

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung.....	1
2	Anlagentechnischer Überblick.....	5
2.1	Funktionsprinzip der oxidkeramischen Brennstoffzelle und Anforderungen an die Systemtechnik	5
2.1.1	Grundlagen der SOFC.....	5
2.1.2	Rußproblematik	8
2.1.3	Einfluss von Brenngasverunreinigungen.....	11
2.1.4	Aufgaben der Abgasnachbehandlung	12
2.1.5	Aufgaben der Luftversorgung	12
2.1.6	Thermomechanische Belastungen.....	13
2.2	Anlagenkonzepte zur stationären Energieversorgung	14
2.2.1	Grundsätzlicher Aufbau und Kenngrößen zur Charakterisierung	14
2.2.2	Anlagenvarianten.....	16
2.2.3	Betriebs- und Regelungsstrategien.....	19
2.3	Stand simulationstechnischer Arbeiten	20
2.3.1	Dynamische Simulation der Netzanbindung	21
2.3.2	Dynamische Simulation des Gesamtsystems	21
2.3.3	Übersichtsdarstellung	23
3	Grundlagen der Anlagensubsysteme	25
3.1	Aufbereitung der Ausgangsstoffe	25
3.1.1	Gasvorwärmung	25
3.1.2	Brenngasreinigung	27
3.1.3	Brenngasbefeuchtung.....	28
3.1.4	Brenngasreformierung	30
3.2	Nachverbrennung der Reaktionsprodukte	32
3.2.1	Verbrennungstypen und Hilfsgrößen	32
3.2.2	Reaktions- und Zündmechanismen	34
3.2.3	Schadstoffbildung und Flammenlöschung	36
3.2.4	Wärme- und Gasstrahlung.....	37
3.3	Gasverteilung	38
3.3.1	Druckverluste.....	38
3.3.2	Verdichter und Pumpen	38
3.3.3	Ejektoren	39
3.4	Wärmeverluste.....	42

4	Methodik der Modellbildung	45
4.1	Systemtheoretische Grundlagen	45
4.1.1	Strategien zur Modellstrukturierung.....	45
4.1.2	Strukturierung des Brennstoffzellensystems.....	46
4.1.3	Varianten der Modellbildung.....	47
4.2	Modellierung verfahrenstechnischer Reaktoren.....	48
4.2.1	Rührkesselkaskade	49
4.2.2	Stoffbilanz	51
4.2.3	Energiebilanz	52
4.3	Programmgestaltung	52
4.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	54
5	Modellierung und Simulation der Anlagenteilkomponenten	57
5.1	Wärmeübertrager	57
5.1.1	Aufbau	57
5.1.2	Wärmeübertragermodell.....	58
5.1.3	Modellvalidierung	59
5.1.4	Simulationsergebnisse	63
5.2	Verdampfer.....	64
5.2.1	Aufbau	64
5.2.2	Verdampfermodell.....	65
5.2.3	Modellvalidierung	69
5.2.4	Simulationsergebnisse	71
5.3	Reformer.....	73
5.3.1	Aufbau	73
5.3.2	Reformermodell.....	73
5.3.3	Modellvalidierung	75
5.3.4	Simulationsergebnisse	77
5.4	Nachbrenner.....	79
5.4.1	Aufbau	79
5.4.2	Nachbrennermodell.....	80
5.4.3	Modellvalidierung	81
5.4.4	Simulationsergebnisse	82
5.5	SOFC.....	83
5.6	Ejektor.....	85
5.6.1	Ejektormodell	85
5.6.2	Simulationsergebnisse	88
5.7	Pumpen und Verdichter.....	90
5.8	Fehlerabschätzung	90

5.9	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	94
6	Dynamische Simulation des Gesamtsystems.....	97
6.1	Basiskonfiguration	98
6.1.1	Aufheizen	98
6.1.1.1	Aufheizen über Verbrennungswärme	100
6.1.1.2	Aufheizen über elektrische Beheizung.....	102
6.1.1.3	Kombiniertes Aufheizen über elektrische Beheizung	
	und Verbrennungswärme.....	104
6.1.1.4	Bewertung der Aufheizstrategien.....	106
6.1.2	Anfahren.....	107
6.1.3	Nennlastfall.....	110
6.1.4	Lastwechsel.....	112
6.1.4.1	Lastreduzierung.....	112
6.1.4.2	Lasterhöhung	117
6.1.4.3	Bewertung des Lastwechselverhaltens.....	122
6.1.5	Stand-by	123
6.1.6	Abschalten.....	124
6.2	Konfiguration mit Anodenabgasrückführung.....	125
6.2.1	Nennlastfall.....	125
6.2.2	Lastwechsel.....	126
6.3	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	128
7	Zusammenfassung und Ausblick	133
8	Literaturverzeichnis	139
9	Nomenklatur	147
10	Anhang.....	151