EXHIBIT 1004

NIEDERSÄCHSISCHES FORSCHUNGSZENTRUM FAHRZEUGTECHNIK

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

URT EX1004
URT Umwelt und Recyclingtechnik v. Duesenfeld
IPR2024-00887

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

LithoRec

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

VDI|VDE|IT

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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)

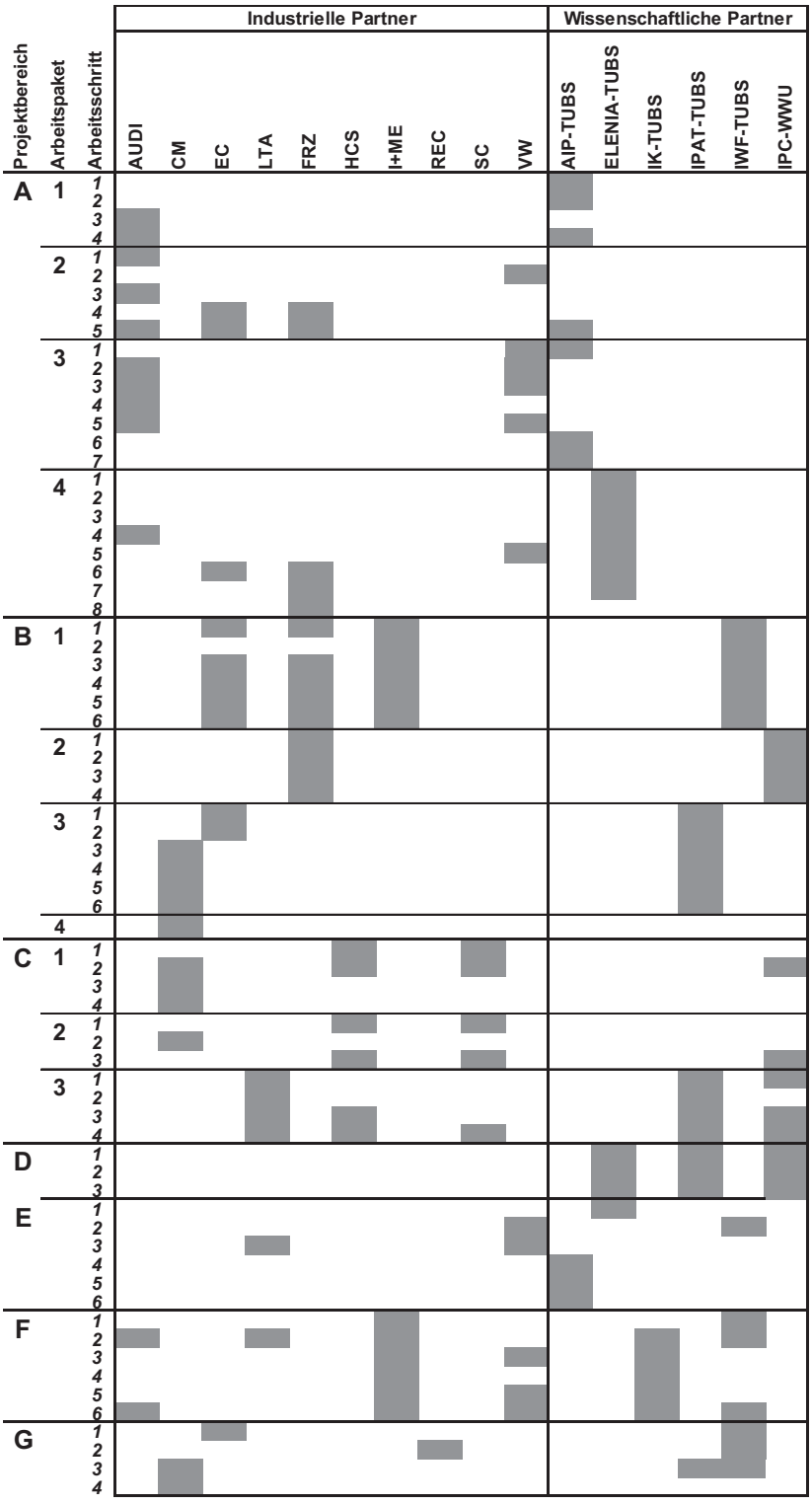
Prof. Martin Winter, Dr. Sascha Nowak
(Institut für physikalische Chemie, WWU Münster)

Allgemeine Kontaktadresse:

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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Übersicht der an den einzelnen Projektbereichen mitgewirkten Partner:



Für die Ergebnisse und Aussagen innerhalb der einzelnen Arbeitsschritte sind die jeweils beteiligten Partner verantwortlich.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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 Aktivmaterialen 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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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 variierter 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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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 LiBF4 in EC/DMC 160
Abbildung C-6: Elektrochemischer Zyklentest einer Referenzelle aus Neumaterialien – Stromstabilitätstest (Zyklen 1-30) und Zyklenstabilität bei 3C (Zyklen 30-500) 161
Abbildung C-7: Elektrochemischer Zyklentest einer Referenzelle 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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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: Zyklisierkurve von LiFePO4 bei 40°C 174
Abbildung D-2: Zyklisierkurve von NMC bei 40°C 174
Abbildung D-3: Temperaturmatrix 1CCC mit LiBF4 in EC/DMC 175
Abbildung D-4: Temperaturmatrix 3CCC mit LiBF4 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 Zyklisierung 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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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 NiSO4- / CoSO4-Lösungen für LNCAO (links) und LNMCO (rechts) 148
Tabelle C-2: Spezifikationen für LiOH•H2O 149
Tabelle C-3: Spezifikationen für Li2CO3 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 Drittelmix 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 LiFePO4 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 Synthesezyklus 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: Minimaile Modulzahl 249
Tabelle F-5: Unterschiedliche Hinweismöglichkeiten 251

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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 Lithiumnickelmangankobaltoxid (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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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. Farbig 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.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

A.1.2 Projektbereich B

- Batterieerkennungs- und Visualisierungssoftware für Mehrmarkenwerkstattdiagnosegerät programmiert und aufgespielt
- Maschineller Aufschluss kompletter Zellverbünde ist möglich → Inertisierung allerdings notwendig
- Mechanische Demontage von verschiedenen Batteriesystemen und Erstellung von Demontagereihenfolgen sowie –zeiten inkl. der notwendigen Dementagewerkzeuge
- 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 Stromsammlerfolie 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 Stromsammlerfolie 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 Produktionsausschuss entwickelt
- Direkt wiederbeschichtete Materialien aus Ausschuss haben gleiche elektrochemische Qualität wie Neumaterialien → keine Resynthese nötig

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- 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-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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-Kozmienski, K.J.:, Goldmann, D.(Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 5, ISBN 978-3-935317-81-8, TK Verlag, Neuruppin, S. 691-698

[Herrmann, 2012] Hermann, 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)

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- 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 Kreislaufkurs“, 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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- „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.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

A.1.2 Entwicklung eines Simulationsmodells zur Abschätzung des Rückflusses von Li-Ionen Altbatterien

