

Inhalt

Formelzeichen	IX
1 Einführung	1
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Funktionsweise und Typen von Brennstoffzellen	3
2.2 Thermodynamische Grundlagen der Brennstoffzelle	6
2.2.1 Reaktionsenthalpie und Reaktionsentropie	7
2.2.2 Die reversible Brennstoffzelle	14
2.2.3 Bilanzierung von Brennstoffzellen und -stacks	22
2.3 Brennstoffe und Brenngaserzeugung	27
2.3.1 Brennstoffeinsatz in Brennstoffzellen	28
2.3.2 Verfahren der Brenngaserzeugung	29
3 Brennstoffzellensysteme und kombinierte Anlagen	36
3.1 Thermodynamische Grundlagen zur Auslegung kombinierter Anlagen	38
3.1.1 Prozessstruktur des allgemeinen Vergleichsprozesses	40
3.1.2 Reversible Arbeit der Vergleichsprozesse	44
3.1.3 Einflussparameter auf die Prozessführung	49
3.2 Modellvereinfachung und Integration der Brenngaserzeugung ..	55
3.2.1 Vereinfachter Brennstoffzellenkraftprozess und Realprozess	56
3.2.2 Integration der Brennstoffaufbereitung – Brenngaserzeugung	62
3.3 Skalierungsgesetze für Brennstoffzellensysteme	72
3.3.1 Abschätzungen der Größenordnungen	73
3.3.2 Prozessmodell und Kennzahlen	76
3.3.3 Auswertungen und Analysen	83
4 Systemintegration und Anlagenkonzepte	90
4.1 Einführung in die Modellierung kombinierter Kraftwerke	91
4.2 Systemlösungen und Baubarkeit	110
4.2.1 Anlagentechnische Konzepte zur hocheffizienten Stromerzeugung	121

4.2.2 Konzeption eines kombinierten SOFC Gasturbinenkraftwerks	122
4.2.3 Planungen zum kombinierten Konzept SureCELL™ von SIEMENS Westinghouse	128
4.2.4 Fortgeschrittene Kreisläufe	133
4.3 Brennstoffzelleneinsatz in der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ..	135
4.3.1 Systemanalyse bei Erdgasbetrieb	136
4.3.2 Systemanalyse von Wasserstoffbetrieb	150
4.3.3 Systemvergleich und Systemintegration	153
4.3.4 SOFC-GT Systeme im KWK Einsatz	157
4.4 Systeme für den Markteintritt und Synergien zu mobilen Anwendungen	160
4.4.1 Beispiele von Anlagenkonzepten	161
4.4.2 Synergien zu mobilen Anwendungen	170
5 Zell- und Stackkonzepte	176
5.1 Konzepte und Bauformen	176
5.2 Auslegung und Prozessanalyse von Brennstoffzellen	191
5.2.1 Nernstspannung, Verluste, Kaskadierung	191
5.2.2 Konstruktionsanalyse und Vergleich tubularer und planarer Konzepte	206
5.2.3 Stoffaustausch und Zellauslegung	216
5.2.4 Zellgeometrien und Baugruppenauslegung	228
5.2.5 Zusammenfassung der Anforderungen an den Stackentwurf	238
5.3 Entwicklungsstand der einzelnen Zelltypen	242
5.3.1 Entwicklungsstand der PEFC (Polymer Electrolyte Fuel Cell)	242
5.3.2 Entwicklungsstand der PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)	248
5.3.3 Entwicklungsstand der MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)	252
5.3.4 Entwicklungsstand der SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)	259
6. Betriebserfahrungen	273
6.1 PEFC Anlagen	274
6.1.1 PEFC Heizgeräte (Bauart HGC)	275
6.1.2 250 kW PEFC BHKW der BEWAG (Bauart Ballard)	276
6.2 PAFC Anlagen	279
6.2.1 200 kW ONSI PC 25 BWK der HEAG	279
6.2.2 200 kW ONSI PC 25 BWK in Bochum und Düren	283
6.2.3 5 000 kW PAFC Anlage bei Kansai Electric Power, Amagasaki	286
6.3 MCFC Anlagen	287

6.3.1	2000 kW MCFC Anlage St. Clara (Bauart Fuel Cell Energy)	287
6.3.2	250 kW MCFC Anlage Miramar (Bauart M-C Power)	290
6.3.3	280 kW Direkt BZ Anlage (MCFC) der Ruhrgas in Dorsten (Bauart MTU)	291
6.3.4	280 kW Direkt BZ Anlage (MCFC) der Stadtwerke Bielefeld (Bauart MTU)	293
6.3.5	280 kW Direkt BZ Anlage (MCFC) des Rhön-Klinikums (Bauart MTU)	295
6.4	SOFC Anlagen.....	296
6.4.1	SOFC Versuchsanlagen im Feldversuch.....	297
6.4.2	100 kW SOFC BHKW der EDB / Elsam (Bauart SIEMENS Westinghouse)	301
6.4.3	230 kW SOFC-GT Anlage University of California Irvine (Bauart SIEMENS Westinghouse)	304
6.4.4	25 kW SOFC Demonstrator von Ceramic Fuel Cells Ltd. .	306
6.4.5	1 kW SOFC Sulzer Hexis im Feldversuch.....	307
7	Die Brennstoffzelle in der zukünftigen Energieversorgung.....	311
7.1	Potentiale dezentraler Stromerzeugung	311
7.2	Bestimmung zulässiger Investitionskosten	314
7.3	Szenarien zu zulässigen Investitionskosten	317
7.4	Randbedingungen zur Markteinführung der Brennstoffzellen-technik	323
7.5	Gesamtwirtschaftliche Einflüsse und Umsetzungsstrategien.....	334
Literatur.....	344	
Sachverzeichnis	369	