

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Energieversorgung im 21. Jahrhundert	2
1.2	Die Brennstoffzelle	3
1.3	Kosten von Brennstoffzellensystemen.....	3
1.4	Kostenprognosen	4
1.5	Gliederung der Arbeit	5
2	Motivation und Ziel der Arbeit	7
2.1	Anforderungen an Kostenprognosemethoden.....	7
2.2	Verwendete Kostenprognosemethoden	8
2.2.1	Leistungsspezifische Kostenrechnung	9
2.2.2	Kostenprognose mittels Lernkurve	11
2.2.3	Objektbezogene Detailkalkulation	13
2.2.4	Sonstige Näherungsverfahren.....	14
2.3	Neuer Ansatz und Zielsetzung.....	14
2.3.1	Massenspezifische Kostenanalyse.....	14
2.3.2	Ziele der Arbeit.....	15
2.3.3	Rechenmodell	15
3	Grundlagen.....	17
3.1	Brennstoffzellensysteme	17
3.1.1	Aufbau einer Zelle	17
3.1.2	Brennstoffzellentypen.....	18
3.2	Statistik.....	19
3.2.1	Deskriptive Statistik.....	19
3.2.2	Induktive Statistik und Zufallsvariablen.....	22
3.2.3	Monte-Carlo-Simulation.....	31
3.3	Regressionsanalyse	32
3.3.1	Definitionen.....	32
3.3.2	Annahmen.....	33
3.3.3	Durchführung von Regressionsanalysen	34
3.3.4	Regressionsmethode der kleinsten Quadrate.....	36
3.3.5	Bewertung und Überprüfung der Regressionsanalyse	38
3.3.6	Anwendbarkeit der Regressionsmethode der kleinsten Quadrate	41
3.3.7	Heteroskedastizität.....	43
3.4	Grundlagen der Kostenrechnung.....	46
3.4.1	Kosten.....	47
3.4.2	Kosten- und Leistungsrechnung.....	49
3.4.3	Skaleneffekt	52
3.4.4	Erfahrungskurven.....	53

4	Methodik	56
4.1	Massenspezifische Kostenanalyse.....	56
4.1.1	Anwendungen	58
4.1.2	Anforderungen an eine modifizierte Methode	59
4.2	Modellmodifikationen	60
4.2.1	Komponentenspezifische Analyse.....	60
4.2.2	Verwendung von Kosteneinflussgrößen	64
4.2.3	Stückzahlabhängigkeit	65
4.2.4	Fehleranalyse	69
4.3	Datenerhebung für die Komponentenanalyse	69
4.3.1	Primäre Datenerhebung	69
4.3.2	Sekundäre Datenerhebung	71
4.4	Datenauswertung	74
4.4.1	Datenauswertung bei wenigen Datensätzen	76
4.4.2	Datenauswertung bei einigen Datensätzen	77
4.4.3	Datenauswertung bei vielen Datensätzen	79
4.5	Anwendung des Modells	85
4.6	Auswertung der Gesamtkosten	87
4.6.1	Verteilungsfunktion der Gesamtkosten.....	87
4.6.2	Fehleranalyse der Gesamtkosten.....	87
4.6.3	Aufteilung der Kosten nach Komponenten	87
4.6.4	Sensitivitätsanalyse.....	88
4.6.5	Varianzsensitivitätsanalyse	88
4.7	Zusammenfassung	89
5	Identifikation kostenintensiver Bauteile	90
5.1	Literaturanalyse	90
5.1.1	Arthur D. Little / TIAX LLC.....	90
5.1.2	Directed Technologies.....	101
5.1.3	Management Engineers	104
5.1.4	Per Ekdunge & Monika Råberg	106
5.2	Schwerpunkte für die Komponentenanalyse	107
6	Komponentenanalysen	108
6.1	Stackkomponenten.....	108
6.1.1	Membran.....	109
6.1.2	Gasdiffusionsschicht	110
6.1.3	Katalysator	110
6.1.4	Membran-Elektroden-Einheit.....	111
6.1.5	Bipolarplatten	111
6.1.6	Dichtung.....	112
6.1.7	Endplatten.....	112
6.1.8	Sonstiges (Stack)	113
6.2	Systemkomponenten	113
6.2.1	Pumpen	114
6.2.2	Verdichter & Lüfter	115

