

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>vii</b>
<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand von Entwicklung und Forschung</b>	<b>3</b>
2.1 Stand der Entwicklung von SOFC-Systemen und Wettbewerbstechnologien	3
2.1.1 Anwendungen- und Größenklassifikation	3
2.1.2 Technologien für Stromerzeugungs- und KWK-Systeme	4
2.2 Stand der Forschung thermodynamischer Analysen von SOFC-Systemen	10
2.2.1 Monografien und Lehrbücher	10
2.2.2 Wissenschaftliche Zeitschriftenbeiträge und Dissertationen	11
<b>3 Motivation und Zielsetzung</b>	<b>13</b>
<b>4 Grundlagen</b>	<b>15</b>
4.1 Bilanzierung	15
4.2 Energie	16
4.2.1 Energiedefinitionen	17
4.2.2 Gespeicherte Energien	18
4.2.3 Transportierte Energien	18
4.2.4 Gewandelte Energien	21
4.3 Energiebilanz und Erster Hauptsatz der Thermodynamik	22
4.3.1 Der Erste Hauptsatz der klassischen Thermodynamik	22
4.3.2 Der Erste Hauptsatz der technischen Thermodynamik	23
4.4 Entropie und Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	23
4.5 Thermodynamisches Gleichgewicht	24
4.6 Katalyse	26
4.7 Reaktions- und verfahrenstechnische Größen	27
<b>5 SOFC-Systeme</b>	<b>33</b>
5.1 Prozessschritte beim Einsatz von Kohlenwasserstoffen in SOFC-Systemen	33
5.2 Festoxid-Brennstoffzellen	33
5.2.1 Prinzip	33
5.2.2 Membrane Electrode Assembly	34
5.2.3 Elektrochemische Reaktoren	35
5.2.4 Spannungsminderungsmechanismen	35
5.2.5 Anforderungen und Restriktionen	36
5.2.6 Brennstoffzellenspezifische Größen	38
5.2.6.1 Elektrochemische Potentialdifferenz	38

5.2.6.2	Brenngasausnutzung	39
5.3	Reforming	40
5.3.1	Reformingverfahren	40
5.3.1.1	Steam-Reforming	40
5.3.1.2	Partielle Oxidation	41
5.3.1.3	Oxidatives Steam-Reforming	41
5.3.2	Kohlenstoffbildung	42
5.3.3	Internes und externes Reforming, Reaktorintegration	42
5.4	Start- und Nachverbrennung	43
5.4.1	Anforderungen	43
5.4.2	Verfahren	43
5.4.3	Emissionsrichtlinien	44
5.5	Wärmeübertrager	44
5.6	Isolation	45
5.7	Anlagenperipherie	45
5.8	Systemkonzepte	48
5.8.1	Reforming	48
5.8.1.1	Rezirkulation	48
5.8.1.2	Reformingkonzepte	49
5.8.1.3	Wassermanagement	49
5.8.2	Verbrennung	49
5.8.3	Elektrochemischer Umsatz	50
5.8.4	Medienversorgung	51
5.9	Betriebsarten	51
<b>6</b>	<b>Thermodynamische Analyse von SOFC-Systemen</b>	<b>53</b>
6.1	Thermodynamisches Modell	53
6.1.1	Zielsetzung	53
6.1.2	Annahmen	53
6.1.3	Vorgehensweise und Verfahrensfließbild	56
6.1.4	Thermodynamische Gleichgewichte der Brennstoffreformate	56
6.1.4.1	Brennstoffe	56
6.1.4.2	Kohlenstoffbildungsgrenzen	57
6.1.4.3	Reformatzusammensetzungen	58
6.1.5	Idealer elektrischer Wirkungsgrad	58
6.1.5.1	Elektrische Spannung	58
6.1.5.2	Elektrischer Strom	62
6.1.5.3	Elektrischer Wirkungsgrad	63
6.1.5.4	Exkurs: Realer elektrischer Wirkungsgrad	66
6.1.6	Prozesstechnische Beschreibung des Reformerbetriebes	66
6.1.6.1	Verhältnis der chemischen Leistungen am Reformier	66
6.1.6.2	Bilanz der thermischen Energie des Reformingschrittes	67
6.2	Darstellung und Auswertung der thermodynamischen Berechnungen	68
6.2.1	Thermodynamische Gleichgewichte der Brennstoffreformate	68
6.2.2	Idealer elektrischer Wirkungsgrad	71
6.2.3	Prozesstechnische Beschreibung des Reformerbetriebes	73
6.3	Diskussion der thermodynamischen Analyse	75
6.3.1	Einfluss der verfahrenstechnisch beeinflussbaren Parameter	76
6.3.2	Zusammenfassung der thermodynamischen Analyse	82

