

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Ziel	1
1.2	Einführung in die Arbeit	2
2	Lithium-Ionen-Sekundärbatterien	5
2.1	Lithium-Ionen-Akkumulatoren und deren Anwendung	5
2.2	Funktionsweise und Aufbau	7
2.3	Überblick zur Technologieentwicklung	10
2.4	Lithium-Ionen-Batterien mit LiFePO_4 -basierter Kathode	13
3	Batteriespeichersysteme	15
3.1	Anwendungsfälle und Anforderungen	15
3.2	Architektur des Batteriesystems	18
3.2.1	Dimensionierung	18
3.2.2	Verschaltung	19
3.2.3	Batterie-Elektronik	22
3.2.4	Batterieladevorrichtungen für Automobilanwendungen und Ladeverfahren	23
3.2.5	Integration	24
3.3	Batteriekennwerte und Zustandsdaten	25
3.3.1	Zellkenndaten	25
3.3.2	Symmetrierter/unsymmetrierter Speicher	26
3.3.3	Systemkennwerte	27
3.3.4	SOC, SOF und SOH	27
3.3.5	Batteriefunktionen	29
4	Batteriemodelle	31
4.1	Hintergrund	31
4.2	Physikalisch-chemische Batteriemodelle	31
4.2.1	Teilchenmigration durch Diffusion	32
4.2.2	Modell der porösen Elektrode	33
4.2.3	Zwei-Phasentransformation, Shrinking-Core-Theorie und anisotrope Interkalation	35
4.3	Elektrische Batteriemodelle	39
4.3.1	Thevenin Ersatzschaltbild	39
4.3.2	Constant Phase Element, ZARC, Warburg-Impedanz	40

4.4	Elektrisch-thermisch gekoppelte, aufgelöste Batteriemodelle	41
5	Zellcharakterisierung und Modellierung	45
5.1	Untersuchte Zellen und verwendetes Messequipment	45
5.2	Ruhespannungseigenschaften	46
5.2.1	Ruhespannung und Abklingverhalten	46
5.2.2	OCV-Hysterese	50
5.2.3	Hysteresemodell der Ionenveramten Poren	53
5.3	Batterieverhalten bei elektrischer Belastung	60
5.3.1	Kleinsignalverhalten	60
5.3.2	Elektrische Leistungscharakteristik	62
5.3.3	Lade-/Entladecharakteristik	66
5.3.4	Ladevorgeschichte abhängige Leistungsfähigkeit und nutzbare Kapazität	71
5.3.5	Vanishing Phase Effect	76
5.4	Alterung von Lithium-Ionen-Zellen	78
5.4.1	Alterungseinfluss	79
5.4.2	Grenznutzbarkeit	81
5.4.3	Alterungsbedingte Änderung der Eigenschaften der LFP-P-Zellen	81
6	Adaption von Batterieimpedanz und Leistungsfähigkeit	85
6.1	Motivation	85
6.2	Grundlagen	86
6.2.1	Literaturübersicht zu bekannten Verfahren für die Batterieimpedanzbestimmung	86
6.2.2	Kontinuierliche und zeitdiskrete Übertragungsfunktionen	88
6.3	Iterative Bestimmung von Impedanzparametern	91
6.3.1	Rekursive Parameterfilterung – ein Minimalbeispiel	92
6.3.2	Bestimmung der Ersatzschaltbildparameter	94
6.3.3	Schätzung der Impedanz der LFP-P-Zellen im Betrieb	97
6.3.4	Zellspezifische Impedanzbestimmung	101
6.4	Selbstlernende Impedanzkennfelder	105
6.4.1	Initiale Impedanzkennfelder	105
6.4.2	Lineare Interpolation mehrdimensionaler Kennfelder	106
6.4.3	Lokale Adaption	107
6.4.4	Globale Kennfeldadaption	109
6.5	Leistungsfähigkeit und -vorhersage	111
6.5.1	Belastungslimitierung	111
6.5.2	Impedanzbasierte Leistungsvorhersage	112
6.5.3	Besonderheit bei LFP-P-Zellen	114
6.5.4	Thermische Limitierung und Restladungsvorhalt	114
7	Ladezustandserkennung	117
7.1	Motivation	117
7.2	Übersicht zu expliziten Methoden zur Ladezustandsbestimmung von Batterien	118

7.2.1	Restladungstest	118
7.2.2	Ladungsintegration	118
7.2.3	Spannungsauswertung	118
7.2.4	Impedanzauswertung und Durchtrittsfrequenz	119
7.2.5	Fuzzylogik-Systeme, Expertensysteme und künstliche neuronale Netze	119
7.2.6	Bewertung expliziter Verfahren zur SOC-Bestimmung	120
7.3	Grundlagen modellbasierter Zustandserkennung	120
7.3.1	Zustandsraumdarstellung	120
7.3.2	Grundprinzip der modellbasierten Zustandserkennung	121
7.3.3	Zustandsbeobachter	121
7.3.4	Systembeobachtbarkeit und die Definition struktureller Beobachtbarkeit	122
7.4	Modellbasierte Ladezustandserkennung von Li-ion-Zellen mit LiFePO ₄ -basierter Kathode	122
7.4.1	Übersicht zu modellbasierten Methoden zur Zustandsbestimmung für Li-ion-Batterien	123
7.4.2	Batteriemodell der LFP-P	124
7.4.3	Grundstruktur des SOC-Beobachters mit dem LFP-P-Batteriemodell	128
7.4.4	Validierungstest, Ergebnisse und Beurteilung der Genauigkeit	129
7.4.5	Reduzierte SOC-Beobachtung mit adaptiver Spannungsvorfilterung	132
7.5	Zellselektive Ladezustandsbestimmung von Batteriesystemen	134
8	Degradations- und Alterungserkennung	139
8.1	Leistungsdegradation	139
8.2	OCV-Adaptionsverfahren und Kapazitätsverlusterkennung	141
8.2.1	Definition der Betriebskapazität	141
8.2.2	Kennlinienadaption	141
8.2.3	Bereichsadaption	142
8.3	Stützende Verfahren zur Erfassung der Batteriealterung	143
9	Zusammenfassung	145
	Literaturverzeichnis	151
	Anhang	167
A.1	Schnellladeverfahren	168
A.2	Untersuchung der Robustheit des SOC-Beobachters	171
A.3	Hysteresemodell der ionenverarmten Poren - elektrisches Modell	175
A.4	Konventionen	178
A.5	Formelzeichen	178
A.6	Liste der Abkürzungen	183
A.7	Einheiten (nicht SI) und Konstanten	184
A.8	Lebenslauf	185