



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Kurzfassung</b>	<b>I</b>
<b>Abstract</b>	<b>III</b>
<b>Danksagung &amp; Vorwort</b>	<b>V</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation & Zielsetzung . . . . .	2
1.2 Abgrenzung der Arbeit . . . . .	5
1.3 Einführung in die Arbeit . . . . .	6
1.4 Forschungsbeiträge dieser Arbeit . . . . .	13
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>19</b>
2.1 Elektrochemische Energiespeicher . . . . .	19
2.1.1 Lithium-Ionen-Akkumulatoren . . . . .	20
2.1.2 Ruhespannungs- & Hystereseverhalten . . . . .	23
2.1.3 Elektrochemische Impedanzspektroskopie . . . . .	25
2.1.4 Innenwiderstand . . . . .	28
2.2 Batteriezustand . . . . .	29
2.2.1 Ladezustand . . . . .	29
2.2.2 Alterungszustand . . . . .	31
2.2.3 Funktionszustand . . . . .	31
2.3 Batteriemodellierung . . . . .	32
2.3.1 Elektrisches Batterieersatzschaltbild . . . . .	33
2.3.2 Helmholtz-Thevenin-Äquivalent . . . . .	33
2.3.3 Konstantphasen- & ZARC-Element . . . . .	34
2.3.4 Iterative Prädiktion der Ersatzschaltbildparameter . . . . .	35
2.4 Verfahren zur Ladezustandsbestimmung . . . . .	37
2.4.1 Stromintegrationsbasierte Verfahren . . . . .	38
2.4.1.1 Restentladungstest . . . . .	38
2.4.1.2 Amperestunden-Bilanzierung . . . . .	38



2.4.1.3	Elektrisches Batterieersatzschaltbild . . . . .	40
2.4.2	Heuristische Verfahren . . . . .	40
2.4.3	Zustandsraumbasierte Verfahren . . . . .	41
2.4.3.1	Grundlagen der Zustandsraummodellierung . . . . .	41
2.4.3.2	Batteriezustandsraummodell . . . . .	43
2.4.3.3	Zustandsbeobachter . . . . .	44
2.4.3.4	Kalman-Filter . . . . .	45
2.4.3.5	Vergleich der zustandsraumbasierten Verfahren . . . . .	47
2.4.4	Klassifikationsverfahren . . . . .	48
2.4.4.1	Grundlagen der Mustererkennung . . . . .	50
2.4.4.2	Stützvektormaschine . . . . .	51
2.4.4.3	Künstliche Neuronale Netze . . . . .	53
2.4.4.4	Fuzzylogikbasierte Verfahren . . . . .	56
2.5	Bewertung der bekannten Verfahren zur Ladezustandsbestimmung . . . . .	57
2.5.1	Stromintegrationsbasierte Verfahren . . . . .	57
2.5.2	Zustandsraumbasierte Verfahren . . . . .	58
2.5.3	Maschinell Lernende Verfahren . . . . .	59
2.5.4	Zusammenfassende Bewertung der Verfahren . . . . .	60
<b>3</b>	<b>Neuartige Methoden zur Ladezustandsbestimmung</b>	<b>63</b>
3.1	LiFePO <sub>4</sub> -Versuchszellen . . . . .	64
3.1.1	Ruhespannungsverhalten der Versuchszellen . . . . .	66
3.1.2	Ladezustandsverhalten im Frequenzbereich . . . . .	68
3.1.3	Temperaturverhalten im Frequenzbereich . . . . .	69
3.2	Zustandsraumbasierte Verfahren mit Parameterprädiktion . . . . .	70
3.2.1	Vergleich zustandsraumbasierter Verfahren mit Parameterprädiktion	73
3.2.1.1	Ergebnisse der numerischen Simulation . . . . .	74
3.2.1.2	Zusammenfassung zustandsraumbasierter Verfahren . . . . .	76
3.2.2	Relative Alterungsnachführung der Batterieparameter . . . . .	77
3.3	Sensorlose Temperaturbestimmung . . . . .	77
3.4	Ladezustandsbestimmung mittels frequenzbasierter Daten . . . . .	80
3.4.1	Simulation der Messungenauigkeiten bei der Impedanzbestimmung	82
3.4.2	Ladezustandsbestimmung via Stützvektormaschine . . . . .	84
3.4.2.1	Impedanzortskurvenklassifikation . . . . .	84
3.4.2.2	Impedanzklassierung . . . . .	85
3.4.2.3	Lineare Suche . . . . .	88
3.4.2.4	Balancierte Baumsuche . . . . .	89
3.4.2.5	Unbalancierte Baumsuche . . . . .	92
3.4.2.6	Zusammenfassung & Vergleich der SVM-Suchalgorithmen	93



3.4.2.7	Relative Alterungsnachführung der Impedanzortskurven	96
3.4.3	Ladezustandsbestimmung via Nächste-Nachbarn-Klassifikator	97
3.4.3.1	Impedanzortskurvenklassifikation	99
3.4.3.2	Impedanzklassierung	99
3.4.3.3	$k$ -Nächste-Nachbarn-Klassifikation	101
3.4.4	Ladezustandsbestimmung mit Künstlichen Neuronalen Netzen	102
3.4.4.1	Impedanzklassierung	105
3.4.4.2	Einfluss von Zwischenschichten & Neuronen	106
3.5	Vergleich der neuartigen Methoden	107
3.5.1	Vorteile der Methoden	109
3.5.2	Nachteile der Methoden	110
3.5.3	Synergien der Methoden	110
3.5.4	Anwendungsmöglichkeiten der Methoden	111
3.6	Konzept eines hybriden Algorithmus zur Ladezustandsbestimmung	111
3.6.1	Prinzip & Methodik	112
3.6.2	Numerische Simulation	116
3.6.3	Ergebnisse & Zusammenfassung	118
<b>4</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>119</b>
4.1	Neuheitswert gegenüber dem aktuellen Stand der Forschung	119
4.1.1	Erweiterung der zustandsraumbasierten Verfahren	119
4.1.2	Sensorlose Zellkerntemperaturbestimmung	120
4.1.3	Relative Alterungsnachführung	121
4.1.4	Ladezustandsbestimmung mittels Frequenzdaten	121
4.1.5	Hybrider Algorithmus zur Ladezustandsbestimmung	122
4.2	Technischer Nutzen	123
4.2.1	Erweiterter Zustandsschätzer	123
4.2.2	Sensorlose Temperaturbestimmung	123
4.2.3	Impedanzklassierung zur Ladezustandsbestimmung	123
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>125</b>
5.1	Fazit	126
5.2	Ausblick	127
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>131</b>
A.1	Batterieversuchsträger	131
A.1.1	Systemkennwerte & Dimensionierung	132
A.1.2	Batteriemanagementsystem	133
A.2	Fahrzyklen	134
A.3	Herleitung des Batteriezustandsraummodells	136



## *Inhaltsverzeichnis*

A.4 Zustandsschätzung mit alternativer Zellchemie . . . . .	140
A.5 Betreute Abschlussarbeiten . . . . .	142
A.6 Publikationen . . . . .	143
A.6.1 Konferenzbeiträge . . . . .	143
A.6.2 Konferenzposter . . . . .	144
A.6.3 Offenlegungs- & Patentschriften . . . . .	144
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>145</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>149</b>
<b>Glossar</b>	<b>155</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>161</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>163</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>165</b>