Zur Simulation, Beschreibung und Analyse des Altbatterieaufkommens wurde von AIP-TUBS ein szenariobasiertes systemdynamisches Modell in der Entwicklungs- und Simulationsumgebung „VENSIM“ entwickelt.[1] Das Modell ist konzeptionell in vier Module gegliedert (siehe Abbildung A-1). Im **Fahrzeugabsatzmodul** wird der Absatz von Neufahrzeugen verschiedener Antriebskonzepte über die Zeit simuliert. Die abgesetzten Neufahrzeuge finden Eingang in das **Fahrzeugbestandmodul**, in dem der Bestand der Fahrzeuge modelliert ist. Der Bestand der Fahrzeuge ist die Summe aus kumulierten Neuzulassungen abzüglich kumulierter Verschrottungen. Die Anzahl der Verschrottungen über die Zeit wird in dem Modul durch die Simulation der Fahrzeugalterung ermittelt. Die in den Fahrzeugen verbauten Batterien unterschiedlicher Varianten werden im **Batteriebestandmodul** erfasst, in dem die Alterung und die anschließende Deinstallation und der Ersatz von Batterien der Fahrzeuge im Fahrzeugbestand simuliert werden. Die Summe aus Fahrzeugverschrottungen und Batterieersatz ist das Aufkommen deinstallierter Batterien. Das für das Recycling zur Verfügung stehende Altbatterieaufkommen wird mit Berücksichtigung der Verzögerung durch mögliche Weiterverwendung im **Altbatterieaufkommenmodul** abgebildet. Das Modell wird mithilfe von Szenarien parametriert. Exogen vorgegeben werden dabei Antriebskonzeptdefinitionen, Batterievariantendefinitionen und Weiterverwendung.

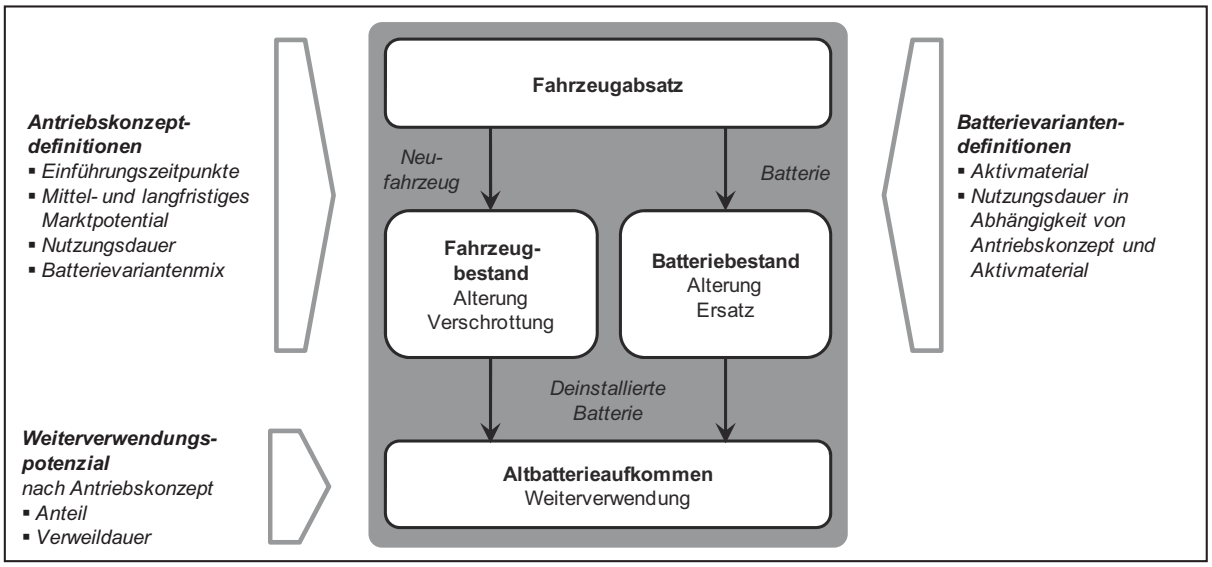


Abbildung A-1: Konzept des Modells zur Abschätzung des Altbatterieaufkommens

A.1.2.1 Beschreibung der Module

Grundidee des **Fahrzeugabsatzmoduls** ist es, auf Basis exogener Szenariovorgaben den Fahrzeugabsatz über die Zeit endogen zu berechnen. Der Gesamtabsatz für die einzelnen Antriebskonzepte ergibt sich dabei annahmegemäß aus der Summe der Erstkäufe und der Ersatzbeschaffungen. Während die Erstkäufe mit Hilfe eines diffusionstheoretischen Modells

[1] Für eine wissenschaftliche Einordnung und Vorstellung einer Erweiterung dieses Modells siehe Hoyer et al. (2011).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

in Anlehnung an Bass (1969) ermittelt werden, ergeben sich die Ersatzkäufe aus den Fahrzeugverschrottungen nach Ende der Nutzungsdauer.

Grundlage für die Ermittlung des Fahrzeugabsatzes auf Basis von Erstkäufen über die Zeit stellt im Modell eine logistische Wachstumsfunktion dar. Der Fahrzeugabsatz entspricht dabei dem Bestandswachstum der logistischen Funktion. Allgemein hängt dieses Wachstum vom aktuellen Bestand, einer Bestandsobergrenze und einer Wachstumskonstanten ab. Die Bestandsobergrenze ist im vorliegenden Fall durch das Marktpotential bestimmt. Die Wachstumskonstante wird im Modell unter Zuhilfenahme exogener Szenariovorgaben berechnet. Hierzu zählen der Einführungszeitpunkt eines Antriebskonzepts sowie die erwarteten Fahrzeugbestände zweier zukünftiger Zeitpunkte: dem initialen und dem langfristigen Marktpotential. Das initiale Marktpotential erlaubt die Vorgabe eines in näherer Zukunft (5 bis 15 Jahre) erwarteten Fahrzeugbestands. Über diesen Zeitraum hinausgehende Erwartungen bezüglich des Fahrzeugbestands in einem gesättigten Markt können mit dem langfristigen Marktpotential berücksichtigt werden. Darüber hinaus erlaubt das Modell die Abbildung von Übergangstechnologien und damit der Degenerationsphase eines Antriebkonzepts. Ist das langfristige Marktpotential niedriger als das initiale Marktpotential, wird die Anzahl der Ersatzbeschaffungen begrenzt, bis auch der Bestand der Fahrzeuge auf das langfristige Marktpotential gesunken ist.

Die im Fahrzeugabsatzmodul berechneten abgesetzten Fahrzeuge finden Eingang in das **Fahrzeugbestandmodul**, in dem die Alterung der Fahrzeuge bis zu ihrer Verschrottung simuliert wird. Der Alterungsprozess der Fahrzeuge ist in sogenannten Alterskohorten modelliert.[2] Damit lässt sich der Gesamtfahrzeugbestand in verschiedene Altersgruppen klassifizieren und Fahrzeugverschrottungen können auf Basis der erwarteten mittleren Nutzungsdauer und der nach Fahrzeugalter differenzierten Ausfallraten bestimmt werden. Fahrzeugverschrottungen führen im Modell zu Ersatzkäufen, die im Falle negativen Marktwachstums begrenzt sind.

Im **Batteriebestandmodul** wird die Anzahl der aufgrund von Fahrzeugverschrottung oder Alterung aus den Fahrzeugen deinstallierten Batterien berechnet. Der Batteriebestand erhöht sich um den Neufahrzeugbatteriebedarf und den Ersatzbatteriebedarf. Der Neufahrzeugbatteriebedarf wird aus dem Gesamtabsatz der jeweiligen Antriebskonzepte unter Berücksichtigung der exogenen Vorgabe von antriebskonzeptspezifischen Batterievariantenanteilen ermittelt. Verschrottungen von Fahrzeugen verringern den Bestand. Gealterte Batterien führen zu Ersatzbatteriebedarf, so dass der Bestand installierter Batterien konstant bleibt. Die Alterung der Batterien ist dabei vereinfacht modelliert, die Batterien werden frühestens durch die Verschrottung des Fahrzeugs und spätestens bei Erreichen der Batterienutzungsdauer deinstalliert. Die nach Antriebskonzept und Batterievariante differenzierte Batterienutzungsdauer wird exogen vorgegeben.

