



I Inhaltsverzeichnis

| | | |
|---------|---|------|
| I | Inhaltsverzeichnis..... | I |
| II | Abbildungsverzeichnis..... | VIII |
| III | Tabellenverzeichnis..... | XIII |
| 1 | Kurzzusammenfassung..... | 1 |
| 1.1 | Wesentliche Ergebnisse in den einzelnen Projektbereichen..... | 2 |
| 1.1.1 | Projektbereich A..... | 2 |
| 1.1.2 | Projektbereich B..... | 3 |
| 1.1.3 | Projektbereich C..... | 3 |
| 1.1.4 | Projektbereich D..... | 4 |
| 1.1.5 | Projektbereich E..... | 4 |
| 1.1.6 | Projektbereich F..... | 5 |
| 1.1.7 | Projektbereich G..... | 5 |
| 1.2 | Veröffentlichungen..... | 6 |
| 1.3 | Begriffsbestimmungen..... | 8 |
| A | Analyse und Entwicklung logistischer Sammel- und Rückführungsprozesse..... | 9 |
| A.1 | Analyse des Altbatterieaufkommens..... | 9 |
| A.1.1 | Identifikation und Analyse der für den Rückfluss von Li-Ionen Altbatterien relevanten Einflussgrößen..... | 9 |
| A.1.2 | Entwicklung eines Simulationsmodells zur Abschätzung des Rückflusses von Li-Ionen Altbatterien..... | 10 |
| A.1.2.1 | Beschreibung der Module..... | 10 |
| A.1.3 | Erarbeitung von Szenarien zur langfristigen Absatzentwicklung und zur Nutzung von Elektrofahrzeugen im Zeitverlauf..... | 12 |
| A.1.3.1 | Grundlegende Annahmen..... | 12 |
| A.1.3.2 | Annahmen der Szenarien..... | 12 |
| A.1.4 | Durchführung einer Simulationsstudie zum Altbatterierücklauf mit expliziter Berücksichtigung unsicherer Einflüsse..... | 15 |
| A.1.4.1 | Szenario „Pessimistisch“..... | 15 |
| A.1.4.2 | Szenario „Politisch“..... | 16 |
| A.1.4.3 | Szenario „Realistisch“..... | 16 |



| | | |
|-----------|---|----|
| A.1.4.4 | Vergleich der Szenarien..... | 16 |
| A.1.4.5 | Sensitivitätsanalyse | 19 |
| A.1.4.5.1 | Vorgehensweise | 19 |
| A.1.4.5.2 | Zusammenfassung der Ergebnisse | 19 |
| A.2 | Analyse und Gestaltung von Informationsflüssen..... | 22 |
| A.2.1 | Analyse und Anpassung der Informationsangebots- und -bedarfs für die Prozesse Ausbau und Prüfung | 22 |
| A.2.2 | Analyse und Anpassung der Informationsangebots- und -bedarfs für den Prozess Transport..... | 24 |
| A.2.3 | Analyse und Anpassung der Informationsangebots- und -bedarfs für den Prozess Lagerung/Sammlung..... | 26 |
| A.2.4 | Identifikation von Informationen aus vorangehenden Prozesse, die während des Recyclingprozesses benötigt werden..... | 28 |
| A.2.5 | Konzeption eines Instrument zur bedarfsgerechten Erfassung und Bereitstellung von Informationen sowie eines Konzepts zur Umsetzung des Instruments in einer Softwarelösung..... | 29 |
| A.2.5.1 | Informationsfluss entlang der Prozesskette | 29 |
| A.2.5.2 | Optionen zur Erfassung und bedarfsgerechten Bereitstellung von Informationen | 30 |
| A.2.5.3 | Anforderungen an ein Informationsinstrument..... | 31 |
| A.2.5.4 | Auswahl und Struktur eines geeigneten Informationsinstruments | 32 |
| A.2.5.4.1 | Prozessorientierte zentrale Datenbanklösung | 32 |
| A.2.5.4.2 | Produktorientierte bedarfsgerechte Individuallösung..... | 33 |
| A.3 | Entwicklung von Sammelkonzepten | 35 |
| A.3.1 | Anforderungsanalyse an potentielle Netzwerke zum Recycling von Li-Ionen-Batterien..... | 35 |
| A.3.1.1 | Definition der Systemgrenzen..... | 35 |
| A.3.1.2 | Ermittlung von Netzwerkkonstellationen | 39 |
| A.3.1.2.1 | Netzwerkkonstellation A – einstufiges Sammlungskonzept..... | 39 |
| A.3.1.2.2 | Netzwerkkonstellation B – zweistufiges Sammlungskonzept mit integrierter Demontage und Aufbereitung | 40 |
| A.3.1.2.3 | Netzwerkkonstellation C – zweistufiges Sammlungskonzept mit entkoppelter Demontage und Aufbereitung..... | 40 |
| A.3.1.3 | Ableitung eines Anforderungskatalogs | 41 |



