

LithoRec

Recycling von Lithium-Ionen-Batterien

Prof. Dr.-Ing. Arno Kwade, Gunnar Bärwaldt (Herausgeber)



Foto: Chemetall GmbH

LithoRec

gefördert durch das:

VDI | VDE | IT



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

www.lithorec.de





Recycling von Lithium-Ionen-Batterien

Abschlussbericht des Verbundprojektes

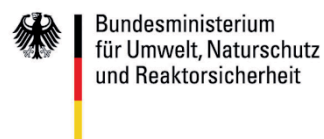
Laufzeit des Vorhabens:

01. September 2009 – 30. September 2011

Gemeinsamer Abschlussbericht folgender Einzelvorhaben

16EM0012	I+ME ACTIA GmbH
16EM0013	Audi AG
16EM0014	Electrocycling GmbH
16EM0015	H.C. Starck GmbH
16EM0016	Chemetall GmbH
16EM0017	Westfälische Wilhelms-Universität Münster
16EM0018	Süd-Chemie
16EM0019	Recylex GmbH
16EM0020	Volkswagen AG
16EM0021	Evonik Litarion GmbH
16EM0022	Fränkisches Recycling Zentrum
16EM0023	Technische Universität Braunschweig

Braunschweig, 02.04.2012



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2012

978-3-95404-112-1

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2012

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2012

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-95404-112-1

Autorenliste

Prof. Arno Kwade (Institut für Partikeltechnik, TU Braunschweig)
wissenschaftliche Projektleitung

Gunnar Bärwaldt (Niedersächsisches Forschungszentrum Fahrzeugtechnik)
Projektkoordination

Koordinatoren der beteiligten industriellen Partner

Tobias Meinfelder (AUDI AG)

Martin Steinbild (Chemetall GmbH)

Kai Kramer (Electrocycling GmbH)

Dr. Robert Barenschee (Evonik Litarion GmbH)

Dr. Markus Weinmann (H.C.Starck GmbH)

Axel Schober (I+ME actia GmbH)

Matthias Walch (Fränkisches Recyclingzentrum)

Peter Brandes (Recylex GmbH)

Dr. Nikolas Tran (Süd-Chemie AG)

Dr. Marko Gernuks (Volkswagen AG)

Beteiligte wissenschaftliche Einrichtungen

apl. Prof. Christoph Herrmann, Stefan Andrew
(Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, TU Braunschweig)

Prof. Michael Kurrat, Hannes Haupt
(Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen, TU Braunschweig)

Prof. Arno Kwade, Christian Hanisch, Stephan Olliges
(Institut für Partikeltechnik, TU Braunschweig)

Prof. Thomas Spengler, Claas Hoyer
(Institut für Automobilwirtschaft und industrielle Produktion, TU Braunschweig)

Prof. Thomas Vietor, Dennis Wedler
(Institut für Konstruktionstechnik, TU Braunschweig)

Prof. Martin Winter, Dr. Sascha Nowak
(Institut für physikalische Chemie, WWU Münster)

Allgemeine Kontaktadresse:

Technische Universität Braunschweig
Niedersächsisches Forschungszentrum Fahrzeugtechnik
Langer Kamp 19
38106 Braunschweig
0531-391 7980
nff@tu-braunschweig.de



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 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 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



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



II Abbildungsverzeichnis

Abbildung A-1: Konzept des Modells zur Abschätzung des Altbatterieaufkommens	10
Abbildung A-2: Vergleich des Altbatterieaufkommensverlauf (Masse) der drei Szenarien	17
Abbildung A-3: Vergleich des Altbatterieaufkommens (Masse) nach Batterievarianten der drei Szenarien	18
Abbildung A-4: Einfluss ausgewählter Parameter auf das Altbatterieaufkommen	20
Abbildung A-5: Einfluss der Batterienutzungsdauer auf das Altbatterieaufkommen (kg/a)	21
Abbildung A-6: Schematische Darstellung des Recyclinginformationssystems	34
Abbildung A-7: Netzwerkkonstellation A – einstufiges Sammlungskonzept.....	39
Abbildung A-8: Netzwerkkonstellation B – zweistufiges Sammlungskonzept mit integrierter Demontage und Aufbereitung	40
Abbildung A-9: Netzwerkkonstellation C – zweistufiges Sammlungskonzept mit entkoppelter Demontage und Aufbereitung	41
Abbildung A-10: HV - Batteriedemontage-KIT	43
Abbildung A-11: Einwegkartonverpackung Sanyo Batteriesystem für Audi Q5	44
Abbildung A-12: Batteriepaloxe (Akkukasten aus starrem Kunststoff).....	46
Abbildung A-13: Kennzeichnung von Lagerein- und Ausgängen.....	48
Abbildung A-14: Modulbildung aus Prozessen.....	52
Abbildung A-15: Dezentrale Sammlung in der Fallstudie „Politisch/VW-OTLG“, zweite Planungsperiode 2015 bis Ende 2017	57
Abbildung A-16: Dezentrale Sammlung in der Fallstudie „Politisch/VW-OTLG“, Dritte Planungsperiode 2018 bis Ende 2020	58
Abbildung A-17: Stark dezentralisierte Sammlung und Demontage in der Fallstudie „Politisch/VW-OTLG“, vierte Planungsperiode 2021 bis Ende 2025.....	59
Abbildung A-18: Dezentrale Sammlung und Demontage in der Fallstudie „Realistisch/VW- OTLG“ von 2021 bis Ende 2025	60
Abbildung A-19: Vergleich der Strukturen in Periode III aus den Fallstudien „Realistisch/VW- OTLG“ (a) und „Politisch/VW-OTLG“ (b) mit derjenigen aus der Fallstudie „Robust/VW-OTLG“ (c)	62
Abbildung A-20: Vergleich der Strukturen in Periode IV aus den Fallstudien „Realistisch/VW- OTLG“ (a) und „Politisch/VW-OTLG“ (b) mit derjenigen aus der Fallstudie „Robust/VW-OTLG“ (c)	62
Abbildung A-21: Sekundärmärkte	66
Abbildung A-22: Prüfschema technische Zustände Module und Zellen	71
Abbildung A-23: Schematischer Aufbau des Entladeverfahrens von Batteriesystemen	73

