

2799-2816

# Fortschritt-Berichte VDI

**Reihe 6**

Energietechnik

Dipl.-Ing. Steffen Wieland,  
Wetzlar

**Nr. 440**

**Der Membranreaktor  
als kompaktes  
Gaserzeugungs- und  
Gasreinigungssystem  
für Brennstoffzellen-  
Antriebe**

**VDI** VERLAG

---

1	Einleitung	1
2	Verfahrens- und Systembeschreibung	4
2.1	Gaserzeugungssystem	4
2.1.1	Reformierverfahren	4
2.1.2	Gasreinigung	5
3	Membranreaktoren in der Literatur	10
3.1	Membranreaktoren mit dichten Metallmembranen	10
3.2	Membranreaktoren mit porösen Membranen	11
3.3	Membranreaktoren für die Methanoldampfreformierung	11
3.4	Membranreaktoren für die Wassergas-Shiftreaktion	12
3.5	Mathematische Modelle	12
3.6	Zusammenfassung	13
3.7	Inhalt der Arbeit	14
4	Grundlagen der Methanoldampfreformierung	15
4.2	Belastung	18
4.3	Methanolumsatz	18
4.4	Selektivität	20
4.5	WGS-Umsatz	20
4.6	Kohlenmonoxidgehalt	22
4.7	Druckabhängigkeit der Methanolreformierung	24
4.8	Wasser/Methanol-Verhältnis	26
5	Membrantechnik	27
5.1	Anorganische, mikroporöse Membranen	28
5.2	Stofftransport in porenfreien Metallmembranen	29
5.3	Metallische Membranmaterialien	35
5.3.1	Palladium	35
5.3.2	Alternative Metallmembranen	37
5.4	Experimentelle Untersuchungen von Metallmembranen	39
5.4.1	Permeationsuntersuchungen Pd <sub>60</sub> Cu <sub>40</sub>	39
5.4.2	Permeationsuntersuchungen Pd <sub>75</sub> Ag <sub>25</sub>	44
5.4.3	Permeationsuntersuchungen von Vanadium-Membranen	46
5.5	Zusammenfassung Membranen	48
5.6	Membranmodule und deren Trennleistung	50
5.6.1	Modultypen	50
5.6.2	Wasserstoffseparation mit Membranmodulen	54
5.6.3	Stoffübergang in Membranmodulen	58
5.6.4	Zusammenfassung Membranmodule	62
6	Aufbau und Wirkungsweise von Membranreaktoren	63
6.1	Anwendungsspektrum	64

6.2	Struktur und Anordnung Katalysator/Membran	67
6.3	Kopplung von Reaktion und Diffusion	69
6.3.1	Stationäre Systeme mit Reaktion und Stoffabfuhr	72
6.3.2	Isotherme und stationäre Systeme mit Reaktion und Stoffabfuhr	76
6.3.3	Membranausnutzung	81
6.4	Zusammenfassung	86
7	<b>Experimentelle Untersuchungen zum Membranreaktor</b>	87
7.1	Konzeption des Teststandes und der Einzelzelle	87
7.2	Voruntersuchungen	90
7.2.1	Druckverlustmessungen	90
7.2.2	Katalysatoruntersuchungen	92
7.3	Einfluss der Schütthöhe	93
7.3.1	Hochdruckreformierung ohne Membran	93
7.3.2	Schütthöhenvergleich Membranreaktor/konventioneller Reaktor	95
7.4	Einfluss der Belastung	97
7.5	Druckeinfluss	99
7.6	Temperatureinfluss	101
7.7	Einfluss des Wasser/Methanol-Verhältnisses	104
7.8	Membranvergleich	106
7.9	Vergleich unterschiedlicher Katalysatoren	108
7.10	Zeitstandfestigkeit	110
7.10.1	Langzeitversuche	110
7.10.2	Membranstandfestigkeit	112
7.11	Zusammenfassung experimenteller Ergebnisse	114
8	<b>Modellierung des Plattenmembranreaktors</b>	116
8.1	Mathematische Beschreibung der Reformierung	116
8.2	Vergleich mit bestehenden Modellen	121
8.3	Modellierung des Druckverhaltens	125
8.4	Modellierung des Belastungsverhaltens	125
8.5	Modellierung des Temperaturverlaufs	128
8.6	Analyse des modellierten Betriebsverhaltens	129
8.6.1	Modellierung der Reaktion als Funktion der Festbettlänge	129
8.6.2	Beschreibung der Reaktionsrate	133
8.6.3	Modellierung der Reaktion als Funktion der Membrandicke	134
8.7	Zusammenfassung der Modellierung	136
9	<b>Zusammenfassung der Arbeit</b>	137
	Anhang	130
	Literatur	154