

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xv
Tabellenverzeichnis	xxi
Abkürzungen und Formelzeichen	xxiii
1 Einleitung und Motivation	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Ziele und Inhalte der Arbeit	6
2 Stand der Wissenschaft und Technik.....	11
2.1 Einführung zu Brennstoffzellen.....	11
2.1.1 Historische Entwicklung	11
2.1.2 Typen von Brennstoffzellen	12
2.2 Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEM-BZ).....	13
2.2.1 Funktionsweise und Zellaufbau	13
2.2.1.1 Polymerelektrolytmembran (PEM)	14
2.2.1.2 Elektroden-Katalysatorschicht und die 3-Phasen-Grenze	15
2.2.2 Gasdiffusionslagen	17
2.2.2.1 Funktionen und Anforderungen der GDL	17
2.2.2.2 Arten von GDL	18
2.2.2.3 Mikroporöse Schicht	19
2.2.2.4 Intrusionsverhalten und Eigenschaften von GDL	20
2.2.2.5 Diffusionsprozesse in GDL und MPL	23
2.2.3 Mathematische PEM-BZ-Modellbildung	29
2.2.3.1 Modellarten und Klassifizierung	29
2.2.3.2 Modellannahmen für die Synthese-Vorauslegungsmethode	31
2.2.3.3 Sättigungsdampfdruck von Wasser	32
2.3 Auslegung von PEM-BZ.....	33
2.3.1 Konstruktiver Aufbau von PEM-BZ-Stacks.....	33
2.3.1.1 Einzelzelle	33

Inhaltsverzeichnis

2.3.1.2	Zellstapel	35
2.3.1.3	Verspannsystem	37
2.3.2	Bipolarplatten und Flussfeldstrukturen	38
2.3.2.1	Funktionen einer BPP	39
2.3.2.2	Materialarten und Fertigungsverfahren von BPP	39
2.3.2.3	Anforderungen an BPP	42
2.3.2.4	Flussfeldtypen und Grundlagen zur Auslegung	43
2.3.2.5	Grundstruktur einer BPP	49
2.3.3	Methoden zur Entwicklung von BZ-Stacks und BZ-Systemen	53
2.3.4	Untersuchungen zu BPP- und Flussfeldstrukturen	56
2.3.4.1	Anwendung von generischen Optimierungsalgorithmen	57
2.3.4.2	Mathematische Beschreibung von Flussfeldstrukturen	57
2.3.4.3	Parametereinfluss auf die Leistungsfähigkeit	58
2.4	Beurteilung des Standes von Wissenschaft und Technik	59
3	Grundlagen von PEM-BZ	61
3.1	Elektrochemische und Thermodynamische Grundlagen	61
3.1.1	Nernstspannung	62
3.1.2	Verlusteffekte in PEM-BZ	64
3.1.3	Aktivierungsverluste	65
3.1.4	Ohm'sche Verluste	67
3.1.4.1	Ohm'sche Verluste in der PEM	68
3.1.4.2	Ohm'sche Verluste durch Kontaktwiderstände	68
3.1.4.3	Zusammenfassung und Modellannahmen	72
3.1.5	Konzentrationsverluste	73
3.2	Leistungs- und Wirkungsgradbetrachtungen	76
3.3	Anwendungsfelder, Marktsituation und Marktpotenziale	81
4	Synthese-Auslegungsmethode	87
4.1	Gesamtübersicht zur Programmstruktur	87
4.2	Initialisierung	89
4.2.1	Konstanten und Definitionen	89
4.2.1.1	Grundlegende Stoffdaten	89