VIII



Abbildung A-24: Aktuelle Zellentladung und Greiferlösung	74
Abbildung A-25: Prinzip Schaltbild Entladewerkzeug	74
Abbildung A-26: Zellspannungsverlauf während der Entladung	75
Abbildung B-1: Eindrücke der Testdemontage des Batteriesystems A	77
Abbildung B-2: Eindrücke der Testdemontage des Batteriesystems B,	78
Abbildung B-3: Verbindungsgraph	79
Abbildung B-4: Demontagevorranggraph	80
Abbildung B-5: Beispielhafte Bewertung der Automatisierbarkeit	81
Abbildung B-6: Beispielhafte Bewertung der Demontage	82
Abbildung B-7: Kriterienkatalog (Englisch)	83
Abbildung B-8: Portfoliodarstellung zur Bewertung der Automatisierbarkeit für den Einzelschritt	84
Abbildung B-9: Prinzip der Greifvorrichtung (links); Parameter zur Motorauslegung (oben rechts) und Steuerungsarchitektur (unten rechts)	87
Abbildung B-10: Schema der allgemeinen Demontage von Batteriesystemen	89
Abbildung B-11: Layout eines Demontagesystems für Szenario „2015 realistisch“	92
Abbildung B-12: Layout eines Demontagesystems für Szenario „2030 realistisch“	94
Abbildung B-13: Diagnosegerät Multi-DIAG	96
Abbildung B-14: Greifersystem mit einzelnen Subsystemen und Komponenten	98
Abbildung B-15: Bedienkonzept des Greifersystems	99
Abbildung B-16: Screenshots der Visualisierung	100
Abbildung B-17: Auswertung der Messungen	104
Abbildung B-18: Elektroden-Stack (IPC-WWU)	109
Abbildung B-19: Untersuchung der 1. Fraktion des Destillationsprozesses mittels GC-MS (IPC-WWU)	110
Abbildung B-20: Untersuchung der 2. Fraktion des Destillationsprozesses mittels GC-MS (IPC-WWU)	111
Abbildung B-21: Prozessfließbild der Trockenen Separation	115
Abbildung B-22: Mechanische Separation in der Schneidmühle	115
Abbildung B-23: Anteil der Feinfraktionen nach Beanspruchung in Schneidmühlen bei variiertem Rotordrehzahl für die Klassierung (Siebung) bei verschiedenen Trennkorngrößen (6-Scheiben-Rotor, 2mm Trapezlochsieb)	116
Abbildung B-24: Verfahrensfließbild Nasschemische Separation der Beschichtung von Batterie-Elektroden	118
Abbildung B-25: Recyclingquote über Anzahl der Batch-Lösevorgänge	119
Abbildung B-26: Wirkmechanismus Batch-Filtration (oben), Fahrweise mit Lösungsmittel- Kreislauf (unten)	120



Abbildung B-27: Verfahrensfliessbild zu Prozessalternativen der Nasschemischen Separation der Beschichtung von Batterie-Elektroden.....	120
Abbildung B-28: Partikelgrößenverteilung der wiedergewonnenen Beschichtung nach Desagglomeration in Prallmühle	122
Abbildung B-29: Aufkonzentrierung und weitere Aufarbeitung nach der nasschemischen Separation.....	122
Abbildung B-30: Projektschema Hydrometallurgisches Batteriematerialrecycling	124
Abbildung B-31: Hauptprozesskomponenten	136
Abbildung B-32: Feststoffhandling	137
Abbildung B-33: Funktionsweise einer Elektrolyse mit monopolarer Membran	140
Abbildung B-34: Funktionsweise einer Elektrodialyse mit bipolarer Membran.....	140
Abbildung B-35: Ursprüngliches und verbessertes Verfahrenskonzept	142
Abbildung B-36: EDBM-Anlage	144
Abbildung B-37: Behandlung Salzlösung	144
Abbildung C-1: Geänderter Recycling Zyklus	146
Abbildung C-2: REM-Aufnahmen der Precursor aus recycelten Lösungen bei 200-, 1.000- und 5.000-facher Vergrößerung.....	156
Abbildung C-3: REM-Aufnahmen des Referenzmaterials und der LNCAO-Materialien aus recycelten Lösungen bei 200-, 1.000- und 5.000-facher Vergrößerung	156
Abbildung C-4: Zyklisierkurve von LiFePO_4 bei Raumtemperatur.....	160
Abbildung C-5: DC-Ratentest von LiBF_4 in EC/DMC.....	160
Abbildung C-6: Elektrochemischer Zyklentest einer Referenzzelle aus Neumaterialien – Stromstabilitätstest (Zyklen 1-30) und Zyklenstabilität bei 3C (Zyklen 30-500)	161
Abbildung C-7: Elektrochemischer Zyklentest einer Referenzzelle aus Neumaterialien – Charakterisierung der Stromstabilität bei variierter Laderate.....	162
Abbildung C-8: Elektrochemische Kapazitätsverläufe von Referenz und zyklisierten Materialien	163
Abbildung C-9: Strombelastbarkeitstest rekonditionierter Materialien.....	163
Abbildung C-10: Sekundärelektronenmikroskopische Aufnahmen der Oberfläche von rekonditionierten Elektroden, Winkel 60°(Quelle: IPC-WWU und iPAT-TUBS)	164
Abbildung C-11: Referenz (links) und leichte Verunreinigung (rechts)	165
Abbildung C-12: CV Test.....	165
Abbildung C-13: C-Ratentest V21 und Referenz	166
Abbildung C-14: Performance V21 und Referenz	167
Abbildung C-15: XRD Messungen	169