| | | |
|---------|--|----|
| A.3.2 | Entwicklung und Bau von Prototypenwerkzeugen sowie Konzeption verschiedener Batterie-Ausbaukonzepte mit Hilfe entsprechender Ausbaustudien | 43 |
| A.3.3 | Entwicklung und Umsetzung eines Verpackungssystems sowie Konzeption eines Befestigungssystems..... | 44 |
| A.3.4 | Entwicklung und Umsetzung eines Systems zur Lagerung und Konzeption eines Lagers..... | 46 |
| A.3.5 | Wirtschaftlichkeitsberechnung des gesamten Sammelkonzeptes | 48 |
| A.3.6 | Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungsinstruments zur Gestaltung von Netzwerken | 50 |
| A.3.6.1 | Modellierung des geographischen Raums..... | 51 |
| A.3.6.2 | Modellierung des Altbatterieaufkommens | 51 |
| A.3.6.3 | Modellierung der Prozesse | 51 |
| A.3.6.4 | Modellierung von Kapazitäten..... | 53 |
| A.3.6.5 | Modellierung der Stoffströme | 53 |
| A.3.7 | Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Gestaltung der Netzwerkstruktur | 54 |
| A.3.7.1 | Fallstudie Politisch/VW-OTLG | 55 |
| A.3.7.2 | Fallstudie Realistisch/VW-OTLG | 59 |
| A.3.7.3 | Fallstudie Realistisch/VG-10 | 61 |
| A.3.7.4 | Fallstudie Robust/VW-OTLG | 61 |
| A.3.7.5 | Ableitung von Handlungsempfehlungen | 63 |
| A.4 | Entwicklung von Entladeprozessen für Li-Ionen Batterien | 66 |
| A.4.1 | Recherche von Sekundärmärkten für Lithium-Ionen-Batteriemodule | 66 |
| A.4.2 | Erstellung technischer Spezifikationen für die Sekundärmärkte | 67 |
| A.4.3 | Analyse existierender Batteriemodule bezüglich der Reparaturtiefe | 68 |
| A.4.4 | Entwicklung einer Bewertungsmethodik für Batteriemodule und Einzelzellen | 70 |
| A.4.5 | Technische Entwicklung eines teilautomatisierten Testverfahrens | 72 |
| A.4.6 | Verfahrensentwicklung für das Enladewerkzeug | 72 |
| A.4.7 | Technische Entwicklung eines teilautomatisierten Enladewerkzeuges | 74 |
| A.4.8 | Erprobung des Prototypen | 75 |
| B | Entwicklung von Demontage- und Recyclingprozessen | 76 |
| B.1 | Mechanische Demontage in Einzelkomponenten..... | 77 |



