

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Motivation	1
2. Stand der Technik und Forschung	7
2.1 Bereitstellung biogener Gase	7
2.1.1 Überblick über die Konversionsverfahren	7
2.1.2 Verfahrensauswahl für die Verwertung agrarischer Reststoffe	9
2.1.3 Biomassevergasung	10
2.2 Aufbereitung biogener Gase	15
2.2.1 Allgemeine Aufbereitung	15
2.2.2 Teer-Aufbereitung	17
2.3 Reformierung biogener Gase	20
2.3.1 Aktueller Stand der Biogasreformierung	20
2.3.2 Aktueller Stand der Produktgasreformierung	22
2.4 Trockene Reformierung von Kohlenwasserstoffen	22
2.4.1 Reaktionssystem und Betriebsbedingungen	23
2.4.2 Aspekte der heterogenen Katalyse	27
2.4.3 Untersuchungsmethoden und Kennzahlen der heterogenen Katalyse	41
2.5 Reaktoren und Reaktormodelle	48
2.5.1 Klassifizierung von Reaktoren nach der Betriebsart	48
2.5.2 Klassifizierung von Reaktoren nach der Art des Aufbaus	48
2.5.3 Ansätze für Mengen- und Energiebilanzen	49
2.6 Zusammenfassung	51
3. Vorbetrachtung zur experimentellen Studie	53
3.1 Versuchsmaterial	53
3.1.1 Brennstoff	53
3.1.2 Katalysatoren	53
3.1.3 Gase	54
3.2 Versuchskonzeptionierung	54
3.2.1 Vorversuche	56
3.2.2 Hauptversuche	57
3.2.3 Ergänzende Versuche	57
3.3 Versuchsanlagen	58
3.3.1 Versuchsanlagen	58
3.3.2 Messtechnik	62
3.4 Versuchsprozeduren	64
3.4.1 Biomassevergaser LWSV50	64
3.4.2 Allgemeine Versuchsprozedur - Standardversuch	64
3.4.3 Vorversuche - Reproduzierbarkeit	66
3.4.4 Hauptversuche - Aktivierung	66
3.4.5 Weiterführende Versuche - Desaktivierung	67
3.5 Versuchsplanaung	67
3.6 Zusammenfassung	67

4. Vorversuche	69
4.1 Charakterisierung der hergestellten Rohgase	69
4.1.1 Allgemeine Versuchsergebnisse	69
4.1.2 Modellgaszusammensetzung	70
4.2 Festlegung der Standardbetriebsbedingungen	70
4.3 Nachweis der Reproduzierbarkeit	71
4.4 Charakterisierung der Katalysatorschüttung und des Stofftransports	73
4.4.1 Bestimmung der internen Stofftransporteinflüsse	73
4.4.2 Bewertung der externen Stofftransporteinflüsse	75
4.4.3 Weitere Untersuchung der Diffusions- und Stofftransportvorgänge	78
4.5 Zusammenfassung	82
5. Hauptversuche	83
5.1 Aktivierung des Reformierungskatalysators	83
5.1.1 Aktivierungstemperatur	85
5.1.2 Aktivierungszeit	87
5.1.3 Wasserstoff-Anteil im Aktivierungsgasstrom	88
5.1.4 Vergleich der gekoppelten Einflussnahme der Aktivierungsparameter	89
5.1.5 Vergleich der Einflussnahme von Aktivierung und Konditionierung	90
5.1.6 Fazit zu den Aktivierungsuntersuchungen des Katalysators	91
5.2 Einfluss der Reaktionstemperatur	91
5.3 Einfluss der Eduktgaszusammensetzung	92
5.3.1 Einfluss des Methan-Anteils	93
5.3.2 Einfluss des Kohlenstoffdioxid-Anteils	98
5.3.3 Einfluss des Kohlenstoffmonoxid-Anteils	101
5.3.4 Einfluss des Wasserstoff-Anteils	104
5.3.5 Fazit zum Einflus der Eduktgaszusammensetzung	108
5.4 Zusammenfassung	109
6. Ergänzende Versuche	111
6.1 Kohlenstoffbildung	112
6.2 Katalysatorvergiftung mit Schwefel und Katalysatorregeneration	114
6.2.1 Einfluss der Schwefelwasserstoff-Beladung	114
6.2.2 Wirkung auf unterschiedliche Katalysatorgrößen	115
6.2.3 Regeneration	116
6.3 Vergroßerung des Maßstabs	119
6.3.1 Maßstabsübertragung zwischen Reformer A und Reformer K	120
6.3.2 Skalierung zwischen den Katalysatoren	121
6.3.3 Untersuchung von Skalierungseffekten	123
6.4 Dynamische Aspekte und Langzeitverhalten	124
6.4.1 Nachweis der Reproduzierbarkeit und Skalierbarkeit	125
6.4.2 Volumenstromvariation	127
6.4.3 Temperaturvariation	130
6.4.4 Untersuchung des dynamischen Verhaltens	130
6.5 Kopplung von Vergasung und Gasaufbereitung	134
6.5.1 Voruntersuchungen zur Kopplung	134
6.5.2 Kopplung von Vergaser mit Reformer K	137
6.6 Zusammenfassung	138

7. Modellierung und Simulation	141
7.1 Daten- und Parameterbasis	142
7.2 Modelle von Teilespekten der zyklischen Gasaufbereitung	143
7.2.1 Basis der Reaktormodelle	143
7.2.2 Aktivierung – Bestimmung von k_{akt} (Gleichung 7.3)	146
7.2.3 Stationärer Betrieb – Bestimmung von k_T (Gleichung 7.3) und Parameterschätzung	147
7.2.4 Desaktivierung – Bestimmung von k_{des} (Gleichung 7.3)	150
7.2.5 Regeneration – Bestimmung von k_{reg} (Gleichung 7.3)	151
7.3 Simulationsstudie	153
7.4 Zusammenfassung	164
8. Zusammenfassende Bewertung und Ausblick	167
Literaturverzeichnis	173
Symbolverzeichnis	187
Anhang	193