normalerweise müsste der Petrolkoks in diesem Bereich angesiedelt werden. Für diesen Bereich ist keine Gruppenzugehörigkeit der Brennstoffgruppen definiert. Von den prinzipiellen Eigenschaften her müsste der Petrolkoks in die Gruppe 3 eingeordnet werden. Es ist also zu überlegen, die Gruppe 3 bis in den Bereich oberhalb der Gruppe 4 auszudehnen. Für eine Erweiterung/ Einschränkung der Gruppe 3 sind gezielte Versuche mit Brennstoffen aus dem fraglichen Bereich erforderlich.

Die verbleibenden Brennstoffe Oliventrester und Sludge ordnen sich mit den jeweils zwei durchgeführten Messfahrten in die Gruppe 3 (Sludge) und Gruppe 4 (Oliventrester) ein. Diese Zuordnung erfüllt die Erwartungen. Wegen der geringen Anzahl der Versuche ist sie jedoch nicht belastbar und kann eher als ein Wegweiser verstanden werden.

Mit der Gruppierung der Brennstoffe und der Möglichkeit, Brennstoffe durch ihren Heizwert und CO_{2max} -Wert in eine bestehende Gruppe einzufügen, liegen die Voraussetzungen vor, um in der Prozessautomatisierung die bereits beschriebenen Wege der Regleranpassung einzuleiten. Dabei kann entweder zwischen bereits ermittelten Parametersätzen für jede Brennstoffgruppe umgeschaltet werden oder ein verwendeter Reglerbaustein zur Selbstparametrierung angeregt werden. Für die Inbetriebnahme einer neuen Anlage eignet sich der zweite Weg besonders gut. Hier entfällt das aufwendige Bestimmen der benötigten Parameter des Reglers.

6. Gesamtergebnis

Nach der experimentellen Verifikation ist die Verfahrensentwicklung zur selbständigen Brennstofferkennung aus dem Abgas einer Feuerung abgeschlossen.

In der vorausgehenden theoretischen Untersuchung wurde gezeigt, dass der CO_{2max} -Wert und das Verfahren zur Heizwertbestimmung den an den Prozess gestellten Kriterien der Echtzeitfähigkeit genügen. Alle hierfür notwendigen Berechnungen lassen sich innerhalb der charakteristischen Zeitspanne von $t = 1$ s abschließen. Die notwendigen Berechnungen werden in dem für die Prozessführung verwendeten System quasiparallel verarbeitet und durch die Verwendung des beschriebenen Bussystems werden alle relevanten Daten erfasst und verwendet.

Die Verfahrensherleitung liefert einen Weg, um die notwendigen brennstofftechnischen Werte aus der Zusammensetzung der Feuerungsabgase zu ermitteln. Dabei müssen die postulierten Randbedingungen des Reaktionsortes und der Stationarität erfüllt sein. Die Reaktion muss vollständig in der fluidisierten Wirbelschicht ablaufen und die Feuerung muss sich zum Zeitpunkt der Betrachtung in einem stationären Betriebszustand befinden.

Der theoretisch hergeleitete Algorithmus wird mit einer Auswahl von Testbrennstoffen in der Simulation überprüft. Nachdem das Verfahren in der Simulation funktioniert, wird es unter realen Bedingungen an einer SWSF erprobt.

Dabei zeigt sich, dass die guten Ergebnisse der Simulation nicht genau reproduziert werden können. Für die Brennstoffe Erdgas und Rapsschrot wird der Heizwert mit einer Abweichung $< 5\%$ ermittelt. Die übrigen brennstofftechnischen Werte (CO_{2max} , l_{min}) werden mit einer Abweichung von $\sim 10\%$ ermittelt. Damit funktioniert das Verfahren für diese beiden Brennstoffe ausreichend genau.

Für den Brennstoff Petrolkoks wird ein von den Tabellenwerten deutlich abweichender Heizwert ermittelt. In verschiedenen Versuchen wird dieses Ergebnis wiederholt erzielt.

Die Berennstoffe Oliventrester und Klärschlamm wurden nicht ausreichend untersucht, um belastbare Ergebnisse zu erreichen.

Anhand des vorgestellten Verfahrens kann der Heizwert und der CO_{2max} -Wert eines unbekannten Brennstoffes ausreichend genau ermittelt werden. In einem Prozessleitrechner können jetzt Kriterien hinterlegt werden, die zur Auslösung der beschriebenen Schalthandlungen führen. Durch die Überprüfung und Einordnung des Brennstoffes anhand der beiden bestimmten Werte kann die automatisierte Prozessführung auf wechselnde Brennstoffe mit der Anpassung der Betriebsbedingungen reagieren.

Bei der experimentellen Verifikation des Verfahrens traten mehrere Probleme zu Tage:

Der mit dem Verfahren berechnete Heizwert zeigt eine starke Abhängigkeit von dem in das System eingetragenen Brennstoffmassenstrom. Für die Versuchsauswertung wurden jeweils die Momentanwerte der einzelnen Größen verwendet. Dadurch, dass der Heizwert aus dem Quotienten von Brennstoffleistung und Brennstoffmassenstrom gebildet wird, können sich stark schwankende Momentanwerte für den Heizwert ergeben. Abhilfe kann hier durch entsprechende Mittelwertbildungen geschaffen werden.

Für die Anwendung des Verfahrens zur Identifikation der brennstofftechnischen Werte muss sich die Anlage in einem stationären Betriebszustand befinden. Für die jeweils betrachtete Anlage müssen dazu Kriterien definiert werden, nach deren Erreichen der Betrieb als stationär angesehen werden kann. Für eine überschaubare Anlage wie die SWSF ist es relativ einfach, solche Kriterien abzuleiten, für eine größere kommerzielle Anlage wird es schwieriger, solche Kriterien zu definieren. Ein Ansatz für die Definition des stationären Zustandes ist die Konstanz der Wirbelschichttemperatur, der Freeboardtemperatur und der Sauerstoffkonzentration im Abgas bei einem nahezu konstanten Brennstoffmassenstrom.

In weiteren Untersuchungen sollte daraufhin gearbeitet werden, das Verfahren so weit zu erweitern, dass es auch in den instationären Betriebszuständen einer Feuerung erfolgreich angewendet werden kann. Hierzu muss ein Ansatz gefunden werden, der die Ladung der Wärmespeicher im betrachteten System beschreibt und die dafür verwendeten Leistungen in die Bilanzierung mit einbezieht. Denkbar sind hierbei Ansätze aus der Elektrotechnik, die die Beladung von Kondensatoren im Gleichstromkreis beschreiben.

Ein weiteres Problem ergibt sich aus der Bestimmung der Verlustleistung der Feuerung. Wenn für den Betrieb ein unbekannter Brennstoff verwendet wird, kann die Verlustleistung nicht aus der Energiebilanz ermittelt werden. Bei kleinen Anlagen kann die Verlustleistung dann durch einen „Kalibrierversuch“ mit einem bekannten Brennstoff ermittelt werden. Für Großanlagen wird dieses Verfahren nur schwierig realisierbar sein. Für solche Anlagen muss daher ein Weg gefunden werden, mit dem die Verlustleistung bereits im Vorwege ausreichend genau bestimmt werden kann. Wegen des bei Großanlagen kleineren Anteils der Verlustleistung ist eine Vorausberechnung auf der Grundlage konstruktiver Daten und Isolationseigenschaften aber sicherer als an der Testanlage.

Mit den durchgeföhrten Versuchen ist die theoretische Entwicklung und experimentelle Verifikation des Verfahrens zur Identifikation der kalorischen Eigenschaften eines Brennstoffes aus dem Abgas einer Feuerung zunächst abgeschlossen. Als Ergebnis liegt ein Verfahren vor, das seine Leistungsfähigkeit in ersten Versuchen erfolgreich unter Beweis gestellt hat. Das Verfahren liefert mit den genannten Bedingungen der „Echtzeit“ den Heizwert, den CO_{2max} -Wert und die spezifische minimale Luftmenge zur Verbrennung des Brennstoffes unmittelbar aus den im Abgas gemessenen Werten.

Ein weiterer Vorteil des Verfahrens ist es, dass sich der Ansatz zur Berechnung des Heizwertes auf die Methoden der Verbrennungsrechnung stützt. Damit ist das Verfahren bei Verbrennungsvorgängen aller Art einsetzbar.

7. Ausblick

Mit den durchgeführten Versuchen ist der Funktionsnachweis des hergeleiteten Verfahrens zur Identifikation der kalorischen Eigenschaften eines Brennstoffes erbracht. Damit ist jedoch nur der erste Teil einer solchen Verfahrensentwicklung abgeschlossen. In weiteren Arbeiten gilt es, die offensichtlich gewordenen Probleme zu beseitigen und das Verfahren einer kommerziellen Anwendung zuzuführen. Im vorherigen Kapitel sind die Probleme bereits angesprochen worden und Lösungsansätze impliziert worden.

Das Verfahren kann dabei technisch oder „informativ“ genutzt werden.

Die technische Verwendung und der Übergang zur kommerziellen Nutzung des Verfahrens kann in verschiedenen Bereichen der Technik erfolgen:

In der Feuerungstechnik besteht mit diesem Verfahren die Möglichkeit, die wichtigsten kalorischen und brennstofftechnischen Eigenschaften eines Brennstoffes während des Anlagenbetriebes zu bestimmen. Diese Informationen können vielfältig genutzt werden. Mit ihnen wird der Anlagenbetreiber in die Lage versetzt, die Energiebilanz einer Feuerungsanlage in „Echtzeit“ zu überwachen. Verschleißerscheinungen und technische Problem können auf diese Weise rechtzeitig erkannt und behoben werden.

Eine weitere Anwendung ergibt sich bei der gleichzeitigen Verbrennung zweier Brennstoffe. Diese Verfahren wird zur Stützfeuerung in Müllverbrennungsanlagen verwendet. Hierbei wird zusätzlich zu dem Brennstoff „Müll“ ein weiterer edler Brennstoff (Kohle, Öl) mit bekannten kalorischen Eigenschaften verbrannt. Mit Hilfe des Verfahrens kann dann der Heizwert des unedlen Brennstoffes aus dem „Gesamtheizwert“ ermittelt werden. Weiterhin lassen sich dann Aussagen zu den entstehenden Verbrennungsendprodukten treffen. Sie können ge-

nau dem sie verursachenden Brennstoff zugewiesen werden. So kann z.B. das entstehende CO_2 bewertet werden. Umgekehrt kann die Anlage über die gezielte Veränderung des Massenverhältnisses der verwendeten Brennstoffe gefahren werden.

Mit Hilfe der gewonnenen Daten kann in die Regelung des Verbrennungsprozesses eingegriffen werden. Die ermittelten brennstofftechnischen Werte können auf zwei Weisen genutzt werden:

Es besteht die Möglichkeit, bei einer Änderung des Brennstoffes die Betriebsbedingungen an den neuen Brennstoff anzupassen. Hierzu wird die in Kapitel 3.7 hergeleitete Gruppierung von Brennstoffen verwendet. In dem Automatisierungssystem werden die Betriebsbedingungen für die dort definierten Brennstoffgruppen und die Übergangsbedingungen (Temperaturrampen, Massenstrombegrenzungen,...) hinterlegt. Wenn über die Brennstoffidentifikation eine Änderung des Brennstoffes detektiert wird, ist die SWSF so in der Lage, sich selbstständig durch die hinterlegten Informationen an den neuen Brennstoff anzupassen.

Die zweite Möglichkeit besteht bei der Verwendung eines selbstparametrierenden Reglers darin, durch einen detektierten Brennstoffwechsel eine Selbstparametrierung auszulösen. In diesem Fall müssen auch Übergangsbedingungen, wie Drehzahlbegrenzungen, in dem Automatisierungssystem hinterlegt werden.

Für weitergehende Untersuchungen ist es ebenfalls denkbar, dass es Zusammenhänge zwischen den brennstofftechnischen Daten des verwendeten Brennstoffes und den notwendigen Betriebsparametern gibt, die identifiziert werden können und in einem automatischen Betriebssystem verwendet werden können (z.B. Heizwert und Ascheerweichungstemperatur).

Zur Überwachung des Verbrennungsprozesses kann mit den gewonnenen Daten eine Verbrennungsrechnung durchgeführt werden. Da der für den Betrieb der SWSF verwendete Field Controller nur Berechnungen in begrenztem Umfang erlaubt und im Wesentlichen für die Überwachung und den Betrieb des Prozesses eingesetzt wird, sollten solche Berechnungen außerhalb des Controllers auf dem Prozessrechner ablaufen. Für die Berechnungen kann dann auf MS-Excel zurückgegriffen werden. Das Programm kann über die zur Verfügung gestell-

ten Datenschnittstellen (OPC) an einen Field Controller angeschlossen werden und so auf alle prozessrelevanten Daten zugreifen und so die notwendigen Berechnungen durchführen.

Mit Hilfe des ermittelten Heizwertes kann bei der Entsorgung von Problemstoffen ihr energetischer Wert beziffert und so die Entsorgung entsprechend vergütet werden.

In wie weit das Verfahren auch bei anderen thermischen Verfahren, wie etwa der motorischen Verbrennung genutzt werden kann, muss in weiteren Untersuchungen geklärt werden. Als vorteilhaft kann sich dabei erweisen, dass für das Bestimmungsverfahren ein universeller Ansatz gewählt wurde, der auf der Verbrennungsrechnung basiert.

Die „informative“ Nutzung des Verfahrens bezieht sich auf das Sichtbarmachen des energetischen Wertes von unedlen oder lokal anfallenden Brennstoffen. Auf diese Weise kann der regionalen Bevölkerung das energetische Potential solcher Brennstoffe anschaulich vor Augen geführt werden. Die Vorteile lokal anfallender Brennstoffe werden somit schnell sichtbar und Widerstände beseitigt.

8. Quellen

- [1] BAEHR, H.D.; KABELAC, S.: *Thermodynamik, Grundlagen und technische Anwendung*, 13. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2006.
- [2] BECKMANN, M.; HORENI, M.: *Möglichkeiten zur Optimierung von Müllverbrennungsanlagen durch Einsatz eines Online-Bilanzierprogrammes*. VDI-Berichte Nr. 1888, 2005.
- [3] BECKMANN, M.; HORENI, M.; METSCHKE, J.; KRÜGER, J.; PAPA, G.; ENGLMAIER, L.; BUSCH, M.: *Optimierung eines Müllheizkraftwerkes durch Einsatz eines Online-Bilanzierungsprogramms*. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): *Optimierung der Abfallverbrennung 2*. TK Verlag Thomé-Kozmiensky, 2005, S. 219 – 239.
- [4] BEU, J.: *Anpassung der Kennlinie einer Förderschnecke*. Rostock: Internes Arbeitspapier LUT, 2006
- [5] BEU, J.: *Datensicherung an SWSF kleiner Leistung*. Rostock: Programmierung am LUT, 2004.
- [6] BOIE, W.: *Vom Brennstoff zum Rauchgas*. Leipzig: B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1957.
- [7] BROUËR, B.: *Regelungstechnik für Maschinenbauer*, 2. Auflage. Stuttgart: B.G. Teubner, 1998.
- [8] BÜNGER, G. *Vorlesungsunterlagen Vorlesung Kraft- und Schmierstoffe*. Rostock: Universität Rostock, 2000.
- [9] CFH: *Datenblatt 52060, Bedienungsanleitung Turbo Handlötgerät GT 2000*. Offenau: CFH Löt- und Gasgeräte GmbH.
- [10] CHRISTEN, D.: *Praxiswissen der chemischen Verfahrenstechnik, Handbuch für Chemiker und Verfahrensingenieure*. Berlin: Springer Verlag, 2005.
- [11] DIN 19 258: *INTERBUS-S Norm. Übersicht/Einführung. Layer 1. Layer2*. Berlin: Beuth Verlag, 19XX.
- [12] DIN 44 300: *Prozeßsteuerung*. Berlin: Beuth Verlag, 1988. Zurückgezogen, ersetzt durch ISO/IEC 2383.
- [13] DIN 51 794: *Prüfung von Mineralölkohlenwasserstoffen - Bestimmung der Zündtemperatur*. Berlin: Beuth Verlag, 2003.

- [14] DIN 51 900: *Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe - Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes - Teil 1: Allgemeine Angaben, Grundgeräte, Grundverfahren*. Berlin: Beuth Verlag, 2000.
 - [15] DIN 66 230: *Informationsverarbeitung, Programmdokumentation*. Berlin: Beuth Verlag, 1981.
 - [16] DIN EN 116: *Dieselkraftstoffe und Haushaltsheizöle*. Berlin: Beuth-Verlag, 1998.
 - [17] DIN EN 61131-3: *Speicherprogrammierbare Steuerungen - Teil 3: Programmiersprachen*. Berlin: Beuth Verlag, 2003.
 - [18] DIN EN 61158: *Digitale Datenkommunikation in der Leittechnik - Feldbus für industrielle Leitsysteme*. Berlin: Beuth Verlag, 2005/ 2006.
 - [19] DIN ENISO 4264: *Berechnung des Cetanindex von Mitteldestillaten aus 4 Parametern*. Berlin: Beuth-Verlag, 1996.
 - [20] DOHMANN, J.; STARKE, C.: *Ermittlung der Feuerleistung von Müllverbrennungsanlagen*. In: *Müll & Abfall*, Nummer 09, 2000, S. 528 – 531.
 - [21] FELLNER, J.; CENCIC, O.; RECHBERGER, H.: *Bilanzenmethode Ein Verfahren zur Bestimmung der fossilen CO₂-Emissionen*. In Lorber et al. (Hrsg.): *DepoTech 2006, Tagungsband zur 8. DepoTech Konferenz*. Montanuniversität Leoben: VGE Verlag, Essen, 2006, 341-348.
 - [22] FISCHER-Rosemount: *Anlage zum Auftrag Nr. A 00.7.1974*. Hasselroth: Fischer-Rosemount GmbH, 1996.
 - [23] GEVATTER, H.-J. (Hrsg.); GRÜNHAUPT, U. (Hrsg.): *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*, 2. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2006.
 - [24] GIECK, K; GIECK, R.: *Technische Formelsammlung*. 30. erweiterte Ausgabe. Germering: Gieck Verlag, 1995.
 - [25] GROTH, K.-H. (Hrsg.); FELDHUSEN, J. (Hrsg.): *Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau*, 21. Auflage. Berlin: Springer Verlag, 2005,
 - [26] HAMBURGER STADTENTWÄSSERUNG: *Klärschlammbehandlung in Hamburg*. Hamburg: Hamburger Stadtentwässerung, 2000.
 - [27] HEMMING, W.: *Verfahrenstechnik*, 8. Auflage. Würzburg: Vogel Buchverlag, 1999.
 - [28] HILLENBRAND, D.: *NGA 2000 MLT Multikomponentengasanalysator*. Datenblatt. Hasselroth: Emmerson Process Management AG, Form BRH_43-6658_D.
 - [29] HOFFMANN, J. (Hrsg.): *Taschenbuch der Messtechnik*. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 1998.
-

- [30] HORENI, M.; BECKMANN, M.; FLEISCHMANN, H.; BARTH, E.: *Ermittlung von Betriebsparametern in Abfallverbrennungsanlagen als Voraussetzung für die weitere Optimierung*. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): *Energie aus Abfall Band 2*. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, S. 213 – 229.
- [31] ISO/IEC 2383: Informationstechnik Begriffe. Berlin: Beuth Verlag, 1993/ 2000.
- [32] KUCHLING, H.: *Physik, Formeln und Gesetze*, Fachbuchverlag Leipzig, 1984.
- [33] LANGE, F.: Anwendungshandbuch nach DIN für die WSF Rönkendorf. Rostock: Universität Rostock, 2005.
- [34] LANGMANN, R.: *INTERBUS Technologie zur Automation*. München: Carl Hanser Verlag, 1999.
- [35] LUNZE, J.: *Regelungstechnik 1, Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*, 5. Auflage. Berlin: Springer Verlag, 2006
- [36] MICROSOFT Corporation: *MS Windows 2000 Hilfe, Suchwort “OLE”*. Redmond: Microsoft Corporation, 1999.
- [37] MÜLLER, G. (Hrsg.): *Lexikon Technologie Metallverarbeitende Industrie*. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2- Auflage, 1992.
- [38] N. N.: *The Specification of petroleum coke produced in Homs Refinery company*. Homs: Homs Refinery.
- [39] OFFENSAND, J.; SCHÄFER, R.: *Anwenderhandbuch Peripherals Communication Protocol (PCP)*. Bloomberg: Phoenix Contact GmbH & Co., 1997.
- [40] OPC Foundation: *What is OPC?*. 2007. URL: http://www.opcfoundation.org/Default.aspx/01_about/01_whatis.asp?MID>AboutOPC. (25.01.07)
- [41] PHOENIX Contact: *Interbus OPC-Server Hilfsdatei, OPC-Interbus Server 2.0X*. Bloomberg: Phoenix Contact GmbH & Co KG, 2003.
- [42] REMY, H.: *Lehrbuch der Anorganischen Chemie*, 13. Auflage. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Gust & Portig K.-G., 1970. (KA)
- [43] ROSEMOUNT: *Rosemount Produktdatenblatt Modell 8800C, Smart Vortex Wirbelzähler, Nr. 00813-0105-4003, Rev. GA9/99, Bedienungsanleitung Rosemount*. Hasselroth : Fisher-Rosemount GmbH, 1999.
- [44] SCHRÖTER, W.; LAUTENSCHLÄGER, K.-H.; BIBRACK, H. SZNABEL, A.: *Chemie*, 16. Auflage. Leipzig: Fachbuchverlag, 1985.

- [45] SCHULZ, V.: *NGA 2000, Operating Manual, MLT Analyzer Module*. Hasselroth: Fisher-Rosemount GmbH, 6. Edition, Oktober 1999.
- [46] SEMICONDUCTOR Technical Data: *Advanced Information MPX5100 Series Silicon Pressure Sensors*. Datenblatt zu den verwendeten Drucksensoren.
- [47] SPRINGER, G. (Lektor): *Fachkunde Elektrotechnik*, 20. Auflage. Haan-Gruiten: Verlag Europa Lehrmittel, 1993.
- [48] STADTWERKE ROSTOCK: *Erdgas H Orientierungswerte 2005*. Rostock: Datenblatt der Stadtwerke Rostock, 2005
- [49] STEINBRECHT, D.: *Abschnitt 1, Technische Verbrennung , Emissionen , Verfahrenstechnische Berechnungen mit Verbrennungsabgasen*. Rostock: Vorlesungsscript, 2006.
- [50] STEINBRECHT, D.: *Abschnitt 2, Wirbelschichtfeuerungen, Schwerpunkt Stationäre Wirbelschichtfeuerungen*. Rostock: Script zur Vorlesung, 2006.
- [51] STRAUß, K.: *Kraftwerkstechnik zur Nutzung fossiler, regenerativer und nuklearer Energiequellen*, 3. Auflage. Berlin: Springer Verlag, 1997.
- [52] TC Meß- und Regelungstechnik: *Handbuch zur Temperaturbestimmung mit Thermoelementen und Widerstandsthermometern*. Mönchengladbach: TC Meß- und Regelungstechnik GmbH, 2006.
- [53] THERMAL Ceramics: *Produktinformation SW 607 MAX*. Reinbeck: Thermal Ceramics Deutschland GmbH & Co. KG, 2003.
- [54] URBAN, A. I.; SEEGER, H.: *Online-Heizwertbestimmung in einer Müllverbrennungsanlage*. In: BILITEWSKI, B; URBAN, A. I.; FAULSTICH, M. (Hrsg.): *10. Fachtagung Thermische Abfallbehandlung*. Dresden: Schriftenreihe des Instituts für Abfallwirtschaft und Altlasten, Technische Universität Dresden, 2005, S. 278 - 294.
- [55] VDI-Wärmeatlas, 6. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1991
- [56] WIRTH, K.-E.: *Zirkulierende Wirbelschichten, Strömungsmechanische Grundlagen, Anwendung in der Feuerungstechnik*. Berlin: Springer Verlag, 1990.
- [57] WÖRN, H.; BRINKSCHULTE, U.: *Echtzeitsysteme, Grundlagen, Funktion, Anwendungen*. Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- [58] ZIROX Sensoren & Elektronik GmbH: *ZIROX-Sauerstoff-Meßsystem Gerätehandbuch*. Greifswald: Zirox Sensoren und Elektronik GmbH, 1998.