| | | |
|-------|--|-----|
| B.1.1 | Produktanalyse und Strukturierung der Demontage | 77 |
| B.1.2 | Konzepte für teilautomatisierte Demontageschritte | 81 |
| B.1.3 | Entwurf alternativer Demontagesysteme (Layout, Verkettung von Arbeitsstationen/-plätzen) | 87 |
| B.1.4 | Ausgestaltung der Elemente des Demontagesystems | 95 |
| B.1.5 | Durchführung von Demontageversuchen / Erprobung..... | 100 |
| B.1.6 | Ableitung von Anforderungen für eine demontage- und automatisierungsgerechte Batteriegestaltung..... | 106 |
| B.2 | Aufbereitung und Verwertung von Elektrolyten | 108 |
| B.2.1 | Entwicklung von Öffnungskonzepten | 108 |
| B.2.2 | Trockenlegung der nassen Batteriezelle..... | 109 |
| B.2.3 | Prozessentwicklung eines geeigneten Destillationsverfahrens für die Elektrolytrückgewinnung | 110 |
| B.2.4 | Prozessentwicklung der alkalischen Rekristallisation der Leitsalze | 111 |
| B.3 | Mechanische, thermische und chemische Aufbereitung der Einzelkomponenten..... | 112 |
| B.3.1 | Demontage der trockenen Zellen und Sortieren | 112 |
| B.3.2 | Aufbereitung und Verwertung von Zellgehäuse, Separator und metallischen Komponenten..... | 112 |
| B.3.3 | Verfahrensentwicklung der trockenen Separation der Aktivmaterialien vom Stromsammler..... | 114 |
| B.3.4 | Verfahrensentwicklung der nassen mechanischen Abtrennung der Elektrodenbeschichtungen vom Stromsammler und deren mechanische Trennung..... | 118 |
| B.3.5 | Aufbereitung hochkonzentrierter, partikulärer Aktivmaterialsuspensionen | 121 |
| B.3.6 | Extraktion der Bindersysteme aus Elektrodenmaterialien in Abhängigkeit der Trennungsalternativen | 123 |
| B.4 | Hydrometallurgische Aufbereitung und Verwertung von NE-Metallen..... | 124 |
| B.4.1 | Laborarbeiten zu den hydrometallurgischen Extraktions- und Reinigungsverfahren | 125 |
| B.4.2 | Pilotanlage für säurebasierte Extraktionen und fluorfreie Leitsalzherstellung.... | 134 |
| B.4.3 | Pilotanlage für Aufreinigung mittels Ionenaustauscher und Salzspaltung mittels Elektrodialyse | 139 |
| C | Entwicklung von Herstellungsprozessen für „Recycling-Batterien“ | 146 |
| C.1 | Charakterisierung der recycelten Grundstoffe | 147 |

IV



| | | |
|-------|--|-----|
| C.1.1 | Erstellen einer Rohstoff-Spezifikation für die recycelten Lithium-Rohstoffe durch die Aktivmaterialhersteller | 147 |
| C.1.2 | Bewertung der recycelten Lithium- und Übergangsmetallsalze im Vergleich von kommerziellen und recycelten Primärrohstoffe | 150 |
| C.1.3 | Übergreifende Analyse von chemischen und physikalischen Materialparametern und Bewertung der potentiellen Weiterverwendung | 151 |
| C.1.4 | Bewertung der Verwendungsmöglichkeiten für unterschiedliche Qualitäten der zurück gewonnenen Rohstoffe..... | 152 |
| C.2 | Synthese und Charakterisierung von recycelten Aktivmaterialien | 153 |
| C.2.1 | Synthese von Aktivmaterialien aus recycelten Rohstoffen | 153 |
| C.2.2 | Herstellung von Leitsalzen aus Laborrecycling Stoffen und Vergleich mit kommerziellen Leitsalzen..... | 154 |
| C.2.3 | Charakterisierung der Aktivmaterialien – Produktausgangskontrolle..... | 155 |
| C.3 | Herstellung und Charakterisierung neuer Elektroden und Testzellen aus recycelten Aktivmaterialien | 159 |
| C.3.1 | Standardisierte Elektroden- und Zellfertigung aus kommerziellen Referenzmaterialien und elektrochemische Charakterisierung..... | 159 |
| C.3.2 | Standardisierte Elektroden- und Zellfertigung aus rekonditionierten Aktivmaterialien und elektrochemische Charakterisierung | 162 |
| C.3.3 | Standardisierte Elektroden- und Zellfertigung aus recycelten Aktivmaterialien gewonnen aus formierten Zellen und elektrochemische Charakterisierung | 164 |
| C.3.4 | Standardisierte Elektroden- und Zellfertigung aus recycelten Aktivmaterialien gewonnen aus gealterten Zellen und elektrochemische Charakterisierung..... | 167 |
| D | Analyse des Alterungsverhaltens von Li-Ionen Batterien..... | 173 |
| D.1 | Aufnahme der Performance und Analyse der Alterung von konventionell erhältlichen Aktivmaterialien anhand einer Standardzelle (LiFePO ₄ und Schichtoxide) | 174 |
| D.2 | Aufnahme der Performance und Analyse der Alterung von recycelten Aktivmaterialien und mehrfach recycelten Aktivmaterialien anhand einer Standardzelle (LiFePO ₄ und Schichtoxide) | 186 |
| D.3 | Analyse der Mechanismen von Alterung im Vergleich konventioneller und recycelter Aktivmaterialien | 193 |
| E | Ökonomische und ökologische Bewertung von Recycling-Konzepten für Li-Ionen Batterien | 194 |
| E.1 | Erhebung und Prozesssimulation des Energiebedarfs..... | 194 |
| E.2 | Ökobilanzierung der gesamten Recyclingprozesskette..... | 196 |
| E.3 | Entwicklung eines Stoffstrommodells für Kobalt und Lithium, Verfügbarkeitsstudie | 196 |



