

Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung	1
2.	Einleitung	3
3.	Problemstellung und Zielsetzung	7
3.1	Problemstellung	7
3.2	Zielsetzungen	9
3.3	Methodik der Arbeit.....	10
4.	Literaturübersicht und Grundlagen	11
4.1	Holzverbrennung	11
4.1.1	Holz und Holzwerkstoffe als Brennstoff.....	11
4.1.2	Zusammensetzung von Holz	14
4.1.3	Verbrennungsvorgang	15
4.1.4	Homogene Verbrennung der flüchtigen Bestandteile	16
4.1.5	Heterogene Verbrennung des Restkohlenstoffes	16
4.2	Emissionen bei der Holzverbrennung	17
4.2.1	Vermeidbare Emissionen.....	18
4.2.2	Unvermeidbare Emissionen.....	20
4.3	Stickoxide	20
4.3.1	Allgemeines	20
4.3.2	Definition der Emissionskonzentration.....	22
4.4	NO-Bildungsmechanismen in Feuerungen	22
4.4.1	Thermische NO-Bildung	22
4.4.2	"Prompte" NO-Bildung	24
4.4.3	Bildung und Reduktion von NO aus Brennstoffstickstoff	25
4.4.3.1	Bildung von NO aus gasförmigem Brennstoff.....	25
4.4.3.2	Bildung von NO aus festem Brennstoff	29

4.4.3.1	Bildung von NO aus gasförmigem Brennstoff	25
4.4.3.2	Bildung von NO aus festem Brennstoff	29
4.4.3.3	Reduktion von NO in der Gasphase	30
4.4.3.4	Heterogene Reduktion von NO am Kohlenstoff	35
4.5	Stickstoff im Holz	36
4.5.1	Herkunft	36
4.5.2	Stickstoffgehalt verschiedener Holzsorten	37
4.6	Primärmassnahmen zur Stickoxidminderung	39
4.6.1	Grundsätzliches zu den Primärmassnahmen	39
4.6.2	Primärmassnahmen zur Stickoxidminderung aus dem Brennstoffstickstoff	40
4.6.2.1	Änderung der Gesamtluftzahl	40
4.6.2.2	Luftstufung	40
4.6.2.3	Abgasrezirkulation	42
4.6.2.4	Brennstoffstufung	43
4.6.2.5	Prozessinterne Brennstoffstufung	45
4.6.2.6	Advanced Reburning	45
4.6.2.7	Katalytische Reduktion von Stickstoffverbindungen	
	in der Vergasungszone	46
4.7	Berechnung der Kenngrößen	48
4.7.1	Gesamtluftzahl	48
4.7.2	Primärluftzahl	48
4.7.3	Umwandlungsgrad von Brennstoffstickstoff zu Stickstoffmonoxid	52
4.7.4	Rezirkulationsgrad	55
4.8	Konsequenzen für diese Arbeit	57
5.	Beschreibung der Versuchsverbrennungsanlage	58
5.1	Auslegungskriterien	58
5.2	Aufbau der modularen Versuchsfeuerung	59
5.2.1	Gesamtanlage	59

5.2.2	Festbettvergaser	63
5.2.3	Reduktionskammer	63
5.2.4	Brennkammer	67
5.3	Messtechnik.....	67
5.3.1	Bestimmung der Abgase.....	67
5.3.2	Bestimmung der Rohgase.....	69
5.3.3	Temperaturmesstechnik.....	70
5.3.4	Volumenstrommessung der Verbrennungsluft	70
5.3.5	Bestimmung der Holzfeuchtigkeit	71
5.3.6	Messwerterfassung.....	71
6.	Versuchsergebnisse und Diskussion.....	73
6.1	Stickoxidminderung bei der Verbrennung von Holz und	73
	Spanplattenresten mit zweifacher Luftstufung	73
6.1.1	Charakterisierung des Festbettvergasers.....	73
6.1.1.1	Einfluss der Primärluftzahl	73
6.1.1.2	Temperaturverlauf im Festbett	86
6.1.1.3	Verlauf der Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Stickstoff-	88
	konzentrationen der Partikel im Festbett.....	88
6.2.1	Charakterisierung der Reduktionszone.....	97
6.2.1.1	Einflussgrößen.....	97
6.2.1.2	Einfluss der Gesamtluftzahl auf die CO- und	98
	NO-Emissionen.....	98
6.2.1.3	Einfluss der Primärluftzahl	103
6.2.1.4	Einfluss der Temperatur in der Reduktionskammer	107
	auf die NO-Emissionen	107
6.2.1.5	Einfluss der Verweilzeit in der Reduktionskammer	110
	auf die NO-Emissionen	110
6.2.1.6	Einfluss der Wassergehaltes auf die CO- und	112
	NO-Emissionen.....	112
6.2.1.7	Vermischung in der Reduktionszone	114