9. Anhang

9.1. Übersicht spezifische Wärmekapazitäten von Brennstoffen

Feste Brennstoffe

Randbedingungen: $0 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \vartheta_{BS} \leq 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $p_{BS} = 1,0123 \text{ bar}$; reine Stoffe

Tabelle 27: Spezifische Wärmekapazitäten fester Brennstoffe [24]

Nr.	Benennung	spezifische Wärme-kapazität kJ/ kgK
1.	Graphit	0,71
2.	Hartgummi	1,42
3.	Ahorn	1,60
4.	Birke	1,90
5.	Buche	2,10
6.	Eiche	2,40
7.	Erle	1,40
8.	Esche	1,60
9.	Fichte	2,10
10.	Kiefer	1,40
11.	Lärche	1,40
12.	Pappel	1,40
13.	Holzkohle	0,84
14.	Kork	2,00
15.	Papier	1,34
16.	Paraffin	3,26
17.	Phosphor	0,80
18.	Ruß	0,84
19.	Steinkohle	1,02
20.	Rindertalg	0,88
21.	Torfmüll	1,90
22.	Wachs	3,35
	MW	1,62

Flüssige Brennstoffe

Randbedingungen: $0 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \vartheta_{BS} \leq 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $p_{BS} = 1,0123 \text{ bar}$; reine Stoffe

Tabelle 28: Spezifische Wärmekapazitäten flüssiger Brennstoffe [24]

Nr.	Benennung	spezifische Wärme-kapazität kJ/ kgK
1.	Aethyläther	2,28
2.	Äthylalkohol	2,38
3.	Azeton	2,22
4.	Benzin	2,02
5.	Benzol	1,70
6.	DK	2,05
7.	Glyzerin	2,37
8.	H EL	2,07
9.	Leinöl	1,88
10.	Methylalkohol	2,51
11.	Petroleum	2,16
12.	Rüböl	1,97
13.	Schmieröl	2,09
14.	Trafoöl	1,88
	MW	2,11

„Ersatzgas“ als Mischung aus Methan und Stickstoff

Tabelle 29: Spezifische Wärmekapazität des „Ersatzgases“

Nr.	Gasmischung		Vorwärm-temperatur	spezifische Enthalpie	Dichte der Gas-mischung	spezifische Enthalpie	spezifische Wärme-kapazität d. Gas-mischung
	CH ₄	N ₂					
	$m_N^3 CH_4 / m_N^3 BG$	$m_N^3 N_2 / m_N^3 BG$	°C	kJ/ m ³ NBG	kg/ m ³ BG	kJ/ kgBG	kJ/ kgBG K
1.	0,20	0,80	100	136,67	1,1439	119,48	1,19
2.	0,20	0,80	200	278,76	1,1439	243,69	1,22
3.	0,20	0,80	300	427,25	1,1439	373,51	1,25
4.	0,15	0,85	100	134,88	1,1706	115,23	1,15
5.	0,15	0,85	200	274,05	1,1706	234,12	1,17
6.	0,15	0,85	300	418,44	1,1706	357,47	1,19
7.	0,10	0,90	100	133,09	1,1972	111,17	1,11
8.	0,10	0,90	200	269,34	1,1972	224,98	1,12
9.	0,10	0,90	300	409,62	1,1972	342,15	1,14
						MW	1,17

9.2. Brennstoffschlüssel Simulationsrechnungen

Tabelle 30: Brennstoffschlüssel flüssige/ feste Brennstoffe der Simulation

Nr.	Brennstoff	Nr.	Brennstoff
1.	H-EL n. DIN 51603	22.	Strohpellets 2
2.	Rapsmethylester (RME)	23.	Holzpellets - 4
3.	Tierfett	24.	Strohpellets 1
4.	BRAM	25.	Petrolkoks Homs, Syrien
5.	Crambeöl	26.	Hausmüll-Siebüberlauf (2) max.40mm
6.	Rapsöl	27.	Pferdemist / Sägespäne
7.	Sommer-Leindotter-Öl	28.	Strohpellets
8.	Hausmüll-Siebdurchgang (3) max.40mm	29.	Mix Weizenstroh&Korn
9.	Klärschlamm Homs	30.	Waldholzpellets
10.	Tiermehl (Bayern)	31.	Hausmüll-Siebüberlauf
11.	Leindotter-Pellets	32.	Kakaoschoten
12.	Klärschlamm Eurawasser	33.	Hanfschäben
13.	Teerschlamm Rostock	34.	Weizenstroh
14.	Rapsschrot	35.	Reisstroh
15.	Holzpellets - 3	36.	Kaffee-Häutchen
16.	Holzpellets - 2	37.	Kaffee-Häutchen, pelletiert
17.	Holzpellets - 1	38.	Pferdemist, feucht
18.	Holzpellets - 5	39.	Hähnchenmist, Dänemark
19.	Kompostierungsrückstand Güstrow	40.	Holz, trocken
20.	Weidenpellets	41.	Mais, Großbeeren 1992
21.	Weizenkorn		

Tabelle 31: Brennstoffschlüssel gasförmige Brennstoffe Simulation

Nr.	Brennstoff
1.	Erdgas Brandenburg 7
2.	Erdgas Brandenburg 1
3.	Erdgas Brandenburg 2
4.	Erdgas Brandenburg 4
5.	Erdgas Brandenburg 3
6.	Erdgas Rußland
7.	Erdgas Stadtwerke Rostock 2004
8.	Erdgas Mecklenburg-Vorpommern 2
9.	Erdgas Mecklenburg-Vorpommern 3
10.	Erdgas NL
11.	Erdgas Mecklenburg-Vorpommern 1
12.	Erdgas Brandenburg 6
13.	Erdölbegleitgas Nigeria

9.3. Aufbau der Simulationstabelle

Die für die Simulation verwendete Tabelle setzt sich aus den folgenden Untertabellen zusammen:

1. Einführung

Das Blatt enthält eine Übersicht über die vorhandenen Tabellenblätter und eine Dokumentation der an der Tabelle durchgeführten Bearbeitungen.

2. Datenblatt Elementaranalyse

Das Blatt enthält die Elementaranalyse und weitere charakteristische Kenngrößen des verwendeten Brennstoffes. Hierbei unterscheiden sich die Tabellen für feste/ flüssige Brennstoffe von den für gasförmige Brennstoffe. In der Tabelle für die festen/ flüssigen Brennstoffe werden alle Labordaten direkt eingegeben. In der Tabelle für die gasförmigen Brennstoffe wird nur die Elementaranalyse direkt eingegeben, die übrigen Kennwerte werden dazu berechnet [49].

3. Verbrennungsrechnung

In dieser Tabelle wird über die ermittelten Laborwerte eine Verbrennungsrechnung für den verwendeten Brennstoff durchgeführt. Die Verbrennungsrechnung wird dabei sowohl mit spezifischen als auch mit absoluten Größen durchgeführt.

4. Stoffwerte Luft, BG, AG

Diese Tabelle enthält die Bestimmungstabellen zur Bestimmung der Enthalpie der Luft, des Brenngases, des Abgases und der verwendeten festen Brennstoffe. Teile der Tabellen basieren auf den in [49] vorgestellten Polynomen zur Bestimmung von Stoffwerten. Die hier ermittelten Enthalpiewerte werden in den übrigen Berechnungstabellen weiterverwendet.

5. Verbrennungstemperatur

In der Tabelle wird die theoretische Verbrennungstemperatur des verwendeten Brennstoffes ermittelt. Dazu wird die in [49] vorgestellte Bilanz verwendet und um einen Verlustterm erweitert. Mit dieser Erweiterung der Berechnungsgleichung wird der Energieverlust über die Reaktorwand nachgebildet. Aus der adiabaten Berechnung wird eine reale Berechnung.

Zur Bestimmung der Verbrennungstemperatur wird ein Makro mit einer Zielwertsuche verwendet. Das hier verwendete Makro wurde aus einer vergleichbaren Tabelle aus [49] entnommen.

6. Brennstofferkennung

In dieser Tabelle wird die Brennstofferkennung anhand der in der Verbrennungsrechnung ermittelten Daten simuliert. Dazu wurde ein Formelsatz, basierend auf der einheitenlosen Verbrennungsrechnung nach [6] und der gewöhnlichen Verbrennungsrechnung, erstellt und hier programmiert. In der Tabelle werden die Ergebnisse aus der Brennstofferkennungsrechnung immer mit den jeweiligen Ergebnissen der Verbrennungsrechnung verglichen und die Abweichung voneinander berechnet. Bezugsgröße ist dabei immer die Größe aus der Verbrennungsrechnung. Als Endergebnis dieser Tabelle liegt der aus der Erkennungsrechnung ermittelte Heizwert des verwendeten Brennstoffes vor.

7. Bedienung Ergebnisse

Dieses Tabellenblatt dient der Bedienung und Ergebnisausgabe der Simulationsrechnung.

Dabei werden im ersten Teil der Tabelle die Ordnungsdaten (Daten zur Identifikation, z.B. die vergebene Probennummer) des verwendeten Brennstoffes eingegeben. Danach wird die Elementaranalyse des Brennstoffes eingegeben und bei festen/ flüssigen Brennstoffen der ermittelte Heizwert. Bei gasförmigen Brennstoffen wird dieser Wert aus der Analyse berechnet.

Weiterhin werden in diesem Tabellenblatt die geometrischen Daten der betrachteten Wirbelschichtfeuerung und die verwendeten Materialien bereitgestellt. Diese Daten werden zur Berechnung des Wärmeverlustes durch die Reaktorwand benötigt. Die Nutzung dieser Größe erfolgt im Blatt 5.

Im dritten Abschnitt des Tabellenblattes erfolgt die eigentliche Bedienung der Simulationsrechnung. Hier werden die Eckdaten des betrachteten Prozesses vorgegeben:

Lufttemperatur, Brennstofftemperatur, Luftmassenstrom und die Solltemperatur des Prozesses.

Über hinterlegte Makros wird dann die Verbrennungstemperatur bzw. der zum Erreichen dieser Temperatur benötigte Brennstoffmassen- / -volumenstrom ermittelt.

Weiterhin werden hier auch die Ergebnisse der Brennstofferkennung mit ausgegeben.

Alle wichtigen Simulationsergebnisse sind mit einer „Sammelzeile“ verknüpft. Über diese Sammelzeile werden alle Ergebnisse in eine Ergebnistabelle transferiert.

8. Ergebnisse

In diesem Tabellenblatt werden die Ergebnisse das Simulationsrechnungen gespeichert. Dabei werden alle Werte, die für eine Reproduktion der Ergebnisse notwendig sind, mit gespeichert.

9. Ergebnisdarstellung

In diesem Tabellenblatt können die Ergebnisse der Rechnungen graphisch dargestellt werden.

9.4. Ergebnisse der Simulation

Hier werden die Ergebnisse der Simulationsrechnungen dargestellt. Die Schlüssel für die Brennstoffe finden sich in Anhang 9.2.

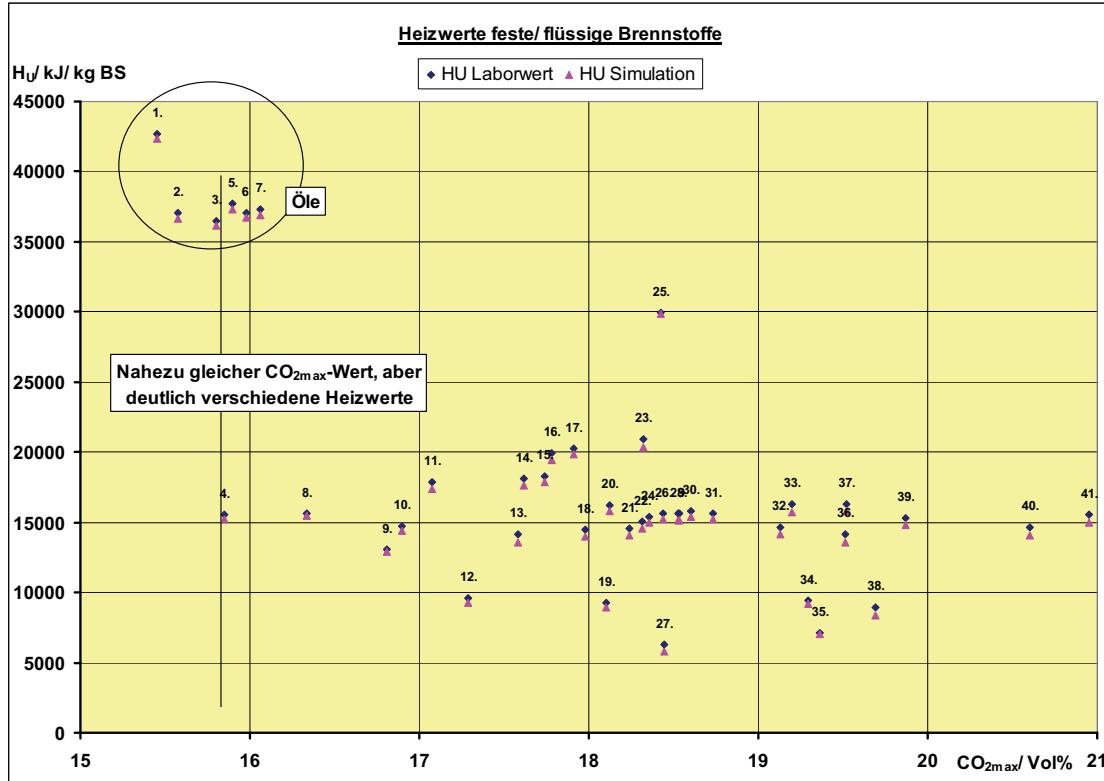


Abbildung 31: Ergebnisse der Simulationsrechnung feste/ flüssige Brennstoffe ohne LUVO (Legende: Anhang 9.2)

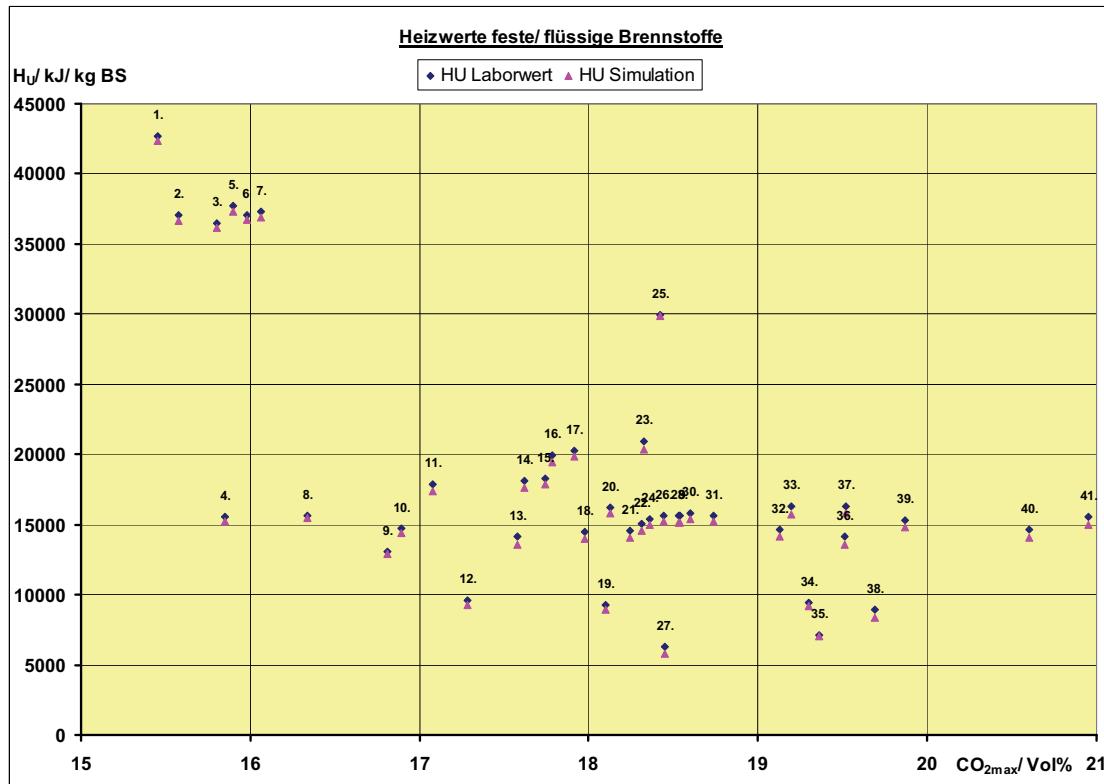


Abbildung 32: Ergebnisse der Simulationsrechnung feste/ flüssige Brennstoffe mit LUVO (Legende: Anhang 9.2)

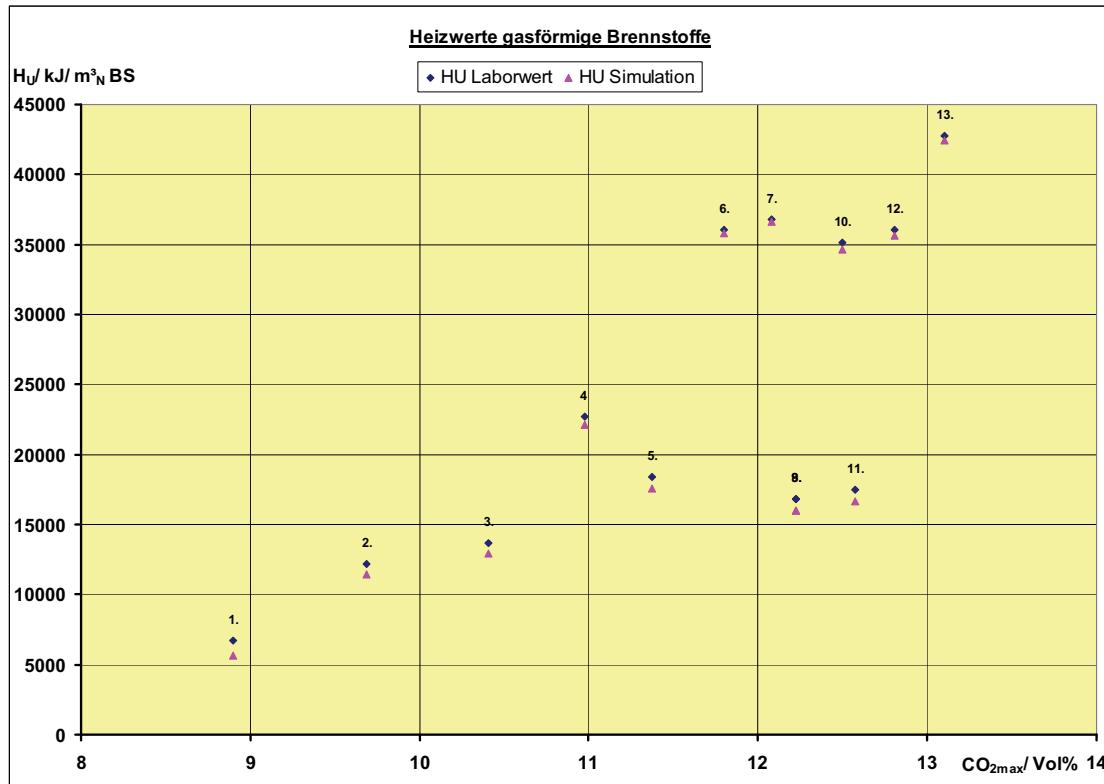


Abbildung 33: Ergebnisse der Simulationsrechnung gasförmige Brennstoffe ohne LUVO (Legende: Anhang 9.2)

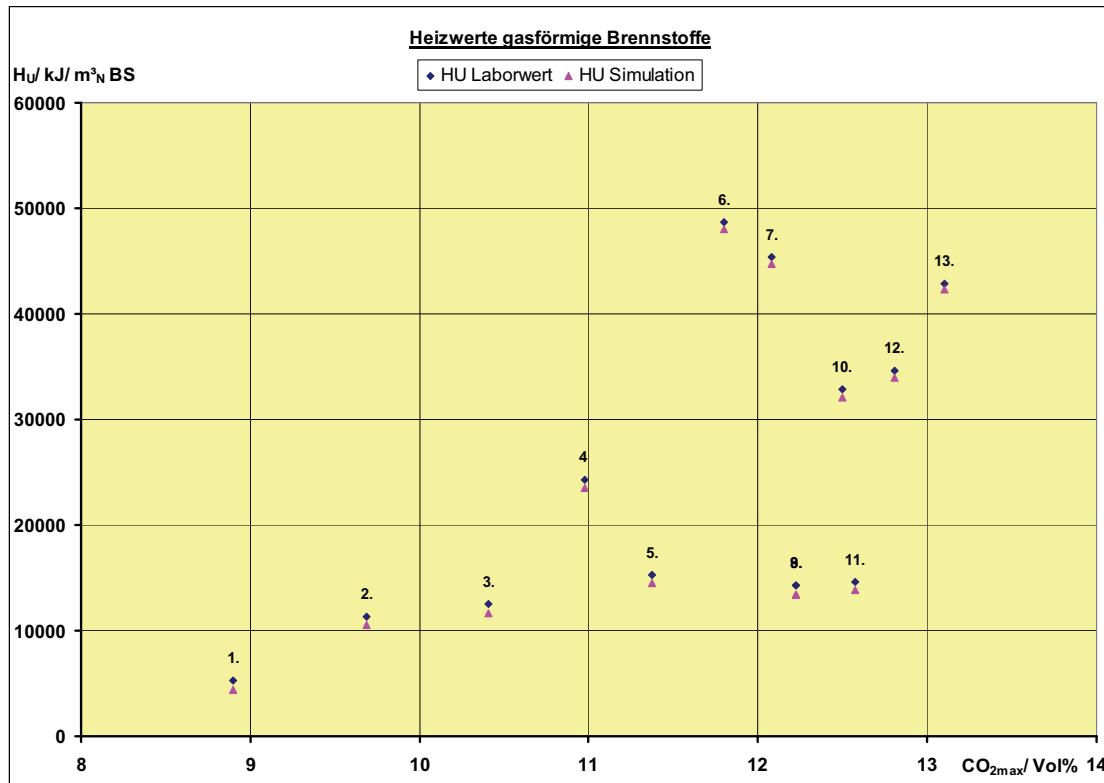


Abbildung 34: Ergebnisse der Simulationsrechnung gasförmige Brennstoffe mit LUVO (Legende: Anhang 9.2)

9.5. Beschreibung der Standard-Sensoren

Temperaturen

Für die Erfassung aller Temperaturen an der SWSF Rostock werden Thermoelemente vom Typ K (NiCr-Ni) verwendet. Thermoelemente mit dieser Materialpaarung sind die am häufigsten genutzten Thermoelemente. Ursprünglich für den Einsatz in oxidierenden Umgebungen konzipiert, werden diese Elemente wegen ihres breiten Anwendungsbereiches und den niedrigen Beschaffungskosten in einer Reihe von Anwendungen verwendet.

Typ K Thermoelemente eignen sich für einen Dauereinsatz im Temperaturintervall von $-250^{\circ}\text{C} < \vartheta < 1100^{\circ}\text{C}$ (kurzzeitig bis $\vartheta = 1350^{\circ}\text{C}$). Im Temperaturbereich von $\vartheta > 850^{\circ}\text{C}$ können Änderungen in den thermoelektrischen Eigenschaften auftreten, die zu einer bleibenden Messwertabweichung im Bereich von $\Delta T = 1\text{ K}$ führen.

Der Seebeck-Effekt, der die physikalische Grundlage für die Temperaturmessung ist, tritt bei einer Temperaturänderung ohne Verzögerung ein. Die von dem Thermoelement erzeugte Thermospannung ändert sich ohne Verzögerung. Da an der SWSF Mantelthermoelemente verwendet werden, kommt es bei einer Temperaturänderung im Prozess durch die Trägheit des Mantels zu Verzögerungen bei der Temperaturmessung.

Drücke

Für die Überwachung des Betriebszustandes an der SWSF Rostock müssen Drucksignale erfasst werden. Hierfür werden piezoresitive Dünnfilm-Drucksensoren verwendet.

Die Sensoren an der SWSF Rostock sind für die Druckmessung so geschaltet, dass sie Überdrücke und Differenzdrücke erfassen. Vor der Verwendung der Drucksensoren wurden die Kennlinien der einzelnen Sensoren aufgenommen, um die Rückrechnung der elektrischen Signale in die entsprechenden Druckeinheiten zu ermöglichen.

Die Drucksensoren werden an der SWSF Rostock verwendet, um den Differenzdruck über dem Wirbelbett und den Druck der Wirbelluft nach dem Volumenstrommessgerät zu ermitteln.

Konzentrationen im trockenen Abgas

In der SWSF Rostock soll die Verwendbarkeit von verschiedenen Brennstoffen in einer Wirbelschichtfeuerung kleiner Leistung untersucht werden. Dazu ist es unerlässlich, neben der Eignung für die Verbrennung in der SWSF auch das Abgas der Brennstoffe zu überwachen. Für die Abgasanalyse wird an der SWSF Rostock ein Abgasanalysator der Fa. Fisher-Rosemount verwendet, der NGA 2000 MLT. Das Gerät analysiert das Abgas der Verbrennung auf die Konzentration der Komponenten CO , CO_2 , NO , NO_2 , SO_2 und O_2 . Bei den ermittelten Konzentrationen handelt es sich um die Konzentrationen im trockenen Abgas.

Das Abgas wird in dem Gerät mit Hilfe der Absorptions-Spektroskopie (IR und UV) und einem magnet-mechanischen Verfahren untersucht. Beide Verfahren werden im Folgenden kurz dargestellt.

