

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Formelzeichen .....</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Motivation.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Aufbau der Arbeit .....</b>	<b>4</b>
<b>2 Stand der Wissenschaft.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 Physikalische Grundlagen und Nomenklatur von Lithium-Ionen-Zellen .....</b>	<b>9</b>
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
<b>2.2 Degradation und Alterung von Lithium-Ionen-Zellen.....</b>	<b>19</b>
2.2.1 Kalendarische Alterung .....	19
2.2.2 Zyklische Alterung .....	20
2.2.3 Degradationseffekte .....	21
2.2.4 Alterungsabhängigkeit der Ruhespannungskennlinie .....	23
<b>2.3 Modellbildung und Simulation .....</b>	<b>24</b>
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
<b>2.4 Methoden zur Ladezustandsbestimmung.....</b>	<b>31</b>
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
<b>2.5 Methoden zur Bestimmung des Degradationszustands .....</b>	<b>39</b>

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
<b>2.6</b>	<b>Energieprädiktion eines Elektrofahrzeugs .....</b>	<b>44</b>
<b>3</b>	<b>Voruntersuchungen und Kritik am Stand der Wissenschaft .....</b>	<b>47</b>
<b>3.1</b>	<b>Implementierung und Validierung eines Extended Kalman-Filters .....</b>	<b>47</b>
3.1.1	Beobachtbarkeit .....	47
3.1.2	Testumgebung .....	49
3.1.3	Konvergenz .....	50
3.1.4	Rechenleistung und Bus-Auslastung .....	51
<b>3.2</b>	<b>Implementierung eines dualen Kalman-Filters zur Parameterschätzung ....</b>	<b>52</b>
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
<b>3.3</b>	<b>Kritik am Stand der Wissenschaft .....</b>	<b>57</b>
<b>3.4</b>	<b>Konzept „Commuters' cycle monitoring“ .....</b>	<b>58</b>
3.4.1	Degradationsindikatoren .....	59
3.4.2	Berechnung der nutzbaren Kapazität .....	61
3.4.3	Berechnung des Innenwiderstands .....	61
<b>4</b>	<b>Vorgehen .....</b>	<b>63</b>
<b>4.1</b>	<b>Versuchsfahrzeug NEMO-Smart .....</b>	<b>64</b>
<b>4.2</b>	<b>Prüfstandsversuche zur Quantifizierung der Degradationseinflüsse .....</b>	<b>66</b>
<b>4.3</b>	<b>Serienfahrzeug VW eGolf .....</b>	<b>67</b>
<b>4.4</b>	<b>Längsdynamikmodell zur Simulation von einzelnen Fahrzyklen .....</b>	<b>70</b>
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
<b>4.5</b>	<b>Gesamtfahrzeugmodell zur Lebenszyklus-Simulation .....</b>	<b>75</b>
4.5.1	Nutzerszenario .....	76
4.5.2	Degradation der Traktionsbatterie .....	78
<b>5</b>	<b>Implementierung des Commuters' cycle monitoring .....</b>	<b>81</b>
<b>5.1</b>	<b>Schematischer Ablauf .....</b>	<b>81</b>
<b>5.2</b>	<b>Ähnlichkeitsanalyse der Referenzfahrten .....</b>	<b>82</b>

5.3	Kapazitätsbestimmung und Aktualisierung des Filtermodells .....	85
5.4	Prämisse 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 .....	xl ii
Anhang-L	Einfluss der Degradation auf die Parameterschätzung .....	xl iii
Anhang-M	Längsdynamikmodell.....	xl iv
Anhang-N	Parameter des Forschungsfahrzeugs.....	xl v
Anhang-O	Fahrtstrecke der Pendlerfahrten .....	xl vi
Anhang-P	Parameter des Alterungsmodells.....	xl vii
Anhang-Q	Parametrierung der Fahrzyklen.....	xl viii
Anhang-R	Ergebnisse der Ladezustandsschätzung .....	xl ix
Anhang-S	Kennwerte der Längsdynamik .....	li