6.2.1.8	Abbau der Stickstoffverbindungen in der Vergasungs- Reduktions- und Brennkammer	117
6.3.1	Charakterisierung der Brennkammer	121
6.3.1.1	Einfluss der Brennkammertemperatur	121
6.3.1.2	Zusammenhang der CO- und NO-Emissionen	122
6.3.1.3	Ausbrand der Asche	123
6.2	Stickoxidminderung bei der Verbrennung von Holz und Spanplattenresten mittels weiterer Primärmassnahmen	125
6.2.1	Dreifache Luftstufung	125
6.2.1.1	Dreistufige Verbrennung ohne Reduktionskammer	125
6.2.1.2	Dreistufige Verbrennung mit Reduktionskammer	126
6.2.2	Abgasrezirkulation	129
6.2.2.1	Einfluss der Abgasrezirkulation über die Sekundärluft auf CO- und NO-Emissionen	129
6.2.2.2	Einfluss der Abgasrezirkulation über die Primärluft auf CO- und NO-Emissionen	130
6.2.3	Brennstoffstufung	133
6.2.3.1	Normierung	133
6.2.3.2	Einfluss der Sekundärbrennstoffmenge auf die NO-Emissionen	134
6.2.3.3	Einfluss der Temperatur in der Reduktionszone auf die NO-Emissionen	136
7.	Grundlagenversuche zur Erklärung des Mechanismus der Stickoxidbildung	138
7.1	Bildung von Stickstoffmonoxid bei der einstufigen Verbrennung von Holz	138
7.1.1	Einfluss des Stickstoffgehaltes	138
7.1.2	Einfluss der Verbrennungstemperatur	139
7.1.3	Einfluss der Art der Stickstoffverbindung	140

7.1.4	Einfluss der Holzart auf die Freisetzung von NO	141
7.2	Zersetzung des Brennstoffstickstoffes bei der Pyrolyse von Holz und Spanplatte	143
7.2.1	Beschreibung der Laborreaktoren.....	143
7.2.2	Versuchsergebnisse	144
7.3	Katalytische Reduktion des Brennstoffstickstoffes.....	148
7.3.1	Zumischen von Katalysatoren bei der einstufigen Holzverbrennung....	148
7.3.2	Katalytische Reduktion von NO mit Holzasche.....	149
7.3.2.1	Einfluss der Temperatur.....	149
7.3.2.2	Einfluss der Raumgeschwindigkeit und der Sauerstoffkonzentration.....	151
7.3.2.3	Kinetisches Modell.....	153
7.3.3	Einbringen von Katalysatoren in die Vergasungskammer bei der zweistufigen Holzverbrennung	155
8.	Interpretation der Versuchsergebnisse.....	157
8.1	Vergleich der Versuchsergebnisse mit Literaturaussagen.....	157
8.1.1	Primärluftzahl in der Reduktionszone	157
8.1.2	Temperatur in der Reduktionszone	159
8.1.3	Stickstoffgehalt.....	163
8.2	Modellvorstellung des Mechanismus der Brennstoffstickstoff- umwandlung bei der Holzverbrennung	166
9.	Schlussfolgerungen.....	172
10.	Ausblick.....	176
10.1	Bedeutung für bestehende Feuerungen.....	176
10.2	Bedeutung für neue Feuerungen.....	176
10.3	Weitere Abklärungen	177

11.	Anhang	179
11.1	Bestimmung des Stickstoffgehaltes mittels Verbrennung und Chemilumineszenz-Detektion von Stickstoffmonoxid.....	179
11.1.1	Prinzip.....	179
11.1.2	Kalibrierung.....	181
11.1.3	Auswertung.....	182
11.1.4	Vergleich mit der Methode nach Kjeldahl und der Elementaranalyse.....	184
11.2	Messprinzipien zur Abgasanalyse.....	185
11.2.1	Bestimmung von Stickstoffmonoxid.....	185
11.2.2	Bestimmung von Sauerstoff.....	186
11.2.3	Bestimmung von Kohlenmonoxid und Kohlendioxid.....	186
11.3	Messprinzipien zur Rohgasanalyse.....	186
11.3.1	Bestimmung von Wasserstoff.....	186
11.3.2	Bestimmung von Methan, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid.....	187
11.3.3	Nasschemische Bestimmung von Ammoniak und Cyanwasserstoff....	187
11.4	Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie (FTIR).....	190
11.4.1	Prinzip.....	190
11.4.2	Messparameter.....	194
11.4.3	Kalibrierspektren.....	195
11.4.3.1	Ammoniak.....	195
11.4.3.2	Cyanwasserstoff.....	196
11.4.3.3	Stickstoffmonoxid.....	197
11.4.3.4	Lachgas.....	199
11.4.4	Auswertung.....	202
12.	Literaturverzeichnis	204