<b>7</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen am Brennstoff Biogas</b>	<b>85</b>
7.1	Biogaserzeugung	85
7.2	Aufbereitung für SOFC	86
7.3	Erste Systemgeneration (Biogas v1)	88
7.3.1	Beschreibung der ersten Systemgeneration	88
7.3.1.1	Prozessbeschreibung	88
7.3.1.2	Konstruktive Umsetzung	90
7.3.1.3	Verbesserungsmaßnahmen (Biogas v1.1)	91
7.3.1.4	Labor- und Versuchsumgebung	94
7.3.1.5	Fehlerbetrachtung	94
7.3.2	Versuchsplanung	95
7.3.3	Darstellung und Diskussion der Ergebnisse Biogas v1	97
7.3.3.1	Analyse der Modulation der Eintrittsleistung	97
7.3.3.2	Energiestromanalyse des Gesamtsystems	102
7.3.3.3	Modellvalidierung	103
7.4	Zweite Systemgeneration (Biogas v2)	106
7.4.1	Beschreibung der zweiten Systemgeneration	106
7.4.1.1	Prozessbeschreibung	106
7.4.1.2	Definition der Entwicklungsziele	108
7.4.1.3	Komponentenauslegung und konstruktive Umsetzung	109
7.4.1.4	Labor- und Versuchsumgebung	112
7.4.1.5	Fehlerbetrachtung	113
7.4.2	Versuchsplanung	113
7.4.2.1	Startbrenner	114
7.4.2.2	Reformer	114
7.4.2.3	System	115
7.4.3	Darstellung und Diskussion der Komponentenversuchsergebnisse	116
7.4.3.1	Startbrenner	116
7.4.3.2	Reformer	117
7.4.4	Darstellung der Ergebnisse Biogas v2 und abschließende Diskussion	119
7.4.4.1	Zusammenfassung der experimentellen Untersuchungen	122
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>125</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>A1</b>
A.1	Übersicht zum Stand der Entwicklung	A1
A.2	Ergänzungen zur thermodynamischen Analyse	A6
A.2.1	Beispielberechnung idealer elektrischer Wirkungsgrad	A6
A.2.2	Ergänzende Abbildungen zur thermodynamischen Analyse	A8
A.3	Ergänzungen zu den experimentellen Untersuchungen	A14
A.3.1	Beschreibung der Anlagenperipherien Biogas v1 und Biogas v2	A14
A.3.2	Auslegungsdaten Biogas v1	A16
A.3.3	Beschreibung der Anlagenperipherie Biogas v1	A19
A.3.4	Bilddokumentation Biogas v1	A20
A.3.5	Dokumentation der Versuchsauswertung Biogas v1	A24
A.3.6	Ergänzende Abbildungen zur Versuchsauswertung Biogas v1	A28
A.3.7	Auslegungsdaten Biogas v2	A29
A.3.8	Ergänzungen zu den Komponentenversuchen Biogas v2	A32
A.3.9	Beschreibung der Anlagenperipherie Biogas v2	A33
A.3.10	Bilddokumentation Biogas v2	A34

## **Inhaltsverzeichnis**

A.3.11 Dokumentation der Versuchsauswertung Biogas v2 . . . . .	A37
A.3.12 Ergänzende Abbildungen zur Versuchsauswertung Biogas v2 . . . . .	A38

## **B Literaturverzeichnis**

**B1**