Abbildung C-16: Ansicht der Primärpartikel bei der Referenz (links) und starke Verunreinigung (rechts)	169
Abbildung C-17: CV Daten aller drei Materialien.....	170
Abbildung C-18: Zyklenstabilität.....	170
Abbildung C-19: C-Ratentest V5-Z und Referenz	171
Abbildung C-20: Performance V5-Z und Referenz.....	172
Abbildung D-1: Zyklierkurve von LiFePO ₄ bei 40°C	174
Abbildung D-2: Zyklierkurve von NMC bei 40°C	174
Abbildung D-3: Temperaturmatrix 1CCC mit LiBF ₄ in EC/DMC	175
Abbildung D-4: Temperaturmatrix 3CCC mit LiBF ₄ EC/DMC	175
Abbildung D-5: Entladung der zu charakterisierenden Standardzellen	176
Abbildung D-6: Ladung der zu charakterisierenden Standardzellen	177
Abbildung D-7: Sprungantwort der Gesamtspannung des Systems	177
Abbildung D-8: Sprungantwort der Einzelzellspannungen	178
Abbildung D-9: Zellspannungsverlauf während der Zyklierung	180
Abbildung D-10: Performance von Standard-Schichtoxid-Zellen bei 1C Laderate	181
Abbildung D-11: Performance von Standard-Schichtoxid-Zellen bei 3C Laderate	182
Abbildung D-12: C-Ratentest bei unterschiedlichen Temperaturen	182
Abbildung D-13: Haftkraftmessung an zyklisierten Zellen (Standard).....	183
Abbildung D-14: Nanoindentationsmessungen an NMC-Standardmaterial	184
Abbildung D-15: SEM-Aufnahmen von NMC Standardmaterial.....	185
Abbildung D-16: C-Ratentest NMC bei 21°C	187
Abbildung D-17: C-Ratentest NMC bei 45°C	188
Abbildung D-18: Performance NMC bei 21°C und 3C	188
Abbildung D-19: Performancetest NMC bei 45°C und 3C.....	189
Abbildung D-20: Haftkraftuntersuchung von NMC-Material bei unterschiedlichen Laderaten und Temperaturen	189
Abbildung D-21: SEM-Aufnahmen von NMC Recyclingmaterial bei 1C-Laderate	190
Abbildung D-22: Nanoindentation von Recyclingmaterial. Laderate 3C, Temperatur 21°C.191	
Abbildung D-23: Nanoindentation von Recyclingmaterial. Laderate 3C, Temperatur 45°C.191	
Abbildung E-1: Energieinhalt der rücklaufenden Batteriesysteme	195
Abbildung E-2: LithoRec-Prozesskette mit alternativen Prozesspfaden	197
Abbildung E-3: Massenzusammensetzung des zugrundegelegten Batteriegemischs [t System]	210
Abbildung E-4: Stoffflussbezogener Deckungsbeitrag in der Demontage	212
Abbildung E-5: Prozessdeckungsbeitrag in der Demontage.....	214



Abbildung E-6: Stoff- und energieflussbezogener Deckungsbeitrag in der Mechanischen Aufbereitung	215
Abbildung E-7: Prozessdeckungsbeitrag in der Mechanischen Aufbereitung	216
Abbildung E-8: Deckungsbeitrag in der Hydrometallurgischen Aufbereitung für NMC- und LFP-Systeme	218
Abbildung E-9: Sensitivitätsanalyse bezüglich der Prozessdeckungsbeiträge (K-NMC)	220
Abbildung E-10: Sensitivitätsanalyse bezüglich der Prozessdeckungsbeiträge (G-NMC)	220
Abbildung E-11: Sensitivitätsanalyse bezüglich der Prozessdeckungsbeiträge (K-LFP)	221
Abbildung E-12: Sensitivitätsanalyse bezüglich der Prozessdeckungsbeiträge (G-LFP)	221
Abbildung E-13: Relative Abweichungen der Szenarien vom Referenz-GDB	222
Abbildung E-14: Gewinnschwellendiagramm für Hydrometallurgische Aufbereitung bei unterschiedlicher Zusammensetzung des Altbatterieaufkommens	225
Abbildung E-15: Gewinnschwellendiagramm des Gesamtprozesses für NMC-Systeme	226
Abbildung E-16: Gewinnschwellendiagramm des Gesamtprozesses für LFP-Systeme	227
Abbildung E-17: Gewinnschwellendiagramm des Gesamtprozesses für gemischtes Aufkommen	228
Abbildung E-18: Jährliches Ergebnis in Abhängigkeit von Durchsatz und Zusammensetzung des Altbatterieaufkommens	229
Abbildung E-19: Gewinnschwellen in Abhängigkeit der Szenarien und prozentuale Abweichung der Extremszenarien vom Referenzszenario	230
Abbildung E-20: Zeitbezogene Gewinnschwellen der Einzelprozesse in Abhängigkeit der Szenarien zum Altbatterieaufkommen	232
Abbildung E-21: Zeitbezogene Gewinnschwellen der Gesamtprozesse in Abhängigkeit der Szenarien zum Altbatterieaufkommen	232
Abbildung F-1: Modelleingabe bei ProdTect am Beispiel Li-Ionen Batterie	236
Abbildung F-2: Erweiterung der Recyclingdatenbank in ProdTect	237
Abbildung F-3: ProdTect Ergebnis-Visualisierung	238
Abbildung F-4: Gesamtsystem Batterie mit allen notwendigen Komponenten	244
Abbildung F-5: Aufbau eines Konstruktionskataloges	247
Abbildung F-6: Beispiel für die Bewertungsmöglichkeit	253
Abbildung F-7: Beispiele für die Umsetzbarkeit in IDIS	254
Abbildung G-1: Verfahrensfließbild mechanische Aufbereitung	265
Abbildung G-2: Layout der Aufbereitungsanlage für Lithium-Ionen-Batterien	267
Abbildung G-3: Sankey-Diagramm zum Materialfluss in den Prozessen	268