4.2.1.2	Definition der Kanalparameter.....	89
4.2.2	Definition der Anforderungen und Randbedingungen.....	91
4.2.2.1	BZ-Leistungs- und -Betriebsrandbedingungen.....	91
4.2.2.2	Anforderungen an die Aktivfläche.....	92
4.2.2.3	Intervalldefinitionen zu Kanalvariationsparametern.....	93
4.2.2.4	Sonstige Konstruktionsrandbedingungen und -grenzen.....	94
4.2.3	GDL-Daten.....	95
4.2.4	MEA-Konstruktionsdaten.....	96
4.2.5	MEA-Referenzkennlinien.....	97
4.2.6	1D-BZ-Referenzmodell.....	99
4.2.6.1	Beschreibung des Gesamtmodells.....	99
4.2.6.2	Modellabhängigkeiten und Sensitivitäten.....	101
4.2.7	Bestimmung von Grundkennwerten zu Synthesevarianten.....	104
4.3	Parametrisierung von Kanalquerschnittskonturen.....	105
4.3.1	Einordnung in den Synthese-Algorithmus.....	105
4.3.2	Spezieller Stand der Technik zu Kanalparametermodellen.....	106
4.3.3	Kanalparametergleichung.....	107
4.3.3.1	Ansatz und Herleitung der Berechnungsgleichung.....	107
4.3.3.2	Gültigkeit und Restriktionen.....	109
4.3.4	Kanalquerschnittsflächengleichung.....	110
4.3.4.1	Ansatz und Herleitung der Flächenberechnungsgleichung.....	110
4.3.4.2	Gültigkeit und Restriktionen.....	112
4.3.5	Filterung von Kanalquerschnittsvarianten.....	112
4.4	Parametrisierung von Flussfeldverläufen.....	114
4.4.1	Einordnung in den Synthese-Algorithmus.....	114
4.4.2	Allgemeine Ablaufstruktur von Flussfeldberechnungsmodulen.....	115
4.4.3	Implementierte Flussfeldmodelle.....	116
4.4.3.1	Übersicht zu bisher hergeleiteten Flussfeldmodellen.....	116
4.4.3.2	Serpentine Längs (SeL).....	117
4.4.3.3	Serpentine Quer (SeQ).....	119
4.4.3.4	Wave Parallel Variante 1 (WaP01).....	119

Inhaltsverzeichnis

4.4.3.5	Straight Parallel (StraP)	121
4.4.4	Mathematische Beschreibung einer Flussfeldstruktur	122
4.4.5	Dimensionierung der Mediensammler	126
4.4.5.1	Abhängigkeit zum Druckabfall	127
4.4.5.2	Abhängigkeit zur Stack-Leistung und -Zellanzahl	129
4.4.5.3	Annahmen Ein-zu-Auslass-Verhältnis	130
4.5	Hydraulische Druckabfallberechnung	131
4.5.1	Analytischer Berechnungsansatz	131
4.5.1.1	Gasgemische und Strömungsgeschwindigkeiten	132
4.5.1.2	Gasgemischdichten	134
4.5.1.3	Dynamische und kinematische Viskosität	134
4.5.1.4	Reynolds-Zahlen	136
4.5.1.5	Druckverlustbeiwerte aus Hinderniskonturen	136
4.5.1.6	Rohrreibungsbeiwerte und Formfaktoren	139
4.5.2	Annahmen zu Grenzwerten und Zielkriterien	141
4.5.3	Filterung von Flussfeldvarianten und Datenspeicherung	144
4.6	Bewertung und Kombination der Flussfeldvarianten	145
4.6.1	Einordnung in den Synthese-Algorithmus	145
4.6.2	Kriterien und Szenarien zur Flussfeldvariantenbewertung	145
4.6.3	Filterung und Kombination von Flussfeldvarianten	151
4.7	Parametrisierung von Kanalplattenlayouts	154
4.7.1	Einordnung in den Synthese-Algorithmus	154
4.7.2	Implementierte Bipolarplattenmodelle	156
4.7.2.1	Dichtungsbereiche und Kühlmediensammler	156
4.7.2.2	SeL-SeL-Modell	157
4.7.2.3	SeL-SeQ-Modell	159
4.7.2.4	SeQ-SeQ-Modell	160
4.7.2.5	SeL-WaP01-Modell	162
4.7.2.6	SeL-StraP-Modell	163
4.7.3	Berechnung von Stack-Kennwerten	165
4.7.4	Zwischenbewertung von BPP- und Stapel-Varianten	166