Das **Altbatterieaufkommenmodul** dient der Ermittlung der dem Recycling zur Verfügung stehenden Altbatterien über die Zeit. Eingangsgröße ist die Anzahl deinstallierter Batterien aus dem Batteriebestandmodul. Aus exogenen Szenariovorgaben bezüglich des Anteils der Batterien in Weiterverwendung und der Dauer der Weiterverwendung wird die Stückzahl der Altbatterien berechnet, die dem Recycling zur Verfügung stehen. Dabei wird nach dem Antriebskonzept differenziert, in dem die Batterie ursprünglich installiert war. Mithilfe der vorge-

[2] Vgl. Sterman (2000).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

gebenen antriebskonzept- und batterievariantenspezifischen Massen wird daraus die Gesamtmasse der Altbatterien über die Zeit ermittelt.

A.1.3 Erarbeitung von Szenarien zur langfristigen Absatzentwicklung und zur Nutzung von Elektrofahrzeugen im Zeitverlauf

Zunächst war eine Beteiligung des AIP-TUBS in diesem Arbeitsschritt nicht vorgesehen. Im Projektverlauf erschien dies jedoch eine wertvolle Ergänzung zu den Ergebnissen der Projektpartner, so dass hier die Ergebnisse der AIP-TUBS zu diesem Arbeitsschritt vorgestellt werden. In Zusammenarbeit mit Experten von AUDI konnten drei Szenarien zur langfristigen Absatzentwicklung und zur Nutzung von Elektrofahrzeugen im Zeitverlauf erarbeitet werden. Nach einer Auflistung der grundlegenden Annahmen werden die Annahmen der einzelnen Szenarien erläutert und die daraus folgende Parametrierung dargelegt.

A.1.3.1 Grundlegende Annahmen

Betrachtungsgegenstand ist das zu erwartende Aufkommen von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien in Deutschland, die nach ihrer Nutzung in Hybrid-, Plug-In-Hybrid- und Elektrofahrzeugen aufgrund Fahrzeugverschrottung, Defekts oder Erreichung der maximalen Nutzungsdauer als Abfall einer Entsorgung zugeführt werden müssen. Aufgrund der ungewissen Entwicklung des Markts für die Fahrzeuge und der Batterietechnik wird die Analyse in einer szenariobasierten Simulation durchgeführt.

Die **Zielgröße** der Simulation ist das Altbatterieaufkommen. Es wird in den Einheiten Menge in Stück/a, Masse in t/a und Nennkapazität in kWh/a, jeweils gegliedert nach Antriebskonzept, erhoben. Die Berechnung erfolgt auf Grundlage der Referenzwerte aus Anhang 2.

Die Analyse findet für einen **langfristigen Zeitraum** von 2010 bis 2030 statt. Für die Überprüfung von Systemverhalten im Gleichgewicht wurden auch weitreichendere Zeiträume simuliert, diese sind jedoch nicht Gegenstand der Auswertung in **AS A.1.4**. **Verkaufsstart** für Hybridfahrzeuge mit serienmäßiger Lithium-Ionen-Batterie ist 2010, Plug-In-Hybrid- und reine Elektrofahrzeuge werden ab 2012 auf dem deutschen Markt angeboten. Als Grundlage zur Berechnung der Marktanteile der Elektromobilität wird von einem **langfristigen jährlichen PKW-Absatzvolumen** auf dem deutschen Markt von 3,3 Mio. Fahrzeugen ausgegangen.[3]

A.1.3.2 Annahmen der Szenarien

Als Treiber des Altbatterieaufkommens wurden die Ölpreis-, Markt- und Technikentwicklung sowie das Wieder- und Weiterverwendungspotenzial der Traktionsbatterien identifiziert. Tabelle A-1 beschreibt die Annahmen der Szenarien zur Markt- und Technologieentwicklung. Aus den beschriebenen Annahmen der Szenarien wurde entsprechend der in **AS A.1.2** ermittelten Einflussfaktoren eine Parametrierung vorgenommen, welche Tabelle A-2 bis Tabelle A-5 zu entnehmen ist.

[3] Geschätzt auf Basis der PKW-Zulassungszahlen, vgl. Statistisches Bundesamt (2009).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tabelle A-1: Beschreibung der Annahmen der Szenarien zur Markt- und Technologieentwicklung

Treiber	**Pessimistisches Szenario**	**Politisches Szenario**	**Realistisches Szenario**
Ölpreis	Unwesentlich steigend	Stark steigend	Extrem steigend
Markt	Keine oder nicht zielführende Anreizprogramme Hohe Aufpreise, keine Kompensation durch Betriebskosten	Erfolgreiche Marktaktivierung, Subventionen an Hersteller mindern deren Risiko, Aufpreise werden durch niedrige Betriebskosten und Vergünstigungen kompensiert	Zielgerichtete Anreizprogramme Moderate Aufpreise werden durch vergleichsweise niedrige Betriebskosten kompensiert
Technik	Viele herstellerspezifische Lösungen, internationale Ladung kompliziert Kaum Fortschritte in der Batterietechnik, niedrige Reichweite und Lebensdauer der Batterien	Späte Standardisierungen in Bezug auf Batterien und deren Ladung sowie Elektroantrieb; Fortschritte in Bezug auf Effizienz, Reichweite und Zuverlässigkeit der Batterien	Weitreichende Standardisierungen in Bezug auf Batterien, deren Ladung sowie den Elektroantrieb Technologiesprünge führen zu hoher Reichweite und langer Batterielebensdauer
Wieder-/Weiterverwendung	Niedrige Eignung und kaum Nachfrage für stationäre Verwendung	Hohe Eignung, jedoch wenig Nachfrage für stationäre Verwendung	Hohe Eignung und Nachfrage für stationäre Verwendung, hoher finanzieller Restwert
Konsequenzen	**Alternative Kraftstoffe und optimierte konventionelle Verbrennungsmotoren setzen sich durch, Hybrid- und Elektrofahrzeuge bleiben Randerscheinung**	**Beschleunigtes Marktwachstum für PHEV und BEV, langfristig sehr hohe Marktanteile (ca. 60 Prozent)** **Bestand 2020: 1 Mio. Elektrofahrzeuge (PHEV + BEV)**	**Natürliches Marktwachstum für PHEV und BEV, aufgrund der hohen Reichweiten werden vergleichsweise hohe Anteile BEV abgesetzt**

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tabelle A-2: Szenarioparametrierung, Marktentwicklung Antriebskonzept (A1 – A5)

Szenario	Pessimistisch			Politisch			Realistisch		
	Antriebskonzept			Antriebskonzept			Antriebskonzept		
Parameter	HEV	PHEV	BEV	HEV	PHEV	BEV	HEV	PHEV	BEV
Initiales Marktpotenzial (A1) [1.000 Fahrzeuge]	100	200	50	200	800	200	50	200	50
Zeitpunkt der Erreichung (A2) [Datum]	2020	2020	2025	2030	2020	2020	2020	2020	2020
Langfristiges Marktpotenzial (A3) [1.000 Fahrzeuge]	250	300	250	150	15.000	5.000	150	12.000	8.000
Zeitpunkt der Erreichung (A4) [Datum]	2030	2030	2035	2040	2050	2050	2040	2050	2050
Durchschn. Lebensdauer des Fahrzeugs (A5) [Jahre]	11	9	9	12	10	10	14	12	12

