

# Inhaltsverzeichnis

|                                                |           |
|------------------------------------------------|-----------|
| <b>Abstract</b>                                | <b>1</b>  |
| <b>Zusammenfassung</b>                         | <b>3</b>  |
| <b>1 Einleitung</b>                            | <b>5</b>  |
| 1.1 Motivation und Ziel der Arbeit . . . . .   | 5         |
| 1.1.1 Demontage von Batteriesystemen . . . . . | 6         |
| 1.1.2 Skalierung von Batteriezellen . . . . .  | 7         |
| 1.2 Forschungsfragen . . . . .                 | 9         |
| 1.2.1 Die erste Forschungsfrage . . . . .      | 9         |
| 1.2.2 Die zweite Forschungsfrage . . . . .     | 10        |
| 1.2.3 Die dritte Forschungsfrage . . . . .     | 11        |
| 1.3 Publikationen . . . . .                    | 16        |
| 1.4 Aufbau der Arbeit . . . . .                | 16        |
| <b>2 Grundlagen zur Batteriezelle</b>          | <b>19</b> |
| 2.1 Lithium-Ionen Batteriezellen . . . . .     | 19        |
| 2.1.1 Aufbau und Funktionsweise . . . . .      | 20        |
| 2.1.2 Bauformen . . . . .                      | 21        |
| 2.1.3 Relevante Kenngrößen . . . . .           | 22        |
| 2.2 Elektrischer Widerstand . . . . .          | 23        |
| 2.3 Produktionsschritte . . . . .              | 26        |
| 2.3.1 Elektrodenfertigung . . . . .            | 26        |
| 2.3.2 Zellenassemblierung . . . . .            | 30        |
| 2.3.3 Zell-Finishing . . . . .                 | 33        |
| <b>3 Grundlagen zur Demontage</b>              | <b>35</b> |
| 3.1 Demontagemodi . . . . .                    | 35        |

---

|          |                                                                                                   |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1.1    | Demontagetiefe . . . . .                                                                          | 35        |
| 3.1.2    | Demontagetechnik . . . . .                                                                        | 36        |
| 3.1.3    | Demontagesequenz . . . . .                                                                        | 37        |
| 3.1.4    | Automatisierungsgrad . . . . .                                                                    | 37        |
| 3.2      | Demontagestrategieplanung . . . . .                                                               | 38        |
| <b>4</b> | <b>Untersuchung von Demontageszenarien für Elektrofahrzeugbatterien – ein Multimethodenansatz</b> | <b>41</b> |
| 4.1      | Preprocessing . . . . .                                                                           | 42        |
| 4.1.1    | Produkt-Preprocessing . . . . .                                                                   | 42        |
| 4.1.2    | Prozess-Preprocessing . . . . .                                                                   | 44        |
| 4.1.3    | Produkt-Prozess-Preprocessing . . . . .                                                           | 46        |
| 4.2      | Modellbildung . . . . .                                                                           | 46        |
| 4.2.1    | Modellaufbau . . . . .                                                                            | 47        |
| 4.2.2    | Agenten . . . . .                                                                                 | 47        |
| 4.2.3    | Modelllogik . . . . .                                                                             | 49        |
| 4.2.4    | Demontageroute . . . . .                                                                          | 51        |
| 4.3      | Fallstudie . . . . .                                                                              | 53        |
| 4.3.1    | Batterie . . . . .                                                                                | 54        |
| 4.3.2    | Demontagestation . . . . .                                                                        | 57        |
| 4.3.3    | Referenzszenario . . . . .                                                                        | 59        |
| 4.3.4    | Visualisierung der Demontageschritte . . . . .                                                    | 60        |
| 4.3.5    | Strecken . . . . .                                                                                | 63        |
| 4.3.6    | Auslastung der Werkzeuge . . . . .                                                                | 65        |
| 4.3.7    | Einfluss der Roboterdynamik . . . . .                                                             | 67        |
| 4.3.8    | Positionierung der Batterie . . . . .                                                             | 68        |
| 4.4      | Ausblick . . . . .                                                                                | 70        |
| 4.4.1    | Evaluation der Methodik . . . . .                                                                 | 70        |
| 4.4.2    | Evaluation der Ergebnisse . . . . .                                                               | 71        |
| <b>5</b> | <b>Kreislaufwirtschaftsstrategien als Teil der Demontageplanung</b>                               | <b>73</b> |
| 5.1      | Methodik . . . . .                                                                                | 73        |
| 5.1.1    | Aufbau des Demontageoptimierers . . . . .                                                         | 74        |
| 5.1.2    | Erstellung der Ausgangspopulation . . . . .                                                       | 75        |
| 5.1.3    | Evaluation einer Population . . . . .                                                             | 79        |
| 5.1.4    | Selektion und Rekombination . . . . .                                                             | 80        |

---

---

|          |                                                                         |            |
|----------|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.1.5    | Mutation . . . . .                                                      | 82         |
| 5.2      | Fallstudie . . . . .                                                    | 84         |
| 5.2.1    | Modellannahmen . . . . .                                                | 84         |
| 5.2.2    | Zustandsszenarien . . . . .                                             | 86         |
| 5.2.3    | Modellergebnisse . . . . .                                              | 88         |
| 5.3      | Ausblick . . . . .                                                      | 90         |
| <b>6</b> | <b>Zelldesigns und Produktionstechnologien für die Demontagefreund-</b> |            |
|          | <b>lichkeit</b>                                                         | <b>93</b>  |
| 6.1      | Rundzellen im Automobilbereich . . . . .                                | 94         |
| 6.2      | Produktanalyse . . . . .                                                | 95         |
| 6.2.1    | Untersuchung der Zelleigenschaften . . . . .                            | 95         |
| 6.2.2    | Untersuchung des Zelldesigns . . . . .                                  | 100        |
| 6.3      | Ergebnisse der Produktanalyse . . . . .                                 | 102        |
| 6.3.1    | Zelleigenschaften . . . . .                                             | 102        |
| 6.3.2    | Wickeldesign . . . . .                                                  | 109        |
| 6.4      | Generische Beschreibung . . . . .                                       | 115        |
| 6.4.1    | Wickeldesign . . . . .                                                  | 115        |
| 6.4.2    | Wickelkontaktierung . . . . .                                           | 116        |
| 6.5      | Produktionstechnologien . . . . .                                       | 120        |
| 6.5.1    | Anforderungen an die Wickelanlage . . . . .                             | 120        |
| 6.5.2    | Wickelaufgaben und Produktionsschritte . . . . .                        | 121        |
| 6.5.3    | Materialfluss und Module der Wickelanlage . . . . .                     | 125        |
| 6.6      | Ausblick . . . . .                                                      | 128        |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                                     | <b>131</b> |
|          | <b>Abkürzungsverzeichnis</b>                                            | <b>133</b> |
|          | <b>Tabellenverzeichnis</b>                                              | <b>139</b> |
|          | <b>Abbildungsverzeichnis</b>                                            | <b>141</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>                                             | <b>149</b> |
|          | <b>Veröffentlichungen</b>                                               | <b>161</b> |
|          | <b>Curriculum Vitae</b>                                                 | <b>165</b> |

---