Absorptions-Spektroskopie [29]:

Die Absorptions-Spektroskopie beruht auf der Eigenschaft von Gasen, bestimmte charakteristische Anteile eines Spektrums zu absorbieren. Die Absorption bestimmter Spektralbereiche bedeutet eine Energieaufnahme des Gases. Mit der Energieaufnahme des Gases verändern sich die Zustandsgrößen. Diese Auswirkung wird für eine Messung der Konzentration genutzt. Für die Untersuchung der Abgase steht für jede der Komponenten ein eigener Sensor zur Verfügung.

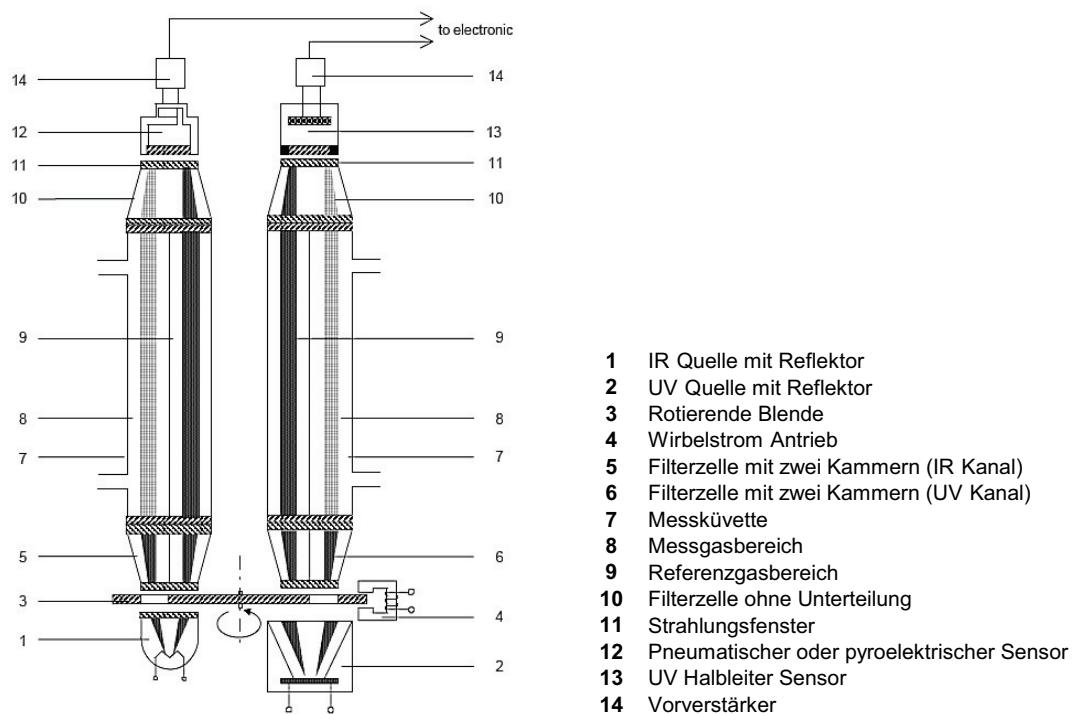


Abbildung 35: Aufbau der Messküvetten NGA 2000 MLT [45]

Bei der spektroskopischen Konzentrationsanalyse wird die Strahlung einer Strahlungsquelle (IR oder UV) mit Hilfe einer rotierenden Blende so geleitet, dass sie abwechselnd zwei parallele Küvetten passiert. In einer Küvette befindet sich das Messgas (Messgas-Küvette), in der anderen Küvette befindet sich ein Referenzgas (Referenzgas-Küvette). Nach dem Passieren der beiden Küvetten trifft der Strahl auf einen Detektor. Unabhängig von der Strahlungsart (IR oder UV) ist der Aufbau der Messstrecke gleich. Daher wird im Folgenden lediglich der Aufbau und die Funktion des IR-Strahlenganges beschrieben.

Das für die Konzentrationsmessung verwendete Signal ergibt sich aus unterschiedlichen Mikroströmungen im Detektor (verg. Abbildung 36). In dem Detektor befindet sich das Gas, dessen Konzentration mit der Messanordnung ermittelt werden soll. Durch die Absorption der charakteristischen Spektralanteile wird dem Gas Energie zugeführt. Durch die Verwendung einer rotierende Blende erfolgt die Energiezufuhr gepulst, dabei durchlaufen aufeinander folgende Strahlen unterschiedliche Messküvetten. Solange sich in beiden Küvetten Gas mit den gleichen Absorptionseigenschaften bez. der verwendeten Strahlung befinden, wird dem Strahl beim Passieren der Küvetten keine Energie entzogen. Beim Auftreffen auf den Detektor bildet sich durch den gleichmäßigen Energieeintrag ein stationärer Zustand aus. Es kommt nicht zu Strömungen durch den Überströmkanal.

Befindet sich in der Messküvette das zu detektierende Gas, erfolgt dort ein Energieeintrag in das Messgas. Die mit dem Strahl transportierte Energie wird verringert. Die Absorption ist proportional zur Konzentration der betrachteten Komponente in dem Messgas.

Auf den Detektor treffen jetzt nacheinander Strahlen mit unterschiedlichem Energieinhalt. Dadurch kommt es zu einer unterschiedlich starken Energienahme bei zwei aufeinander folgenden Strahlen. Der Gleichgewichtszustand im Detektor wird verlassen. Es stellt sich eine gepulste Strömung in dem Überströmkanal ein. Die Strömung kann mit einem Mikroströmungssensor erfasst und ausgewertet werden.

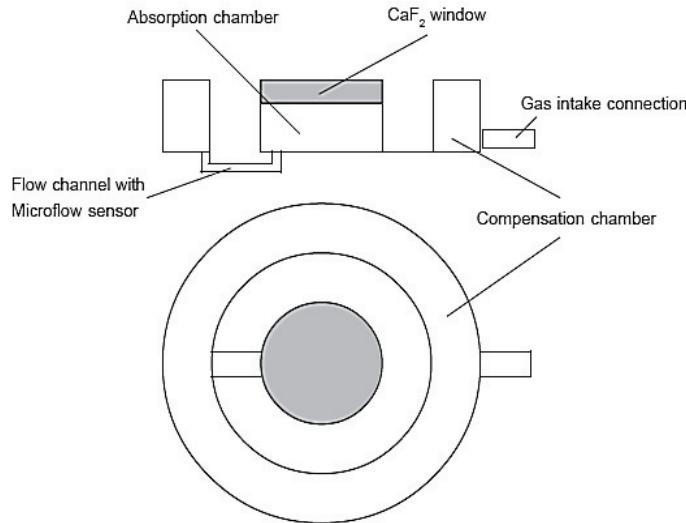


Abbildung 36: Prinzipieller Aufbau des Sensors [45]

Magnet-mechanisches Verfahren zur Sauerstoffkonzentrationsmessung:

Magnet-mechanische Verfahren zur Messung von Sauerstoffkonzentrationen nutzen die paramagnetischen Eigenschaften des Sauerstoffs. Die Feldstärke magnetischer Felder kann durch das Einbringen von Stoffen in das Feld verstärkt oder abgeschwächt werden. Je nach ihrer Verstärkung des Feldes werden ferromagnetische, paramagnetische oder diamagnetische Stoffe unterschieden. Paramagnetische Stoffe verstärken ein Magnetfeld, in dem sie sich befinden.

Tabelle 32: Stoffe im Magnetfeld [32]

Nr.	Permeabilitätszahl	Beschreibung	Eigenschaft	Beispiel
1.	$\mu_r \gg 1$	ferromagnetischer Stoff	erhebliche Feldstärkung	Fe, Co, Ni
2.	$\mu_r > 1$	paramagnetische Stoffe	geringe Feldstärkung	Pt, Al, Luft
3.	$\mu_r < 1$	diamagnetische Stoffe	geringe Feldschwächung	Ag, Cu, Ws

Für die Konzentrationsmessung wird der Sauerstoff magnetisch aus dem Messgas abgetrennt. Danach wird er in einen mechanischen Sensor geleitet.

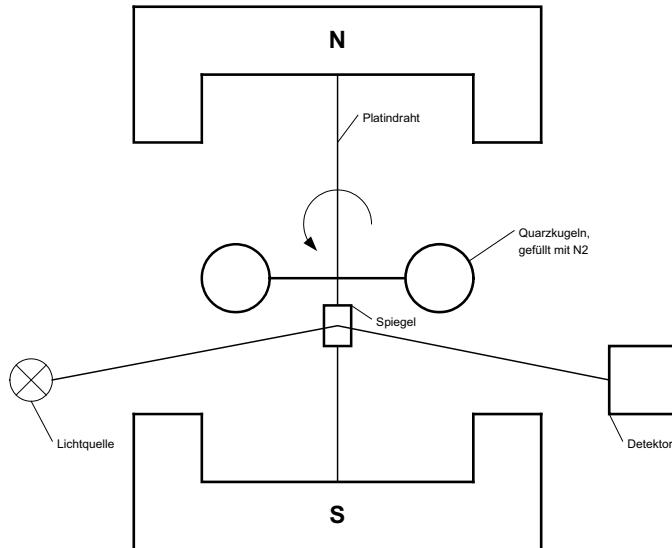


Abbildung 37: Prinzipieller Aufbau Sauerstoffsensor (angelehnt an [29])

Der Sauerstoffsensor besteht aus einem Permanentmagneten, in dem sich an einem selbstspannenden Platindraht eine hantelförmige Konstruktion aus zwei Quarzkugeln befindet. Die Konstruktion ist drehbar.

Für die Messung tritt der aus dem Messgas abgetrennte Sauerstoff in das Magnetfeld ein. Dabei verdrängt er die Quarzkugeln, die hängende Konstruktion wird torquiert. Die Verdrehung wird optisch über die Veränderung eines Lichtstrahls ermittelt. Der Detektor kann dazu verwendet werden, die Messanordnung mit Hilfe eines elektrischen Stromes wieder in die Ausgangslage zurückzustellen. Die Größe des Stromes kann als Maß für die Sauerstoffkonzentration verwendet werden.

Die beiden beschriebenen Sensorentypen sind in einem standardisierten Gehäuse montiert. Bevor das Abgas der Feuerung untersucht werden kann, müssen alle kondensierbaren Bestandteile aus ihm entfernt werden. Hierzu ist eine vorgeschaltete Abgastrocknung notwendig. Messgeräte dieser Bauart sind gegenüber Vibrationen unempfindlich und weisen eine lange Einsatzdauer auf. Sie werden in der Glas- und Keramikindustrie, in der chemischen und petrochemischen Industrie und in der Automobilindustrie verwendet [29].

9.6. Verbrennungsrechnung für Musterbrennstoff

Verfahren nach Steinbrecht [49]. Alle verwendeten Gleichungen werden dort für feste/ flüssige und gasförmige Brennstoffe hergeleitet.

Aufgabe:

Darstellen einer Verbrennungsrechnung mit einem Musterbrennstoff zur Verdeutlichung des Verfahrens.

Die Verbrennungsrechnung wird nach dem genannten Verfahren mit den folgenden variierenden Aufgaben durchgeführt (nach [49]):

- Ermittlung des spezifischen Luftbedarfs zur Verbrennung von 1 kg Brennstoff
- Bestimmung des bei der Verbrennung von 1 kg Brennstoff entstehenden spezifischen Abgasvolumens
- Berechnung der realen Verbrennungsluft- und Abgasmengen aus dem Brennstoffmassenstrom
- Berechnung der Abgaszusammensetzung
- Berechnung der stöchiometrischen Emissionen von CO_2 und SO_2
- Das Ermöglichen von wärmetechnischen Berechnungen mit den Abgasen

Gegeben:

Brennstoff: H-EL nach DIN 51 603

Tabelle 33: Elementaranalyse H-EL

Nr.	Bestandteil	Menge	Einheit
1.	Kohlenstoff	0,8615	kg/kg Br
2.	Wasserstoff	0,1310	kg/kg Br
3.	Sauerstoff	0,0000	kg/kg Br
4.	Stickstoff	0,0040	kg/kg Br
5.	Schwefel	0,0020	kg/kg Br
6.	Asche	0,0010	kg/kg Br
7.	Wasser	0,0005	kg/kg Br
8.	Heizwert	42700	kJ/kg Br

Für die Verbrennungsrechnung wird davon ausgegangen, dass eine vollkommene Verbrennung vorliegt. Der Brennstoff wird während der Verbrennung in die Verbrennungsendprodukte CO_2 , H_2O und SO_2 umgesetzt.

Verbrennungsrechnung:

Ansatz:

Die Verbrennung erfolgt nach dem Prinzip



Für die minimale spezifische Sauerstoffmenge gilt

$$o_{\min} = 1,867 \cdot c + 5,56 \cdot h + 0,7 \cdot s - 0,7 \cdot o \quad (37)$$

Mit den Werten der Elementaranalyse ergibt sich für den betrachteten Brennstoff:

$$o_{\min} = 2,34 \text{ m}^3 \text{ N} / \text{kg BS}$$

Mit

$$l_{\min} = \frac{o_{\min}}{y_{O_2, \text{Luft}}} \quad (38)$$

ergibt sich der minimale spezifische Verbrennungsluftbedarf zu

$$l_{\min} = 11,14 \text{ m}^3 \text{ N} / \text{kg BS.}$$

Mit der tatsächlich gelieferten Luftmenge kann jetzt das Verbrennungsluftverhältnis berechnet werden. Hierfür gilt:

$$\lambda = \frac{l}{l_{\min}} \quad (39)$$

Da für diese Berechnung keine spezifische Luftmenge bekannt ist, kann λ nicht berechnet werden. Hierfür müsste ein konkreter Betriebszustand vorliegen.

Aus der Elementaranalyse wird dann die Abgaszusammensetzung ermittelt. Für das spezifische feuchte Abgasvolumen gilt:

$$v_f = v_{CO_2} + v_{H_2O} + v_{SO_2} + v_{N_2} + v_{O_2} \quad (40)$$

Und mit den Werten der Elementaranalyse:

$$\begin{aligned} v_f = & \\ 1,867 \cdot c + 1,245 \cdot (9 \cdot h + w) + 0,7 \cdot s + 0,8 \cdot n + & \\ y_{N_2} \cdot \lambda \cdot l_{\min} + (\lambda - 1) \cdot o_{\min} & \end{aligned} \quad (41)$$

Da hier ebenfalls das Luftverhältnis mit eingeht, kann das spezifische feuchte Abgasvolumen nur für einen bestimmten Lastpunkt berechnet werden. Genauso verhält es sich mit dem spezifischen trockenen Abgasvolumen. Hierfür gilt:

$$v_{tr} = v_{CO_2} + v_{SO_2} + v_{N_2} + v_{O_2} \quad (42)$$

Und mit den Werten der Elementaranalyse

$$v_{tr} = 1,867 \cdot c + 0,7 \cdot s + 0,8 \cdot n + y_{N_2} \cdot \lambda \cdot l_{\min} + (\lambda - 1) \cdot o_{\min} \quad (43)$$

Das minimale spezifische trockene Abgasvolumen ist das trockene spezifische Abgasvolumen, das bei der stöchiometrischen Verbrennung ($\lambda = 1$) entsteht. Für $v_{tr,min}$ gilt demnach:

$$v_{tr} = v_{CO_2} + v_{SO_2} + v_{N_2(\lambda=1)} \quad (44)$$

Und mit den Werten der Elementaranalyse:

$$v_{tr,\min} = 1,867 \cdot c + 0,7 \cdot s + 0,8 \cdot n + y_{N_2} \cdot l_{\min} \quad (45)$$

Nach Einsetzen der Werte für H-EL erhält man:

$$\underline{v_{tr,\min} = 10,4 \text{ m}^3 \text{ N} / \text{kg BS}}$$

Mit dem spezifischen minimalen trockenen Abgasvolumen und dem spezifischen CO_2 -/ SO_2 -Volumen kann dann der Brennstoffkennwert $CO_{2\max}$ und $SO_{2\max}$ berechnet werden. Hierfür gilt:

$$CO_{2\max} = \frac{v_{CO_2}}{v_{tr,\min}} \quad (46)$$

Die Gleichung wird ebenfalls für die Berechnung von $SO_{2\max}$ verwendet. Hierfür werden die entsprechenden SO_2 -Volumina eingesetzt. Mit den Werten der Elementaranalyse erhält man die folgenden Zahlenwerte:

$$\begin{aligned} CO_{2\max} &= 0,15 \text{ m}^3 \text{ CO}_2 / \text{m}^3 \text{ AG} \\ SO_{2\max} &= 1,34 * 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ SO}_2 / \text{m}^3 \text{ AG} \end{aligned}$$

Damit sind alle brennstofftechnischen Werte, die aus der Elementaranalyse ohne Kenntnis eines bestimmten Betriebszustandes berechnet werden können, bestimmt.

9.7. Untersuchung Petrolkoks Homs



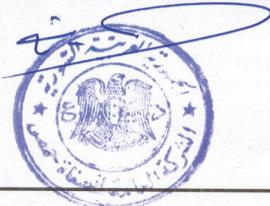
The specification of petroleum coke produced in Homs Refinery company

مواصفات الفحم البترولي المنتج في الشركة العامة لمصفاة حمص

APPARENT DENSITY	1.20-1.30	الكتافة الظاهرية
TRUE DENSITY	1.30-1.40	الكتافة الحقيقة
MOISTURE PCT WT	4.40-5.00 (VARIABLE)	نسبة الرطوبة (% وزناً)
VOLATILE MATTER PCT WT	6-12	نسبة المواد المتطرورة (% وزناً)
CARBON CONTENT PCT WT	62	نسبة الكربون (% وزناً)
SULPHUR CONTENT PCT WT	8.9-9.1	نسبة الكبريت (% وزناً)
ASH CONTENT PCT WT	0.6-0.8	نسبة الرماد (% وزناً)
GRINABILITY FACTOR	60-80	معامل الطحن (% وزناً)
GROSS CALORIFIC VALUE KACL/KG	8300-8400	القيمة الحرارية العظمى (كيلو كالوري / كلغ)
METAL CONTENT PPM:		المعدن جزء بالمليون:
-VANADIUM	500 MAX	فاناديوم
-NICKEL	50 MAX	نيكل
-MOLYBDENUM	50 MAX	موليبدينوم
GRANULES SIZE PCS WT:		نسبة توزيع حجم الحبيبات (% وزناً):
- LESS THAN 1 INCH	75-80	أقل من 1 انش
- FROM 1-4 INCH	10-15	من 1 - 4 انش
- FROM 4-8 INCH	3-6	من 4 - 8 انش
- MORE THAN 8 INCH	1-2	أكبر من 8 انش

P-Print-AJ-2004-WORD

المدير العام
الدكتور المهندس / أحمد الشيف محمد



P.O Box : 352 Homs - Syria
Phone : +963-31-470101 / 516401
Fax : +963-31-516410/516411

Email : homs-refine@mail.sy
www.homsrefinery.org

9.8. Ergebnisse der Auswertung (Diagramme mit kurzen Kommentaren)

Erdgas

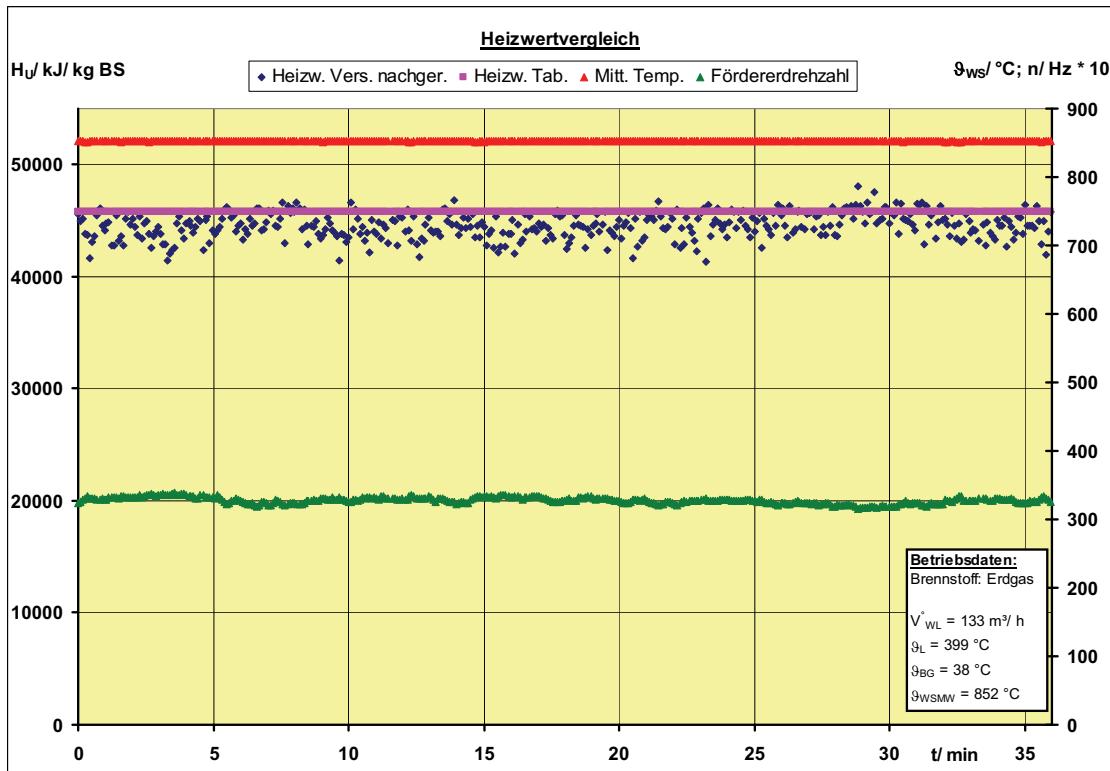


Abbildung 38: 060906 EG1 auto

Die SWSF wird automatisch betrieben. Die Solltemperatur wird konstant gehalten. Im Zuge des Versuches wird der tabellierte Heizwert gut erreicht.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): H_U 45794 kJ/kgBS

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): H_U 44539 kJ/kgBS

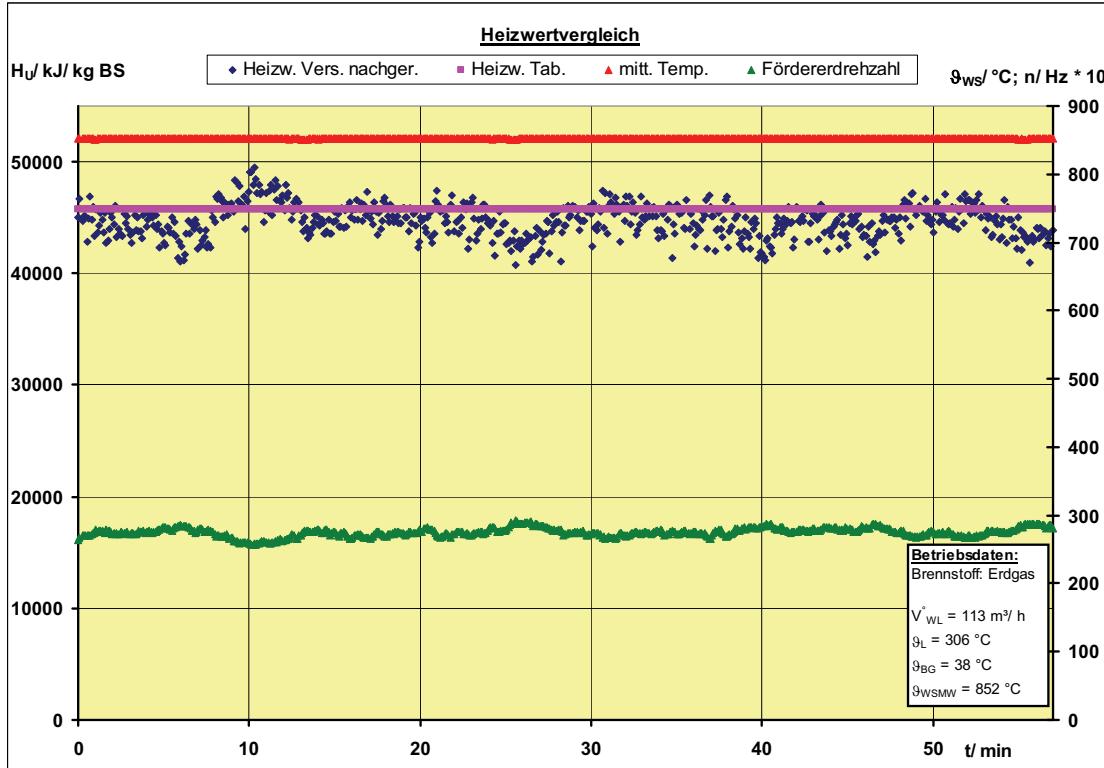


Abbildung 39: 060906 EG2 auto

Die SWSF wird automatisch betrieben, der tabellierte Heizwert wird gut erreicht. Bei $t = 10 \text{ min}$ und $t = 28 \text{ min}$ erkennt man deutlich die Gegenläufigkeit von berechnetem Heizwert und dem Brennstoffmassenstrom. Dabei reichen schon kleine Änderungen der Brennstofffördererdrehzahl aus, große Änderungen im berechneten Heizwert zu bewirken. Der Heizwert weist in dem Versuch eine Streuung von $s = 1443 \text{ kJ/kgBS}$ auf. Damit liegt der tabellierte Heizwert innerhalb des durch die Streuung gegebenen Intervalls.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): $H_U = 45794 \text{ kJ/kgBS}$

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): $H_U = 44707 \text{ kJ/kgBS}$

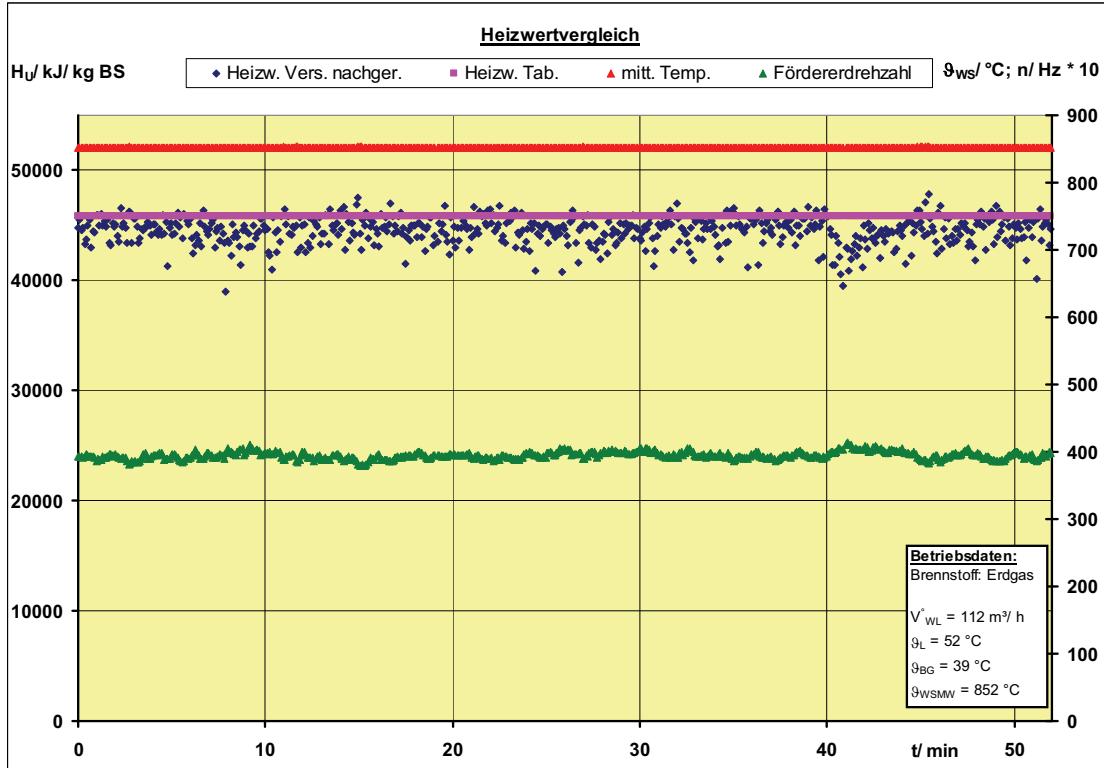


Abbildung 40: 060906 EG3 auto

In diesem Versuch wird die SWSF manuell betrieben. Dabei wird der Heizwert erneut gut bestimmt.