Tabelle A-3: Szenarioparametrierung, Verhältnis der verwendeten Batterievarianten (C1)

Szenario	Pessimistisch	Politisch	Realistisch
Verhältnis LFP [v.H.]	20	20	60
Verhältnis NMC [v.H.]	70	70	30
Verhältnis LCA [v.H.]	10	10	10

Tabelle A-4: Szenarioparametrierung, Nutzungsdauer der Batterien nach Antriebskonzept (C3)

Szenario	Pessimistisch	Politisch	Realistisch
Nutzungsdauer HEV [Monate]	50	72	180
Nutzungsdauer PHEV [Monate]	42	60	96
Nutzungsdauer BEV [Monate]	36	48	60

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tabelle A-5: Szenarioparametrierung, Wieder-/Weiterverwendung außerhalb des Systems (D1 und D2)

Szenario	**Pessimistisch**			**Politisch**			**Realistisch**		
	Antriebskonzept			Antriebskonzept			Antriebskonzept		
Parameter	HEV	PHEV	BEV	HEV	PHEV	BEV	HEV	PHEV	BEV
Rücklaufverzögerung (D1) [Jahre]	–	–	2,0	–	1,0	2,0	–	2,0	4,0
Anteil der verzögerten Rückläufer (D2) [v. H.]	–	–	8	–	2	15	–	15	50

A.1.4 Durchführung einer Simulationsstudie zum Altbatterierücklauf mit expliziter Berücksichtigung unsicherer Einflüsse

Die Simulationsstudie wurde mit Hilfe des in **AS A.1.2** entwickelten Modells von AIP-TUBS in Kooperation mit AUDI durchgeführt. Im Folgenden werden zunächst jeweils die Ergebnisse für die Parametrierung des Modells mit den drei Szenarien „Pessimistisch“, „Politisch“ und „Realistisch“ aus **AS A.1.3** dargelegt und die Szenarien untereinander verglichen. Aufgrund der erheblichen Unsicherheiten im Rahmen des Altbatterieaufkommens werden abschließend die Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse ausgewertet.

A.1.4.1 Szenario „Pessimistisch“

Das Szenario „Pessimistisch“ kann bezüglich der Marktentwicklung für Elektrofahrzeuge als Minimalszenario betrachtet werden. Die Annahmen vorausgesetzt, entspricht der gemeinsame Marktanteil der Elektrofahrzeuge (PHEV und BEV) 2020 unter 1 Prozent. Er steigt nur unwesentlich bis zum Jahr 2040 auf knapp 2 Prozent. Insbesondere reine Elektrofahrzeuge werden erst ab 2020 in nennenswerter Menge abgesetzt.

Im Jahr 2015 beträgt das Altbatterieaufkommen rund 450 Hybrid- und 700 Plug-In-Hybrid-Batterien (Batterien aus Elektrofahrzeugen sind vernachlässigbar) mit einer Gesamtmasse von etwa 120 Tonnen. Dazu zählen neben Batterien aus verschrotteten Fahrzeugen bereits erste ausgetauschte Altbatterien. 2020 sind es knapp 4.300 Tonnen, im Jahr 2030 ergibt sich ein Aufkommen von ca. 22.500 Tonnen. Langfristig wird ab 2035 ein Aufkommen von ungefähr 30.000 t/a erreicht.

Dieses Ergebnis ist neben dem Marktwachstum auf niedrigem Niveau auch in der sehr kurzen Lebensdauer der Fahrzeuge (11 Jahre für Hybridfahrzeuge, 9 für Plug-In-Hybrid- und reine Elektrofahrzeuge) sowie der Batterien (ca. 4,2 / 3,5 / 3 Jahre) begründet, was zu einer hohen Frequenz von Fahrzeugverschrottungen und Batterieaustäuschen führt. Da lediglich acht Prozent der Batterien aus vollelektrischen Fahrzeugen im Durchschnitt nur zwei Jahre wieder- oder weiterverwendet werden, stehen sie zum größten Teil sofort nach dem Ausbau aus den Fahrzeugen dem Recycling zur Verfügung.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

A.1.4.2 Szenario „Politisch“

Im Szenario „Politisch“ wird im Jahr 2020 die mit dem Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität angestrebte Menge von einer Million Elektrofahrzeugen auf Deutschlands Straßen erreicht. Diese Menge setzt sich aus 200.000 reinen Elektrofahrzeuge und 800.000 Plug-In-Hybriden zusammen. Der gemeinsame Marktanteil der Elektrofahrzeuge entspricht 2020 etwa 8 Prozent und wächst bis zum Jahr 2040 auf ca. 60 Prozent.[4]

Aufgrund des frühen und schnellen Marktwachstums von Plug-In-Hybrid- und Elektrofahrzeugen in Verbindung mit vergleichsweise kurzen Nutzungsdauern der Fahrzeuge und Batterien und der nur mittelmäßigen Bedeutung der Wieder-/Weiterverwendung der Batterien führt das Szenario „Politisch“ zu einem sehr hohen Altbatterieaufkommen. So führen im Jahr 2015 Verschrottungen zu einem Aufkommen von 26 Hybrid- und gut 1.900 Plug-In-Hybrid-Batterien sowie ca. 420 Batterien aus reinen Elektrofahrzeugen mit einer Gesamtmasse von ca. 380 Tonnen. 2020 sind es ca. 11.500 Tonnen, hierunter fallen bereits die ersten ausgetauschten Altbatterien. Für das Jahr 2030 ergibt sich ein weiterhin stark wachsendes Aufkommen von ca. 150.000 Tonnen.

A.1.4.3 Szenario „Realistisch“

Im Szenario „Realistisch“ wird im Gegensatz zum „politischen Szenario“ von einem natürlichem, das heißt, nicht künstlich beschleunigtem, Marktwachstum ausgegangen. Langfristig wird der Elektromobilität in diesem Szenario zwar ein ähnlich hoher Erfolg beigemessen. Hohe Marktanteile und Bestände werden jedoch deutlich später erreicht. Der gemeinsame Marktanteil der Elektrofahrzeuge (PHEV und BEV) beträgt 2020 ca. 2,5 Prozent, steigt jedoch im Jahr 2030 auf 32 Prozent und erreicht bereits 2036 ungefähr 60 Prozent.

Im Jahr 2015 führen ausschließlich Verschrottungen zu einem Aufkommen von gut 150 Hybrid- und 300 Plug-In-Hybrid-Batterien sowie ca. 50 Batterien aus reinen Elektrofahrzeugen mit einer Gesamtmasse von etwa 60 Tonnen. 2020 sind es knapp 1.000 Tonnen, im Jahr 2030 ergibt sich ein stark wachsendes Aufkommen von knapp 29.000 Tonnen. Das zunächst sehr langsam steigende Aufkommen von Altbatterien ist der langen Lebensdauer sowohl der als auch der Batterien sowie der hohen Weiterverwendungsquote zuzuschreiben.

A.1.4.4 Vergleich der Szenarien

Die jährlichen Abfallmengen von Altbatterien sind im Vergleich der Szenarien stark abweichend und unterschiedlich schnell wachsend. In Abbildung A-2 ist der Altbatterieaufkommensverlauf im Vergleich der Szenarien dargestellt. Bezüglich der Entwicklung der **Zusammensetzung des Altbatterieaufkommens** im Zeitverlauf sind im Vergleich der Szenarien große Unterschiede festzustellen.