4.7.5	Berechnung von Geometriematrizen und Kontaktkarten	168
4.8	Gesamtbewertung und Ermittlung von Vorzugslösungen.....	172
4.8.1	Erfüllungsgrade der Kontaktierungsbetrachtungen.....	172
4.8.2	Berechnung von Vorspannkraften	174
4.8.3	Finale Bestimmung von Vorzugslösungen.....	175
5	Berechnungsmodule	179
5.1	Übersicht und Verweis zu Fachveröffentlichungen	179
5.2	Abschätzung der Umformschädigung.....	180
5.2.1	Spezieller Stand der Wissenschaft und Technik	180
5.2.2	Herleitung des Modellansatzes	181
5.2.2.1	Schädigungsfaktor Kanalradien	184
5.2.2.2	Einflussfaktor Dicke-zu-Längenänderung	185
5.2.2.3	Einflussfaktor kumulierte Dehnung	186
5.2.2.4	Einflussfaktor Dicken-zu-Tiefenverhältnis.....	186
5.2.2.5	Einflussfaktor Dicken-zu-Längenänderung	187
5.2.2.6	Analytische Gesamtgleichung.....	187
5.2.3	Zusammenfassung und Einschätzung	188
5.3	GDL-Intrusionsmodell	189
5.3.1	Motivation und Zielstellung	189
5.3.2	Messmethode	190
5.3.2.1	Versuchsaufbau	190
5.3.2.2	Vorbereitung der GDL-Proben	191
5.3.2.3	Kanalparameterproben	192
5.3.2.4	Messablauf und -modell	194
5.3.3	Analytisch-empirischer Modellansatz.....	196
5.3.4	Zusammenfassung und Einschätzung	199
5.4	Stromdichteverteilung an Kanalquerschnitten.....	199
5.4.1	Motivation und Zielstellung	199
5.4.2	Spezieller Stand der Wissenschaft und Technik.....	200
5.4.3	Modellansatz.....	202
5.4.3.1	Bereichsdefinition und Diskretisierung	202

5.4.3.2	Variable Parameter am Kanalquerschnitt	202
5.4.3.3	Annahmen zu Berechnungsreihenfolgen	206
5.4.3.4	Modellergebnisse und Diskussion	209
5.4.4	Zusammenfassung und Einschätzung	215
6	Anwendung der Synthese-Methode.....	217
6.1	Annahmen zum Vorauslegungsszenario	217
6.1.1	Anzustrebende Zielparameter	217
6.1.2	Betriebsrandbedingungen, GDL- und MEA-Daten.....	218
6.1.3	Konstruktive Vorgaben und Parametervariationsintervalle	221
6.2	Ergebnisse aus Hauptprogramm und Postprozess.....	223
6.2.1	Flussfeldgenerierung und -bewertung	223
6.2.2	BPP-Variantenberechnungen	226
6.2.3	Stack-Variantenberechnungen	228
6.2.4	Bestresultate.....	235
6.3	Vorzugslösung des Beispielszenarios	238
6.3.1	Übersicht zu relevanten Kennwerten.....	238
6.3.2	Konstruktion	243
6.3.2.1	Kanalhalbplatten.....	243
6.3.2.2	Einzelzellaufbau	244
6.3.2.3	Zellstapel und Stack.....	246
6.3.2.4	Oberes Endplattensystem mit Federeinheit.....	248
6.3.2.5	Unteres Endplattensystem mit Medienanschlüssen.....	250
6.3.2.6	Experimenteller Test-Stack in Einzelzellkonfiguration.....	252
6.3.3	Untersuchungen zu mechanischen Tragbildern	255
6.3.4	Experimentelle Ermittlung der Polarisationskurve	260
6.4	Einschätzung der Methode	266
7	Schlussbetrachtungen	271
7.1	Zusammenfassung.....	271
7.2	Abgleich zu den wissenschaftlichen Fragestellungen	274
7.3	Ausblick.....	277
8	Literatur.....	281