III Tabellenverzeichnis

Tabelle A-1: Beschreibung der Annahmen der Szenarien zur Markt- und Technologieentwicklung.....	13
Tabelle A-2: Szenarioparametrierung, Marktentwicklung Antriebskonzept (A1 – A5).....	14
Tabelle A-3: Szenarioparametrierung, Verhältnis der verwendeten Batterievarianten (C1) ..	14
Tabelle A-4: Szenarioparametrierung, Nutzungsdauer der Batterien nach Antriebskonzept (C3).....	14
Tabelle A-5: Szenarioparametrierung, Wieder-/Weiterverwendung außerhalb des Systems (D1 und D2)	15
Tabelle A-6: Untersuchte Parameter in der Sensitivitätsanalyse und ihre möglichen Ausprägungen.....	19
Tabelle A-7: Qualifikationsgrade für Arbeiten an Hochvoltkomponenten	22
Tabelle A-8: Erforderliche Qualifikation je nach Tätigkeit und Gefährdungspotential	23
Tabelle A-9: Empfehlungen für zu treffende Regelungen	24
Tabelle A-10: Auflistung berufsgenossenschaftliche Vorschriften / Arbeitsschutzregelungen	27
Tabelle A-11: Anforderungskatalog auf Netzwerk- und Prozessebene und mögliche Akteure	42
Tabelle A-12: Vergleich der Kapitalwerte in szenariospezifischer und robuster Optimierung	63
Tabelle A-13: Anwendungen in Sekundärmärkten.....	66
Tabelle A-14: Zellparameter	67
Tabelle A-15: Eignung des Batteriesystems für die identifizierten Anwendungen	68
Tabelle A-16: Reparaturtiefe Batteriesystem A	69
Tabelle A-17: Reparaturtiefe Batteriesystem B	69
Tabelle A-18: Reparaturtiefe Batteriesystem C	70
Tabelle A-19: Batterieeigenschaften	73
Tabelle B-1: Dokumentation von Demontageprozessen (Beispiel).....	78
Tabelle B-2: Zusammenstellung der Konzepte für die Handhabung eines Batteriesystems vom Anlieferungsort zum Demontageplatz	85
Tabelle B-3: Auszug aus der Anforderungsliste für die Greifvorrichtung	86
Tabelle B-4: Rücklaufmengen der Batteriesysteme (Stückzahl) für die Szenarien „2015 realistisch“ und „2030 realistisch“	90
Tabelle B-5: Morphologischer Kasten der Demontagesysteme für Szenario „2015 realistisch“	91



Tabelle B-6: Morphologischer Kasten der Demontagesysteme für Szenario „2030 realistisch“	93
Tabelle B-7: Rücklaufmengen der Batteriesysteme (Stückzahl) für das Szenario „2030 politisch“	94
Tabelle B-8: Fraktionen nach der Demontage der Batterien	103
Tabelle C-1: Spezifikationen der NiSO ₄ - / CoSO ₄ -Lösungen für LNCAO (links) und LNMCO (rechts)	148
Tabelle C-2: Spezifikationen für LiOH•H ₂ O	149
Tabelle C-3: Spezifikationen für Li ₂ CO ₃	149
Tabelle C-4: Rohstoffspezifikation von Lithiumhydroxid Monohydrat	150
Tabelle C-5: Konzentrationen und pH-Werte der Lösungen von LNCMO V21 vs. LNCMO V5-Z	151
Tabelle C-6: Simulation der Lösungen (Metallsalz in g/l Lösung)	153
Tabelle C-7: Simulation der Lösungen für den exakten Drittmix mit Ni:Co:Mn = 1:1:1	154
Tabelle C-8: Chemische Zusammensetzung der Aktivmaterialien [Masse-%]	157
Tabelle C-9: Lade- und Endladekapazitäten von jeweils zwei Zellen des Referenz-LNCMO und V21 bzw. V5-Z	157
Tabelle C-10: Chemische, physikalische und elektrochemische Eigenschaften der LiFePO ₄ Materialien, welche aus sekundären Li-Rohstoffen hergestellt wurden	158
Tabelle C-11: Vergleich der Zusammensetzung der Reaktionslösung von V5-Z aus dem ursprünglichen (Klein-) Versuch und dem dritten Syntheszyklus	168
Tabelle D-1: Matrix der Alterungsuntersuchungen	175
Tabelle E-1: Typische Kapazitäten von Automotive-Batteriesystemen	194
Tabelle E-2: Ermittelte Energieverbräuche	195
Tabelle E-3: Funktionelle Einheiten [t Systeme] und [BEV-Äq.] sowie Umrechnung in PHEV- u. HEV-Systeme	212
Tabelle E-4: Berechnung der Lohnkosten	213
Tabelle E-5: Lohnkosten in der Mechanischen Aufbereitung	215
Tabelle E-6: Zusammensetzung der Übergangsmetallsalzlösung	217
Tabelle E-7: Fallunterscheidungen und Gesamtprozessdeckungsbeiträge	218
Tabelle E-8: Durchsatzbezogene Gewinnschwellen aller Einzelprozesse und des Gesamtprozesses	224
Tabelle F-1: unterschiedliche Möglichkeiten der Gehäuseteilung	240
Tabelle F-2: Konzepte der demontagefreundlichen Batteriemodulgestaltung	246
Tabelle F-3: Darstellung für die Umsetzung in CAD	249
Tabelle F-4: Minimale Modulzahl	249
Tabelle F-5: Unterschiedliche Hinweismöglichkeiten	251



Tabelle G-1: Bedarfsrechnung Zerlege- und Entladungsstationen	257
Tabelle G-2: Durchschnittliche Zusammensetzung von Lithium-Ionen-Akkumulatorzellen ..	258
Tabelle G-3: Verteilung wesentlicher Masseströme für die Aufbereitung von 700 kg Zellmasse je Stunde	258
Tabelle G-4: Abschätzung der erforderlichen Entstaubungsluftmengen	263
Tabelle G-5: Berechnung des Lagerbedarfs für die Batterietypen	269
Tabelle G-6: Abschätzung des Lagerplatzbedarfs für die Produkte	270
Tabelle G-7: Liste der Maschinen und Ausrüstungen	270



A 1 Kurzzusammenfassung

In dem Projekt „LithoRec – Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ wurden mehrere Verfahrenswege zum Recycling von Traktionsbatterien evaluiert. Die Planung der Demontage der Batteriesysteme in LithoRec umfasste neben der reinen Systemplanung auch erste Untersuchungen der Automatisierbarkeit der Demontageschritte, u. a. mit der prototypischen Realisierung eines Greifersystems zur Entnahme von Batteriezellen. Prozesse für das Zerlegen der Zellen und das Abtrennen der Aktivmaterialien von den Metallfolien wurden im Labor sowie hinsichtlich des Shredderns der Zellen auch im Technikumsmaßstab etabliert und untersucht. Zur hydrometallurgischen Aufbereitung separierter Beschichtungspulver aus Lithium-Ionen-Batterien wurde in LithoRec eine Pilotanlage realisiert. Ökologische und ökonomische Bilanzen auf Basis der im Labor- oder Technikumsmaßstab durchgeführten Untersuchungen zeigten positive Ergebnisse. Zur Auftrennung der Batteriesysteme bis auf die Ebene des eingesetzten kathodischen Aktivmaterialpulvers wurde ein schlüssiges Konzept entwickelt, das in Laborapparaturen sehr gute Ergebnisse zeigte.

