

Berichte aus der Verfahrenstechnik

**Marc Sommer**

**Entwicklung eines Benzinreformers  
für mobile Anwendungen**



D 290 (Diss. Universität Dortmund)

Shaker Verlag  
Aachen 2003

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung	V
Formelzeichen und Abkürzungen	VII
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Stromerzeugung mit Brennstoffzellen	3
2.2 Verfahren zur Wasserstoffherzeugung aus Kohlenwasserstoffen	7
2.2.1 Dampfreformierung von Kohlenwasserstoffen	8
2.2.2 Partielle Oxidation	9
2.2.3 Autotherme Reformierung von Kohlenwasserstoffen	10
<b>3 Konzept zur Entwicklung eines Benzinreformers</b>	<b>13</b>
3.1 Spezifische Anforderungen an Benzinreformer für den Fahrzeugbetrieb	13
3.2 Grundkonzept eines Brennstoffzellensystems mit Benzinreformer	15
3.3 Reformierungssysteme für mobile Anwendungen in der Literatur	17
3.4 Aufgabe und Ablauf der Arbeit	20
<b>4 Optimierung des Systemwirkungsgrades</b>	<b>23</b>
4.1 Kraftstoffeinfluss	25
4.2 Identifizierung der optimalen Betriebsparameter	26
4.2.1 Einfluss des Systemdruckes und des $H_2$ -Umsatzes der Brennstoffzelle	26
4.2.2 Einfluss der Betriebsparameter für die Reformierung	27
4.2.3 Einfluss der Brennstoffzelle	29
4.3 Identifikation und Berechnung verschiedener Systemverschaltungen	32
4.3.1 Ermittlung der Systeme mit geschlossener Wärmestrombilanz	35
4.3.2 Pinch-Point-Analyse	38
4.3.3 Entwicklung der Systemverschaltungen	42
4.4 Berechnung der wärmetechnisch integrierten Systeme	45
4.4.1 Systemberechnung	45
4.5 Vergleich mit literaturbekannten Systemen	51

4.5.1	Systemverschaltung der Firmen Nuvera/Plug Power . . . . .	51
4.5.2	Systemverschaltung der Firma Hydrogen Burner Technologies (HBT) . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Dynamische Komponenten- und Systemmodellierung</b>	<b>55</b>
5.1	Mathematische Modellierung chemischer Reaktoren . . . . .	56
5.1.1	Modellierung der Shiftreaktoren . . . . .	58
5.1.2	Modellierung des autothermen Reaktors . . . . .	60
5.1.3	Modellierung der Wärmeübertrager . . . . .	62
5.1.4	Modellierung von SelOx, Brennstoffzelle und Katalytbrenner	63
5.2	Umsetzung in Matlab Simulink . . . . .	63
5.2.1	Diskretisierung . . . . .	63
5.3	Plausibilitätstests . . . . .	65
5.3.1	Energiebilanz . . . . .	65
5.3.2	Stoffmengenbilanz . . . . .	65
5.3.3	Diskretisierung . . . . .	66
5.4	Verfahrenstechnische Optimierung der Shiftreaktoren . . . . .	68
5.4.1	Analyse der Ansätze für die Reaktionsgeschwindigkeiten . .	68
5.4.2	Untersuchung verschiedener Betriebsweisen zur Volumenopti- mierung der Shift-Reaktoren . . . . .	71
5.5	Simulation der Einzelkomponenten . . . . .	79
5.5.1	Betriebsverhalten des Reformierungsreaktors . . . . .	79
5.5.2	Betriebsverhalten der Shiftreaktoren . . . . .	81
5.5.3	Betriebsverhalten der Wärmeübertrager . . . . .	84
5.6	Simulation der Systemkonzepte . . . . .	87
5.6.1	Modellvereinfachungen . . . . .	87
5.6.2	Darstellung der Zusatzkomponenten . . . . .	87
5.6.3	Dynamisches Systemverhalten von System 1d . . . . .	90
5.7	Vergleich und Bewertung des dynamischen Systemverhaltens . . . .	96
5.8	Kaltstart des Gaserzeugungssystems . . . . .	98
5.8.1	Startbrenner . . . . .	100
5.8.2	Kaltstart des Systems . . . . .	101
<b>6</b>	<b>Bewertung und Systemauswahl</b>	<b>107</b>
6.1	Betriebsfenster und Multi-Fuel-Fähigkeit des ausgewählten Systems	108
6.2	Wirkungsgrad und Benzinverbrauch im Neuen Europäischen Fahrz- klus (NEFZ) . . . . .	110
<b>7</b>	<b>Experimentelle Ergebnisse</b>	<b>113</b>
7.1	Beschreibung der Versuchsanlage . . . . .	114
7.1.1	Verfahrensfließbild . . . . .	114
7.1.2	Benzosierung . . . . .	116
7.2	Betriebsverhalten des autothermen Reformierungsreaktors . . . . .	117
7.2.1	Beschreibung des Reaktors . . . . .	117