Das gesamte Altbatterieaufkommen liegt 2015 zwischen 70 und 400 Tonnen. Vorwiegend stammen diese aus Plug-In-Hybridfahrzeugen (50 bis 270 Tonnen). Die Masse der anfallenden Altbatterien aus Hybridfahrzeugen ist unbedeutend gering (unter 20 Tonnen), Batterien aus reinen Elektrofahrzeugen sind nur im politischen Szenario in nennenswerter Menge zu erwarten (100 Tonnen).

[4] Absoluter Marktanteil als Verhältnis der jährlich abgesetzten Menge eines oder mehrerer Antriebskonzepts/-konzepte zum gesamten PKW-Absatz.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Im Jahr 2020 ist mit einem Aufkommen von Altbatterien von 1.000 Tonnen im realistischen Szenario über 4.000 im pessimistischen Szenario bis hin zu 11.500 Tonnen im politisches Szenario zu rechnen. Vorwiegend stammen die Batterien weiterhin aus Plug-In-Hybridfahrzeugen. Der Anteil der Hybridfahrzeugbatterien bleibt gering. Batterien aus reinen Elektrofahrzeugen sind im pessimistischen Szenario weiterhin unbedeutend, in den anderen Szenarien erreichen sie jedoch erhebliche Anteile von ungefähr einem Drittel im politischen Szenario (gut 4.000 Tonnen) bis zur Hälfte des gesamten Altbatterieaufkommens im realistischen Szenario (knapp 500 Tonnen).

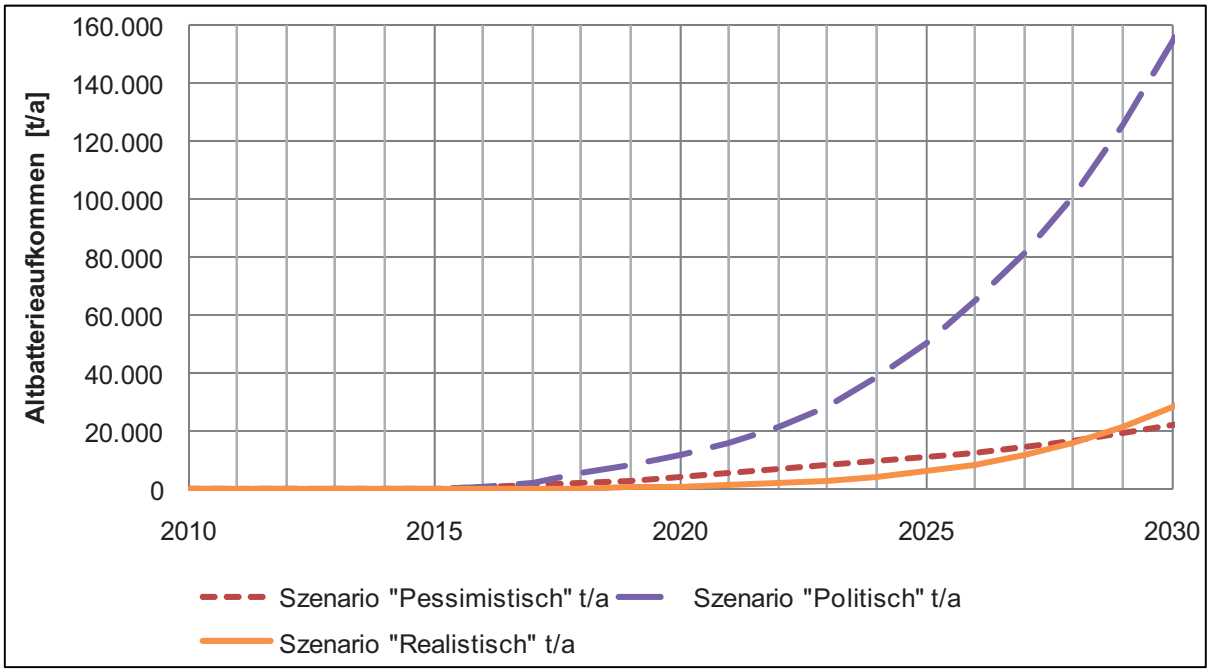
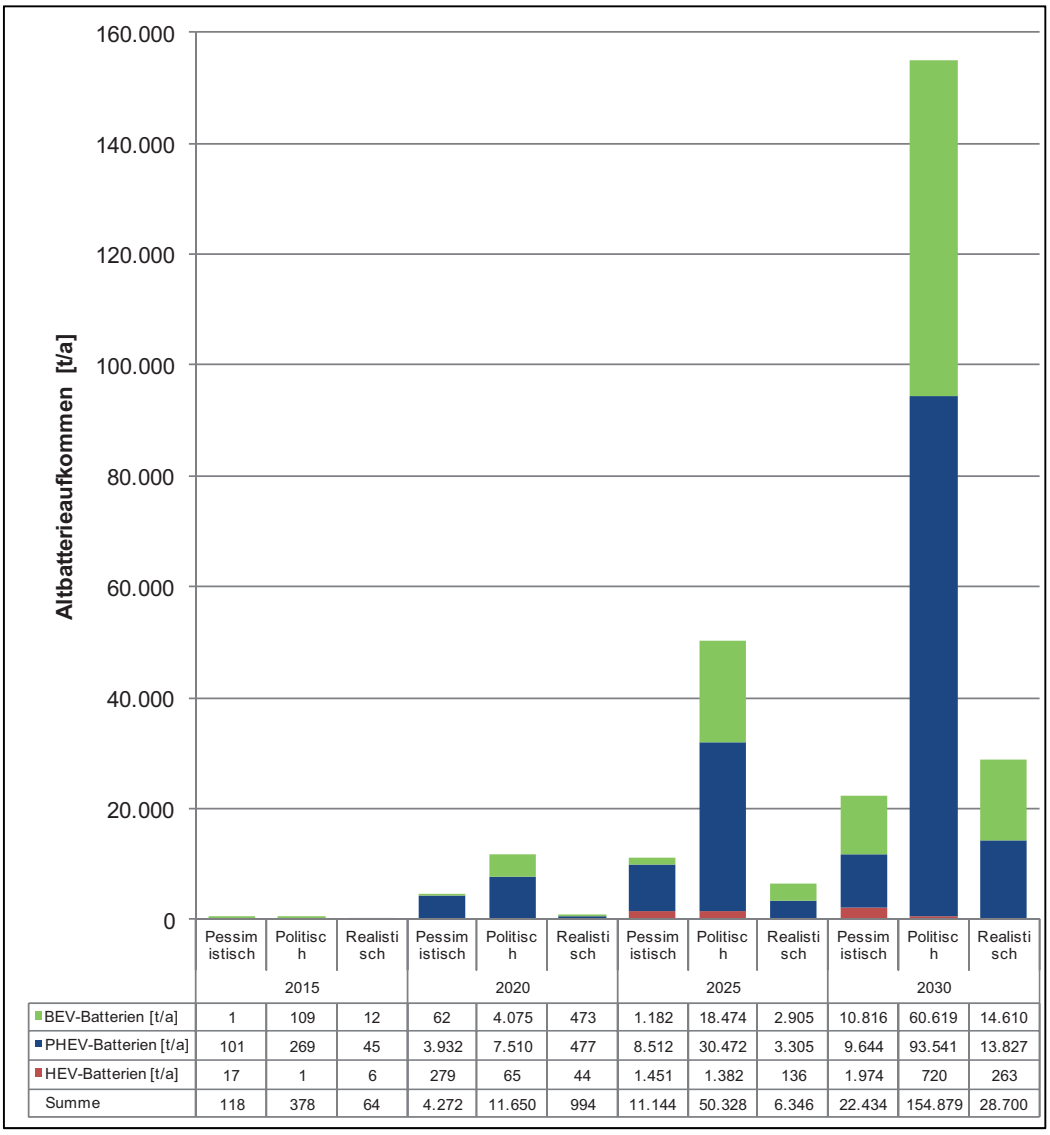