Alle Versuche an diesem Tage dienten dem Funktionsnachweis der Brennstoffidentifikation. Dazu wurde die SWSF mit Erdgas bei verschiedenen Lastpunkten betrieben:

060906 EG1 auto: hoher Luftvolumenstrom mit Luftvorwärmung

060906 EG2 auto: verringrigerter Luftvolumenstrom mit Luftvorwärmung

060906 EG3 auto: verringrigerter Luftvolumenstrom ohne Luftvorwärmung

Mit diesem Versuch wurde nachgewiesen, dass die Brennstoffidentifikation bei verschiedenen Lastpunkten erfolgreich funktioniert und plausible Ergebnisse liefert.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): H_U 45794 kJ/kgBS

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): H_U 44566 kJ/kgBS

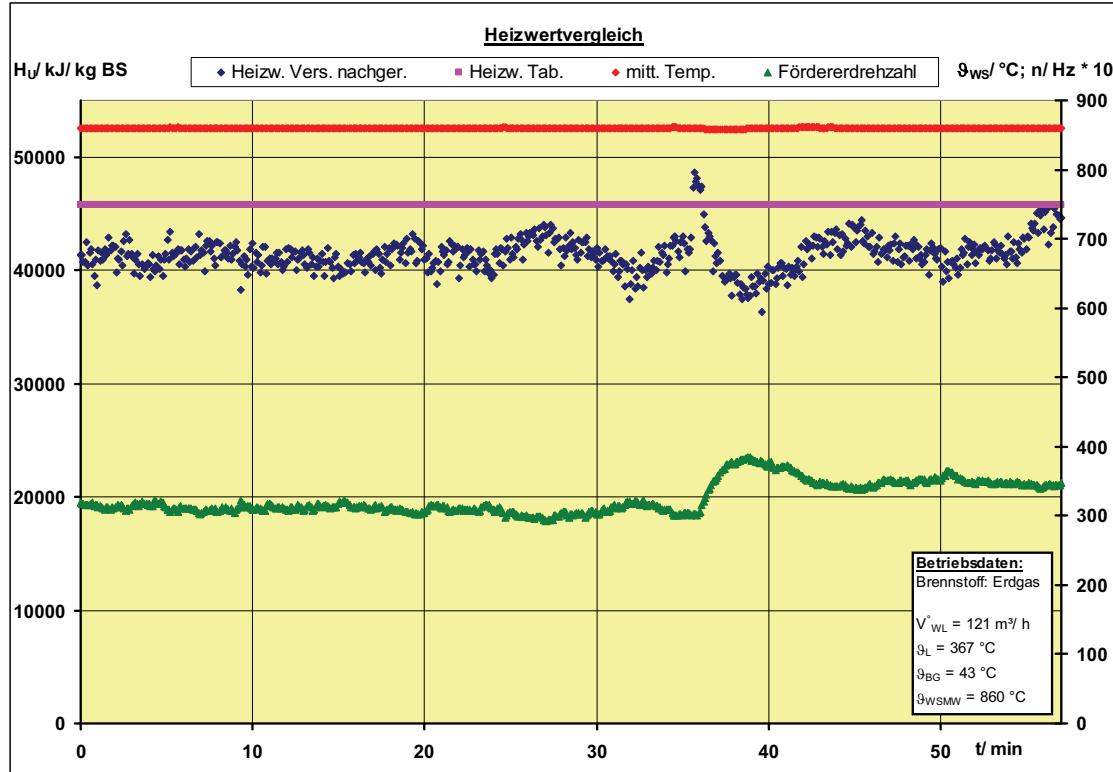


Abbildung 41: 060926 EG1 auto

Die Brennstoffidentifikation arbeitet während des Warmfahrens der SWSF. Der Tabellenwert des Heizwertes wird nicht erreicht. Es liegt keine Stationarität vor. Es werden noch Leistungen benötigt, um Speicher im System aufzuladen. Der Sprung bei $t = 36$ min führt von einer Veränderung des Betriebszustandes her.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): $H_U = 45794 \text{ kJ/kgBS}$

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): $H_U = 41510 \text{ kJ/kgBS}$

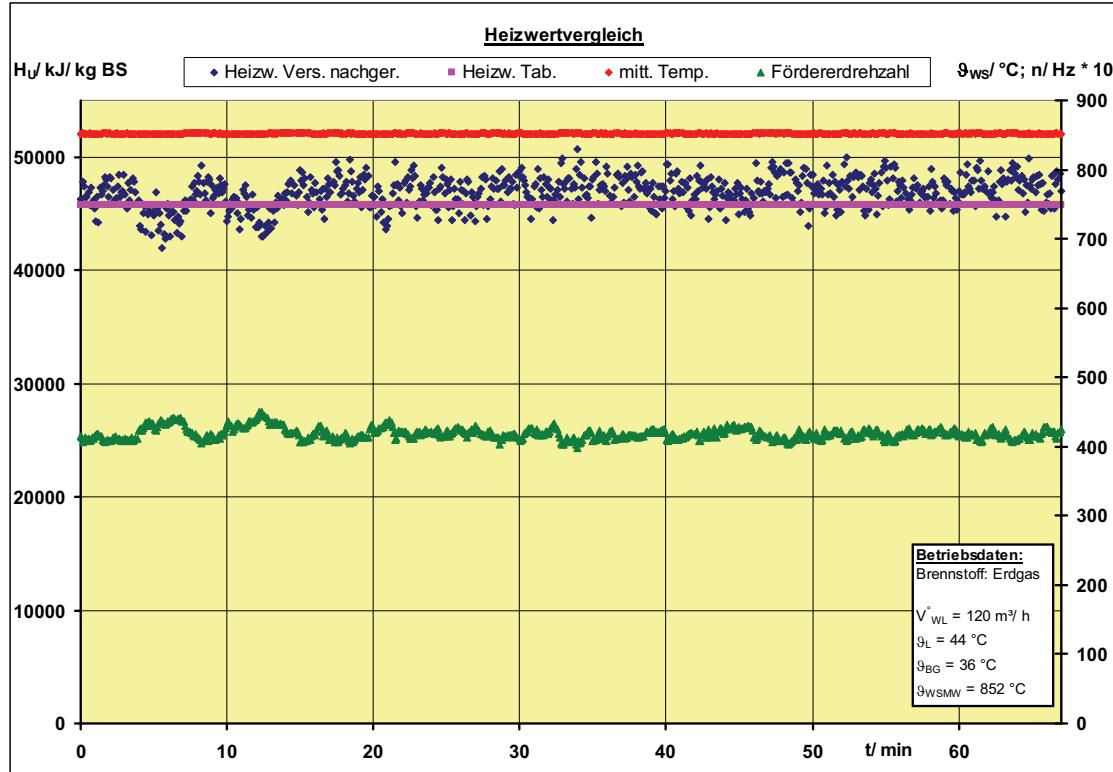


Abbildung 42: 061130 EG1 man

An diesem Versuchstag wurden Brennstoffuntersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Brennstoffidentifikation fallen dabei als verwertbare „Nebenprodukte“ an. Die Brennstofferkennung arbeitet während des Warmfahrens der SWSF. Der Heizwert wird dabei gut erreicht. Die SWSF wird manuell gefahren. Es zeigt sich erneut das gegenläufige Verhalten von berechnetem Heizwert und Brennstoffmassenstrom ($t < 20 \text{ min}$).

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): $H_U = 45794 \text{ kJ/kgBS}$

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): $H_U = 46903 \text{ kJ/kgBS}$

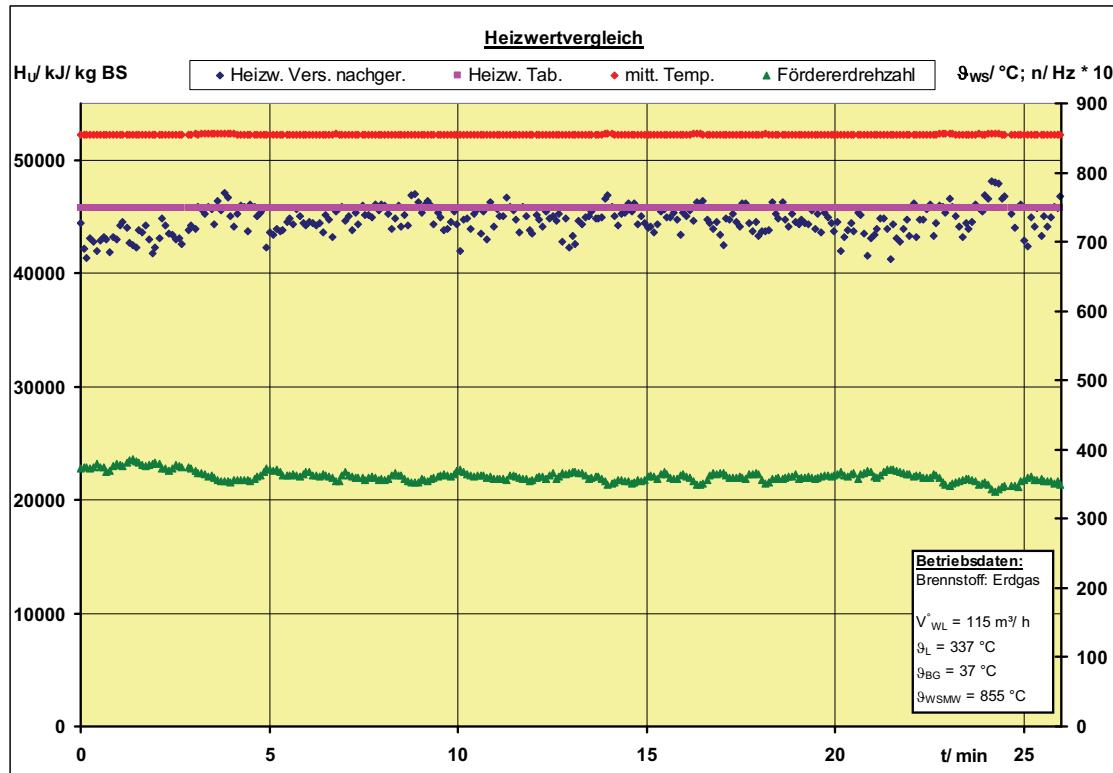


Abbildung 43: 061212 EG1 auto

Bei den Versuchen an diesem Versuchstag wurde Sickerwasser in der SWSF mitverbrannt. Das Ziel der Versuchsauswertung ist es dabei stets, den Heizwert des Erdgases zu ermitteln. Die Eindüsung von Sickerwasser wird hier als Störung der Verbrennung interpretiert, die in der Energiebilanz berücksichtigt wird (Sickerwasser \approx „flüssiges Additiv“). Die Heizwerte der im Sickerwasser enthaltenen Komponenten werden dabei vernachlässigt. Die Menge wurde über den Versuchstag variiert. Die SWSF wurde für die Versuche 061212 EG1 061212 EG3 im Betriebsmodus Automatik betrieben. Die letzten beiden Versuche an diesem Tage wurden im Betriebsmodus Hand gefahren. Für die Versuche 1 – 4 an diesem Tag wurde die Verbrennungsluft vorgewärmt.

Der hier dargestellte Versuch liefert den Vergleichswert für die Versuchsauswertung („Nullversuch“ ohne Sickerwasser). Hier wird der Heizwert noch ohne die Eindüsung von Sickerwasser gut erreicht.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): H_U 45794 kJ/kgBS

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): H_U 44671 kJ/kgBS

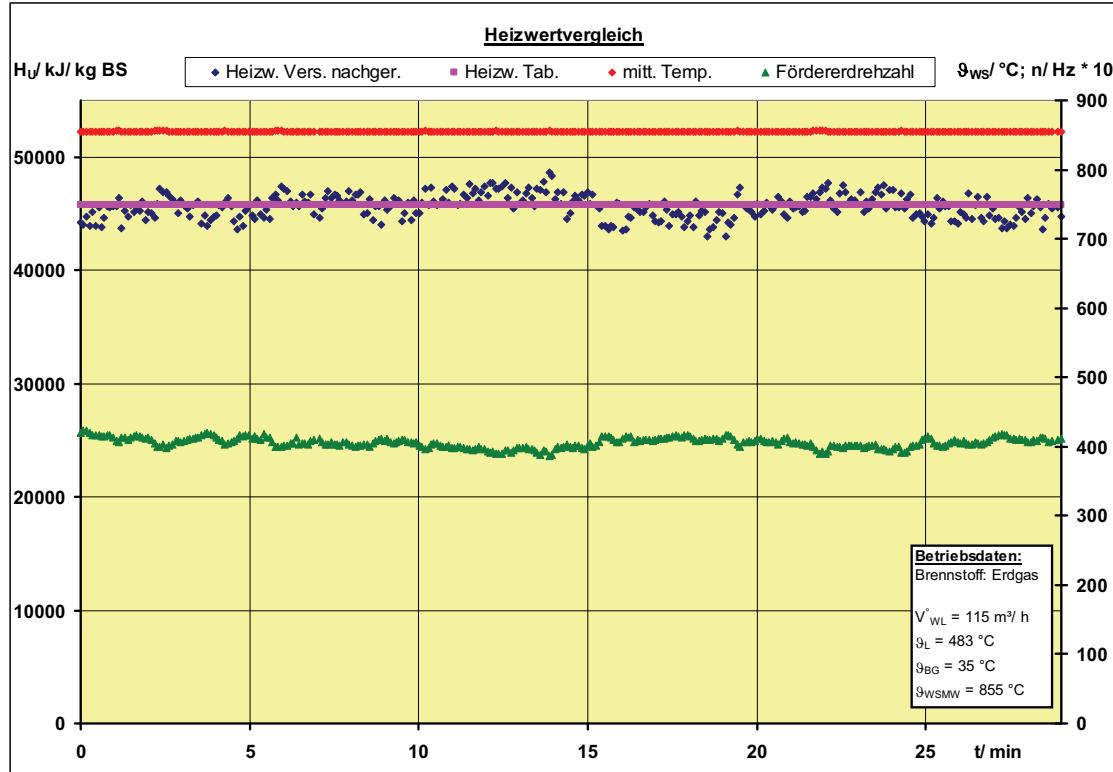


Abbildung 44: 061212 EG2 SW auto

Hier wird Sickerwasser mit in die SWSF eingedüst, $\dot{m}_{SW} = 8 \text{ kg/h}$. Der Heizwert wird trotz der Eindüsung (Störung) genau erreicht, er schwankt um den tabellierten Wert. Der Organik-Anteil im Sickerwasser wurde bei der Heizwertermittlung vernachlässigt.

Die Gegenläufigkeit von Brennstoffmassenstrom und berechnetem Heizwert wird bei $t = 14 \text{ min}$ erneut sichtbar.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): $H_U = 45794 \text{ kJ/kgBS}$

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): $H_U = 45627 \text{ kJ/kgBS}$

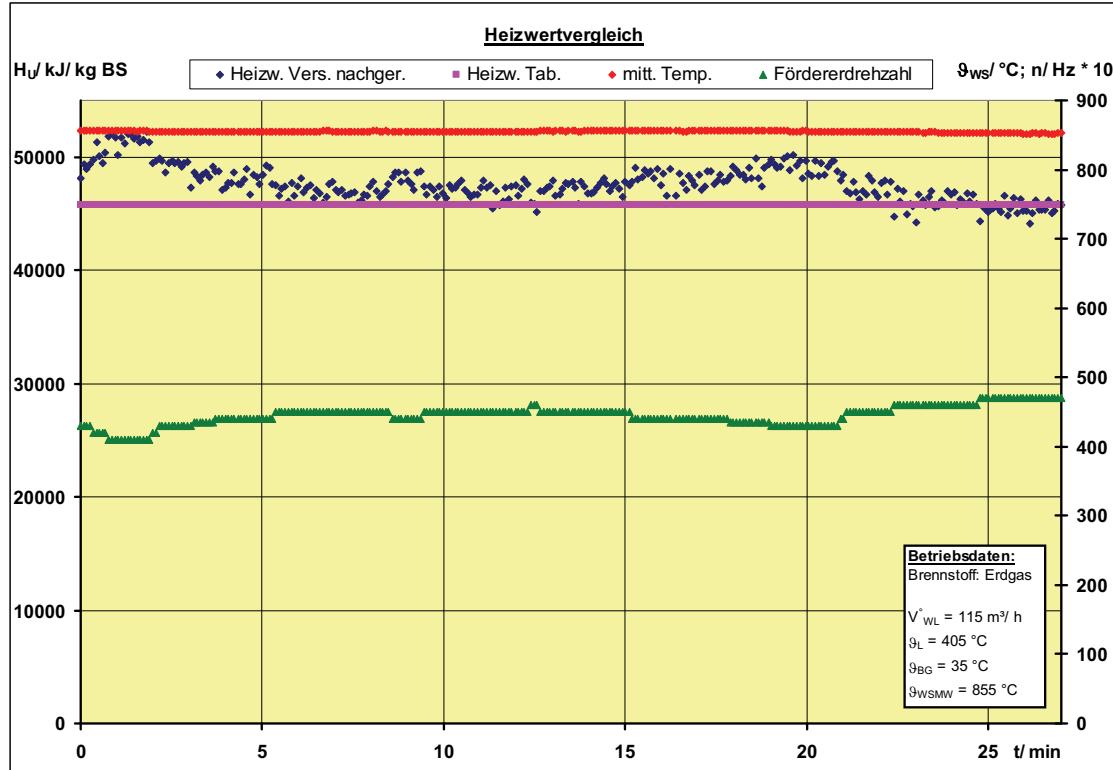


Abbildung 45: 061212 EG3 SW auto

Für den Versuch ist der Massenstrom \dot{m}_{sw} 16,2 kg/ h für das mitverbrannte Sickerwasser eingestellt. Im Vergleich zum vorherigen Versuch hat sich der Brenngasmassenstrom erhöht (Frequenz ist angestiegen). Dieses Verhalten war zu erwarten. Die Größe der Störung hat sich verändert (Sickerwassermassenstrom) und dementsprechend muss mehr Brennstoffenergie in die SWSF eingetragen werden, um den Betriebszustand zu halten.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): H_U 45794 kJ/kgBS

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): H_U 47616 kJ/kgBS

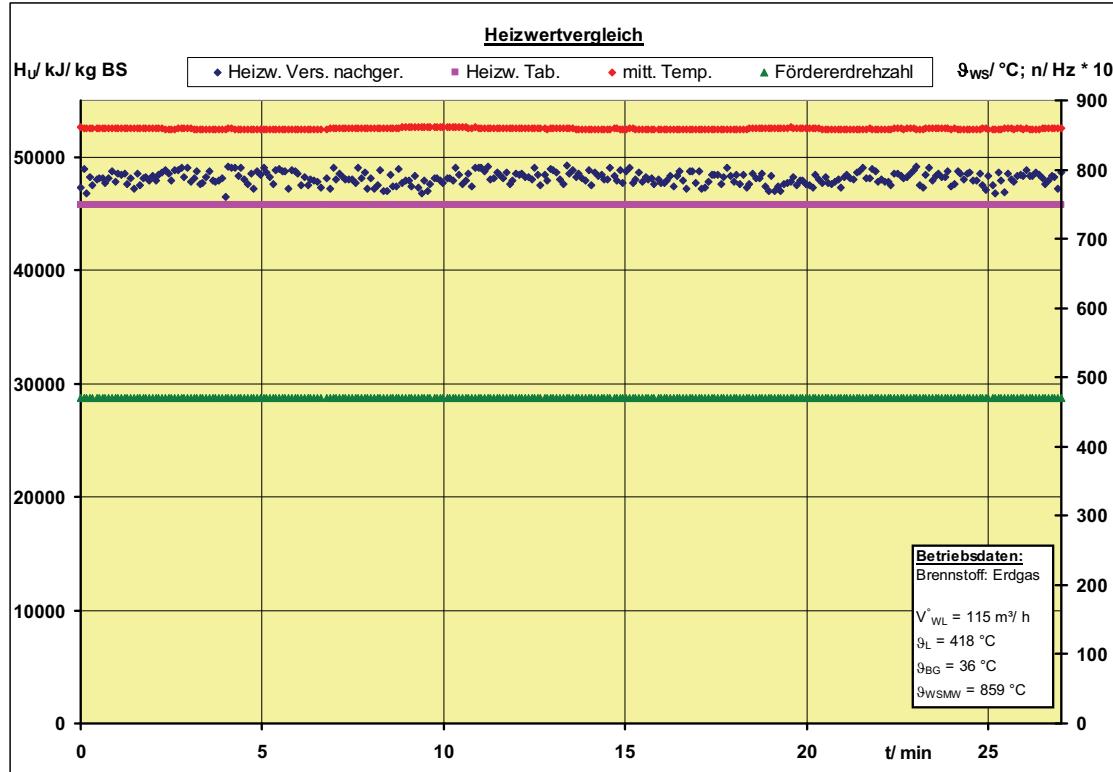


Abbildung 46: 061212 EG4 SW man

Die Anlage wird für diesen Betriebspunkt im Betriebsmodus Hand betrieben. Man erkennt es an dem sehr gleichmäßigen Drehzahlsignal und dem berechneten Heizwert. Die Schwankungen fallen deutlich kleiner aus als bei den Versuchen, die im Betriebsmodus Automatik durchgeführt wurden. Die Streuung des berechneten Heizwertes verringert sich gegenüber den anderen Versuchen. Der Organik-Anteil im Sickerwasser wurde bei der Heizwertermittlung vernachlässigt.