Die meisten konventionellen Verfahren zum Batterierecycling fokussieren auf die Rückgewinnung der Wertmetalle Kobalt und Nickel durch ein im Wesentlichen pyrometallurgisches Verfahren, das zur Rückgewinnung des Lithiums mit hydrometallurgischen Verfahren kombiniert werden muss. Die Rückgewinnung eines signifikanten Anteils an Lithium ist mit diesen Verfahren nur mit extrem hohem Aufwand möglich. In LithoRec konnte hingegen ein Verfahren entwickelt werden, in welchem auf mechanischem und hydrometallurgischem Wege je nach Aktivmaterial 85 bis über 95 %* des Lithiums wiedergewonnen werden kann. Ein weiterer Vorteil des „LithoRec-Prozesses“ ist, dass die zurückgewonnenen Materialien bei mechanischer Aufbereitung im Labormaßstab nachgewiesenermaßen Batteriequalität aufweisen und somit ein geschlossener Kreislauf der strategisch wichtigen Batterierohstoffe erfolgt. So wurde aus Lithiumeisenphosphat Lithiumhydroxid gefällt und aus Lithiumnickelmangan-kobaltoxid (NCM) wieder neues NCM in Batteriequalität hergestellt.

Die Automatisierung der Demontage von Lithium-Ionen-Batteriesystemen wurde ebenfalls in LithoRec theoretisch untersucht. Es konnte hierbei gezeigt werden, dass einzelne dedizierte Demontageschritte wie z. B. die Entnahme der Batteriezellen ein ausgeprägtes Automatisierungspotenzial aufweisen. Ferner wurde beispielhaft ein Greifer zur Zellhandhabung mit integrierter Zustandsbestimmung (Spannungsmessung und Innenwiderstandsbestimmung) entwickelt. Eine durchgängige Automatisierung von Demontagesequenzen von Batteriesystemen ist jedoch aufgrund der Umgebungsbedingungen in Demontagefabriken, der Variantenvielfalt bzw. fehlender Standardisierung der Systeme und der Qualifikationsvoraussetzungen auch langfristig nur eingeschränkt realisierbar.

Bei der maschinellen Zerlegung, insbesondere der Zerkleinerung von Batteriesystemen, -zellen und -elektroden, treten - abhängig vom Aufbereitungsverfahren - Verunreinigungen in den zurückgewonnenen Aktivmaterialien auf, die Probleme bei der Synthese neuer Aktivmaterialien bereiten können. So zeigten sich in LithoRec bei der Synthese von LNCMO aus gezielt mit nennenswerten Mengen von Aluminium verunreinigten Lösungen Prozessschwierigkeiten: Das im hydrometallurgischen Prozess bei der Übergangsmetallabtrennung mitgefällte Aluminiumhydroxid führte zum Verkleben der sphärischen Übergangsmetallhydroxid-Partikel, die nach der Kalzination stark aggregiert vorlagen und ohne Zerstörung

* bezogen auf separiertes Kathodenmaterial als Rohstoff für das hydrometallurgische Recycling



der vorher gezielt eingestellten Morphologie nicht mehr aufzumahlen waren. Zudem wurde eine verunreinigungsbedingte Veränderung der Partikelmorphologie nach der erneuten Ausfällung aus verunreinigten Übergangsmetallsalzlösungen registriert.

Des Weiteren wurden in LithoRec neue Ansätze zur Elektrolytrückgewinnung (Lösungsmittel und Leitsalz) identifiziert. Erste Erfolge zeigten sich auf den Wegen der Unterdruck-Kondensation und der Extraktion mittels überkritischem Kohlenstoffdioxid im kleinsten Labormaßstab.

Erste ökologische Bewertungen geben einen Überblick über die vollständige Prozesskette (Cradle-to-grave) mit Fokus auf Lithium-Ionen-Batterien. Im Rahmen der beiden gerade abgeschlossenen BMU-geförderten Projekte LIBRI und LithoRec wurden die Recyclingtechnologien für Lithium-Ionen-Batterien ökologisch bewertet. Des Weiteren konnte die potentielle Wirtschaftlichkeit des Recyclings großer Mengen Altbatterien in LithoRec nachgewiesen werden.

A.1 Wesentliche Ergebnisse in den einzelnen Projektbereichen

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse aus den einzelnen Projektbereichen in stichpunktartigen Sätzen dargestellt. Eine detaillierte Diskussion erfolgt in den jeweiligen Arbeitsschritten.

A.1.1 Projektbereich A

- Bei Realisation des vom Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität vorgegebenen Ziels eines deutschlandweiten Bestands von einer Million Elektrofahrzeuge bis 2020 sind im gleichen Jahr bereits 11.000 Tonnen Altbatterien zu behandeln (Szenario „Politisch“). Vorausgesetzt wird, dass die schnelle Marktdurchdringung zu nur minimalen Fortschritten in der Lebensdauer der Batterien führt. **(AP A.1)**
- Die wesentlichste recyclingrelevante Information ist die in Batteriesystemen und Zellen verwendete Zellchemie. Farblich gekennzeichnete Aufkleber auf Batteriesystemen, Modulen und Zellen sollen Aufschluss über die Zellchemie geben (z. B. „NCA“, „NMC“, „LFP“). Zudem sollte die BattG-Melderegisternummer nach UBA oder der Herstellername selbst angegeben werden, damit der Hersteller im Sinne des BattG eindeutig identifiziert werden kann. **(AP A.2)**
- Die Bereitstellung der für die Demontage benötigten Anweisungen kann über eine Erweiterung des bereits etablierten System IDIS erfolgen. **(AP A.2)**
- Da zunächst ein **zentrales einstufiges Sammelkonzept** anzustreben ist, sollte ein erstes Demontagewerk mit einer Verarbeitungskapazität in der Größenordnung bis 5.000 BEV-Äquivalente/Jahr in der unmittelbaren Nähe eines Zellaufbereitungswerks errichtet werden.
- Langfristig (ab ca. 2020) ist ein Übergang zur **dezentralen zweistufigen Sammlung und Demontage** empfehlenswert.

