
Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)-Systeme mit integrierter Reformierung bzw. Vergasung von Kohlenwasserstoffen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. Christian Schlitzberger

aus (Geburtsort): Kassel

eingereicht am: 12.06.2012

mündliche Prüfung am: 09.10.2012

Referenten:

Prof. Dr. techn. Reinhard Leithner	(Referent/Betreuer)
Prof. Dr.-Ing. Otto Carlowitz	(Referent)
Prof. Dr.-Ing. Stephan Scholl	(Vorsitzender)

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	2
Kurzfassung	3
Abstract	4
1 Einleitung	7
1.1 Allgemeine Überlegungen	7
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	8
2 Grundlagen und Problembeschreibung	10
2.1 Funktionsweise und thermodynamische Grundlagen von Hochtemperatur-Brennstoffzellen . . .	10
2.1.1 Funktionsprinzip der Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)	11
2.1.2 Thermodynamische Grundlagen der Brennstoffzelle	12
2.1.3 Thermodynamische Grundlagen der Reformierung/Vergasung	19
2.2 Kohlenwasserstoffe für Hochtemperatur-Brennstoffzellen-Systeme	21
2.3 Motivation, Grundprinzip und Verfahrenskonzept	27
3 Stand der Technik und Forschung	38
3.1 Brennstoffaufbereitung	38
3.1.1 Reformierung	38
3.1.2 Vergasung	40
3.1.3 Gas- und Brennstoffkonditionierung	42
3.1.3.1 Gasreinigung	43
3.1.3.2 Gastrennung/CO ₂ -Abscheidung	45
3.2 Keramische Hochtemperaturbrennstoffzellen - Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)	47
3.2.1 Membran-Elektroden-Einheit (MEA)	47
3.2.2 Stack	50
3.3 Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) - Systeme mit integrierter Nutzung von Kohlenwasserstoffen . . .	53
4 Entwicklung eines hochintegrierten SOFC-Konzepts	60
4.1 Methodische SOFC-Stack- und System-Auslegung	60
4.1.1 Methodische SOFC-Stack-Auslegung	63
4.1.1.1 Morphologische Kästen SOFC-Stack-Design-Auslegung	68
4.1.2 Methodische SOFC-System-Auslegung	73
4.1.2.1 Morphologische Kästen SOFC-System-Auslegung	76
4.2 Konstruktion Stack und System	80
4.2.1 Stack Design	80
4.2.1.1 Erstes Stack-Design	81
4.2.1.2 Zweites Stack-Design	84
4.2.1.3 Endgültiges, drittes Stack-Design	85
4.2.1.4 Alternative Stack-Designs für höhere Kohlenwasserstoffe	96
4.2.2 System-Design	96
4.2.2.1 Luftvorwärmer	100
4.2.2.2 Membranreaktor	100
5 Mathematische Beschreibung von SOFC-Systemen	102
5.1 Chemische Reaktoren	105
5.1.1 Reformierungsreaktor	105
5.1.1.1 Bilanzierung	107
5.1.1.2 Chemisches Modell	109
5.1.2 Vergasungsreaktor	110
5.1.2.1 Bilanzierung	113

5.1.2.2	Chemisches Modell	115
5.1.3	Brennkammer	116
5.1.4	Membranreaktor/Plattenwärmeübertrager	118
5.1.4.1	Bilanzierung	121
5.1.4.2	Geometrie	122
5.1.4.3	Modellierung der Wärmeübertragung	124
5.1.4.4	Diffusionsmodell	126
5.1.4.5	Chemisches Modell	130
5.2	Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)	130
5.2.1	Bilanzierung	134
5.2.2	Geometrie	136
5.2.3	Wärmeübertragung	137
5.2.4	Chemisches Modell	137
5.2.5	Elektrisches Modell	137
5.2.5.1	Kaskadierung	141
5.2.6	Elektrochemisches Modell	143
5.2.6.1	Anodenoxidation	146
5.3	Wärmeübertragung	147
5.3.1	Gegenstrom-Wärmeübertrager mit Kondensat-Abführung	148
5.3.2	Wirbelschichttrockner	150
5.3.3	Thermische Isolierung	152
5.4	Strömungsmaschinen	155
5.4.1	Verdichtung/Expansion	155
5.4.2	Injektor	157
6	Untersuchung und Bewertung von SOFC-Systemen	160
6.1	Modell-Implementierung in ENBIPRO (Energie-Bilanz-Programm)	161
6.2	Untersuchung von Systemkomponenten	164
6.2.1	Reformierungsreaktor	164
6.2.2	Vergasungsreaktor	167
6.2.3	Membranreaktor	170
6.2.4	DIR-SOFC-Zelle	173
6.2.4.1	Untersuchung Area Specific Resistance (ASR) der SOFC-Einzelzelle	176
6.2.4.2	Betriebskennlinien und -felder	181
6.2.5	Luftvorwärmer	186
6.2.6	Hotbox	187
6.2.7	Injektor	188
6.3	Untersuchung von SOFC-Systemen für verschiedene Kohlenwasserstoffe als Brennstoff	190
6.4	Untersuchung von System-Varianten	209
6.4.1	Optionen zur Steigerung des System-Wirkungsgrads und zur CO ₂ -Abscheidung	209
6.4.2	Optionen zur SOFC-Kühlung und zur Abwärme-Integration	223
6.5	Detaillierte Analyse von Erdgas-SOFC-Systemen	231
6.5.1	Erdgas-SOFC-System mit DIR-ASC-Stack und Nachverbrennung	232
6.5.2	Erdgas-SOFC-System mit DIR-ASC-Stack und CO ₂ -Abscheidung/-Verdichtung mittels hohem Umsatzgrad	237
6.5.3	Erdgas-SOFC-System mit DIR-ASC-Stack und CO ₂ -Abscheidung/-Verdichtung mittels Membranreaktor	240
6.5.4	Abschließende Bewertung der Systemvarianten	246
7	Zusammenfassung und Ausblick	248
	Symbolverzeichnis	252
	Literaturverzeichnis	257