Abbildung A-2: Vergleich des Altbatterieaufkommensverlauf (Masse) der drei Szenarien

Im weiteren Verlauf bis 2030 wächst das jährliche Altbatterieaufkommen durchschnittlich zwischen ca. 20°Prozent (pessimistisches Szenario) und 40°Prozent (realistisches Szenario) pro Jahr. Die Masse der im realistischen Szenario jährlich anfallenden Altbatterien übersteigt erst ab ungefähr 2029 die des pessimistischen Szenarios. Für das Jahr 2030 ergibt sich in den pessimistischen und realistischen Szenarien ein Altbatterieaufkommen von unter 22.000 respektive 29.000 Tonnen. Der vergleichsweise früh und stark wachsende Elektrofahrzeugmarkt im politischen Szenario führt zum mit Abstand stärksten Altbatterieaufkommen von ca. 150.000 Tonnen. Hybridfahrzeugbatterien erreichen nur im pessimistischen Szenario einen deutlichen Anteil von 9 Prozent (ca. 2.000 Tonnen). Batterien aus Plug-In-Hybridfahrzeuge tragen szenarienübergreifend weiterhin zu einem großen Teil des Aufkommens bei, jedoch gewinnen die Batterien aus reinen Elektrofahrzeugen zunehmend an Bedeutung und übertreffen deren Anteil im pessimistischen und realistischen Szenario sogar.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.



	Pessimistisch	Politisch	Realistisch	Pessimistisch	Politisch	Realistisch	Pessimistisch	Politisch	Realistisch	Pessimistisch	Politisch	Realistisch
	2015			2020			2025			2030		
BEV-Batterien [t/a]	1	109	12	62	4.075	473	1.182	18.474	2.905	10.816	60.619	14.610
PHEV-Batterien [t/a]	101	269	45	3.932	7.510	477	8.512	30.472	3.305	9.644	93.541	13.827
HEV-Batterien [t/a]	17	1	6	279	65	44	1.451	1.382	136	1.974	720	263
Summe	118	378	64	4.272	11.650	994	11.144	50.328	6.346	22.434	154.879	28.700

Abbildung A-3: Vergleich des Altbatterieaufkommens (Masse) nach Batterievarianten der drei Szenarien

Abbildung A-3 verdeutlicht die Entwicklung der Zusammensetzung des Altbatterieaufkommens der drei Szenarien für ausgewählte Zeitpunkte.

Bei einem Vergleich der Zeitpunkte der Erreichung von **Schwellenwerten kumulierter Altbatterien** von 1.000, 10.000 und 100.000 Tonnen werden die Unterschiede zwischen den Szenarien besonders deutlich. Sie werden innerhalb des Projektionszeitraums jeweils im politischen Szenario zuerst und im realistischen Szenario zuletzt erreicht.

Die ersten 1.000 Tonnen Altbatterien stehen dem Recycling im politischen Szenario 2015 zur Verfügung, ein Jahr später im pessimistischen Szenario und erst 2018 im realistischen Szenario. Für die ersten 10.000 Tonnen ergibt sich ein ähnliches Bild, auch hier beträgt der zeitliche Abstand zwischen politischem und pessimistischem Szenario nur ein Jahr (2018 respektive 2019). Im realistischen Szenario wird dieser Schwellwert erst 2023 erreicht. Die stark wachsenden Bestände der Fahrzeuge mit Lithium-Ionen-Batterien führen im politischen Szenario bereits 2023 zu einem kumulierten Aufkommen von 100.000 Tonnen Altbatterien. Diese Menge wird beinahe zeitgleich erst fünf Jahre später im pessimistischen und realistischen Szenario erreicht.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

A.1.4.5 Sensitivitätsanalyse

Aufgrund der starken Ungewissheit bezüglich der Markt- und Technikentwicklung von Elektrofahrzeugen und insbesondere der Traktionsbatterien wird für ausgesuchte Parameter deren Auswirkung auf das Altbatterieaufkommen untersucht.

A.1.4.5.1 Vorgehensweise

Die zu untersuchende endogene Größe ist das massenmäßige Altbatterieaufkommen nach Batterievariante. Als Grundlage für die Analyse dient das Szenario „Realistisch“. Einflussfaktoren, die das mengenmäßige Altbatterieaufkommen in unmittelbarer Weise bestimmen, sind die durchschnittliche **Lebensdauer der Fahrzeuge**, die **Nutzungsdauer der Batterien** im mobilen Betrieb sowie die **Rücklaufverzögerung der Batterien** und der **Anteil der verzögerten Batterien**. Der Einfluss der Variation dieser ausgewählten Parameter auf das Altbatterieaufkommen wird in mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation untersucht. Diese erfolgt multivariat, so dass jeweils mehrere Parameter gleichzeitig variiert werden. Die untersuchten Ausprägungen sind Tabelle A-6 zu entnehmen.

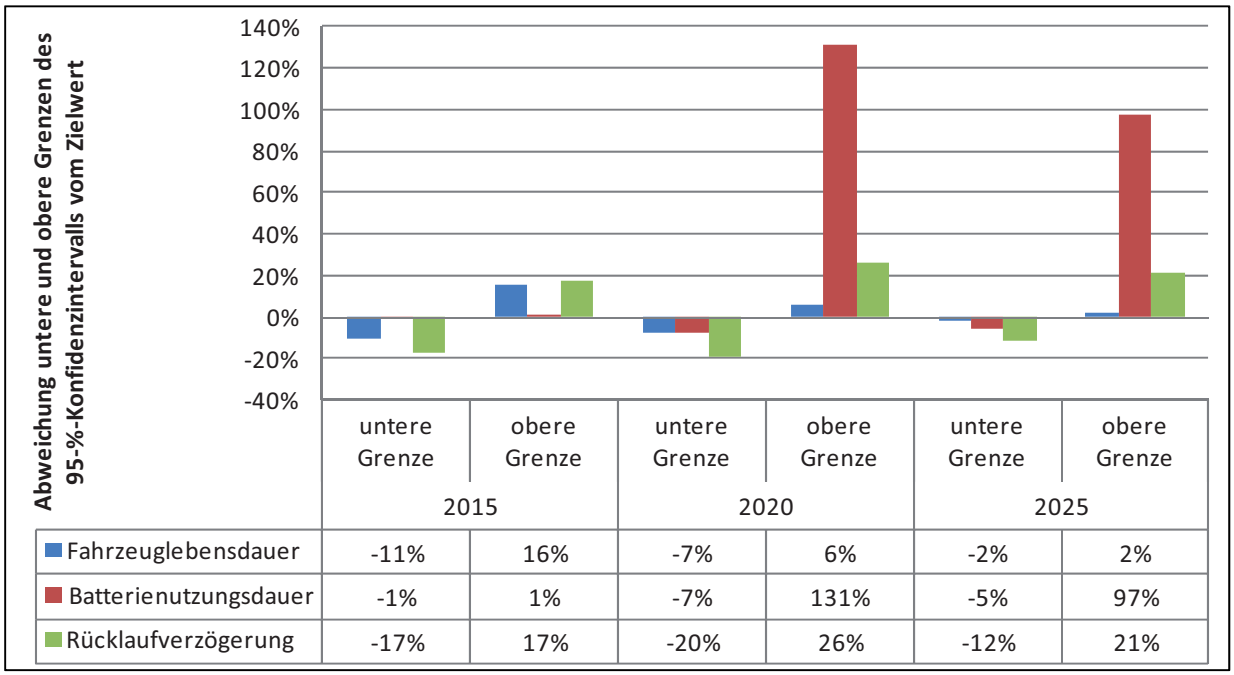
Tabelle A-6: Untersuchte Parameter in der Sensitivitätsanalyse und ihre möglichen Ausprägungen

