



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen	5
2.1	Nernstgleichung	6
2.2	Butler-Volmer-Gleichung	7
2.3	Maxwellgleichungen	9
3	Messtechnik und Darstellung	13
3.1	Messtechnik	13
3.1.1	Herkömmliches Brennstoffzellensystem	14
3.1.2	Flächiges Strommesssystem	17
3.1.3	Modifiziertes Brennstoffzellensystem	19
3.2	Darstellung der Ergebnisse	22
3.2.1	Stromverteilungen bei maximalem Strom	22
3.2.2	Darstellung des Flächensegmentes mit maximalem Strom	24
3.2.3	Darstellung der Mittelwerte der Segmentzeile und Segmentspalte	25
4	Strominhomogenitätsmessungen	27
4.1	Variation der Parameter bei konstantem Strom	28
4.2	Variation der Parameter bei veränderlichem Strom	31
4.2.1	Temperaturverhalten bei veränderlichem Strom	37
4.2.2	Stöchiometrieänderung bei veränderlichem Strom	42
4.2.3	Rezirkulationsänderung bei veränderlichem Strom	47
4.2.4	Zusammenfassende Betrachtung der Variation eines Parameters	53



4.3	Variation zweier Parameter bei veränderlichem Strom	54
4.3.1	Niedrige Rezirkulation und hohe Stöchiometrie	55
4.3.2	Hohe Rezirkulation und niedrige Stöchiometrie	58
4.3.3	Hohe Rezirkulation und hohe Stöchiometrie	60
4.3.4	Zusammenfassende Betrachtung der Auswirkung zweier Parameter	63
4.4	Strominhomogenitäten innerhalb der Brennstoffzelle bei Variation von nur einem Parameter	64
4.4.1	Strominhomogenitätsverlauf durch den Brennstoffzellenstack bei Variation der Temperatur	64
4.4.2	Strominhomogenitätsverlauf durch den Brennstoffzellenstack bei Variation der Purgedauer	66
4.4.3	Strominhomogenitätsverlauf durch den Brennstoffzellenstack bei Variation des Purgeintervalls	68
4.4.4	Strominhomogenitätsverlauf durch den Brennstoffzellenstack bei Variation der Stöchiometrie	69
4.4.5	Strominhomogenitätsverlauf durch den Brennstoffzellenstack bei Variation der Rezirkulation	71
4.4.6	Zusammenfassung der Variation eines Parameters	73
4.5	Strominhomogenitätsverlauf durch den Brennstoffzellenstack bei Variation von zwei Parametern	74
4.5.1	Strominhomogenitätsverlauf durch den Brennstoffzellenstack bei niedriger Rezirkulation und hoher Stöchiometrie	74
4.5.2	Strominhomogenitätsverlauf durch den Brennstoffzellenstack bei hoher Rezirkulation und hoher Stöchiometrie	75
4.5.3	Strominhomogenitätsverlauf durch den Brennstoffzellenstack bei hoher Rezirkulation und niedriger Stöchiometrie	76
4.6	Beständigkeit der Strominhomogenität bei Bezug von konstantem Strom	77
4.7	Strominhomogenitäten bei Verwendung der Brennstoffzelle als Antrieb im Elektroauto	81
4.8	Zusammenfassung der Strominhomogenitätsmessungen	85



5	Veränderte Medienführung zur Reduzierung der Strominhomogenitäten	87
5.1	Einführung	87
5.2	Verlauf des Strommaximums zwischen Zelle 3/4 des Brennstoffzellenstacks	88
5.3	Verlauf des Strommaximums durch den Brennstoffzellenstack hindurch . .	90
5.4	Stromverteilungen im Brennstoffzellenstack bei maximalen Strömen . . .	93
5.5	Vergleich von Strom, Spannung und Leistung	104
5.6	Standardabweichung	108
5.7	Zusammenfassung der Ergebnisse zur veränderten Medienführung	113
6	3D Modell mit den fundamentalen Alterungsmechanismen	115
6.1	Reaktionsgleichungen	115
6.2	Ruhepotential	116
6.3	Nernstspannung	118
6.4	Durchtrittsüberspannung und Doppelschichtkapazität	119
6.5	Druckabnahme durch Reibung	120
6.6	Stoffmengenverbrauch der Reaktionen	122
6.7	Diffusionsüberspannung	122
6.8	Mischpotential	123
6.9	Ergebnisse des 3D Modells	123
7	Modell auf Grundlage des Larminie-Dicks-Modells	127
7.1	Larminie-Dicks-Formel	127
7.2	Zuordnung der einzelnen Parameter zu Alterungsprozessen	130
7.2.1	Elektrodendegradation	130
7.2.2	Membrandegradation	132
7.2.3	Degradation der Gasdiffusionsschicht	133
7.2.4	Tabellarische Zusammenfassung der Degradationen	134
7.3	Sensitivitätsanalyse der Parameter der Larminiefunktion	139
8	Lebensdauerprognose für Brennstoffzellen unter Verwendung des Larminiemodells	149
8.1	Aufbereitung der Daten	150



8.2	Bestimmung der Parameter der Polarisationskurven	152
8.3	Zeitverläufe der einzelnen Parameter	155
8.3.1	Ruhespannung E_0	157
8.3.2	Koeffizient der Aktivierungsüberspannung A	157
8.3.3	Flächenspezifischer Widerstand r	159
8.3.4	Austauschstromdichte i_0	159
8.3.5	Fuel Crossover und interne Ströme i_n	160
8.3.6	Koeffizient m des Massentransport- und Konzentrationsterms . . .	160
8.3.7	Exponentialkoeffizient n des Massentransport- und Konzentrations- terms	161
8.4	Evaluation der ermittelten Parameterverläufe	161
8.5	Prognose der Lebensdauer	165
8.6	Prognose der Lebensdauer aus einem Leistungsprofil	171
8.7	Parameterverläufe weiterer Brennstoffzellen	172
8.8	Vergleich zu anderen Modellen	182
8.8.1	Semi-empirisches Diagnosemodell	183
8.8.2	Theoretisches Diagnosemodell	184
8.8.3	Empirische Prognosemodelle	186
8.8.4	Semi-empirische Prognosemodelle	187
8.8.5	Theoretische Prognosemodelle	192
8.9	Fazit	199
9	Übertragung des Modells auf Batterien	201
9.1	Direkte Anwendung des Lebensdauerprognosemodells	201
9.2	Anpassung der Batteriedaten zur Verwendung des Lebensdauerprognose- modells und zugehörige Ergebnisse	204
9.3	Prognose der Lebensdauer für Batterien	207
10	Zusammenfassung und Ausblick	211
10.1	Zusammenfassung	211
10.2	Ausblick	214
11	Nomenklatur	215



12 Anhang	231
12.1 Weitere Parameteruntersuchungen bei variablem Strom	231
12.1.1 Änderung der Purgedauer bei veränderlichem Strom	231
12.1.2 Änderung des Purgeintervalls bei veränderlichem Strom	234
12.2 Reproduzierte Messungen zur veränderten Medienführung	236
12.3 Programmoberfläche zum 3D Modell in Matlab Simulink	239