Hier wurde der Sickerwassermassenstrom erneut erhöht, $\dot{m}_{SW} = 20,4 \text{ kg/h}$. Der Betriebspunkt liegt sehr nahe an der maximal zulässigen Drehzahl des Brenngasverdichters, daher wird der Betriebspunkt manuell gefahren.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): $H_U = 45794 \text{ kJ/kg BS}$

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): $H_U = 48135 \text{ kJ/kg BS}$

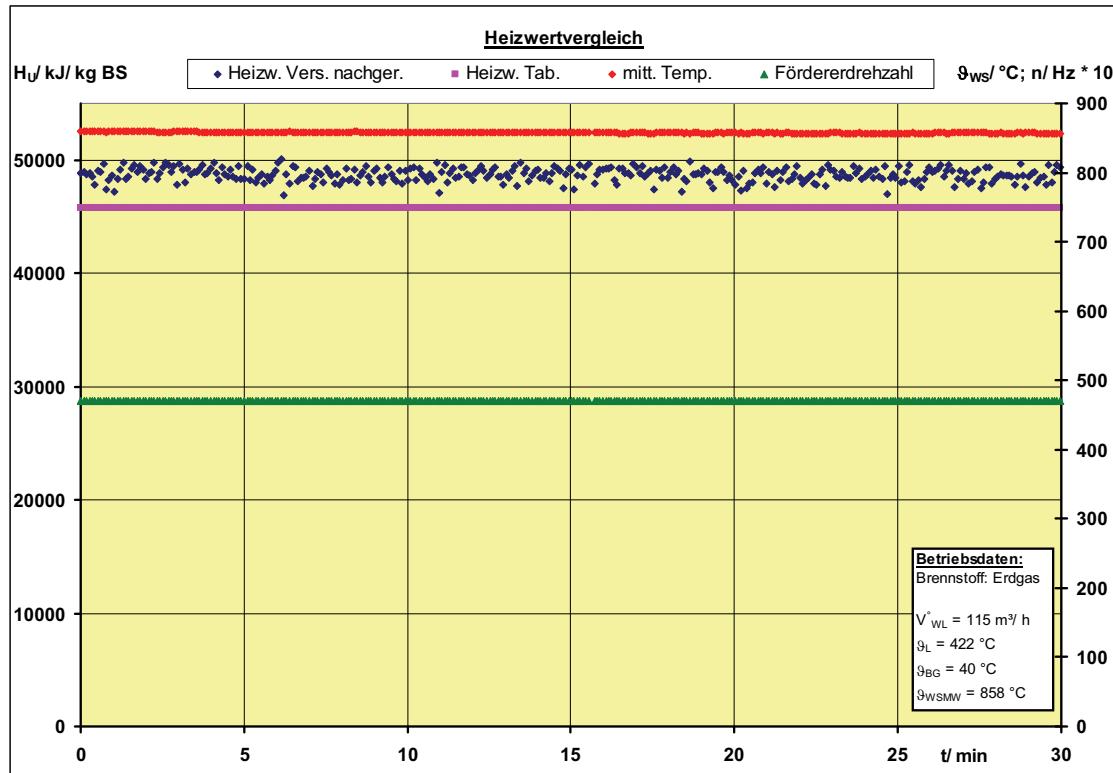


Abbildung 47: 061212 EG5 SW

Der Sickerwassermassenstrom wird erneut erhöht, die Anlage wird im Betriebsmodus Hand betrieben, $\dot{m}_{SW} = 21,6 \text{ kg/h}$. Der Heizwert stimmt sehr gut mit dem tabellierten Heizwert des Erdgases überein. Im Zuge der Massenstromerhöhung des Sickerwassers zeigt sich, dass sich der berechnete Heizwert des Erdgases erhöht. Bei den Berechnungen für die Heizwertermittlung werden die organischen Anteile, die sich im Sickerwasser befinden, vernachlässigt. Der Anstieg des ermittelten Heizwertes im Zuge der Massenstromerhöhung des Sickerwassers deutet darauf hin, dass diese Anteile zu der Erhöhung des berechneten Heizwertes führen.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): $H_U = 45794 \text{ kJ/kgBS}$

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): $H_U = 48709 \text{ kJ/kgBS}$

Bei allen Versuchen an diesem Versuchstag wird der Heizwert des Erdgases trotz der Störung durch das Sickerwasser sehr gut erreicht. Daher ist anzunehmen, dass die Methode vergleichbare Ergebnisse mit anderen flüssigen Additiven liefert. Es fällt auf, dass mit einer Steigerung des Sickerwassermassenstromes der ermittelte Heizwert ansteigt. Eine Veränderung des Sickerwassermassenstromes kann über den sich verändernden Brennstoffmassenstrom des Erdgases identifiziert werden.

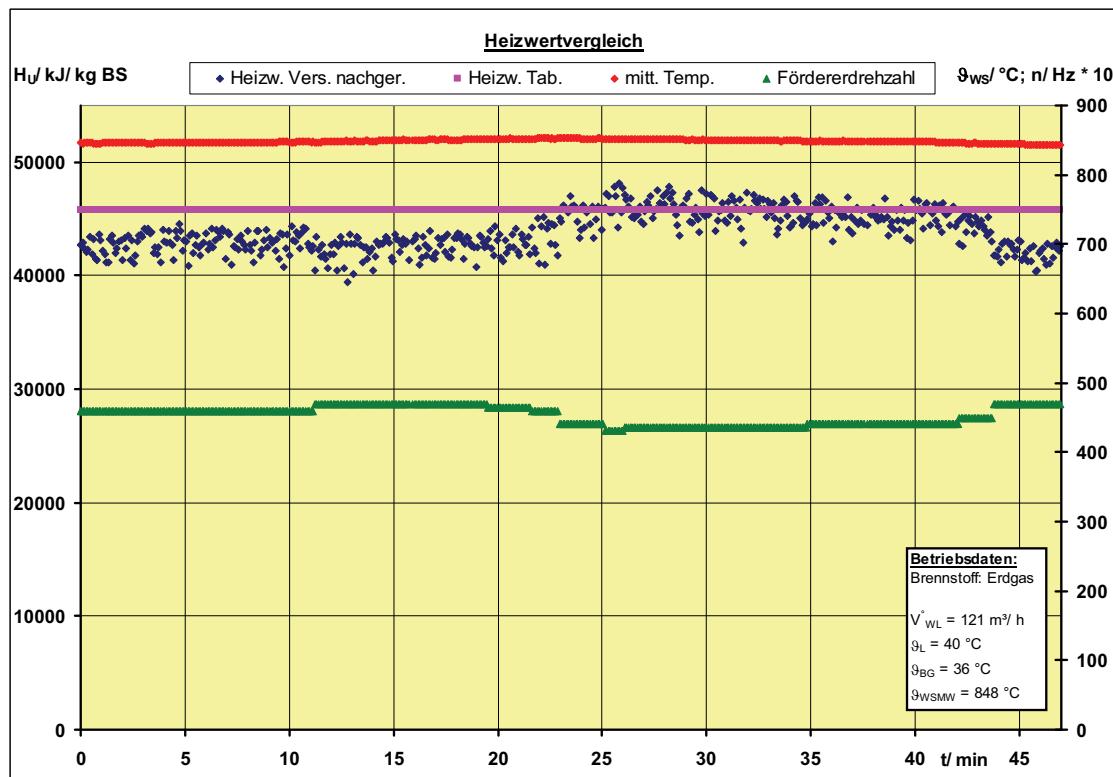


Abbildung 48: 061218 EG1 man

Die SWSF wird im Betriebsmodus Hand betrieben. In dieser Darstellung wird die Warmfahrphase der SWSF dargestellt. Der Heizwert stimmt nicht mit dem tabellierten Heizwert überein, da Leistungen zum Aufladen von Speichern benötigt werden. Am Beginn der Versuchsfahrt steigt die Temperatur der SWSF noch an. Ab $t = 22$ min wird der Brennstoffmassenstrom zur Temperaturreduktion der SWSF zurückgenommen. Entsprechend der Gegenläufigkeit von Brennstoffmassenstrom und bestimmtem Heizwert nimmt der berechnete Heizwert in dieser Phase sofort zu.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): $H_U = 45794 \text{ kJ/kgBS}$

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): $H_U = 43882 \text{ kJ/kgBS}$

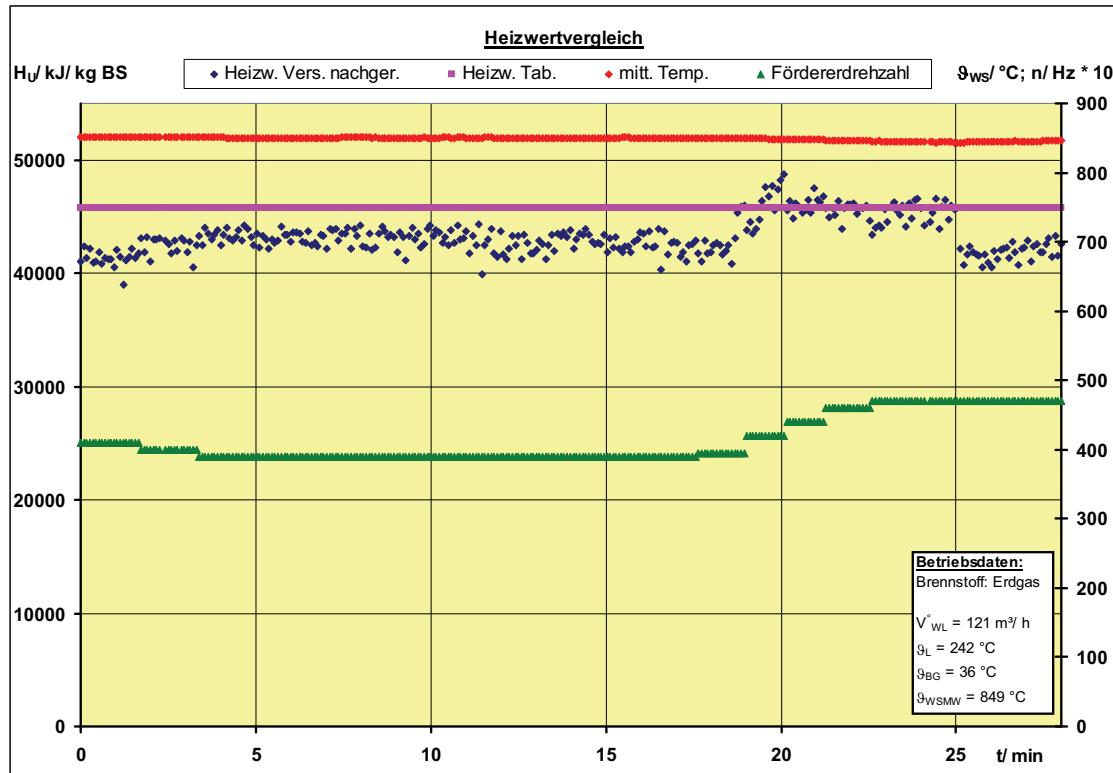


Abbildung 49: 070110 EG1 man

An diesem Versuchstag wird ein anderer Brennstoff untersucht. Der hier gezeigte Verlauf des Erdgasheizwertes wurde während der Anfahrphase aufgezeichnet. Man erkennt mehrere Zusammenhänge:

Die SWSF befindet sich noch nicht im thermischen Gleichgewicht. In der Zeit von $t = 0$ min bis $t = 5$ min wird der Brennstoffmassenstrom reduziert, um die SWSF auf die Solltemperatur einzustellen. Bei $t = 20$ min wird die Luftvorwärmung abgeschaltet. Danach reduziert sich die mit der Wirbelluft eingetragene Energie und der Brennstoffmassenstrom muss zum Halten der Temperatur angehoben werden. Durch die verringerte Lufttemperatur nimmt der normierte Luftvolumenstrom und damit die eingetragene Leistung der Luft zu. Dieses bewirkt, dass trotz des ansteigenden Brennstoffmassenstromes ein erhöhter Heizwert für den Brennstoff errechnet wird. Bei $t = 25$ min wird der Luftvolumenstrom korrigiert und der berechnete Heizwert reduziert sich wieder.

Der Fehler bei der Berechnung des Brennstoffheizwertes kann hier zwei Ursachen haben:

Für die folgenden Untersuchungen wird in die SWSF mit einer gekühlten Lanze ein flüssiges Additiv in den Reaktor eingetragen. Die Kühlung der Lanze entspricht dabei der Auskopplung von Nutzleistung. Diese Leistung wird hier nicht automatisch sondern durch manuelles Messen erfasst, so dass hierdurch ein Fehler in der Bilanzierung eintreten kann. Als weitere Ursache für die Abweichungen der Heizwerte kann ein Aufladen von thermischen Speichern, bei dem hierfür Leistungen benötigt werden, angenommen werden. Es liegt noch kein statio- närer Betriebszustand vor.

Als Kriterien für die Stationarität der Anlage kann bei einem konstanten Brennstoffmassenstrom eine konstante Sauerstoffkonzentration im Abgas und eine konstante Freeboard-Temperatur verwendet werden.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): H_U 45794 kJ/ kgBS

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): H_U 43243 kJ/ kgBS

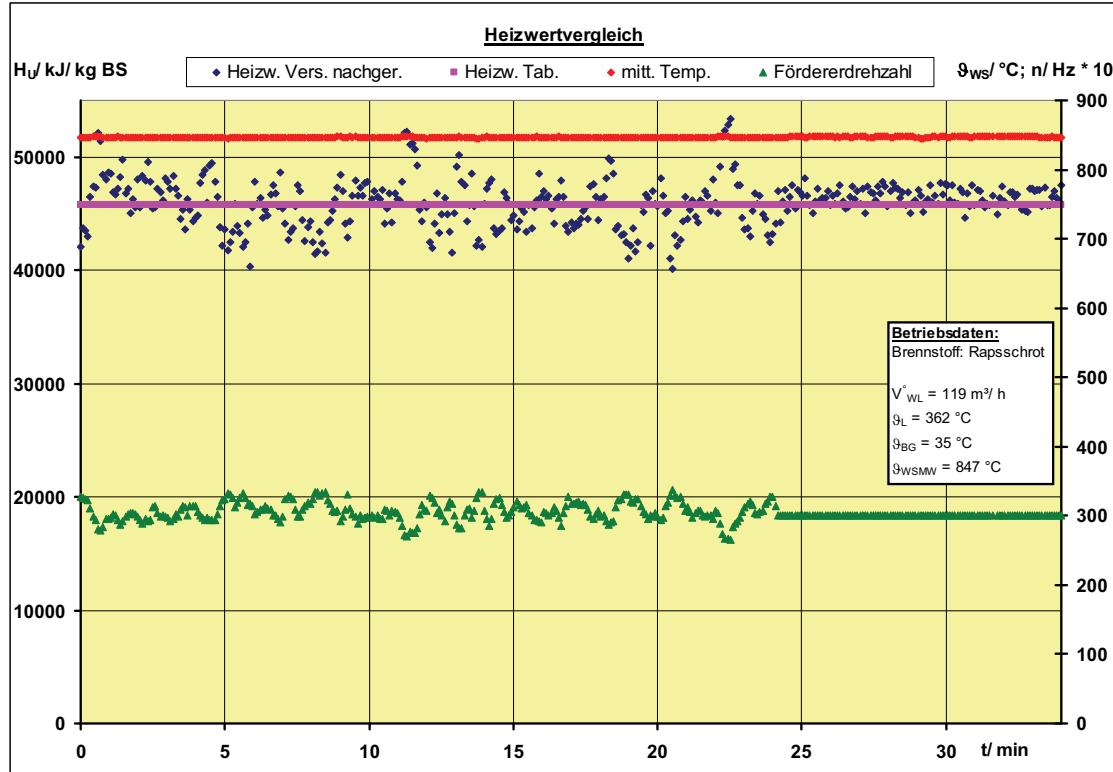


Abbildung 50: 070117 EG1 auto/ man

Ziel dieses Versuches war es, die Funktionsfähigkeit des Reglers nachzuweisen. Zur Regelung wird ein selbst parametrierender Regelbaustein verwendet. Im ersten Teil des Versuches arbeitet dieser Regelbaustein. Das Drehzahlsignal des Brenngasverdichters variiert stark, dementsprechend gibt es Schwankungen in dem berechneten Heizwert. Im Mittel wird der tabellierte Heizwert für Erdgas in diesem Betriebszeitraum gut erreicht. Ab $t = 24 \text{ min}$ wird die SWSF im Betriebsmodus Hand betrieben. Hiermit wird in einem Versuch der direkte Unterschied der beiden Betriebsmodi dargestellt. Weiterhin kann so die Güte des geregelten Betriebs sichtbar gemacht werden. Auch hier wird der tabellierte Heizwert gut erreicht. Man erkennt deutlich, dass der Wert nicht mehr solchen Schwankungen unterworfen ist, wie im Betriebsmodus Automatik.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): $H_U = 45794 \text{ kJ/kg BS}$

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): $H_U = 46086 \text{ kJ/kg BS}$

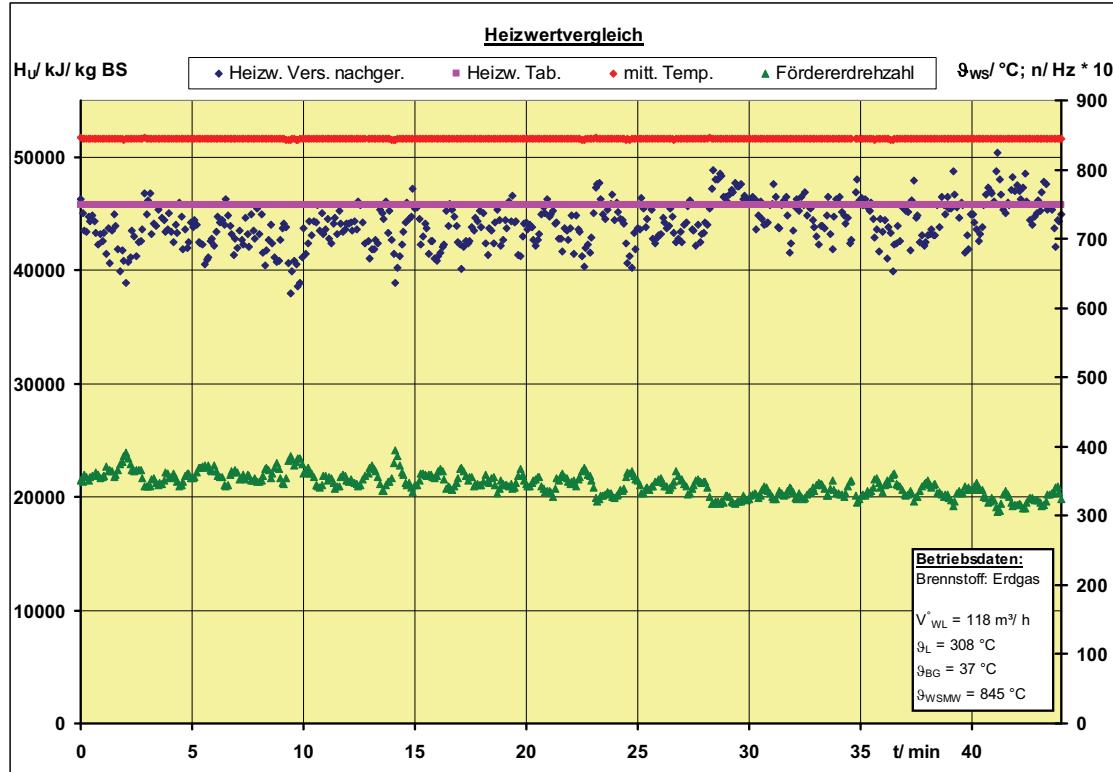


Abbildung 51: 070124 EG1 auto

Im Zuge dieses Versuchstages wurde der Regler erneut überprüft. Hierzu wurde die SWSF in verschiedenen Betriebspunkten mit den ermittelten Reglerparametern betrieben. Man erkennt, dass der tabellierte Heizwert erreicht wird. Dabei unterliegt der berechnete Heizwert Schwankungen entsprechend den Änderungen der Verdichterdrehzahl. Weiterhin erkennt man die Effekte des Beladens der thermischen Speicher: Über den Versuch verringert sich der Brennstoffmassenstrom (bis $t = 30 \text{ min}$). Entsprechend der Verringerung des Brennstoffmassenstromes erhöht sich der berechnete Brennstoffheizwert. Er schwankt am Ende der Messfahrt um den Tabellenwert.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): $H_U = 45794 \text{ kJ/kg BS}$

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): $H_U = 44114 \text{ kJ/kg BS}$

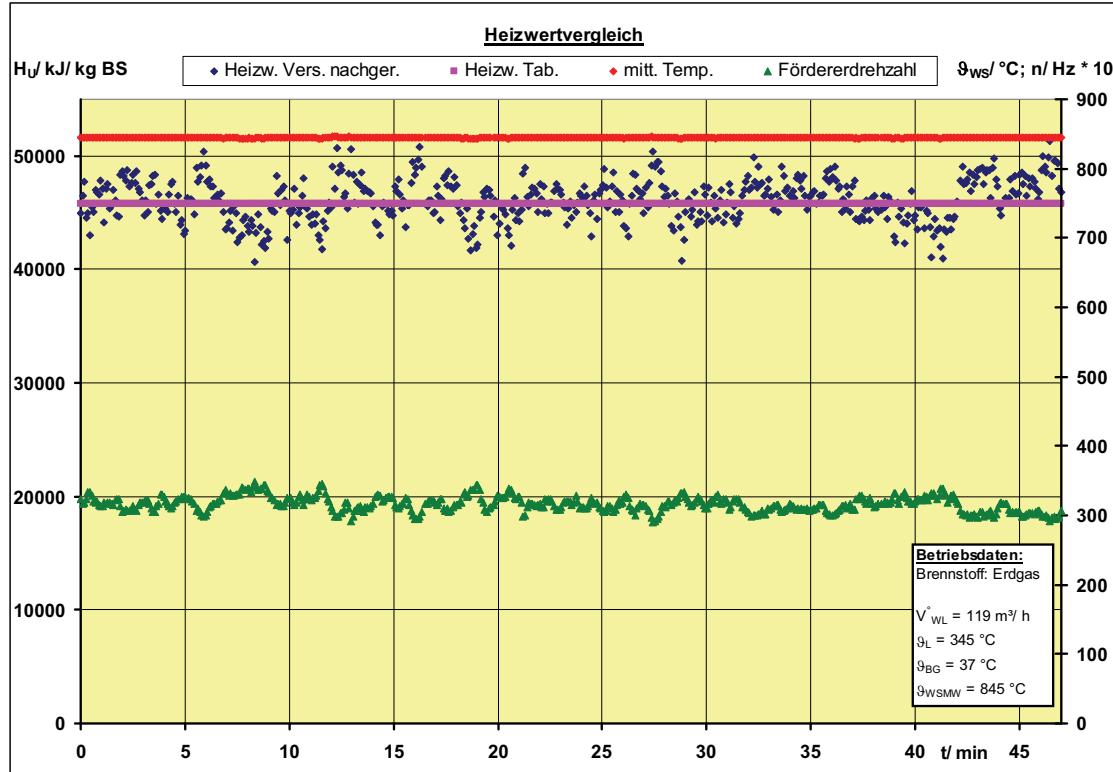


Abbildung 52: 070124 EG2 auto

Die SWSF wir im Betriebsmodus Automatik mit den ermittelten Reglerparametern betrieben. Dabei wird der tabellierte Heizwert gut erreicht. Besonders im Bereich von $t = 42 \text{ min}$ erkennt man erneut das gegenläufige Verhalten des berechneten Heizwertes und des Drehzahlsignals (Brennstoffmassenstrom).

