

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 Versuchsplanung | 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 Stofftransportes | 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 Einfluss 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 Vergrößerung 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 Teilaspekten 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 |