



Jan Patrick Singer (Autor)
**Messmethoden zur Druckcharakterisierung und
Alterungsuntersuchung eingespannter LiFePO₄-
Zellen**

Herausgeber: Prof. Dr. Kai Peter Birke

ENERGIE & NACHHALTIGKEIT
Elektrische Energiespeichersysteme

Jan Patrick Singer

**Messmethoden zur Druckcharakterisierung
und Alterungsuntersuchung
eingespannter LiFePO₄-Zellen**

Elektrische
Energiespeichersysteme



Nachhaltige
CO₂-Kreisläufe



Elektromobilität &
Batterietechnologie



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8391>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Abstract | 1 |
| Zusammenfassung | 3 |
| 1 Einleitung | 5 |
| 1.1 Motivation | 5 |
| 1.2 Aufbau der Arbeit | 7 |
| 2 Grundlagen | 9 |
| 2.1 Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Zelle | 9 |
| 2.2 Thermodynamik der Lithium-Ionen-Zelle | 11 |
| 2.3 Zellkinetik | 13 |
| 2.3.1 Kontaktüberspannung | 14 |
| 2.3.2 Ohm'sche Überspannung | 14 |
| 2.3.3 Durchtrittsüberspannung | 14 |
| 2.3.4 Diffusionsüberspannung | 15 |
| 2.3.5 Temperaturabhängigkeit | 16 |
| 2.4 Reaktionsmechanismen und Volumenänderung der Aktivmaterialien | 16 |
| 2.4.1 Graphit-Anode | 17 |
| 2.4.2 Lithiumeisenphosphat-Kathode | 19 |
| 2.5 Zellalterung | 20 |
| 2.5.1 Anode | 20 |
| 2.5.2 Kathode | 21 |
| 2.5.3 Mechanischer Druck | 22 |
| 2.6 Batteriespezifische Kenngrößen | 23 |
| 3 Bestimmung charakteristischer Zellkenngrößen | 26 |
| 3.1 Spannungs- und Druckkennlinien | 27 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.2 | Differentielle Analysen von Spannungs- und Druckkennlinien | 29 |
| 3.3 | Impedanzanalyse | 31 |
| 3.3.1 | Theorie der Impedanzanalyse | 31 |
| 3.3.2 | Impedanzanalyse von RC-Gliedern | 32 |
| 3.4 | Verteilung der Relaxationszeiten | 34 |
| 3.4.1 | Theorie der DRT-Analyse | 34 |
| 3.4.2 | Physikalisches Zellmodell | 37 |
| 3.4.3 | DRT-Analyse der RC-Glieder | 40 |
| 3.4.4 | DRT als Funktion des Ladezustands | 41 |
| 3.4.5 | Verhaltensmodell versus physikalisches Modell | 43 |
| 3.5 | Kinetik der Gefügeumwandlung | 45 |
| 3.6 | Bestimmung des Diffusionskoeffizienten | 48 |
| 3.6.1 | Gleichstrommethode | 48 |
| 3.6.2 | Messgerätevergleich | 55 |
| 3.6.3 | Wechselstrommethode | 56 |
| 3.6.4 | Vergleich der Diffusionsmessmethoden | 58 |
| 4 | Elektrische Parameter und Zellkenngrößen | 60 |
| 4.1 | Kennlinienanalyse | 60 |
| 4.1.1 | Spannungskennlinie | 60 |
| 4.1.2 | Druckkennlinie | 68 |
| 4.2 | Kapazitäten, Energiemengen und Wirkungsgrade | 74 |
| 4.2.1 | Kapazitäten und Energiemengen | 74 |
| 4.2.2 | Wirkungsgrade | 77 |
| 4.3 | Innenwiderstand | 80 |
| 4.3.1 | EIS-Messung | 80 |
| 4.3.2 | GIT-T-Puls-Messung | 81 |
| 4.4 | Zwischenfazit | 85 |
| 4.4.1 | Kennlinienanalyse | 85 |
| 4.4.2 | Kapazitäten, Energiemengen und Wirkungsgrade | 85 |
| 4.4.3 | Innenwiderstand | 86 |
| 5 | Kinetik, Grenzflächen und Diffusion | 87 |
| 5.1 | Kinetik der Gefügeumwandlung | 87 |
| 5.2 | Grenzflächenuntersuchungen | 93 |
| 5.2.1 | Druckabhängigkeit der DRT | 93 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.2.2 | Druckabhängigkeit der Zeitkonstanten und RC-Ersatzgrößen | 94 |
| 5.2.3 | Aktivierungsenergien der Zeitkonstanten | 103 |
| 5.2.4 | Plausibilitätsprüfung der Aktivierungsenergien | 107 |
| 5.3 | Diffusionskoeffizienten | 110 |
| 5.3.1 | Druckabhängigkeit bei Raumtemperatur | 110 |
| 5.3.2 | Temperaturverhalten unter Druck | 112 |
| 5.4 | Zwischenfazit | 116 |
| 5.4.1 | Kinetik der Gefügeumwandlung | 116 |
| 5.4.2 | Grenzflächenuntersuchungen | 116 |
| 5.4.3 | Diffusionskoeffizienten | 117 |
| 6 | Zellalterung unter Druckeinwirkung | 119 |
| 6.1 | Kapazitätsverlauf | 119 |
| 6.2 | Druckverlauf | 121 |
| 6.3 | Differentielle Analysen | 124 |
| 6.3.1 | Differentielle Spannungsanalyse | 124 |
| 6.3.2 | Differentielle Kapazitätsanalyse | 127 |
| 6.3.3 | Differentielle Druckanalyse | 129 |
| 7 | Ausblick | 132 |
| A | Aktivierungsenergien der RC-Ersatzgrößen | 134 |
| B | Anmerkungen zum Diffusionskoeffizienten | 138 |
| C | Druck-Dehnungskurven | 140 |
| D | Gummiballon-Modell | 141 |
| | Abkürzungsverzeichnis | 143 |
| | Tabellenverzeichnis | 150 |
| | Abbildungsverzeichnis | 151 |
| | Literaturverzeichnis | 156 |
| | Veröffentlichungen | 171 |

| | |
|------------------|-----|
| Curriculum Vitae | 173 |
| Danksagung | 177 |