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): $H_U = 45794 \text{ kJ/kgBS}$

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): $H_U = 46127 \text{ kJ/kgBS}$

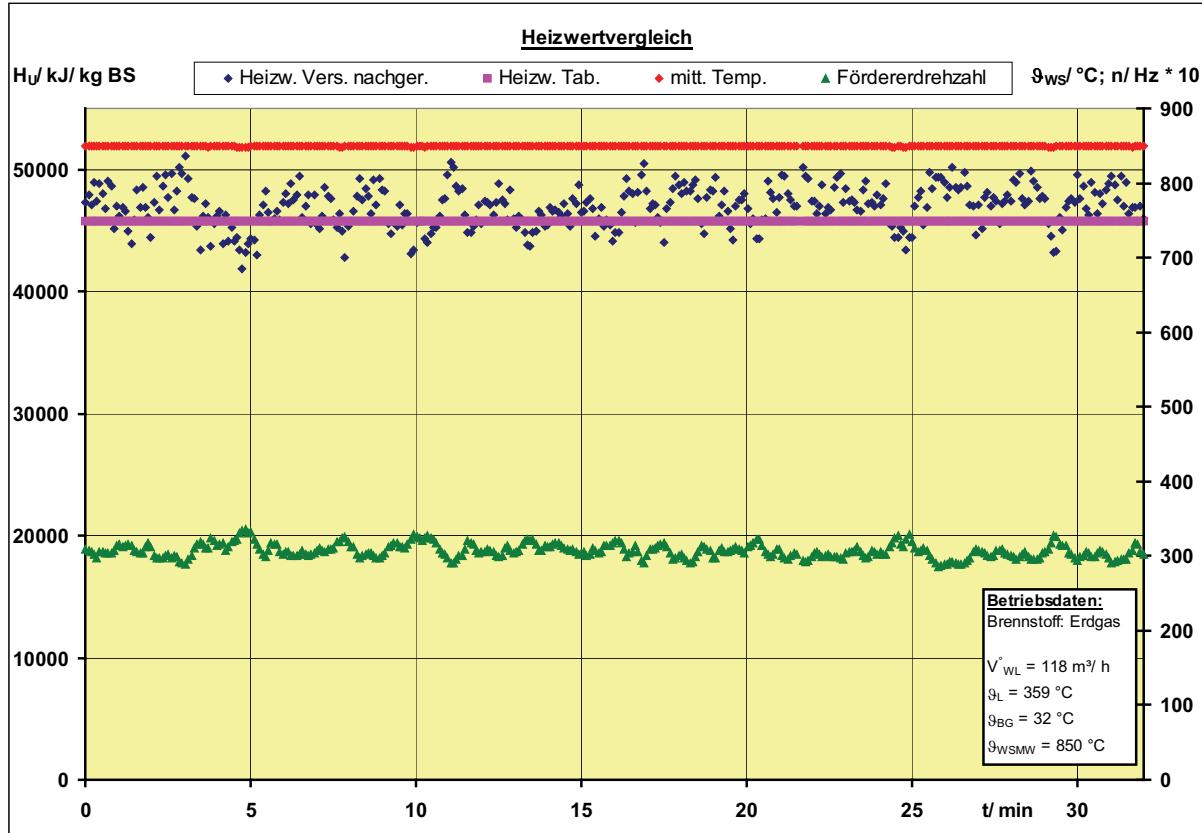


Abbildung 53: 070124 EG3 auto

Für diesen Versuch wird die Solltemperatur auf $g_{WS} = 850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ erhöht. Der Betrieb erfolgt mit den in den vorherigen Versuchen ermittelten Reglerparametern im Betriebsmodus Automatik. Bedingt durch das schwankenden Stellsignal des Reglers entsteht eine Punktwolke von berechneten Heizwerten. Die berechneten Heizwerte liegen dabei leicht oberhalb des tabellierten Heizwertes für Erdgas.

Bei allen Versuchen mit dem Regler (Abbildung 52, Abbildung 53) fällt auf, dass die Änderung der Stellgröße in großen Sprüngen erfolgt. Um den Betrieb der SWSF zu verbessern und einen gleichmäßigeren Verlauf des berechneten Heizwertes zu erhalten, sollte der Regler mit einer Dämpfung beaufschlagt werden.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): $H_U = 45794 \text{ kJ/kgBS}$

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): $H_U = 47216 \text{ kJ/kgBS}$

Rapsschrot

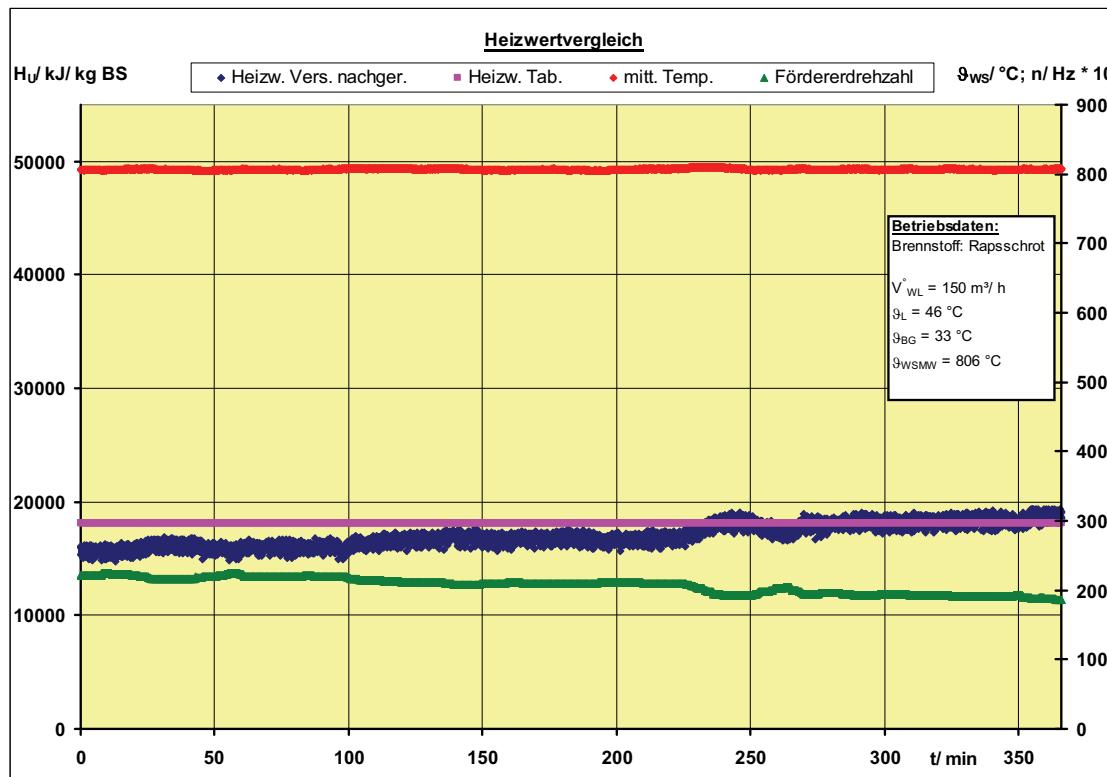


Abbildung 54: 061024 RS1 man

Der Brennstoff der folgenden Versuche ist Rapsschrot. Die SWSF wird im Betriebsmodus Hand betrieben. Es zeigt sich, dass die SWSF erst ab $t > 280$ min in einem stabilen Betriebszustand ist. Erst ab diesem Zeitpunkt verringert sich der Brennstoffmassenstrom nicht mehr und die Solltemperatur wird mit einem konstanten Massenstrom erreicht. Dabei schwankt der berechnete Heizwert des Brennstoffes ab diesem Zeitpunkt um den Tabellenwert. Die Schwankungen fallen deutlicher aus als beim automatischen Betrieb, da hier nur das stochastische Verhalten der Verbrennung und die Fluidisation der Wirbelschicht und nicht die Schwankungen im Brennstoffmassenstrom abgebildet werden. Die Abweichung des Heizwertes von dem tabellierten Wert liegt an der Mittelung über den gesamten Versuchszeitraum.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): $H_U = 18086 \text{ kJ/kg BS}$

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): $H_U = 15940 \text{ kJ/kg BS}$

Bei einer Heizwertberechnung ohne die Anfahrphase (ab $t = 250$ min) ergibt sich ein berechneter Heizwert von $H_U = 18095 \text{ kJ/kg BS}$. Dieser Wert ist praktisch der tabellierte Heizwert.

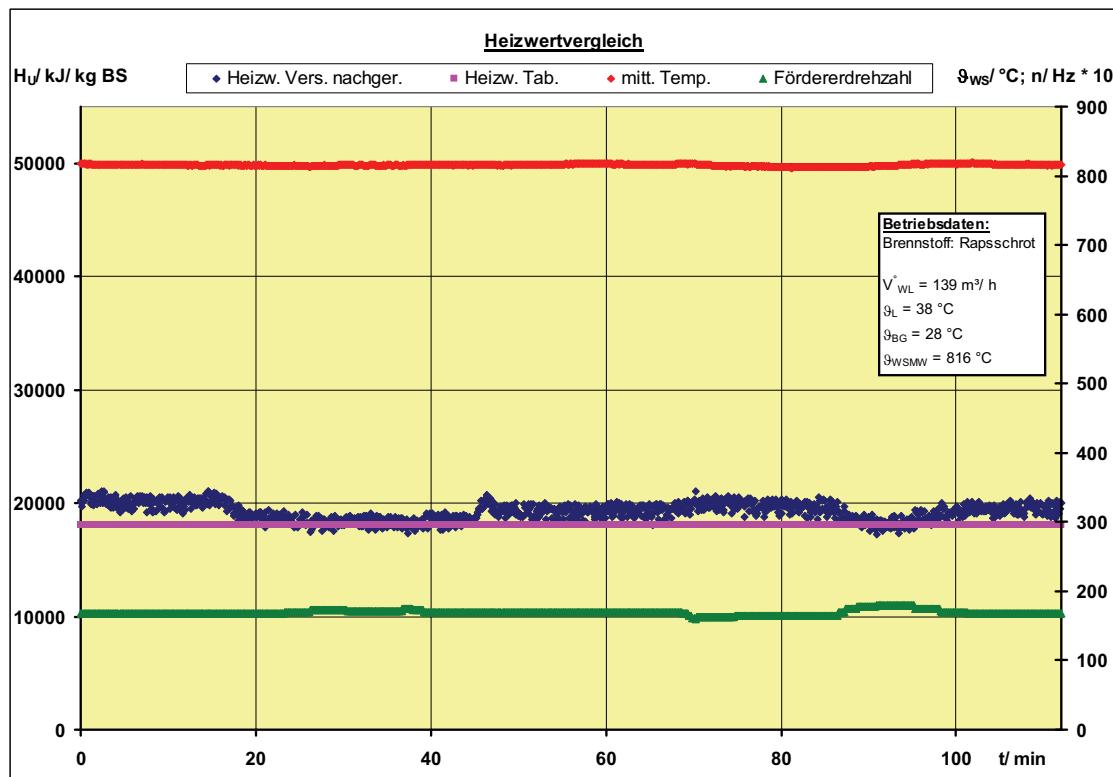


Abbildung 55: 061130 RS1 man

Die SWSF wird im Betriebsmodus Hand betrieben. Dabei wird der tabellierte Heizwert des Rapsschrots gut erreicht. Man erkennt deutlich das gegenläufige Verhalten von Brennstoffmassenstrom und dem tabellierten Heizwert. Die geringe Streuung des berechneten Heizwertes liegt an dem gewählten Betriebsmodus. Hier werden zu den betrieblichen Schwankungen des berechneten Heizwertes nicht zusätzlich die Schwankungen aus der Stellgröße des Reglers überlagert.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert):

H_U 18086 kJ/kgBS

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): H_U 19323 kJ/kgBS

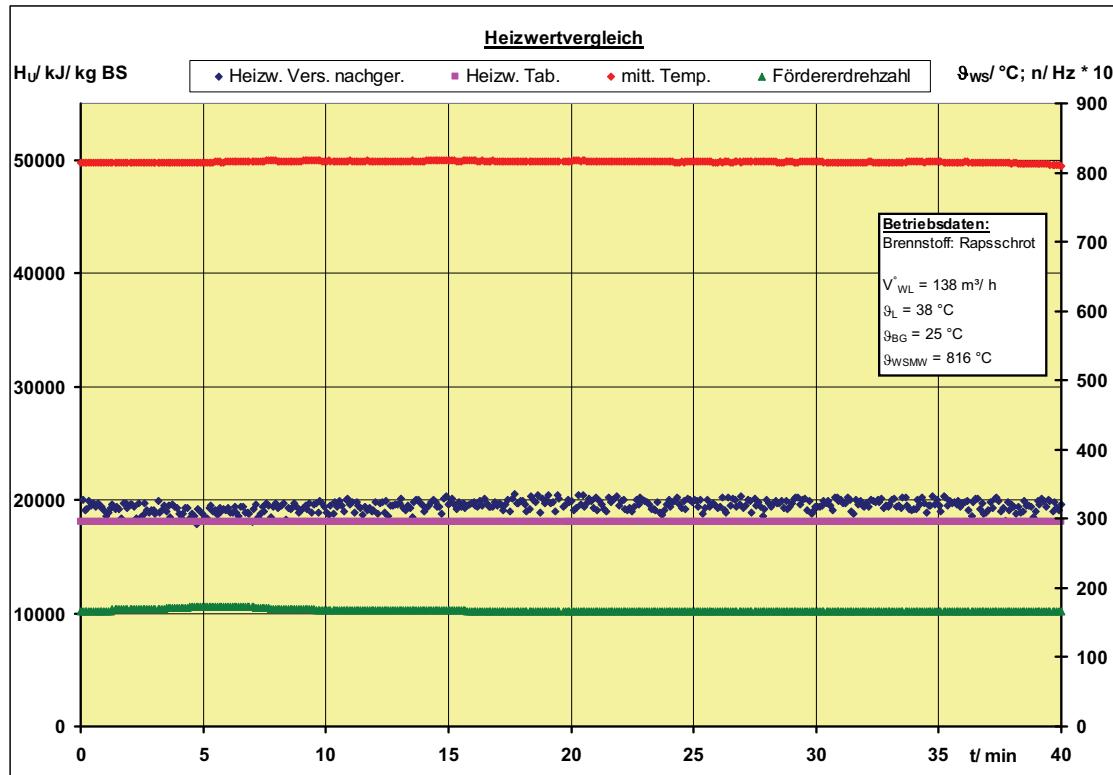


Abbildung 56: 061130 RS2 man

Die SWSF befindet sich im Gleichgewicht, sie wird manuell gefahren. Der tabellierte Heizwert des Rapsschrots wird gut erreicht. Durch den Betriebsmodus Hand und die damit verbundenen geringen Änderungen in der Drehzahl des Brennstoffförderers schwankt der bestimmte Heizwert nur gering.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): $H_U = 18086 \text{ kJ/kg BS}$

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): $H_U = 19483 \text{ kJ/kg BS}$

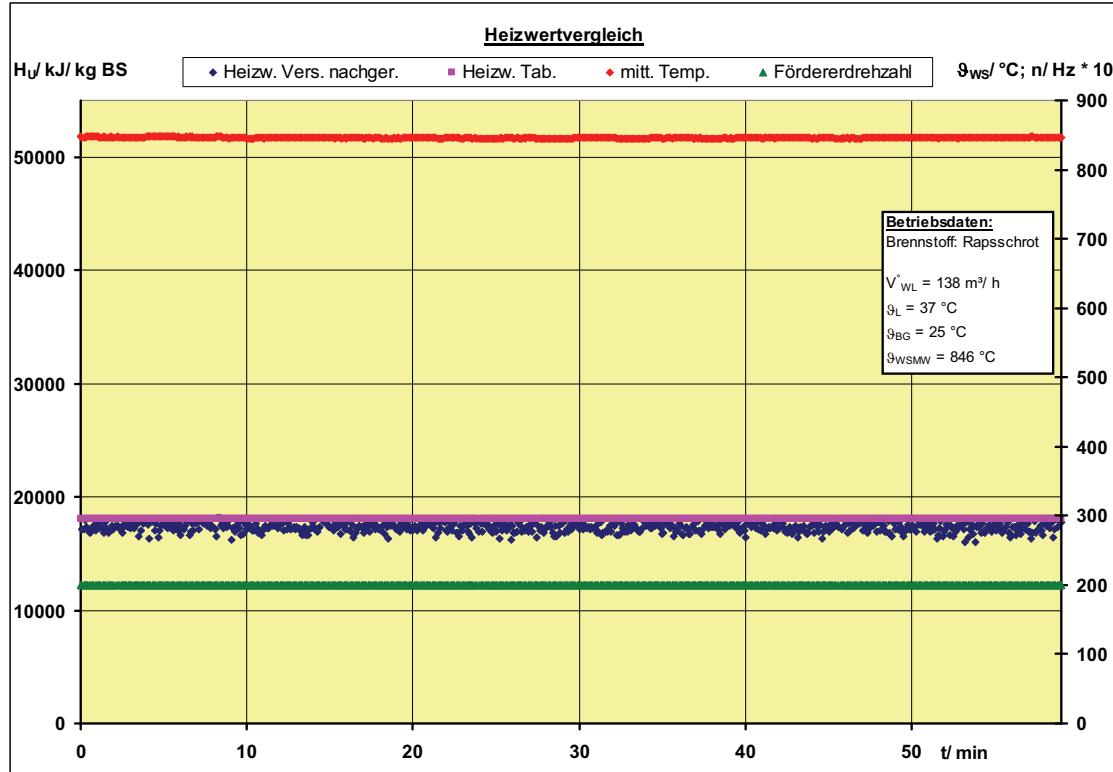


Abbildung 57: 061218 RS1 man

Die SWSF wird im Betriebsmodus Hand betrieben. Der tabellierte Heizwert des Rapsschrot wird sehr gut erreicht. Der berechnete Heizwert schwankt wegen des Betriebsmodus nur gering. Der Brennstoffmassenstrom ist über die Versuchsdauer konstant.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): H_U 18086 kJ/kgBS

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): H_U 17301 kJ/kgBS

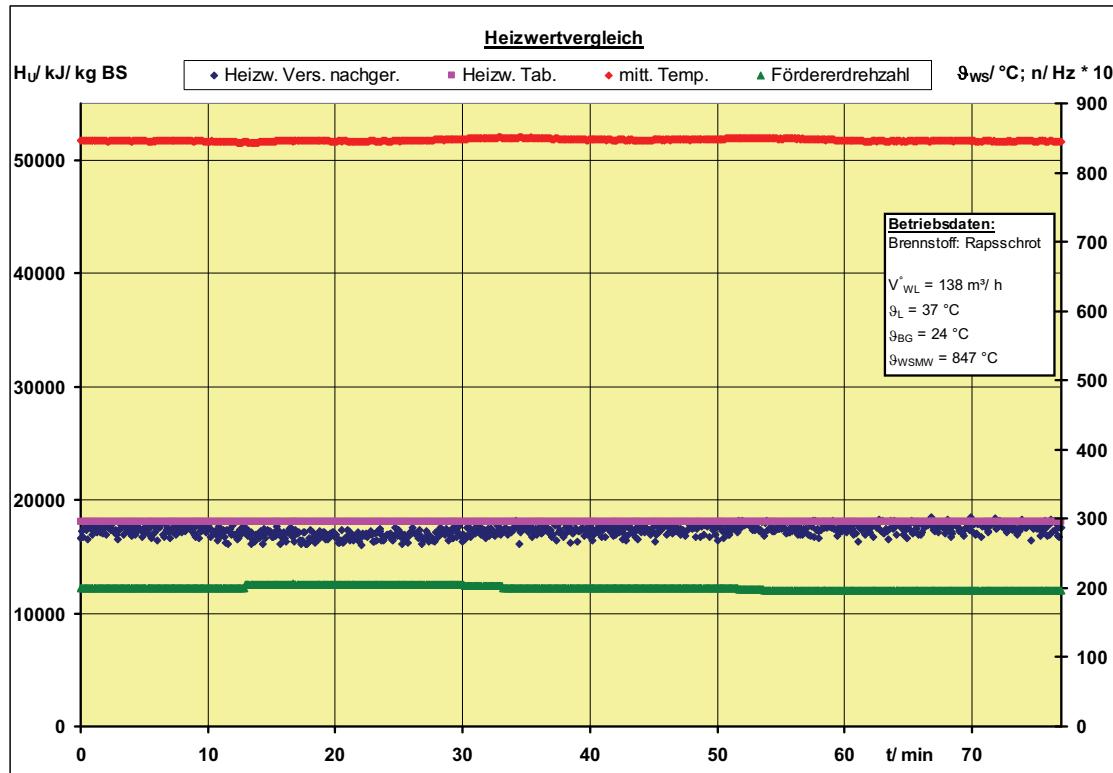


Abbildung 58: 061218 RS2 man

Die SWSF wird im Betriebsmodus Hand betrieben. Der tabellierte Heizwert des Rapsschrot wird sehr gut erreicht. Im Bereich von $t = 10 \dots 20$ min erkennt man erneut die Gegenläufigkeit von Brennstoffmassenstrom und berechnetem Heizwert. Ab $t = 56$ min ist eine Einstellung gefunden worden, bei der mit einem konstanten Brennstoffmassenstrom die SWSF-Temperatur gehalten wurde. In diesem Zeitraum schwankt der berechnete Heizwert um den Tabellenwert.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): $H_U = 18086 \text{ kJ/kg BS}$

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): $H_U = 17294 \text{ kJ/kg BS}$

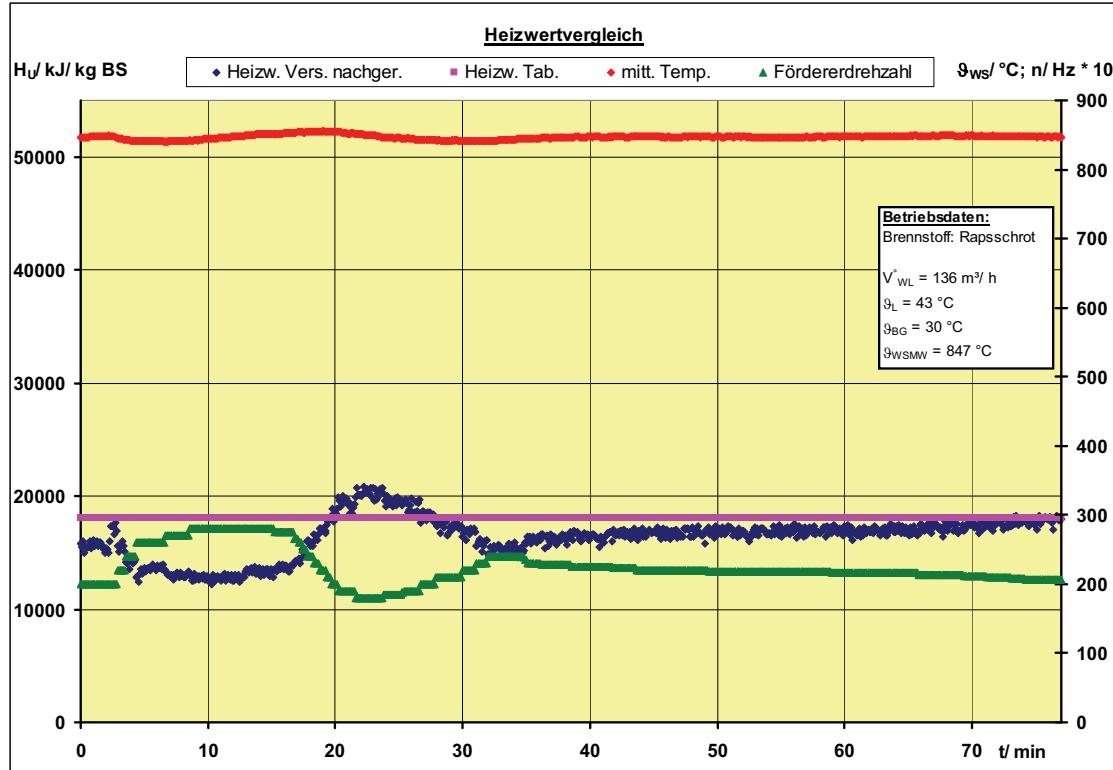


Abbildung 59: 070110 RS1 man

Das Ziel der Versuche dieses Tages war ein Verfahren der Abgasnachbehandlung zu erproben. Dazu wurde Wasser in den Reaktor eingedüst. Alle Versuche wurden im Betriebsmodus Hand gefahren. In diesem ersten Bild befindet sich die Anlage noch in der Warmfahr-Phase. Man erkennt wieder deutlich das gegenläufige Verhalten von Brennstoffmassenstrom und berechnetem Heizwert. Die Anlage befindet sich am Beginn des Versuches noch nicht im thermischen Gleichgewicht. Über die Versuchsdauer wird der Brennstoffmassenstrom noch weiter reduziert. Zum Ende des Versuches geht die Anlage in den stationären Zustand. Der Heizwert des Brennstoffes wird dann sehr gut wiedergegeben. Die Abweichung des angegebenen berechneten Heizwertes ergibt sich aus der Mittelung des Heizwertes über die gesamte Versuchsdauer.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): H_U 18086 kJ/kgBS