Parameter	Untersuchte Ausprägungen
Durchschnittliche Fahrzeuglebensdauer	Gleichzeitige, unabhängige Modifikation der Lebensdauern aller drei Antriebskonzepte Lebensdauer folgt Dreiecksverteilung mit den Parametern minimaler Wert (a), maximaler Wert (b), wahrscheinlichster Wert (c) HEV: $a = 10;\ b = 16; c = 14\ Jahre$ PHEV und BEV: $a = 9;\ b = 16; c = 12\ Jahre$
Nutzungsdauer der Batterien	Gleichzeitige, unabhängige Modifikation; Dreiecksverteilung HEV: $a = 4;\ b = 15; c = 14\ Jahre$ PHEV: $a = 3{,}5;\ b = 10; c = 8\ Jahre$ BEV: $a = 3;\ b = 6; c = 5\ Jahre$
Rücklaufverzögerung der Altbatterien und Anteil der verzögerten Rückläufer	Gleichzeitige, unabhängige Modifikation. Dauer der Verzögerung: HEV: keine Verzögerung (0), PHEV und BEV: Dreiecksverteilung PHEV: $a = 0{,}1;\ b = 2; c = 1\ Jahr$ BEV: $a = 0{,}1;\ b = 5; c = 2\ Jahre$ Anteil der verzögerten Batterien: HEV: 0 PHEV: $(0{,}0;\ 0{,}2; 0{,}4; 0{,}6)$ BEV: $(0{,}0;\ 0{,}2; 0{,}4; 0{,}6; 0{,}8)$

A.1.4.5.2 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass – neben der Marktentwicklung für Hybrid- und Elektrofahrzeuge – die **Nutzungsdauer der Batterien** der wesentlichste Einflussfaktor auf die Höhe des Altbatterieaufkommens ist (siehe Abbildung A-4). Eine Verringerung des Parameters hat eine Erhöhung des Altbatterieaufkommens zur Folge.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.



	untere Grenze 2015	obere Grenze 2015	untere Grenze 2020	obere Grenze 2020	untere Grenze 2025	obere Grenze 2025
Fahrzeuglebensdauer	-11%	16%	-7%	6%	-2%	2%
Batterienutzungsdauer	-1%	1%	-7%	131%	-5%	97%
Rücklaufverzögerung	-17%	17%	-20%	26%	-12%	21%

Abbildung A-4: Einfluss ausgewählter Parameter auf das Altbatterieaufkommen

Der Vergleich der Abweichungen der unteren und oberen Grenzen des 95-Prozent-Konfidenzintervalls vom Zielwert des Basisszenarios zeigt in 2020 ein bis zu 130 Prozent höheres Altbatterieaufkommen bei der Variation der Batterienutzungsdauer. Abbildung A-5 zeigt die 50-Prozent-, 75-Prozent- sowie 95-Prozent-Konfidenzintervalle (rot, orange und grün) des zu erwartenden Altbatterieaufkommens und das gesamte Spektrum aller Realisierungen (grau). Die Mengeneinheit auf der Ordinate ist hier Kilogramm.

Die Variation der **Rücklaufverzögerung** erwirkt 2020 eine im signifikanten Bereich maximale Erhöhung um +26 Prozent. Dabei wird die S-förmige Altbatterieaufkommenskurve jedoch lediglich verschoben, das heißt, die Altbatterien treffen in gleicher Menge, jedoch zeitlich verschoben ein.

Die Verlängerung oder Verkürzung der **Fahrzeuglebensdauer** hat zwar kurzfristig noch Abweichungen um bis zu 16 Prozent zur Folge. Nur im Fall der Hybridfahrzeuge jedoch zeigt sich eine deutliche Auswirkung auf das Altbatterieaufkommen. Aufgrund der geringen Bedeutung des Hybridfahrzeugmarkts sinkt der Einfluss langfristig. Bei Plug-In-Hybrid- und Elektrofahrzeugen liegt die Vermutung nahe, dass ein weitaus bedeutenderer Teil des Altbatterieaufkommens aufgrund der kürzeren Batterienutzungsdauer durch den Batterieaustausch verursacht wird, während die Hybridbatterien im Ausgangsszenario mindestens die durchschnittliche Fahrzeuglebensdauer erreichen und somit erst bei einer deutlichen Erhöhung der durchschnittlichen Fahrzeuglebensdauer gewechselt werden müssen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

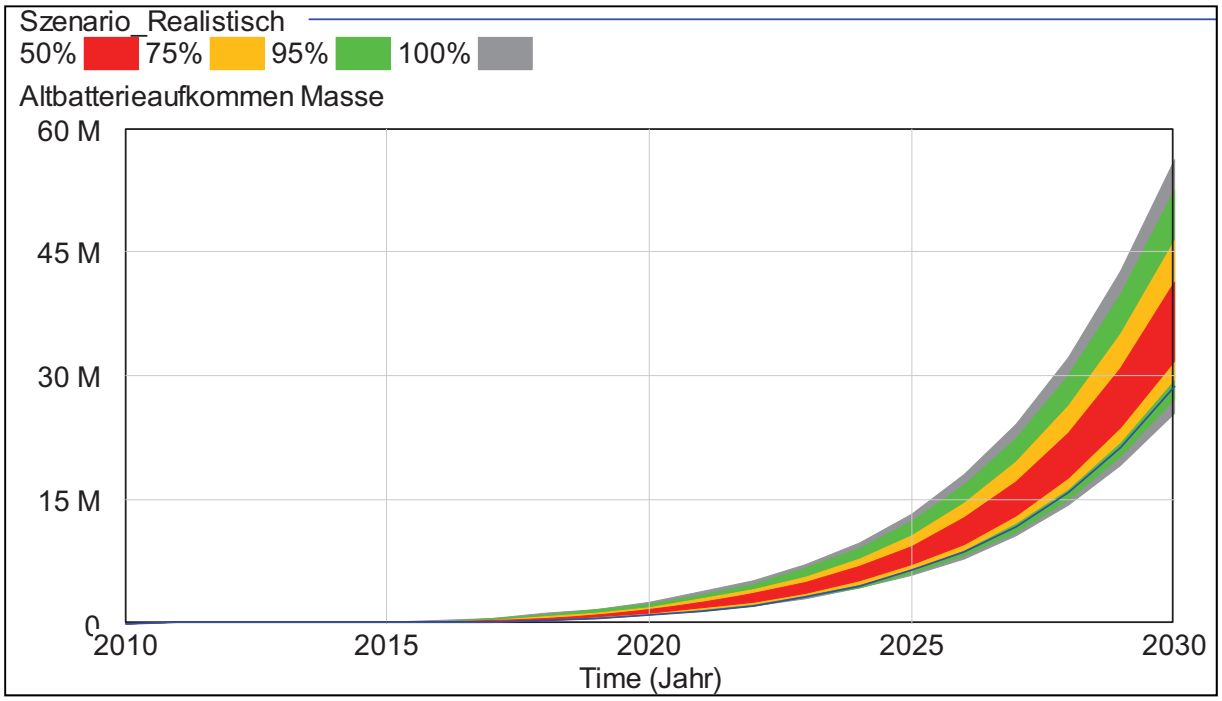


Abbildung A-5: Einfluss der Batterienutzungsdauer auf das Altbatterieaufkommen (kg/a)