A.1.2 Projektbereich B

- Batterieerkennungs- und Visualisierungssoftware für Mehrmarkenwerkstattendiagnosegerät programmiert und aufgespielt
- Maschinelles Aufschlüsseln kompletter Zellverbünde ist möglich → Inertisierung allerdings notwendig
- Mechanische Demontage von verschiedenen Batteriesystemen und Erstellung von Demontagerihenfolgen sowie –zeiten inkl. der notwendigen Demontagewerkzeuge
- Methodische Bewertung der Demontage hinsichtlich Demontagefreundlichkeit und Automatisierbarkeit
- Konzeptionierung von Automatisierungslösungen auf Basis der genannten Bewertungsmethodik (Handhabung der Batteriesysteme, -module und Zellen)
- Entwurf alternativer Layouts und Verkettungen von Demontagesystemen mit rein manuellen Demontagestationen, sowie gemischt manuell und automatisierten Demontagestationen
- Ausgestaltung eines Greifers für das automatisierte Handhaben von Batteriezellen mit integrierter Spannungs- und Innenwiderstandsbestimmung
- Erprobung durch Greifen und SPS-basierte Messdatenerfassung von drei verschiedenen Pouch-Batteriezellen
- Ableitung von Anforderungen an das Design von Batteriesystemen gemäß dem Design for Recycling und Design for Environment
- Aufschluss, Sortierung und Klassierung im industriellen Maßstab sind möglich
- Nasse, Lösungsmittelbasierte Separation von Stromsammelrfolie und Aktivmaterial ist möglich, aber aufwendig
- Trockene, Mechanische Separation ist großtechnisch in hoher Aktivmaterial-Reinheit und mit hohen Ausbeuten umsetzbar
- Prozess zur sortenreinen Trennung von Beschichtung und Stromsammelrfolie in Reinheit >99 % entwickelt
- Bedarf an Realisierung im Pilotmaßstab zur vollständigen Charakterisierung des Prozesses

A.1.3 Projektbereich C

- Aus rekonditionierten Aktivmaterialien lassen sich grundsätzlich Elektroden und Zellen (Labormaßstab) mit ausreichend guter elektrochemischer Performance herstellen.
- Prozess zur direkten Wiederbeschichtung von Trägerfolien mit Material aus Produktionsschuss entwickelt
- Direkt wiederbeschichtete Materialien aus Ausschuss haben gleiche elektrochemische Qualität wie Neumaterialien → keine Resynthese nötig



- Aktivmaterialsynthese aus schwach verunreinigter Übergangsmetallsalzlösung mit vergleichbarer elektrochemischen Performance erfolgreich
- Aktivmaterialsynthese aus verunreinigter Übergangsmetallsalzlösung erfolgreich, aber bei stärkerer Verunreinigung schlechtere elektrochemische Performance
- Bedarf an nachträglicher Aufreinigung – besonders hinsichtlich einer Abreicherung von Aluminium - oder hochreiner Separation (entwickelt in **PB B**)
- Bedarf an weiterer Aufklärung des Einflusses von Verunreinigungen auf die Qualität von Recycling-Elektroden
- Bedarf an Pilotanlage zur tatsächlichen Herstellung von Recyclingmaterialien (ohne Simulation der Verunreinigungen)

A.1.4 Projektbereich D

- Untersuchung der mechanischen Alterungsmechanismen (Haftkraft, Elastizität der Elektrodenschicht) an Standardmaterial
- Untersuchung an zwei unterschiedlich verunreinigten NMC-Aktivmaterialien.
- Schwach verunreinigtes NMC-Material zeigt ähnlich gute elektrochemische Performance wie Ursprungsmaterial
- Stark NMC-verunreinigtes Material zeigt deutlich geringere Performance als Standard
- Verunreinigungen in NMC-Aktivmaterial verursachen verstärkte Partikelbrüche nach Zyklisierung

A.1.5 Projektbereich E

- Die ökologische Auswertung des LithoRec-Prozesses im Rahmen der vom Öko-Institut durchgeführten Ökobilanz nach ISO 14040/14044 ergibt in den betrachteten ökologischen Wirkungskategorien teils deutliche Nettogutschriften in sämtlichen untersuchten Prozessschritten. Das Recycling der Batterien mit Hilfe des LithoRec-Prozesses ist somit als ökologisch sinnvoll zu betrachten.
- Die ökonomische Bewertung zeigt, dass der LithoRec-Recyclingprozess in Kombination mit einer mechanischen Aufbereitung ab einem jährlichen Aufkommen von ca. 4.500 t Systemen bzw. 15.000 Stück BEV-Systemen wirtschaftlich betrieben werden könnte. Ein solches Aufkommen wäre bei starker Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen und bei Erreichung der Ziele des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität – ein Bestand von einer Million Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 – zwischen 2018 und 2020 erreicht.
- Die ursprünglich angedachte manuelle Öffnung und Separation von Batteriezellen, die in Konkurrenz zu der mechanischen Aufbereitung steht, ist als unwirtschaftlich zu bezeichnen.
- Neben der Menge des Altbatterieaufkommens ist dessen Zusammensetzung wesentlicher Treiber eines sich finanziell selbst tragenden Recyclingprozesses. Werden zu-

künftig vorwiegend Lithiumeisenphosphatbatterien in Elektrofahrzeugen verwendet, wird die Gewinnschwelle des Gesamtprozesses erst bei ca. 6.800 t Systeme bzw. 21.000 BEV-Systeme erreicht.

- Die Wirtschaftlichkeit der Einzelprozesse kann dabei durch bestimmte Faktoren wesentlich beeinträchtigt werden. Größter Faktor sind sinkende Preise für die zurückgewonnenen Wertstoffe, aber auch zusätzlich benötigte Einsatzstoffe (z. B. Stickstoff).