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): H_U 16424 kJ/kgBS

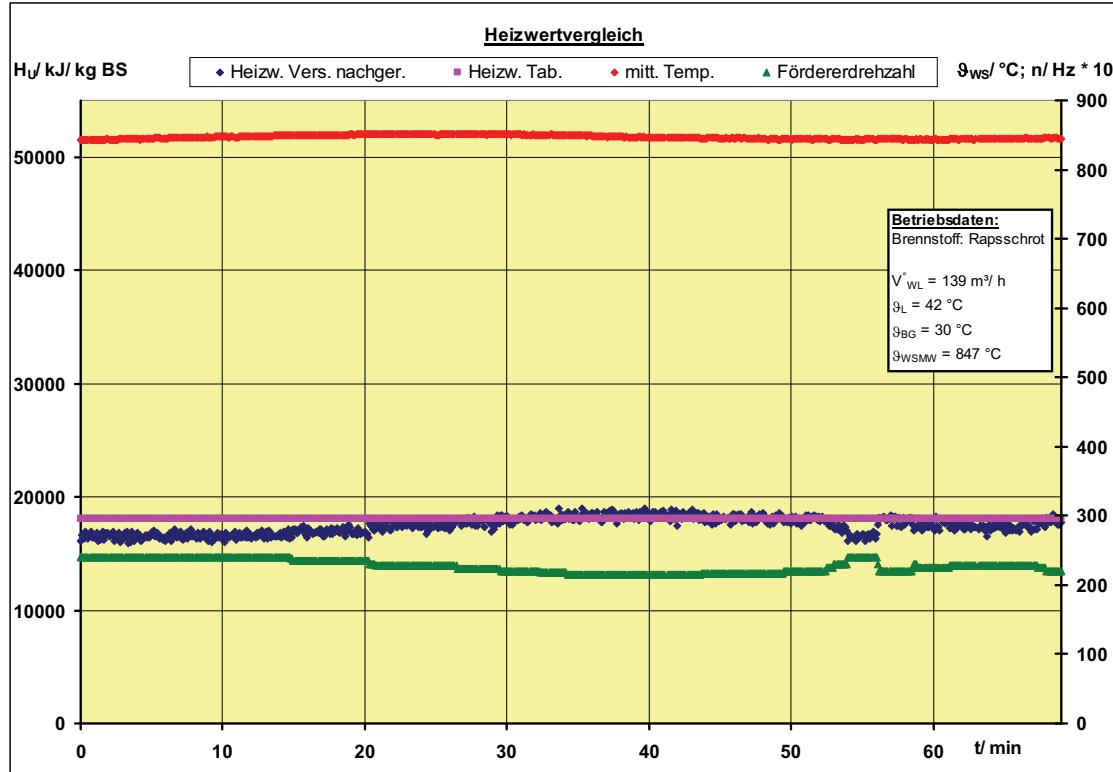


Abbildung 60: 070110 RS1 Harnstoff man

In diesem Versuch wird Harnstoff in den Reaktor eingedüst. Für die Erwärmung, Verdampfung und Überhitzung des Wassers im Harnstoff wird mehr Energie benötigt als für den Betriebszustand im vorherigen Bild. Dementsprechend muss ein erhöhter Brennstoffmassenstrom in das System eingetragen werden, was sich an der erhöhten Frequenz des Brennstoffförderers erkennen lässt. Nachdem ein stationärer Betriebszustand erreicht ist, wird der tabellisierte Heizwert des Brennstoffes sehr gut ermittelt. Durch den Betriebsmodus Hand unterliegen die Momentanwerte nur geringen Schwankungen.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert):

H_U 18086 kJ/kgBS

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): H_U 17486 kJ/kgBS

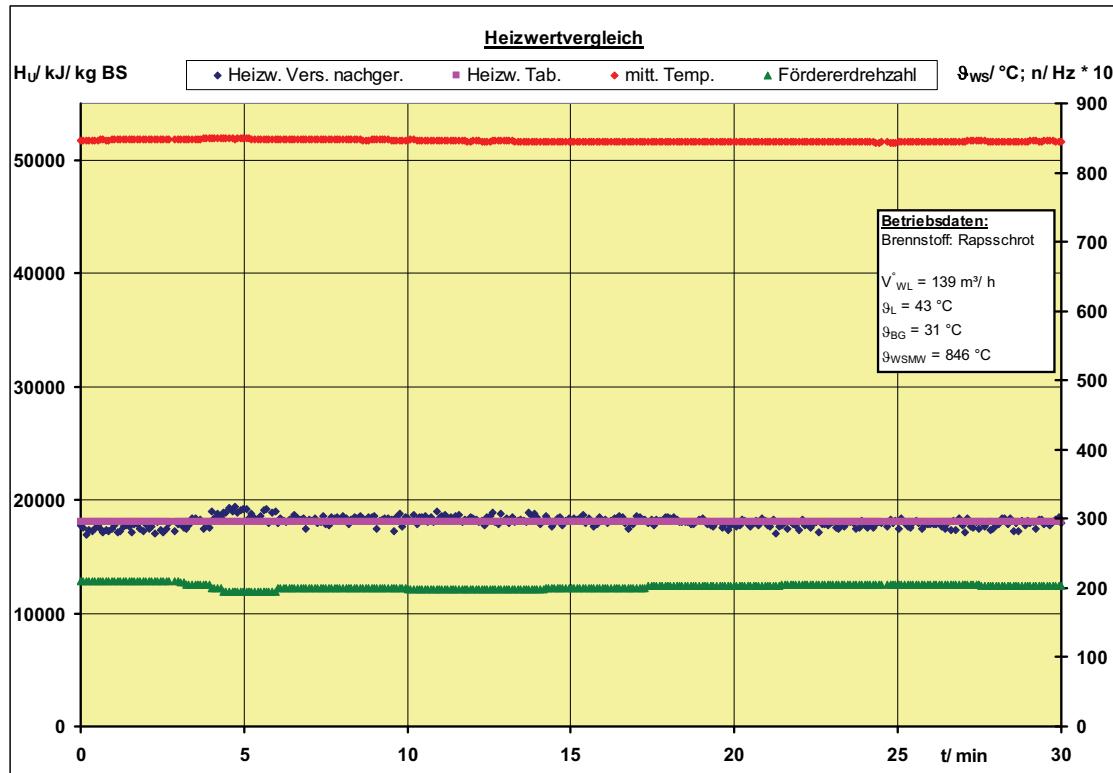


Abbildung 61: 070110 RS2 man

Nach dem ersten Versuchslauf zur Schadstoffreduktion wurde mit Rapsschrot ein kompletter Rückversuch durchgeführt. Hierfür wurde die SWSF erneut an dem Betriebspunkt ohne Additivzugabe betrieben. Dabei reduziert sich der Brennstoffmassenstrom wieder, da kein Additiv eingebracht und erwärmt werden muss. In dem Versuch wird der tabellierte Heizwert des Rapsschrots sehr gut erreicht. Die geringen Schwankungen des berechneten Heizwertes liegen an dem verwendeten Betriebsmodus Hand. Im Zuge des Versuches wird der Heizwert sehr gut berechnet.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert):

$H_U = 18086 \text{ kJ/kg BS}$

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): $H_U = 18043 \text{ kJ/kg BS}$

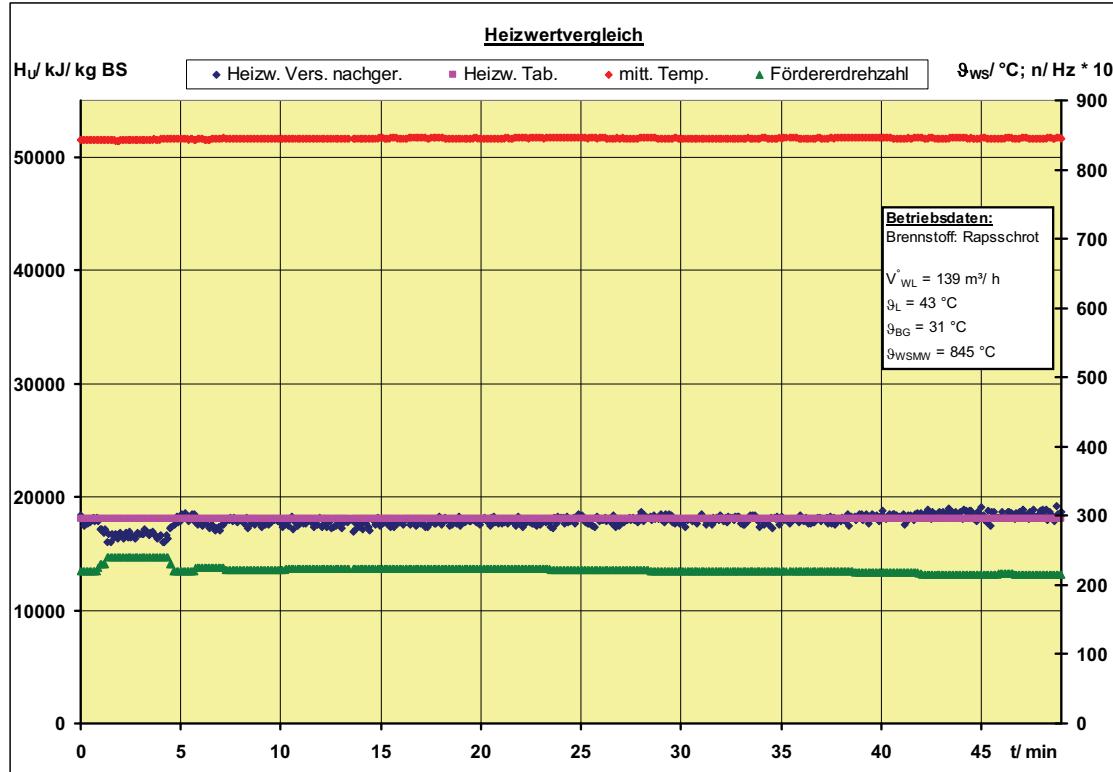


Abbildung 62: 070110 RS2 Harnstoff man

Dieser Versuch ist der Rückversuch mit Rapsschrot zur Abgasentgiftung im thermischen Gleichgewicht der Anlage. Dabei wird der Heizwert des Brennstoffes trotz veränderlicher Drehzahl des Förderers sehr gut ermittelt. Im Vergleich zu dem vorherigen Versuch wird die SWSF erneut mit einem erhöhten Brennstoffmassenstrom betrieben. Die zusätzliche Energie wird zur Erwärmung des eingedüsten Additivs benötigt.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): H_U 18086 kJ/kgBS

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): H_U 17882 kJ/kgBS

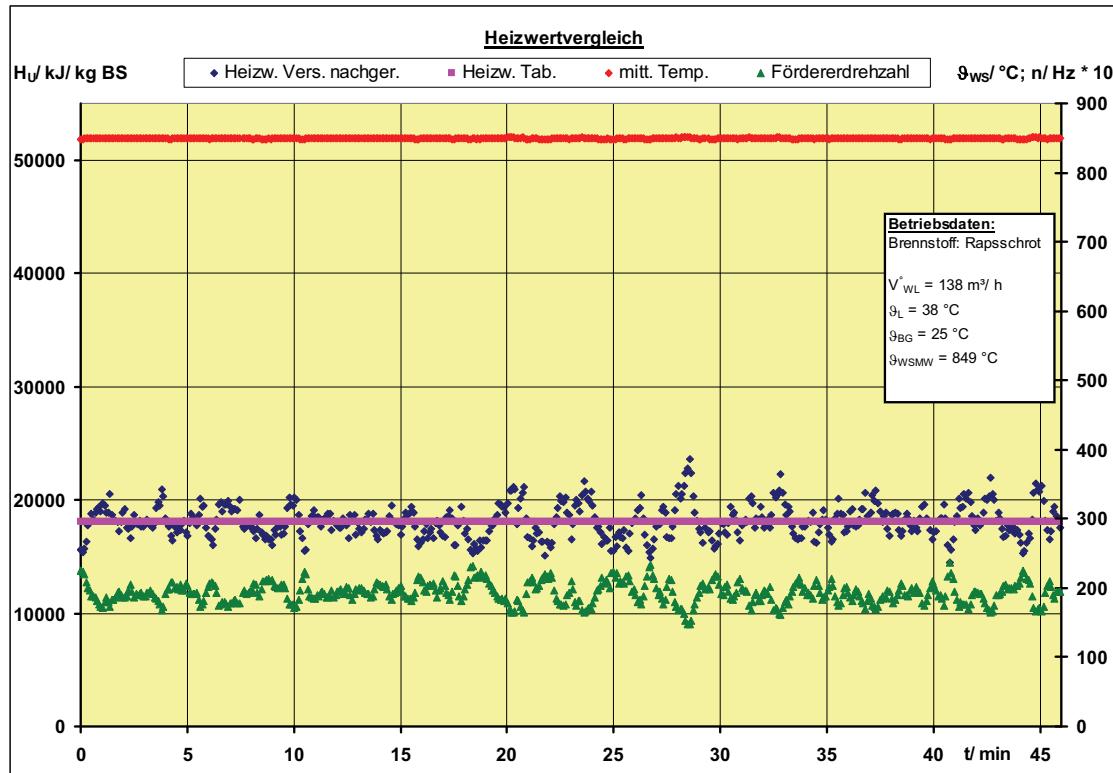


Abbildung 63: 070201 RS1 auto

Im Zuge dieses Versuchstages wird die Funktion des selbstparametrierenden Reglers mit dem Brennstoff Rapsschrot überprüft. Ziel des Versuches ist die Funktionsüberprüfung des Regelbausteins und eine erneute Überprüfung der Brennstoffidentifikation. Der Versuch wird im Betriebsmodus Automatik gefahren. Man erkennt, dass der tabellierte Heizwert des Brennstoffes im Mittel gut ermittelt wird. Die Momentanwerte des Heizwertes weisen deutliche Schwankungen auf. Die Schwankungen ergeben sich aus der Schwankung des Stellsignals des Brennstoffförderers. Diese ergeben sich aus der Reaktion des Regelbausteins. Für den Regelbaustein wird die Temperatur der SWSF als Sollgröße vorgegeben. Der Baustein versucht diese Temperatur unter allen Betriebsbedingungen zu halten. Um einen gleichmäßigeren Betrieb zu erhalten, wäre es notwendig, den Regelbaustein mit einer Dämpfung zu belegen, damit die Änderungen der Stellgröße Brennstoffmassenstrom nicht so groß ausfallen. Mit der Dämpfung erreicht man dann einen gleichmäßigeren Betrieb der SWSF. Im Zuge des Versuches wird der Heizwert des Brennstoffes sehr genau bestimmt.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): H_U 18086 kJ/kgBS

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): H_U 18109 kJ/kgBS

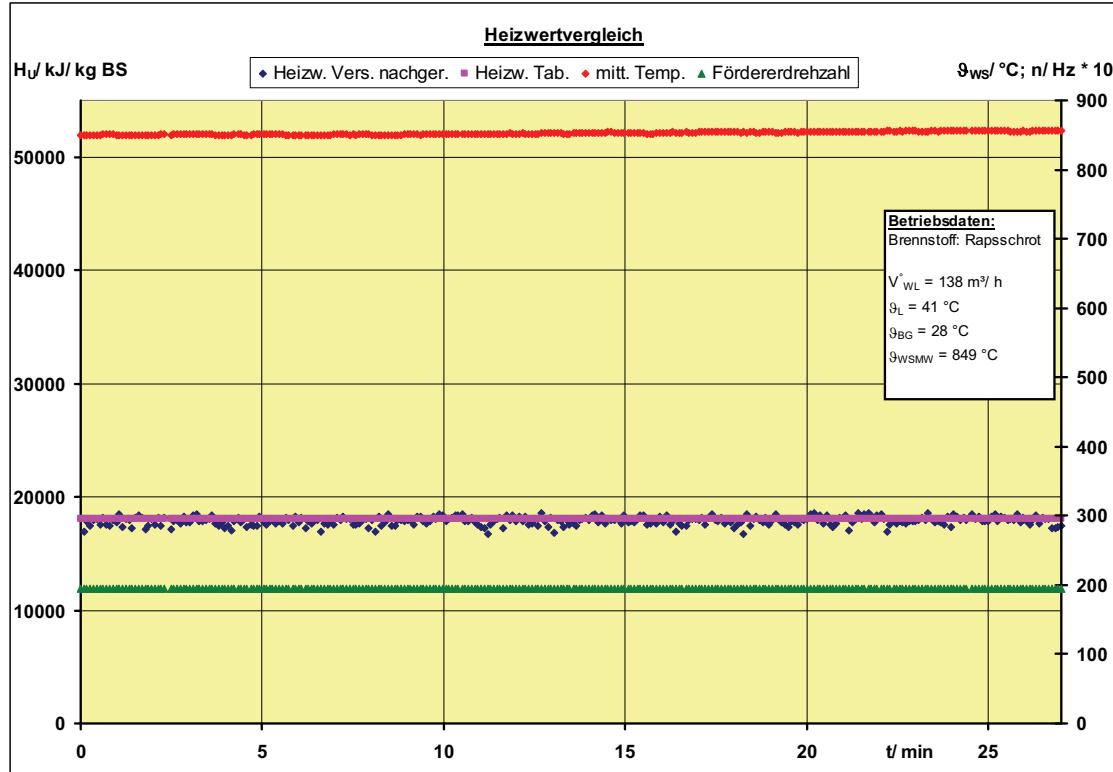


Abbildung 64: 070201 RS2 man

Zum Einordnen des geregelten Betriebes mit dem Brennstoff Rapsschrot wird ein Gegenversuch ohne den Regler gefahren. Dabei wird ein fester Brennstoffmassenstrom eingestellt. Man erkennt die deutlich geringere Schwankung der Momentanwerte des Brennstoffheizwertes, die nur noch aus der Verbrennung und der Fluidisation der SWSF entstehen. In dem Versuch wird der Heizwert des Rapsschrotes genau ermittelt. Der berechnete Wert schwankt um den tabellierten Heizwert.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): H_U 18086 kJ/kgBS

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): H_U 17866 kJ/kgBS

Petrolkoks

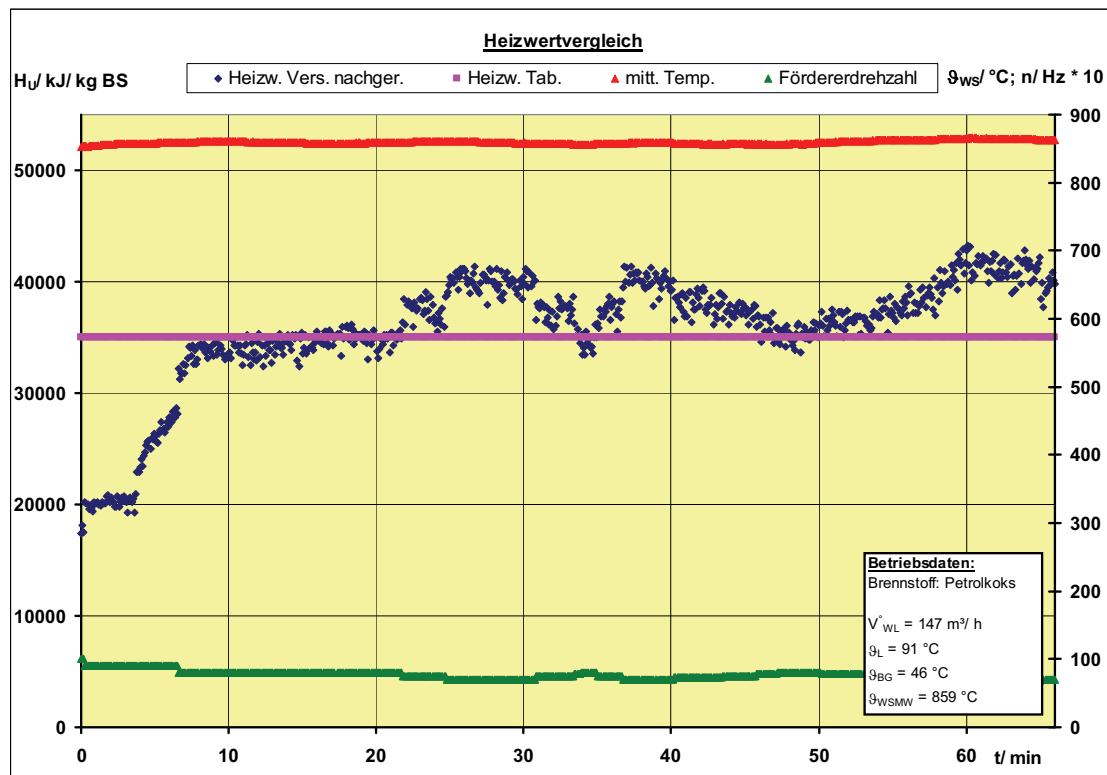


Abbildung 65: 060912 PK1 man

Zur Untersuchung der Verwendbarkeit von Petrolkoks in einer SWSF wurde eine Versuchsreihe gefahren. Dabei wurde der Petrolkoks stets im Betriebsmodus Hand in die SWSF einge tragen. Man erkennt, dass sich die SWSF nicht in einem stationären Betriebszustand befindet. Während des Versuches wird der Brennstoffmassenstrom reduziert. Bei der Auswertung fällt auf, dass der ermittelte Heizwert des Brennstoffes sich deutlich von dem tabellierten Heizwert unterscheidet.

Man erkennt erneut die Gegenläufigkeit von berechnetem Heizwert und tabelliertem Heizwert.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): H_U 34960 kJ/kgBS

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): H_U 35845 kJ/kgBS

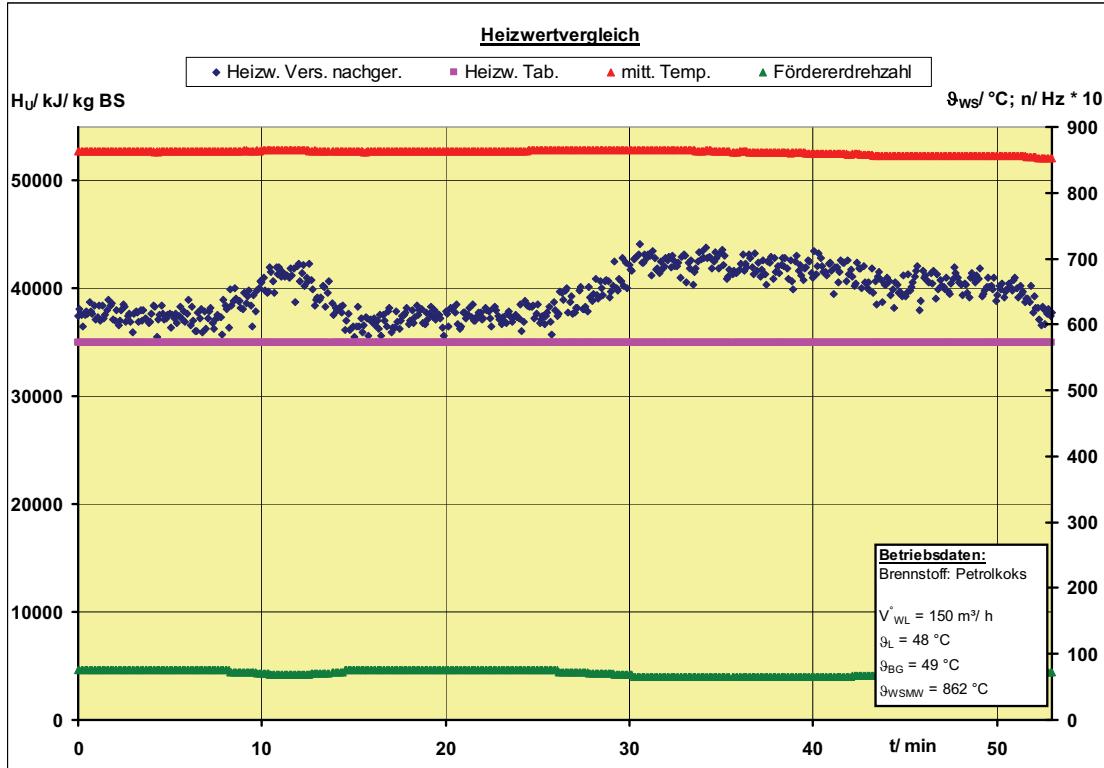


Abbildung 66: 060912 PK2 man

Im Zuge des Versuches wird kein echter stationärer Betrieb erreicht. Die Wirbelschichttemperatur unterliegt Schwankungen. In der Darstellung des berechneten Heizwertes erkennt man erneut die Gegenläufigkeit des Brennstoffmassenstromes und des berechneten Heizwertes. Der im Versuch bestimmte Heizwert weicht erneut deutlich von dem tabellierten Heizwert ab.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): H_U 34960 kJ/ kgBS

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): H_U 39460 kJ/ kgBS

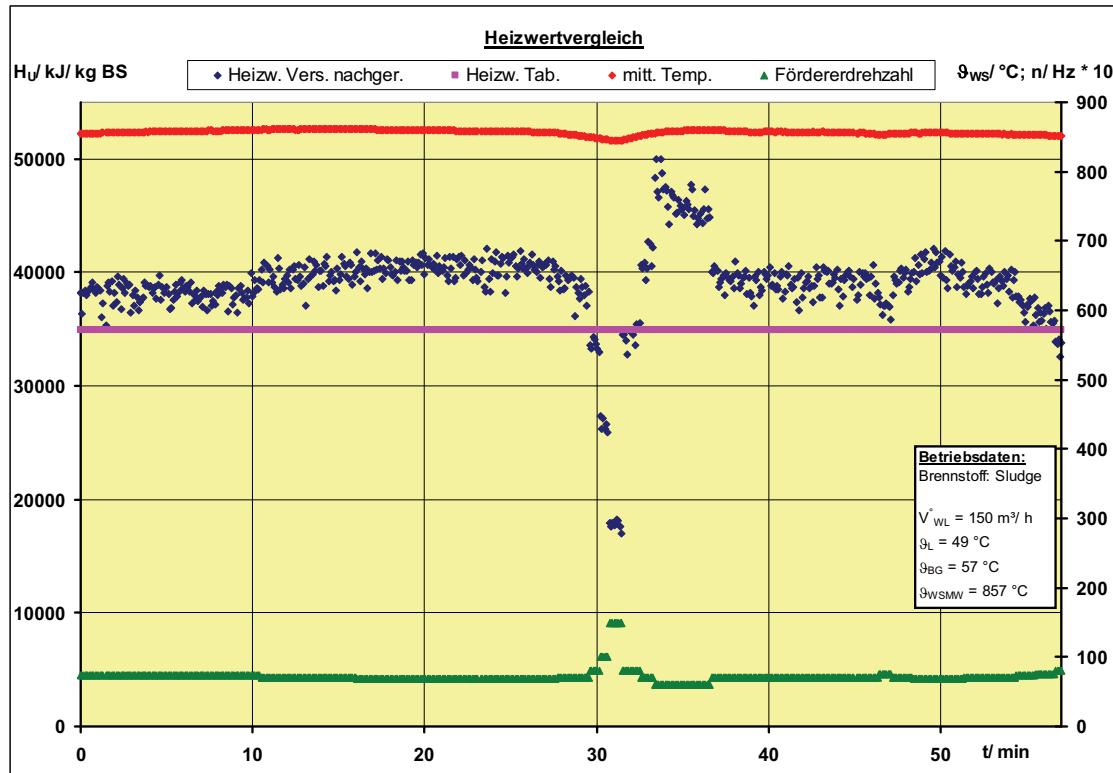


Abbildung 67: 061209 PK3 man

Die SWSF befindet sich in einem stationären Zustand. In den Zeitintervallen von $t = 10 \dots 28 \text{ min}$ und $t = 38 \dots 52 \text{ min}$ wird der Brennstoff mit einem konstanten Massenstrom in die Anlage eingetragen. Dabei wird ein Heizwert ermittelt, der über dem tabellierten Heizwert liegt. Er liegt in demselben Bereich wie in den vorherigen Versuchsabschnitten.

