

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Gliederung	1
1.1	Motivation und Hintergrund	1
1.2	Ausgangspunkt und Zielsetzung	3
1.3	Aufbau der Arbeit	5
2	Grundlagen der Batteriemodellierung und der Impedanzspektroskopie	9
2.1	Batteriesysteme und deren Überwachung	9
2.1.1	Traktionsakkumulatoren im elektrischen Antriebsstrang	9
2.1.2	(Intelligente) Batteriemanagementsysteme	10
2.2	Modellierung von Batteriezellen	12
2.2.1	Lithium-Ionen-Zellen als elektrochemisches System	12
2.2.2	Wichtige Zustandsgrößen und deren Bestimmung	13
2.2.2.1	Der Ladezustand und die Leerlaufspannung	13
2.2.2.2	Der Alterungszustand	14
2.2.2.3	Die Zelltemperatur	14
2.2.3	Die Batteriezelle als Zweipol	15
2.2.3.1	Ersatzschaltungen und deren Modellparameter	15
2.2.3.2	Verhalten im Gleich- und Wechselstromkreis	17
2.2.3.3	Komplexe Wechselstromrechnung	18
2.3	Das Impedanzspektrum einer Batteriezelle	19
2.3.1	Beschreibung von linearen zeitinvarianten Systemen	19
2.3.1.1	Übergang vom Zeit- in den Frequenzbereich mit der Fourier-Transformation	19
2.3.1.2	Die Impulsantwort und der Frequenzgang	19
2.3.1.3	Lineare Systemidentifikation von Zellimpedanzen	21
2.3.2	Gültigkeit der Linearisierung und Validierung der Systemidentifikation	23
2.3.2.1	Entstehung von Oberschwingungen	23
2.3.2.2	Der lineare Kramers-Kronig-Test	24

2.3.3	Nichtlineare Systemtheorie zur Charakterisierung des Zellverhaltens	28
2.3.3.1	Modellierung von nichtlinearen Systemen	28
2.3.3.2	Datengetriebener Ansatz	29
3	Optimierte Anwendung von Impedanzmessdaten	31
3.1	Impedanzbasierte Temperaturschätzung	31
3.1.1	Stand der Technik und Verbreitung	31
3.1.2	Vergleich verschiedener Modellierungsansätze	34
3.2	Alterungsbestimmung und Sensitivitätsanalysen	39
3.2.1	Konventionelle und neuartige Methoden zur Bestimmung der Batteriealterung	39
3.2.1.1	Übersicht über zerstörungsfreie Prüfmethoden	39
3.2.1.2	Beschleunigte Alterung und Alterungseffekte	40
3.2.1.3	Korrelation zwischen Widerstand und Kapazität beim Laden	42
3.2.2	Impedanzbasierte Schätzung des Alterungszustands	43
3.2.2.1	Verwendung charakteristischer Frequenzen	43
3.2.2.2	Quantifizierung des Temperatureinflusses durch eine Sensitivitätsanalyse	44
3.2.2.3	Kompensation des Quereinflusses mit einem Temperaturmodell	48
3.2.2.4	Validierungstest auf Modulebene	51
3.3	Nichtlineare EIS und Krafteinfluss	53
3.3.1	Einordnung und Literaturübersicht	53
3.3.2	Versuchsaufbau mit mechanischer Verspannung von Pouch-Zellen	55
3.3.3	Durchführung und Auswertung der Versuchsreihen	57
3.3.3.1	Auswirkung erhöhter Anregungsamplituden	57
3.3.3.2	Korrelation zwischen Flächenpressung und Impedanz .	58
3.3.3.3	Einfluss der Temperatur und des SoCs auf die nichtlineare Impedanz	61
3.3.4	Zusammenfassung und Einfluss der Messung auf Temperatur und SoC	63
4	Implementierung von Impedanzspektroskopie und Parameterschätzverfahren	67
4.1	Grundlagen einer anwendungsbezogenen Implementierung	68
4.1.1	Analyse der Fahrzeugumgebung	68
4.1.1.1	Störquellen im Fahrzeug	68