A.1.6 Projektbereich F

- Entwicklung eines ProdTect-Produktmodells für ein Lithium-Ionen-Batteriesystem
- Identifizierung von Anforderungen für die allgemeine Batteriegestaltung mit folgender Erarbeitung von Gestaltungsregeln für die demontagefreundliche Batteriegestaltung
- Aufstellen von Konstruktionskatalogen für Verbindungstechniken, Fügen von Körpern und den Formen der Wärmeübertragung
- Die Abhängigkeiten zwischen Batterie und Fahrzeug sind ohne Normung nicht genau präzisierbar bzw. zu stark von den jeweiligen Herstellern abhängig.
- Vordefinierte/genormte Bauräume erleichtern dem Batteriehersteller modulare Systeme zu erarbeiten.
- Mit wenigen Grundmodulen ist es möglich alle Elektrifizierungsgrade abzudecken
- Definition von Ansätzen die eine vollständige Umsetzung in CAD erfordern mit prototypischer CAD-Umsetzung.
- Erarbeitung eines Konzeptes zum sicheren Umgang mit Hochvoltkomponenten des Batteriesystems
- Identifizierung von schnell realisierbaren Sicherheitskonzepten für die Aspekte Transport und Demontage
- Zusammenstellung der Rechtsvorschriften für eine fachgerechte Demontage und das Recycling sowie Ableitung von Vorschlägen für die Dokumentation in IDIS sowie als Recyclingpass

A.1.7 Projektbereich G

- Konzeptionierung einer möglichen Recycling-Pilotanlage aus den Einzelschritten der vorangegangenen Projektbereiche
- komplett neue Anlage auf der „grünen Wiese“
- Zusammenführung der Ergebnisse aus den anderen Projektbereichen
- Grundrisskonzept einer Anlage zur Verarbeitung von 700 kg Zellmaterial
- Ein Verfahrensfließbild wurde erstellt
- Einzelne Anlagenteile, Maschinen und Geräte wurden ausgelegt und mögliche Lieferanten bestimmt



A.2 Veröffentlichungen

Publikationen

- [Schmitt, 2011] Schmitt, J.; Haupt, H.; Kurrat, M.; Raatz, A.: Disassembly Automation for Lithium-Ion Battery Systems Using a Flexible Gripper. In: Proc. 15th IEEE International Conference on Advanced Robotics (ICAR), Tallinn, Estland, 2011, ISBN 978-1-4577-1157-2
- [Hanisch, 2011] Hanisch, C., Haselrieder, W., Kwade, A.. (2011). Recovery of active materials from spent lithium-ion electrodes and electrode production rejects in: Hesselbach, J.; Herrmann, C.(Hrsg.): Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, May 2nd - 4th, 2011, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 85-89
- [Hanisch, 2012] Hanisch, C., Haselrieder, W., Kwade, A.. (2012). "Recycling von Lithium-Ionen-Batterien – das Projekt LithoRec" in: Thomé-Kozmiński, K.J.; Goldmann, D.(Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 5, ISBN 978-3-935317-81-8, TK Verlag, Neuruppin, S. 691-698
- [Herrmann, 2012] Herrmann, C.; Raatz, A.; Mennenga, M.; Schmitt, J.; Andrew, S.: Assessment of Automation Potentials for the Disassembly of Automotive Lithium Ion Battery Systems. In: Proc. 19th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Berkeley, USA, 2012
- [Hoyer, 2011a] Hoyer, C.; Kieckhäfer, K.; Spengler, T. (2011): Strategische Planung des Recyclings von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien, in: Sucky, E.; Asdecker, B.; Dobhan, A.; Haas, S.; Wiese, J. (Hrsg.): Logistikmanagement: Herausforderungen, Chancen und Lösungen, Band II, Tagungsband der Logistikmanagement 2011, University of Bamberg Press, Bamberg, S. 399–419.
- [Hoyer, 2011b] Hoyer, C.; Kieckhäfer, K.; Spengler, T. (2011): A Strategic Framework for the Design of Recycling Networks for Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles, in: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Hrsg.): Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, May 2nd - 4th, 2011, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 79-84

Vorträge und Präsentationen

- 12. Doktorandenworkshop Nordost (April 2010, Cottbus): „Netzwerk- und Prozessgestaltung für das Recycling von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien“ (Claas Hoyer)
- 5. Tagung der Autoverwerter (November 2010, Hohenroda): "LithoRec - Recycling von Lithium-Ionen-Batterien" (Gunnar Bärwaldt)

- Batterietag in Aachen, (Februar 2011, Aachen):
„Recycling von Lithium-Ionen Batterien am Beispiel von LithoRec“ (Arno Kwade)
- Kraftwerk Batterie, (März 2011, Aachen):
„LithoRec - Aufbereitung von Lithium-Ionen-Batterien zur hydro-metallurgischen Rückgewinnung von Lithium und Übergangsmetallen“ (Arno Kwade)
- EUROFORUM-Konferenz “Rohstoffe für E-Mobilität” (Mai 2011, Stuttgart):
„Das LithoRec - Projekt: Recycling von EV-Batterien“ (Arno Kwade)
- 6. Tagung der Autoverwerter (November 2011, Hohenroda):
„LithoRec - Recycling von Lithium-Ionen-Batterien – Die Ergebnisse“ (Stefan Andrew)
- Materialica – Materials for Batteries – Congress (November 2011, München):
“Sustainability – Recycling of Lithium-Ion-Batteries” (Christian Hanisch)
- „Von Akku bis Zink-Kohle - Entwicklungen in der Batterieentsorgung“, (November 2011, Potsdam):
„Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (Christian Hanisch)
- Advanced Battery Power, (März 2012, Münster):
„Recycling of Lithium Ion Batteries“ (Christian Hanisch)

Poster

B. Hoffmann, S. Krüger, H. C. Wagner, F. Schappacher, S. Nowak, S. Passerini, M. Winter „*Recycling von Lithium Ionen Batterien – Analyse und Methoden*“, Kraftwerk Batterie – Lösungen für Automobil und Energieversorgung, Aachen, 01. – 02.03.2011.

S. Krüger, C. Hanisch, W. Haselrieder, S. Nowak, S. Passerini, A. Kwade, M. Winter „*Recycling Of Lithium-Ion Batteries*“, 118th International Conference on Solid State Ionics, Warschau, Polen, 03. – 08.07.2011.

H. Haupt, D. Wedler, „Ansätze zur demontagefreundlichen Batteriegestaltung“, Kraftwerk Batterie – Lösungen für Automobil und Energieversorgung, Aachen, 01. – 02.03.2011.

