

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xiii
Symbolverzeichnis	xv
1 Einleitung und Motivation	1
1.1 Struktur der Arbeit	3
2 Systemtechnische Verfahrensentwicklung	5
2.1 Grundlagen der Systemtechnik	6
2.1.1 Elemente der Prozesssynthese	8
2.2 Systemverfahrenstechnische Prozesssynthese	14
2.2.1 Evolutionäre Vorgehensweise	15
2.2.2 Systematische Methoden	15
2.2.3 Überstrukturbasierte, mathematische Methoden	17
2.3 Zusammenfassung	21
3 Prozesssynthese in der Brennstoffzellenanwendung	23
3.1 Aufbau eines Brennstoffzellensystems	24
3.1.1 Verfahrenstechnische Prozesseinheiten	26
3.2 Publikationen zur Synthese und Optimierung von Brennstoffzellen . .	33
3.2.1 Prozesssyntheseprobleme	36
3.2.2 Parametersynthese für einzelne Zellen und Systeme	39
3.3 Diskussion der Aufgabenstellung	45
3.3.1 Ableitung der Aufgabenstellung	47
4 Prozessmodellierung	49

4.1	Thermochemische Stoffdatenbibliothek	51
4.2	Funktionsmodellierung der Prozesseinheiten	51
4.2.1	Gaskonditionierungsmodelle	51
4.2.2	Modellierung des SOFC-Stapels	59
4.2.3	Hilfsaggregate für den Systembetrieb	64
4.3	Validierung der Hauptkomponenten	66
4.4	Energetische Bewertung von SOFC-Prozessen	69
4.4.1	Komponentenwirkungsgrade	70
4.4.2	Systemwirkungsgrade	71
5	Analyse von SOFC-Konzepten mittels Variantenvergleich	73
5.1	Entwurf und Auslegung eines Batterieladers	74
5.1.1	Technologieauswahl und Systemkonzept	74
5.1.2	Variantenvergleich und Bewertung	80
5.2	Konzeption eines hocheffizienten Systems mit Abwärmenutzung	82
5.2.1	Beschreibung der Systemkonzepte	83
5.2.2	Allgemeine Vergleichsgrundlage	87
5.2.3	Analyse und Bewertung der Prozessvarianten	87
5.3	Weiterführende Anforderungen an die Prozessentwicklung	99
6	Der Optimierungsansatz am energietechnischen Beispiel	101
6.1	Gesamtmodells zur Betriebsoptimierung	103
6.1.1	Systematik der Variablen und Parameter	105
6.1.2	Bilanzierung der Flussgrößen	107
6.2	Das Strukturmodell der Bilanzgleichungen	109
6.2.1	Darstellung als gerichteter Graph	110
6.3	Ableitung des Verflechtungsmodells	113
6.4	Prozessoptimierung des Beispiels	118
7	Ein- und multikriterielle Parametersynthese am Beispiel	123
7.1	Verflechtungs- und Funktionsmodell	125
7.1.1	Visualisierung der Zielfunktion	129
7.2	Bewertung der Systemkosten	132
7.2.1	Zielfunktion der Gesamtkosten	132
7.2.2	Sensitivität der Kostenparameter	136

7.2.3	Kostenanalyse bei veränderlicher Zellfläche	138
7.3	Programmtechnische Umsetzung	141
7.4	Einkriterielle Betriebsoptimierung	144
7.4.1	Evolutionäre Optimierungsalgorithmen (EA)	145
7.4.2	Maximierung des Systemwirkungsgrades	146
7.4.3	Minimierung der Investitionskosten	153
7.5	Multikriterielle Betriebsoptimierung	156
7.5.1	Multikriterielle Optimierungsverfahren	156
7.5.2	Pareto-Optimierung der Prozesskonzepte	159
8	Kurzbeschreibung der Methodik	165
9	Zusammenfassung	167
	Literaturverzeichnis	171
A	Anhang	185
A.1	Ansätze zur Prozessbewertung	185
A.1.1	Ökonomische Bewertung	185
A.1.2	Thermodynamische Bewertung	186
A.2	Mathematische Methoden zur Prozesssynthese	187
A.2.1	B&B-Verfahren für MILPs / MINLPs	187
A.2.2	Deterministische Verfahren für konvexe MINLPs	187
A.2.3	B&B-Verfahren für nicht-konvexe MINLPs	188
A.2.4	Kombinatorische Algorithmen für MINLPs	189
A.3	PROP.DLL - Die IKTS-Stoffdatenbibliothek	190
A.4	LAGRANGE-Verfahren zur Minimierung der freien Enthalpie	193
A.5	Optimierung mittels FIBUNACCI-Suche	197
A.6	Analytische Ableitung des Verflechtungsmodells	199
A.7	Detaillierte Ergebnisse des Variantenvergleiches	202
A.7.1	Prozesssimulation der Batterie-Lade-Einheit	202
A.7.2	Prozesssimulation des SOFC-KWK-Systems	204
A.8	Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung	208
A.9	Kostenminimierung der KWK-Konzepte	209