

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 Entscheidungsunterstützungsinstrumentes 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 Endladewerkzeug	72
A.4.7	Technische Entwicklung eines teilautomatisierten Endladewerkzeuges	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 Stromsampler.....	114
B.3.4	Verfahrensentwicklung der nassen mechanischen Abtrennung der Elektrodenbeschichtungen vom Stromsampler 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

- 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 (LiFePO₄ und Schichtoxide) 174
 - D.2 Aufnahme der Performance und Analyse der Alterung von recycelten Aktivmaterialien und mehrfach recycelten Aktivmaterialien anhand einer Standardzelle (LiFePO₄ 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, Recyclingkenngößen und demontagefreundliches Elektrodendesign	239
F.2.1	Ermittlung einer charakteristischen Demontage und Bestimmung von Recyclingkenngößen 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