Presseartikel

- „Lithium – Ein Spannungsmacher auf Kreislaukurs“, Artikel VDI nachrichten, 07.01.2011 basierend auf Interview mit Professor Kwade.
- „Wiederverwertung Recycling im Elektro-Zeitalter“, Süddeutsche Zeitung, 27.04.2011, basierend auf Interview mit Christian Hanisch



- „Nachweislich grün“, Recyclingmagazin, Ausgabe 05/12 basierend auf Ökobilanz und Interview Christian Hanisch

A.3 Begriffsbestimmungen

Hybridfahrzeuge (Hybrid Electric Vehicles, HEV) sind Personenkraftwagen, die sowohl durch einen konventionellen Verbrennungsmotor als auch durch einen Elektromotor angetrieben werden können. Die Versorgung mit elektrischer Energie erfolgt aus einem Akkumulator, der beispielsweise durch Rekuperation (Bremskraftrückgewinnung) geladen wird. Ein rein elektrischer Antriebsmodus ist keine Bedingung.

Plug-In-Hybridfahrzeuge (Plug-In Hybrid Electric Vehicles, PHEV) sind *→Hybridfahrzeuge*, deren Akkumulatoren unabhängig von dem eingebauten Verbrennungsmotor durch Anschluss an stationäre Ladevorrichtungen geladen werden können. Die Möglichkeit eines rein elektrischen Betriebs für kurze bis mittlere Strecken (~ 40 km) ist Bedingung.

Reine Elektrofahrzeuge (Battery Electric Vehicles, BEV) sind Personenkraftwagen, die ausschließlich über einen elektrischen Antrieb verfügen. Die Versorgung mit elektrischer Energie erfolgt aus einem Akkumulator, der durch Anschluss an stationäre Ladevorrichtungen geladen werden kann.

Unter dem Begriff **Elektrofahrzeug** werden PHEV und BEV zusammengefasst.

Batterie-Management-Systeme (BMS) sind elektronische Systeme die die funktionale Sicherheit eines Batteriesystems gewährleisten. Zusätzliche Funktionen können eine Betriebsdatenerfassung und Verarbeitung umfassen. Die Ausgestaltung ist herstellerabhängig.

Als **Package** bezeichnet man in der Fahrzeugtechnik die geometrische Anordnung von Bauteilen eines Gesamtsystems zueinander. Die Positionen können durch sogenannte Packagemaße beschrieben werden.

Die **Modularisierung** beschreibt die Möglichkeit, unterschiedliche Gesamtsysteme aus der Variation kleiner Grundkörper aufzubauen. Die Grundkörper benötigen dafür definierte Schnittstellen

Templates sind im CAD-System eine Vorlage für einen geometrischen Körper, in dem modellierungsschritte hinterlegt sein können. Anhand von Eingabeparametern kann auf diese Weise schnell eine bekannte Geometrie erzeugt werden.



A Analyse und Entwicklung logistischer Sammel- und Rückführungsprozesse

A.1 Analyse des Altbatterieaufkommens

Zielsetzung des **AP A.1** ist es, das Aufkommen von Lithium-Ionen-Altbatterien aus Elektrofahrzeugen über die Zeit zu analysieren und abzuschätzen, um eine Planungsgrundlage für nachfolgende Untersuchungen in den einzelnen Projektbereichen zu schaffen. Aufgrund der hohen Unsicherheiten werden drei Szenarien entwickelt, die das erwartete Spektrum der Markt- und Technologieentwicklung in ihrer Breite wiedergeben. Diese Szenarien, die unter anderem den Elektrofahrzeugmarktbestand für zukünftige Zeitpunkte sowie die durchschnittliche Nutzungsdauer von Traktionsbatterien vorgeben, werden anschließend genutzt, um mit Hilfe eines neu entwickelten systemdynamischen Simulationsmodells das Altbatterieaufkommen über die Zeit abzuschätzen.

A.1.1 Identifikation und Analyse der für den Rückfluss von Li-Ionen Altbatterien relevanten Einflussgrößen

Ziel des Arbeitsschritts ist die Identifikation und Untersuchung derjenigen Einflussfaktoren, die das Altbatterieaufkommen bestimmen. Diese Arbeiten wurden von AIP-TUBS in Zusammenarbeit mit AUDI durchgeführt. Die identifizierten Faktoren können in exogene und endogene unterteilt werden. Wesentliche exogene Faktoren sind (vgl. Anhang 1): Die Marktentwicklung für Kraftfahrzeuge, die eine Lithium-Ionen-Traktionsbatterie verwenden (A1 – A4), die Lebensdauer dieser Fahrzeuge (A5), die Lebensdauer der Batterien im mobilen Betrieb (C3) und die Weiterverwendung gebrauchter Batterien außerhalb des Systems (D1, D2).

Die Einflussfaktoren sind für die im Projekt untersuchten Batterievarianten und Antriebskonzepte getrennt zu betrachten, da das Altbatterieaufkommen maßgeblich hiervon abhängt. Des Weiteren ist im Bereich des Marktpotenzials zu beachten, dass das mittelfristige und langfristige Marktpotenzial eines Antriebskonzepts differieren kann. Die weiteren Faktoren B1 bis B4 sowie C1 und C2 (im Folgenden *Behelfsfaktoren*) haben zwar keinen unmittelbaren Einfluss auf das gesamte Batterieaufkommen, tragen jedoch dem Sachverhalt Rechnung, dass dieses aufgrund unterschiedlicher chemischer Zusammensetzungen der Batterievarianten nicht als homogene Masse behandelt werden kann. Vielmehr unterscheiden sich die Batterievarianten beispielsweise hinsichtlich ihrer Energie- und/oder Leistungsdichte, ihrer Zyklenfestigkeit und kalendarischen Alterung und damit ihrer Lebensdauer sowie der Reife der Technologie.

Je nach Fragestellung kann mithilfe der Behelfsfaktoren das Altbatterieaufkommen unterschiedlich spezifiziert werden. So sind für den Transport der Batterien eher die Masse und das Volumen bezogen auf das Batteriesystem relevant, während für die Bestimmung von Kapazitäten im Verwertungsprozess eher die Masse bezogen auf die Zellen entscheidend ist. Im Rahmen der Untersuchungen in **AS A.1.4** wurden nur die Anzahl der Systemeinheiten und die Masse des Altbatterieaufkommens erhoben.