7.2.2	Untersuchung des Betriebsverhaltens	117
7.3	Betriebsverhalten der Shiftreaktoren	123
7.3.1	Beschreibung der Reaktoren	123
7.3.2	Untersuchung des Betriebsverhaltens	123
7.4	Betriebsverhalten des Katalytbrenners	128
7.4.1	Beschreibung des Reaktors	128
7.4.2	Untersuchung des Betriebsverhaltens	128
7.5	Betriebsverhalten der Wärmeübertrager	131
7.5.1	Beschreibung der Wärmeübertrager	131
7.5.2	Untersuchung des Betriebsverhaltens	131
7.6	Betriebsverhalten des thermisch integrierten Systems	134
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>149</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>153</b>
<b>A</b>	<b>Stationäre Systemsimulation mit Aspen Plus</b>	<b>161</b>
A.1	Modellierung der Systeme	161
A.1.1	Thermodynamische Eigenschaften	161
A.1.2	Kraftstoffmodell	162
A.1.3	Verwendete Simulationsmodelle für die Unit Operations	163
A.1.4	Kennlinien für Kompressoren und Expander	165
A.1.5	Druckverluste	168
A.1.6	Wärmeverluste	169
A.2	Composite-Curves der Systeme	170
A.3	Ergebnisse der Systemsimulationen	173
A.4	Systemverschaltungen	176
<b>B</b>	<b>Dynamische Systemsimulation mit Matlab Simulink</b>	<b>179</b>
B.1	Herleitung und Zusammenstellung der Modellgleichungen	179
B.1.1	Modellgleichungen für die Shiftreaktoren	179
B.1.2	Modellgleichungen für den autothermen Reaktor	180
B.1.3	Modellgleichungen für die Wärmeübertrager	180
B.1.4	Plausibilitätstests für den autothermen Reaktor	181
B.1.5	Plausibilitätstests für die Wärmeübertrager	182
B.2	Stoffwerte	185
B.2.1	Stoffwerte für Reformatgas	185
B.2.2	Stoffwerte für Wasser	186
B.3	Kinetische Daten	187
B.3.1	Autötherme Reformierung	187
B.3.2	Wassergas-Shift-Reaktion	188
B.3.3	Methanisierung	188
B.4	Volumenoptimierung der Shiftreaktoren	189
B.4.1	Temperatur- und Konzentrationsprofile der gekühlten Konzepte	189

B.4.2	Temperatur- und Konzentrationsprofile der adiabaten Konzepte	191
B.5	Simulation der Systemkonzepte . . . . .	193
<b>C</b>	<b>Experimentelle Ergebnisse</b>	<b>199</b>
C.1	Analytik . . . . .	199
C.2	Fotos der Reaktoren und der Versuchsanlage . . . . .	201
C.3	RI-Fließbilder der Versuchsanlage . . . . .	207