4.1.1.2	Untersuchung real gemessener Stromprofile	68
4.1.2	Überblick über den Stand der Technik und Wissenschaft	70
4.2	Passive Impedanzspektroskopie	79
4.2.1	Numerische Umsetzung der Fourier-Transformation	79
4.2.1.1	Herleitung der diskreten Fourier-Transformation	79
4.2.1.2	Anschauliches Beispiel und der Alias-Effekt	80
4.2.1.3	Der Leck-Effekt	82
4.2.1.4	Vorteilhafte Implementierung der Fourier-Transformation	84
4.2.2	Rahmenbedingungen und Störeinflüsse der Systemidentifikation im Frequenzbereich	84
4.2.3	Schätzverfahren für periodische Anregungssignale	86
4.2.4	Schätzverfahren für zufällige Anregungssignale	88
4.2.4.1	Herleitung von Schätzern basierend auf der spektralen Leistungsdichte	88
4.2.4.2	Spektrale Leistungsdichten bei endlicher Datenlänge	90
4.2.4.3	Der WOSA-Algorithmus nach Welch	91
4.2.4.4	Optimale Parameterwahl für das Verfahren nach Welch	93
4.2.5	Experimentelle Untersuchungen unter Verwendung realer Fahr- daten	96
4.2.5.1	Reproduktion der Fahrumgebung am Batterieprüfstand	96
4.2.5.2	Optimierte Schätzer für passive EIS	99
4.2.5.3	Ergebnisse und Diskussion	100
4.2.6	Erweiterung und finale Bewertung der passiven Impedanzspek- troskopie	106
4.2.6.1	Konzept zur Aufteilung des Frequenzbereichs	106
4.2.6.2	Aktualisierte Resultate	107
4.2.6.3	Abschließende Bewertung und Übergang zur aktiven EIS	109
4.3	Aktive Impedanzspektroskopie	110
4.3.1	Untersuchung der Verfahren durch aktive Referenzanregung	110
4.3.1.1	Validierung der Signalkette	110
4.3.1.2	Auswahl des Schätzverfahrens als Einstellparameter	112
4.3.1.3	Analyse der zweistufigen Onboard-Methode	113
4.3.2	Einbringen von Schaltpulsen durch rekonfigurierbare Batterie- systeme	117
4.3.2.1	Prüfaufbau für rekonfigurierbare Batteriesysteme	117
4.3.2.2	Theoretische Analyse von Schaltsequenzen	120
4.3.2.3	Experimentelle Analyse des Schalteinflusses	121

4.3.3	Variation des Pulsmusters und generelle Erweiterung der Testbedingungen	124
4.3.3.1	Theoretische Betrachtung von Maximalfolgen	124
4.3.3.2	Experimentelle Untersuchung verschiedener Betriebsmodi	127
4.4	Hybride Impedanzspektroskopie	134
4.4.1	Konzeptionelle Einordnung	134
4.4.2	Modellbasierte Verfahren und deren sequentielles Update	135
4.4.2.1	Rekursive Minimierung einer Fehlerfunktion für komplexe Größen	135
4.4.2.2	Ergebnisse des ECM-basierten Ansatzes mit Onboard-Impedanzdaten	140
4.4.3	Datengetriebene Regressionsmodelle als künstliche neuronale Netze	142
4.4.3.1	Anpassung des RLS-Verfahrens an einen vektoriellen Eingang und zwei Ausgänge	142
4.4.3.2	Ergebnisse des RBF-basierten Ansatzes mit Onboard-Impedanzdaten	145
4.4.4	Einbindung und Regelung der Zusatzanregung	148
5	Zusammenfassung und Ausblick	149
5.1	Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse	149
5.2	Gesammelte Anforderungen an Hardware und Software	151
5.2.1	Systemarchitektur	151
5.2.2	Anregung	152
5.2.3	Messung	153
5.2.3.1	Abtastrate	153
5.2.3.2	Synchronität	153
5.2.3.3	Auflösung	154
5.2.4	Berechnung	154
5.3	Ausblick auf weiterführende Arbeiten	155
 Anhang		
A	Grundlegende Definitionen und Herleitungen	157
A.1	Stochastische Grundlagen und Signalanalyse	157
A.1.1	Stationarität und Ergodizität	157
A.1.2	Korrelation und Kovarianz	158
A.2	Leistungssignale und Signalleistung	159
A.2.1	Einordnung	159
A.2.2	Rauschen	159

A.2.3	Periodizität	160
A.3	Parameterschätzung und Stichproben	161
A.3.1	Fehlermaße	161
A.3.2	Mittelwert und Varianz	161
A.3.3	Rekursive Implementierung der Methode der kleinsten Quadrate	162
A.3.4	Matrix-Vektor-Schreibweise des linearen Kramers-Kronig-Modells	163
B	Zusätzliche Ergebnisse	165
C	Experimentelles	169
C.1	Messaufbauten	170
C.2	Verwendete Zellen	171
C.2.1	Pouch-Zelle CC	171
C.2.2	Rundzelle SMG	172
C.2.3	Prismatische Zelle PAN	173
C.3	Eingesetzte Fahrprofile	174
C.3.1	Elektrofahrzeug BEV	174
C.3.2	Elektrofahrzeug (P)HEV	175
C.3.3	Rennwagen FSE	175
	Abbildungsverzeichnis	177
	Tabellenverzeichnis	183
	Abkürzungsverzeichnis	185
	Symbolverzeichnis	187
	Begleitende Studienarbeiten	191
	Literaturverzeichnis	193