Die Ursache dieser Abweichungen liegt mit großer Sicherheit nicht am Verfahren, sondern in einer nicht repräsentativen Probenahme, die bei Brennstoff-Anlieferung erfolgte. Durch die im Sommer 2006 vorherrschenden heißen Umgebungstemperaturen und daraus folgend auch in der Versuchshalle kann ein Nachtrocknen des Petrolkokses angenommen werden.

Der Heizwerteinbruch bei $t = 30 \text{ min}$ ist auf Unregelmäßigkeiten in der Brennstoffförderung zurückzuführen. Ab diesem Zeitpunkt war keine kontinuierliche Brennstoffförderung mehr möglich!

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): $H_U = 34960 \text{ kJ/kg BS}$

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): $H_U = 39022 \text{ kJ/kg BS}$

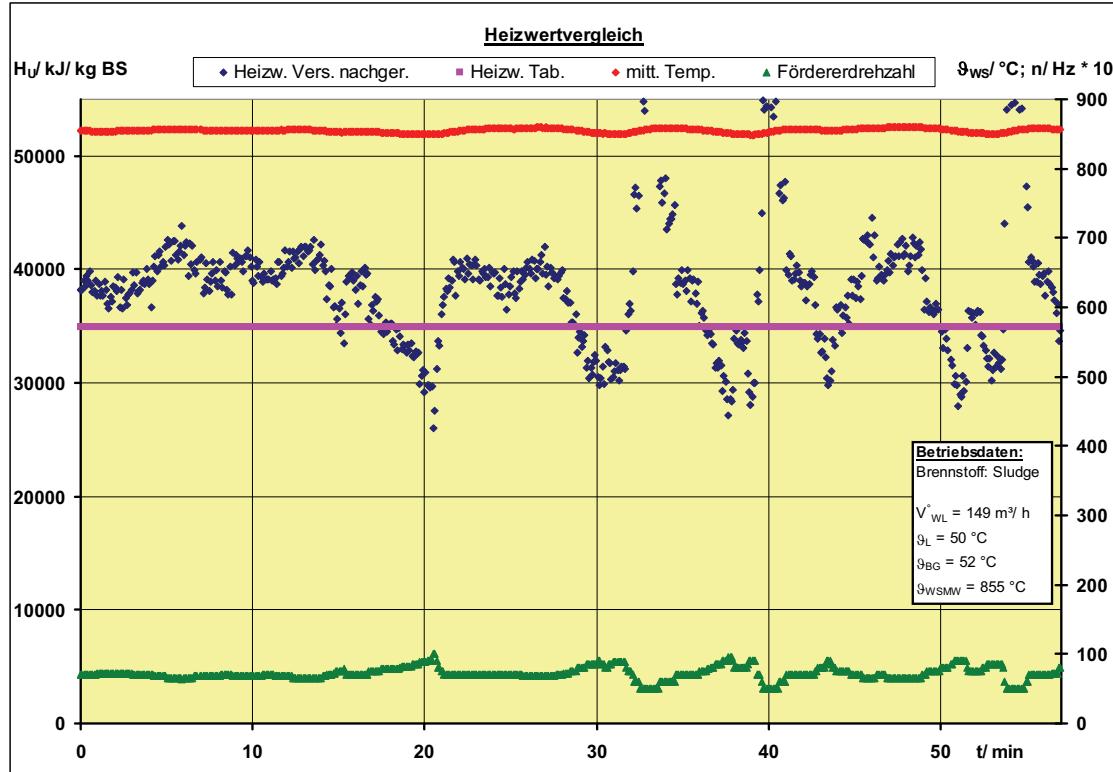


Abbildung 68: 060912 PK4 man

Im Verlaufe des Versuches zeichnete sich ab, dass keine kontinuierliche Brennstoffförderung mehr möglich ist. Die Temperatur der SWSF kann nur durch schnelles Korrigieren des Brennstoffmassenstromes gehalten werden. Mit den Sprüngen im Massenstrom erhöht sich auch die Schwankung der Momentanwerte des Heizwertes deutlich. Die Auswertung ergibt einen berechneten Heizwert, der erneut deutlich oberhalb des tabellierten Heizwertes liegt.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): H_U 34960 kJ/kgBS

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): H_U 38597 kJ/kgBS

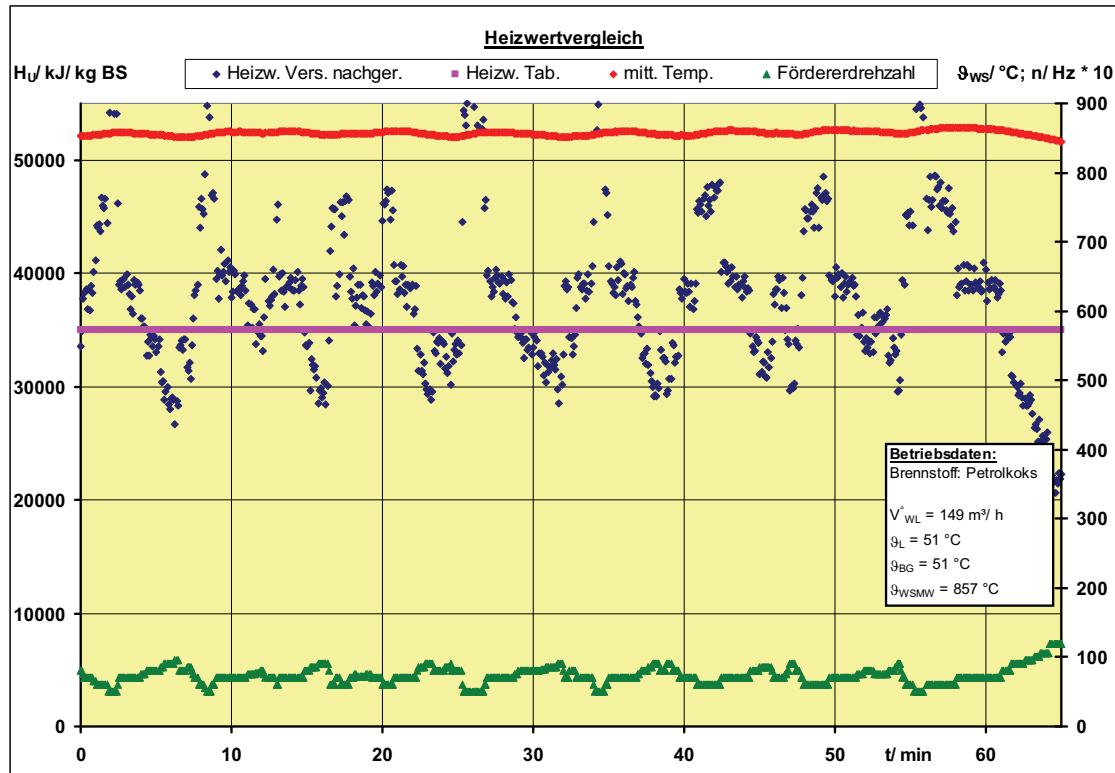


Abbildung 69: 060912 PK5 man

In diesem Versuch setzt sich die Entwicklung des vorherigen Versuches fort. Der Brennstoff wird diskontinuierlich in die SWSF gefördert. Die Momentanwerte des Heizwertes weisen starke Schwankungen auf. Der mittlere Heizwert liegt deutlich oberhalb des tabellierten Wertes.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): $H_U = 34960 \text{ kJ/kg BS}$

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): $H_U = 38038 \text{ kJ/kg BS}$

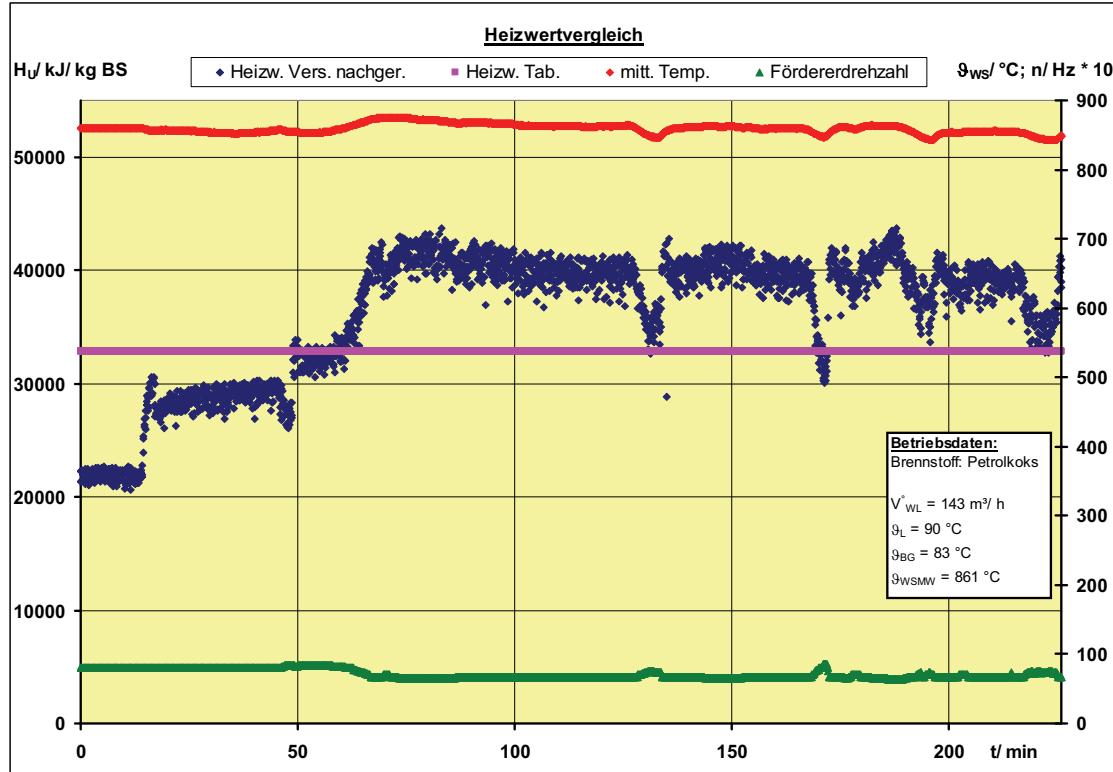


Abbildung 70: 060926 PK1 man

Die Versuchsauswertung zeigt, dass sich die SWSF in einem stationären Zustand befindet. Nach dem Erreichen des Zustandes ($t > 70 \text{ min}$) wird ein Heizwert berechnet, der deutlich oberhalb des tabellierten Wertes liegt. Der mittlere Wert liegt in demselben Bereich wie am vorherigen Versuchstag. Die Einbrüche in der SWSF-Temperatur und der dazugehörige Anstieg des Brennstoffmassenstromes lassen auf Probleme bei der Förderung des Brennstoffes in die SWSF schließen. Entsprechend dem bereits bekannten gegenläufigen Verhalten von Brennstoffmassenstrom und berechnetem Heizwert, verringert sich der berechnete Heizwert in diesen Phasen.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): $H_U = 34960 \text{ kJ/kgBS}$

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): $H_U = 31267 \text{ kJ/kgBS}$

Reduziert man den ausgewerteten Bereich um die Anfahrzeitraum ($t > 70 \text{ min}$) so erhält man einen berechneten Heizwert von $H_U = 39416 \text{ kJ/kgBS}$.

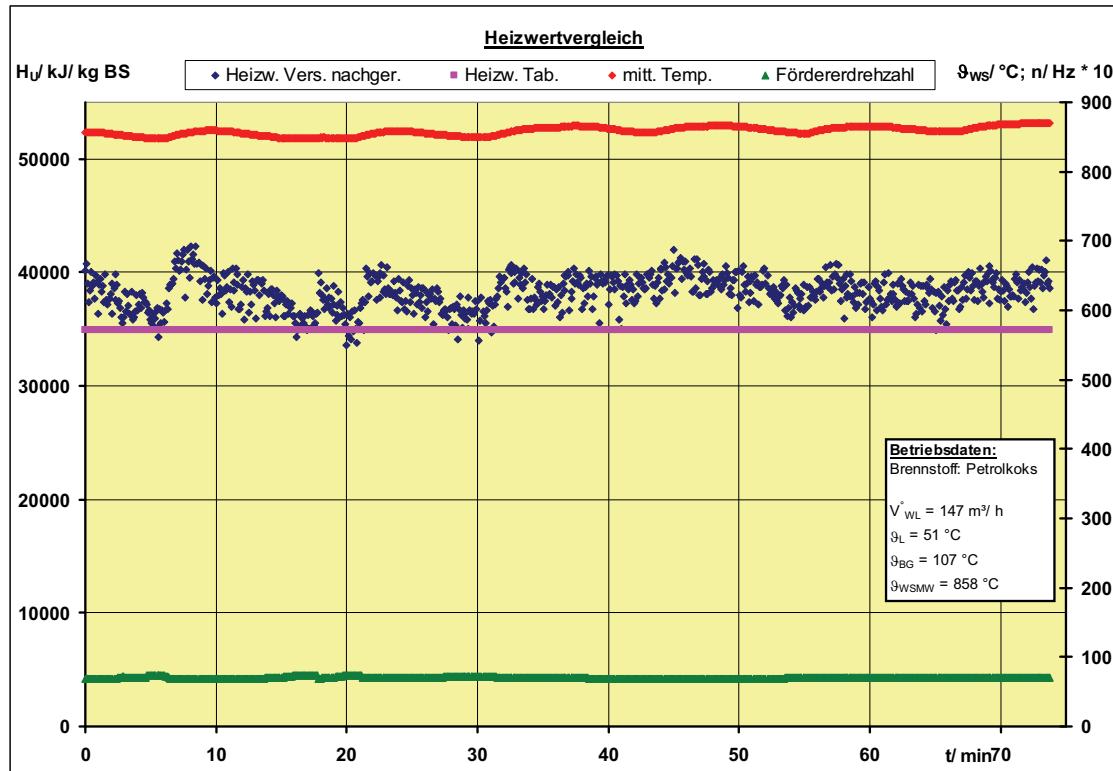


Abbildung 71: 060926 PK2 man

In diesem Versuch wird derselbe Heizwert ermittelt wie in den vorherigen Versuchen. Es zeigt sich die Gegenläufigkeit von Brennstoffmassenstrom und dem berechneten Heizwert. Für diesen Versuch wird die SWSF mit einem festen Brennstoffmassenstrom betrieben. Es ergibt sich ein berechneter Heizwert mit geringen Schwankungen. Dafür wird bei dieser Betriebsweise eine Schwankung der SWSF-Temperatur zugelassen.

Kalorimetrisch ermittelter Heizwert (Tabellenwert): H_U 34960 kJ/kgBS

Durch Online-Auswertung ermittelter Heizwert (experimentell): H_U 38224 kJ/kgBS

Die Untersuchung des Brennstoffes Petrolkoks liefert bei allen durchgeführten Versuchen einen über dem tabellierten Heizwert liegenden berechneten Heizwert. Die möglichen Gründe wurden bereits in den Versuchsauswertungen diskutiert und sollen hier lediglich noch einmal zusammengefasst werden:

Die Bedingung, dass der gesamte Brennstoffumsatz in der Wirbelschicht erfolgen soll, wird nicht erfüllt. In den Ascheproben der Petrolkoksversuche finden sich unverbrannte Brennstoffreste.

Keine repräsentative Probennahme des stark inhomogenen Brennstoffes Petrolkoks und damit keine belastbare Bestimmung des Brennstoffheizwertes.

Offene Brennstoffvorhaltung im warmen Technikum unmittelbar vor dem Versuch und damit verbunden die Trocknung des Brennstoffes.

Bewertung aller drei ausgewerteten Brennstoffe:

Für die Brennstoffe Erdgas und Rapsschrot wird mit der entwickelten Methode zur Brennstoffidentifikation der tabellierte Heizwert mit ausreichender Genauigkeit für die gestellte Aufgabe erreicht. Mit einer Abweichung von < 10 % bei der Heizwertermittlung können Schalthandlungen für den Anlagenbetrieb eingeleitet werden.

Für den Brennstoff Petrolkoks werden einheitliche, aber von dem Tabellenwert abweichende Heizwerte ermittelt. Die Ursache ist hier in der Beprobung und der Lagerung des Brennstoffes zu suchen und nicht in dem vorgestellten Verfahren.

Selbständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die eingereichte Dissertationsschrift „Online-Identifikation von Brennstoffen und ihren kalorischen Eigenschaften beim Betrieb einer stationären Wirbelschichtfeuerungsanlage“ selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche gekennzeichnet habe.

Norderstedt, den 08.07.2007

Florian Lange

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Florian Paul Gerhard Lange
Geburtsdatum: 22. März 1972
Geburtsort: Hamburg



Schulbildung

1978 - 1982 Grundschule Harksheide Nord in Norderstedt
1982 - 1992 Lessing Gymnasium in Norderstedt, Erwerb der allgemeinen Hochschulreife

Studienvorbereitende Praktika

1992 - 1993 Technisches Praktikum bei Fa. Lange in Norderstedt
1993 Pflegepraktikum im Allgemeinen Krankenhaus Ochsenzoll, Hamburg

Berufsausbildung und erste Berufserfahrung

1993 - 1996 Ausbildung zum Elektromaschinenbauer bei Fa. Lange in Norderstedt
1996 Beschäftigung als Elektromaschinenbauer bei Fa. Lange in Norderstedt

Studium

1996 – 2002	Studium des Maschinenbaus an der Universität Rostock, Fachrichtung: Energiemaschinen, Energieanlagen Abschluss: Diplom-Ingenieur Maschinenbau, Thema der Diplomarbeit: „Automatisierung einer stationären Wirbelschichtfeuerungsanlage“
1998 – 1999	Arbeit als Hilfsassistent/ studentische Hilfskraft am Lehrstuhl für technische Thermodynamik der Universität Rostock, Erstellen von elektronischem Lehrmaterial
1999 – 2000	Ingenieur-Praktikum beim Germanischen Lloyd in Hamburg, Arbeiten im Bereich der Zeichnungsgenehmigung

Berufliche Tätigkeiten

2002 – 2007	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umwelttechnik der Universität Rostock, dabei: Untersuchung von Fernwärmenetzen und Wärmebedarfser- mittlung von Gebäuden, Erarbeiten von Lösungsvorschlägen bei der Anpassung von Fernwärmenetzen und Wärmenut- zern Automatisierung und Überwachung von Feuerungsprozes- sen, wissenschaftliche Begleitung von Feuerungsprototypen
-------------	--

Aktivitäten

Mitarbeit im Technischen Hilfswerk (THW):

seit 1986 – heute	Gründungsmitglied der Jugendgruppe des Ortsverbandes Norderstedt Helfer im 1. Technischen Zug Norderstedt, dabei u.a. Mitwirkung bei der Ausbildung von Helfern
-------------------	--

Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertationsschrift „Online-Identifikation von Brennstoffen und ihren kalorischen Eigenschaften beim Betrieb einer stationären Wirbelschichtfeuerungsanlage“ beschreibt die theoretische Herleitung und die praktische Überprüfung eines Verfahrens zur Brennstoffidentifikation während des Betriebes einer Wirbelschichtfeuerung.

Für die Ermittlung der Bearbeitungsaufgabe wird zunächst der Stand der Technik dargestellt. Dabei zeigt sich, dass mit der stationären Wirbelschichtfeuerung kleiner Leistung ein Feuerungssystem zur Verfügung steht, das sich besonders zur dezentralen Nutzung eines breiten Brennstoffbandes eignet. In einer solchen Feuerung können die Reaktionsbedingungen an eine Vielzahl von verschiedenen Brennstoffen angepasst werden (Verbrennungstemperatur, Reaktionsdruck, Verweildauer). Damit ergibt sich ein System, das sich besonders für die umweltverträgliche energetische Verwendung von Abfällen und Reststoffen eignet.

Zur Nutzung dieses Vorteils muss das Betriebsprogramm einer solchen Anlage soweit ertüchtigt werden, dass es wechselnde Brennstoffe selbstständig erkennt und die Reaktions- und Betriebsführung an den aktuellen Brennstoff anpasst. Für eine solche Brennstofferkennung existieren bereits verschiedene Ansätze. Diese Ansätze reichen von der Bilanzierung einer Gesamtanlage, dem Vergleich der Feuerungsabgase mit entsprechenden Abgasen von Musterbrennstoffen bis zu der Verwendung von Näherungsformeln zur Berechnung des Heizwertes des Brennstoffes. Alle Ansätze wurden für die Verwendung an Müllverbrennungsanlagen entwickelt. Sie sind nur schwierig auf andere Brennstoffe übertragbar.

Hieraus ergibt sich die zu lösende Bearbeitungsaufgabe: Es soll ein Verfahren zur Identifikation eines Brennstoffes hergeleitet werden. Exemplarisch wird für die Verfahrensentwicklung eine stationäre Wirbelschichtfeuerung verwendet. Für die Identifikation sollen bestehende brennstoffbeschreibende Kennzahlen herangezogen werden. Aus der Brennstoffidentifikation können dann Schalthandlungen für den Betrieb der Wirbelschichtfeuerung abgeleitet werden.

In der theoretischen Herleitung des Verfahrens zeigt sich, dass eine Brennstoffidentifikation durch die beiden Kenngrößen Heizwert und maximales CO_2 erfolgen kann. Beide Kenngrö-

ßen können am laufenden Prozess ermittelt werden. Wenn diese beiden Größen bekannt sind, kann jeder Brennstoff eindeutig in eine Brennstoffmatrix eingeordnet werden. Das Berechnungsverfahren wird durch Simulationsrechnungen mit Brennstoffen, deren Zusammensetzung bekannt ist, überprüft. Die dabei gewonnenen Ergebnisse bestätigen die theoretischen Überlegungen und rechtfertigen eine praktische Untersuchung des Verfahrens. Diese Untersuchungen erfolgen an der stationären Wirbelschicht des Lehrstuhls für Umwelttechnik der Universität Rostock.

Für die dazu notwendigen Experimente werden die Brennstoffe Erdgas, Rapsschrot, Petrolkoks, Oliventrester und Klärschlamm verwendet. Dabei liefern die Versuche mit den Brennstoffen Erdgas und Rapsschrot sehr gute Ergebnisse. Für die untersuchten Brennstoffe werden die Tabellenwerte für den Heizwert und den CO_{2max} -Wert mit geringen Abweichungen erreicht. Die Brennstoffe lassen sich erfolgreich in die entwickelte Brennstoffmatrix einordnen.

Als Gesamtergebnis der Arbeit steht ein Verfahren zur Verfügung, mit dem über die im Betrieb ermittelten Brennstoffkennwerte Heizwert und CO_{2max} ein Brennstoff identifiziert und in eine Brennstoffmatrix eingeordnet werden kann. Aus dieser Einordnung lassen sich Schalthandlungen für die automatisierte Betriebsführung ableiten.

Aus der Arbeit ergeben sich verschiedene Ansatzpunkte für weiterführende Betrachtungen. Die beiden Wichtigsten sind die Anwendung und Anpassung des Verfahrens an instationäre Betriebszustände. Mit einer solchen Anpassung kann der gesamte Betriebszyklus einer Feuerung überwacht und bewertet werden. Weiterhin sollte die Übertragbarkeit des Verfahrens auf andere Feuerungssysteme und die motorische Verbrennung untersucht werden.