6.2.3	Schläuche & Rohre	116
6.2.4	Sensoren & Ventile	116
6.2.5	Regelungselektronik.....	117
6.2.6	Leistungselektronik	118
6.2.7	Batterie	119
6.2.8	Kraftstofftank.....	119
6.2.9	Gehäuse	120
6.2.10	Sonstiges (System)	121
6.3	Brennstoffaufbereitung	121
6.3.1	Reformer.....	122
6.3.2	Shift- und PrOx-Reaktoren	122
6.3.3	Entschwefelung.....	123
6.3.4	Befeuchter.....	124
6.3.5	Nachbrenner	124
6.3.6	Luftfilter	125
6.3.7	Wärmeübertrager	126
6.3.8	Dampferzeuger	127
6.3.9	Sonstiges (Brennstoffaufbereitung)	127
6.4	Zusammenfassung der Komponentenanalysen	127
7	Montagekosten.....	129
7.1	Stackmontage und Systemmontage.....	129
7.2	Montagesysteme	129
8	Modellanwendung und Ergebnisbewertung.....	131
8.1	50W DMFC System.....	131
8.1.1	Modellierungsergebnisse bei 200 Stück p.a.	132
8.1.2	Modellierungsergebnisse bei 10.000 Stück p.a.	135
8.1.3	Modellierungsergebnisse bei 500.000 Stück p.a.	137
8.1.4	Zusammenfassung.....	138
8.2	1,0 kW DMFC System	139
8.2.1	Modellierungsergebnisse bei 200 Stück p.a.	140
8.2.2	Modellierungsergebnisse bei 10.000 Stück p.a.	142
8.2.3	Modellierungsergebnisse bei 500.000 Stück p.a.	144
8.2.4	Zusammenfassung.....	145
8.3	80 kW PEFC System mit Wasserstoff	147
8.3.1	Modellierungsergebnisse bei 200 Stück p.a.	148
8.3.2	Modellierungsergebnisse bei 10.000 Stück p.a.	150
8.3.3	Modellierungsergebnisse bei 500.000 Stück p.a.	151
8.3.4	Zusammenfassung.....	153
8.4	Verifikation des Modells.....	154
9	Bewertung und Diskussion.....	156
9.1	Bewertung der Methode	156
9.2	Anwendung und Einbettung in den Methodenrahmen.....	158
9.2.1	Einsatzfelder der modifizierten massenspezifischen Kostenprognose.....	158
9.2.2	Positionierung zu den anderen Kostenprognosemethoden	162

9.2.3	Kopplung verschiedener Kostenprognosemethoden	165
9.3	Synthese	167
10	Zusammenfassung	169
11	Anhang	173
11.1	Verzeichnisse	173
11.1.1	Literaturverzeichnis	173
11.1.2	Abbildungsverzeichnis.....	179
11.1.3	Tabellenverzeichnis	181
11.1.4	Verzeichnis der Akronyme, Chemische Symbole und Formelzeichen	183
11.2	Verwendete Werte.....	186
11.2.1	Abschlagsfaktoren für Stückzahlvergleiche	186
11.2.2	Kolmogorov-Smirnov Test.....	187
11.2.3	Student t	188
11.2.4	Rohstoffkosten	189
11.3	Komponentenkosten und Verteilungsfunktionen	195
11.3.1	Membran.....	195
11.3.2	Gasdiffusionsschicht	197
11.3.3	Katalysator	198
11.3.4	Membran Elektroden Einheit (MEA)	199
11.3.5	Bipolarplatten	201
11.3.6	Dichtung.....	203
11.3.7	Endplatten.....	204
11.3.8	Sonstiges (Stack)	206
11.3.9	Pumpen	207
11.3.10	Verdichter & Lüfter	209
11.3.11	Schläuche & Rohre	211
11.3.12	Sensoren & Ventile	214
11.3.13	Regelungselektronik.....	217
11.3.14	Leistungselektronik	219
11.3.15	Batterie	220
11.3.16	Kraftstofftank.....	222
11.3.17	Gehäuse	224
11.3.18	Sonstiges (System)	226
11.3.19	Reformer.....	227
11.3.20	Shift- und PrOx-Reaktoren	228
11.3.21	Entschwefelung.....	229
11.3.22	Befeuchter.....	231
11.3.23	Nachbrenner	233
11.3.24	Luftfilter	233
11.3.25	Wärmeübertrager.....	235
11.3.26	Dampferzeuger	236
11.3.27	Sonstiges (Brennstoffaufbereitung)	237
11.4	Sonstiger Anhang.....	238
11.5	Danksagung	242