

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	V
Formelzeichen	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	3
1.2 Aufbau der Arbeit	4
2 Stand der Wissenschaft.....	7
2.1 Physikalische Grundlagen und Nomenklatur von Lithium-Ionen-Zellen	9
2.1.1 Einsatz und Überwachung von Lithium-Ionen-Zellen im Automobil	9
2.1.2 Funktionsweise von Lithium-Ionen-Zellen.....	10
2.1.3 Nomenklatur.....	11
2.2 Degradation und Alterung von Lithium-Ionen-Zellen.....	19
2.2.1 Kalendrische Alterung	19
2.2.2 Zyklische Alterung.....	20
2.2.3 Degradationseffekte	21
2.2.4 Alterungsabhängigkeit der Ruhespannungskennlinie	23
2.3 Modellbildung und Simulation	24
2.3.1 Energiebetrachtung auf Basis der Peukert-Gleichung	25
2.3.2 Mehrdimensionale physikalisch-chemische Modelle	25
2.3.3 Mathematische Black-Box-Modelle	26
2.3.4 Elektrische Ersatzschaltkreismodelle	26
2.3.5 Zustandsraumdarstellung auf Basis des RC-Modells 2. Ordnung.....	27
2.3.6 Bewertung der Modellansätze	30
2.4 Methoden zur Ladezustandsbestimmung.....	31
2.4.1 Ladungsbilanzierung	31
2.4.2 Auswertung der inversen Ruhespannungskennlinie	32
2.4.3 Kalmanfilter mit Ausgangslinearisierung.....	33
2.4.4 Sigma-Punkt Kalman Filter.....	36
2.4.5 Datenbasierte Methoden	38
2.4.6 Bewertung der Methoden zur Ladezustandsbestimmung	39
2.5 Methoden zur Bestimmung des Degradationszustands	39

2.5.1	Zyklenzähler zur Berechnung der nutzbaren Kapazität	40
2.5.2	Duales Erweitertes Kalman-Filter zur Parameterbeobachtung	41
2.5.3	Recursive Least Square – Methode zur Kapazitätsschätzung	43
2.5.4	Bewertung der Methoden zur Schätzung der Degradation	44
2.6	Energieprädiktion eines Elektrofahrzeugs.....	44
3	Voruntersuchungen und Kritik am Stand der Wissenschaft.....	47
3.1	Implementierung und Validierung eines Extended Kalman-Filters.....	47
3.1.1	Beobachtbarkeit	47
3.1.2	Testumgebung	49
3.1.3	Konvergenz.....	50
3.1.4	Rechenleistung und Bus-Auslastung.....	51
3.2	Implementierung eines dualen Kalman-Filters zur Parameterschätzung	52
3.2.1	Linearisierung im Arbeitspunkt und Initialisierung des Filters.....	53
3.2.2	Beobachtbarkeit der Systemparameter	54
3.2.3	Simulationsumgebung und Konvergenzanalyse des dualen Kalman-Filters	54
3.3	Kritik am Stand der Wissenschaft	57
3.4	Konzept „Commuters‘ cycle monitoring“	58
3.4.1	Degradationsindikatoren	59
3.4.2	Berechnung der nutzbaren Kapazität	61
3.4.3	Berechnung des Innenwiderstands	61
4	Vorgehen	63
4.1	Versuchsfahrzeug NEmo-Smart	64
4.2	Prüfstandsversuche zur Quantifizierung der Degradationseinflüsse	66
4.3	Serienfahrzeug VW eGolf	67
4.4	Längsdynamikmodell zur Simulation von einzelnen Fahrzyklen	70
4.4.1	Anforderungen	71
4.4.2	Modellierungsansatz	71
4.4.3	Komponenten des Längsdynamikmodells	72
4.4.4	Modellierung und Simulation der Traktionsbatterie.....	74
4.4.5	Modell und Simulation der Sensorik	74
4.5	Gesamtfahrzeugmodell zur Lebenszyklus-Simulation.....	75
4.5.1	Nutzerszenario	76
4.5.2	Degradation der Traktionsbatterie	78
5	Implementierung des Commuters‘ cycle monitoring.....	81
5.1	Schematischer Ablauf	81
5.2	Ähnlichkeitsanalyse der Referenzfahrten	82

5.3	Kapazitätsbestimmung und Aktualisierung des Filtermodells.....	85
5.4	Prämissen und Einschränkung der Methodik.....	86
5.5	Einsatz in Serienanwendungen	87
6	Ergebnisse und Diskussion.....	91
6.1	Simulationsergebnisse zur Schätzung der Kapazität	91
6.2	Betrachtung der Ladezustands- und Degradationsschätzung.....	96
6.3	Prüfstandsversuche zur Validierung des Commuters' cycle monitoring	98
6.4	Fahrversuche zur Ähnlichkeitsanalyse von Referenzfahrten.....	100
7	Zusammenfassung und Ausblick	103
	Abbildungsverzeichnis	i
	Tabellenverzeichnis	v
	Literaturverzeichnis	vii
	Vorveröffentlichungsliste	xxiii
	Anhang.....	xxvii
Anhang-A	Vergleich BEV Serienmodelle	xxviii
Anhang-B	Fahrprofile	xxxii
Anhang-C	Einfluss Degradation auf SOC-Schätzung	xxxiii
Anhang-D	Einfluss der Degradation – hohe Stabilität.....	xxxiv
Anhang-E	Einfluss der Degradation – schnelle Konvergenz.....	xxxv
Anhang-F	Berechnung der Jacobi-Matrix.....	xxxvi
Anhang-G	Parametersatz des 2-RC Modells	xxxviii
Anhang-H	Einfluss der Degradation auf R _i -Schätzung	xxxix
Anhang-I	Einfluss der Degradation auf C _n -Schätzung.....	xl
Anhang-J	Optimierte Parametersätze zur Initialisierung des DEKF	xli
Anhang-K	Einfluss der Degradation auf SOC-Schätzung	xlii
Anhang-L	Einfluss der Degradation auf die Parameterschätzung	xliii
Anhang-M	Längsdynamikmodell.....	xliv
Anhang-N	Parameter des Forschungsfahrzeugs.....	xlv
Anhang-O	Fahrtstrecke der Pendlerfahrten	xlvi
Anhang-P	Parameter des Alterungsmodells.....	xlvii
Anhang-Q	Parametrierung der Fahrzyklen.....	xlviii
Anhang-R	Ergebnisse der Ladezustandsschätzung	xlix
Anhang-S	Kennwerte der Längsdynamik	li