| | | |
|-----------|---|-----|
| E.4 – E.6 | Ökonomische Bewertung des LithoRec-Verfahrens | 197 |
| E.4.1 | Modularisierung und Bildung von Referenzanlagen | 198 |
| E.4.2 | Schätzung von Investitionen und Fixkosten..... | 200 |
| E.4.2.1 | Umschlaglager | 200 |
| E.4.2.2 | Demontagewerk..... | 203 |
| E.4.2.3 | Mechanisches Aufbereitungswerk | 206 |
| E.4.2.4 | Hydrometallurgisches Aufbereitungswerk..... | 207 |
| E.4.3 | Schätzung von Prozessdeckungsbeiträgen | 208 |
| E.4.3.1 | Definitionen und Vorgehensweise | 208 |
| E.4.3.2 | Deckungsbeitrag in der Demontage | 211 |
| E.4.3.3 | Deckungsbeitrag in der Mechanischen Aufbereitung | 214 |
| E.4.3.4 | Deckungsbeitrag in der Hydrometallurgischen Aufbereitung | 216 |
| E.4.3.5 | Gesamtprozessdeckungsbeitrag und Sensitivitätsanalyse | 218 |
| E.4.4 | Gewinnschwellen | 222 |
| E.4.4.1 | Durchsatzbezogene Gewinnschwellen | 223 |
| E.4.4.2 | Zeitbezogene Gewinnschwellen | 231 |
| E.4.5 | Zusammenfassung..... | 232 |
| F | Entwicklung von demontagefreundlichen Batteriesystemen und lebenszyklusorientierten Sicherheitskonzepten | 235 |
| F.1 | Entwicklung eines Werkzeuges für integrierte Recycling- und Umweltbewertung von Batteriesystemen | 236 |
| F.2 | Charakteristische Demontage, Recyclingkenngrößen und demontagefreundliches Elektrodendesign | 239 |
| F.2.1 | Ermittlung einer charakteristischen Demontage und Bestimmung von Recyclingkenngrößen für repräsentative Batteriebaukonzepte | 239 |
| F.2.2 | Ermittlung eines demontagefreundlichen Designs für Elektroden | 241 |
| F.3 | Entwicklung von Gestaltungs- und Konstruktionsrichtlinien für die demontagefreundliche Entwicklung/Fertigung von Batterien..... | 243 |
| F.4 | Erarbeitung von Werkzeugen (CAD Tools, K.-Kataloge...) für die Konstruktion und Simulation von Gesamtbatteriekonzepten, mit Berücksichtigung der gegenseitigen Einflüsse von Batterie, Peripherie und Fahrzeugtechnik | 247 |
| F.5 | Ableitung lebenszyklusorientierter Sicherheitskonzepte, speziell für Rückbau, Demontage und Recycling von Lithium-Ionen-Batterien | 250 |



| | | |
|-----|---|-----|
| F.6 | Entwicklung von Dokumentations- (mindest-) Standards für die fachgerechte Behandlung, Rückbau, Demontage und das Recycling | 252 |
| G | Konzeptionierung einer Recycling-Pilotanlage | 255 |
| G.1 | Entladung der Batterien und Demontage der Systemkomponenten | 256 |
| G.2 | Separation der Aktivmaterialien..... | 258 |
| G.3 | Planung des Gesamtsystems und Auslegung der Prozessschritte | 266 |
| H | Literaturverzeichnis | 272 |
| I | Anhang..... | 273 |