Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

2 Motivation 5

3 Batteriesensoren in der Feldanwendung 9
- 3.1 Alterungseffekte . . . 9
  - 3.1.1 Wasserverlust . . . 9
  - 3.1.2 Erosion . . . 10
  - 3.1.3 Sulfatierung . . . 11
  - 3.1.4 Korrosion . . . 12
- 3.2 Impedanzmessungen zur Alterungsdetektion an Bleibatterien . . . 14
  - 3.2.1 Verwendetes Equipment . . . 14
  - 3.2.2 Künstliche Alterung . . . 15
  - 3.2.3 Verwendete Batterietypen . . . 15
  - 3.2.4 Messergebnisse . . . 16
  - 3.2.5 Fazit . . . 21
- 3.3 Vergleich zwischen Batteriesensor und Labormessgerät . . . 21

4 Grundlagen der Impedanzspektroskopie 23
- 4.1 Anwendungsbereiche . . . 23
- 4.2 Messprinzip . . . 24
  - 4.2.1 Impedanzbegriff und LTI Systeme . . . 24
  - 4.2.2 Darstellungsformen . . . 27
  - 4.2.3 Anregungsarten . . . 31
- 4.3 Impedanzmessgeräte . . . 33
  - 4.3.1 Prinzipieller Aufbau von Impedanzmessgeräten . . . 34
  - 4.3.2 Anforderungen für elektrochemische Impedanz-Spektroskopie (EIS) an Batterien . . . 41
  - 4.3.3 Verwendetes Equipment . . . 51
- 4.4 Anregungsformen . . . 56
  - 4.4.1 Einzelfrequenz . . . 57
  - 4.4.2 Multifrequenz . . . 59
  - 4.4.3 Frequenz-Sweep / Chirp . . . 63
  - 4.4.4 „Current Interrupt“ Technik . . . 67
  - 4.4.5 Maximalfolgen . . . 69
- 4.5 Fazit . . . 74

Bibliografische Informationen
http://d-nb.info/1034689533

digitalisiert durch DEUTSCHE NATIONAL BIBLIOTHEK

5 Impedanzmessungen an Batterien als Beispiel für Nicht-LTI Systeme 75
5.1 Stromabhängigkeit der Batterieimpedanz . . . 75
5.2 Vermessung von Kleinsignal-Impedanzen . . . 78
5.2.1 Sinusförmige Signale an Nichtlinearitäten . . . 81
5.2.2 Intermodulation . . . 84
5.3 Nachführung der Anregungsamplitude . . . 87
5.3.1 Hybridmethode aus galvanostatischer und potentiostatischer Anregung 87
5.3.2 Oberwellengeführte Regelung der Anregungsamplitude . . . 88
5.3.3 Automatische Fehlerkorrektur durch Analyse der Harmonischen . . . 95
5.4 Stationarität . . . 100
5.5 Plausibilisierung der Messdaten . . . 102
5.6 Fazit . . . 104

6 Ein nichtlineares Impedanznormal 107
6.1 Aufbau . . . 108
6.1.1 Schaltbild . . . 108
6.1.2 Berechnung . . . 109
6.2 Simulations- und Messergebnisse . . . 112
6.3 Vergleich unterschiedlicher Impedanzspektroskope . . . 113
6.4 Stromabhängige Nichtlinearität . . . 120
6.4.1 Realisierung . . . 122
6.4.2 Vergleich zwischen Messung und Simulation . . . 124
6.4.3 Einfluss der Temperatur . . . 125
6.5 Fazit . . . 126

7 Impedanzspektroskopie für Batteriesensoren im Feldeinsatz 127
7.1 Kostengünstige Batteriesensoren . . . 128
7.1.1 Digitale Signalverarbeitung . . . 130
7.1.2 Analoge Schaltungstechnik . . . 131
7.2 Verwendung von Maximalfolgen . . . 132
7.2.1 Wahl der Länge . . . 133
7.2.2 Einfluss von Nichtlinearitäten . . . 140
7.2.3 Fazit . . . 142
7.3 Verwendung von Rechtecksignalen . . . 143
7.3.1 Sinus- und Rechteck Signal . . . 143
7.3.2 Periodische Rechteckfunktion . . . 144
7.3.3 Wahl der Abtastrate . . . 145
7.3.4 Einfluss der Stromabhängigkeit . . . 156
7.3.5 Auswertung der Grundwelle . . . 160
7.3.6 Messungen . . . 173
7.4 Fazit . . . 185

8 *Zusammenfassung* 187

A Anhang **195**
A.1 Schaltplan Impedanznormal 195
A.2 Formeln 197
A.2.1 Reihenentwicklung Rechteck an Nichtlinearität 197
A.2.2 Analytische Näherung Butler-Volmer-Widerstand R_{ct} 199

Abkürzungsverzeichnis **201**

Symbolverzeichnis **203**

Literaturverzeichnis **207**