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

A.2 Analyse und Gestaltung von Informationsflüssen

A.2.1 Analyse und Anpassung der Informationsangebots- und -bedarfs für die Prozesse Ausbau und Prüfung

Im Rahmen der Projektarbeiten wurden die gängigen Einbaupositionen der Hochvoltbatterie im Fahrzeug untersucht. Derzeit geläufige Einbauorte für HV-Akkus sind die Reserveradmulde im Kofferraum, hinter der Rücksitzbank im Kofferraum, am Fahrzeugunterboden vor der Hinterachse, am Fahrzeugunterboden im Tunnel und im Motorraum.

Bei Vollhybriden oder Elektrofahrzeugen kann der Batterieblock auf mehrere Einbauorte aufgeteilt sein. Es ist zu prüfen, ob sich weitere HV-Akkumulatoren im Fahrzeug befinden. Die Einbauorte variieren aus konstruktiven, antriebskonzeptspezifischen und fahrzeugdynamischen Gründen.

In einem Altfahrzeugdemontagebetrieb werden in Abhängigkeit der spezifischen Tätigkeiten die in Tabelle A-7 aufgeführten drei Qualifikationsgrade benötigt:

Tabelle A-7: Qualifikationsgrade für Arbeiten an Hochvoltkomponenten

Qualifikationsgrade für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvolttechnik	
Elektrisch unterwiesene Person (**EuP**)	Die EuP darf: • allgemeine Arbeiten und Wartungen am Fahrzeug durchführen; • von der EFK-HV beauftragte, mechanische Arbeiten am spannungsfreien Hochvoltsystem durchführen.
Elektrofachkraft für festgelegte Tätigkeiten für Arbeiten bei der Demontage von HV- Systemen von Hybrid- und Elektrostraßenfahrzeugen (**EFK-HV**)	Die EFK-HV hat auf Grund seiner Qualifikation die gleichen Befugnisse wie eine EuP. Zusätzlich darf die EFK-HV: • die zertifizierte Messung der Spannungsfreiheit des Hochvoltsystems durchführen, • folgende Arbeiten am Hochvoltsystem durchführen: ➢ Spannungsfreiheit herstellen ➢ Gegen Wiedereinschalten sichern ➢ Spannungsfreiheit feststellen und dokumentieren. ➢ Die EuP mit Arbeiten am spannungsfreien Hochvoltsystem beauftragen.
Elektrofachkraft (**EFK**) mit Zusatzqualifikation einer EFK-HV	Die EFK darf alle Arbeiten einer EuP und einer EFK-HV durchführen und ist berechtigt, alle Arbeiten unter Spannung durchzuführen, wenn sich ein Fahrzeug nicht spannungsfrei schalten lässt.

✓ ***Die derzeitigen Vorschriften sind ausreichend. Empfehlenswert wäre aber eine genau abgegrenzte Beschreibung der Qualifikation zur Elektrofachkraft für festgelegte Tätigkeiten für Arbeiten bei der Demontage von HV- Systemen von Hybrid- und Elektrostraßenfahrzeugen (EFK-HV).***

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

In Abhängigkeit der einzelnen Gefährdungspotentiale der im Altfahrzeugdemontagebetrieb anfallenden Tätigkeiten sind in folgender Tabelle A-8 die entsprechenden Qualifikationsgrade beschrieben:

Tabelle A-8: Erforderliche Qualifikation je nach Tätigkeit und Gefährdungspotential

Fahrzeug-zustand	Tätigkeit	Qualifikations-grad	Bemerkung
Serienfahr-zeug	Nichtelektrotechnische Tätigkeiten z.B. Bedienen von Fahrzeugen	Keine	Einweisung über: keine Arbeiten an oder in der Nähe von HV-Systemen
Serienfahr-zeug	Nichtelektrotechnische Tätigkeiten in der Nähe von HV-Komponenten z.B. mechanische Tätigkeiten (Betriebsflüssigkeiten ablassen,…)	Elektrotechnisch unterwiesene Person	Unterweisung schriftlich über: - keine Arbeiten an oder in der Nähe von HV-Systemen, - Ansprechpartner, - zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen
Serienfahr-zeug	Elektrotechnische Tätigkeiten z.B. Spannungsfreiheit herstellen	Elektrofachkraft für festgelegte Tätigkeiten (HV-Systeme an Fahrzeugen)	Erfolgreiche Ausbildung zur Elektrofachkraft für festgelegte Tätigkeiten (HV-Systeme an Fahrzeugen) Schriftliche Bestellung zur EFK-HV Unterweisung schriftlich über: - keine Arbeiten an spannungsführenden HV-Systemen
Prototypen und Unfallfahrzeuge mit Beschädigungen der HV - Komponenten	alle elektrotechnischen und nichtelektrotechnischen Arbeiten am Fahrzeug	analog Serienfahrzeug + Zusatzqualifikation für Arbeiten unter Spannung (Elektrofachkraft - EFK)	Weiterführend zu Serienfahrzeugen bedürfen alle Tätigkeiten einer schriftlichen Unterweisung Schriftliche Bestellung zur EFK + EFK-HV

In nachfolgender Tabelle sind nochmals einige Empfehlungen für erforderliche Regelungen zusammengestellt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tabelle A-9: Empfehlungen für zu treffende Regelungen

Arbeitsschritt	Qualifizierung	Regelungsempfehlung
Identifizierung Fahrzeug mit HV-Systemen	EuP	Keine
Batteriekennwerte aus Batteriemanagementsystem auslesen	EFK-HV	Regelungen zur Datenspeicherung und -auswertung erforderlich
12V- Bordnetzbatterie abklemmen (optional)	EFK-HV	
Hochvoltbatterietyp identifizieren	EuP	
Hochvoltbatterie visuell auf Beschädigungen überprüfen	EuP	Regelungen für Umgang von bei Unfällen beschädigten HV-Batterien erforderlich
Freischalten der Hochvoltbatterie und gegen Wiedereinschalten sichern	EFK-HV	Ausreichend geregelt in BGV A3 BGI 8686 DIN VDE 1000-10 DIN VDE 0105-100 BetrSichV TRBS 1203
Spannungsfreiheit überprüfen	EFK-HV	VDE 0413 Nur Messgeräte verwenden die der VDE 0682-401 entsprechen → Keine Vielfachmessgeräte
Spannungsfreiheit dokumentieren		
HV- Batterie aus Fahrzeug demontieren	EuP	Hersteller- und fahrzeugspezifische Informationen für Verwerter
HV-System bei Prototypen und beschädigten Unfallfahrzeugen freischalten / Sichern	EFK + EFK-HV	Aufnahme in hersteller- und fahrzeugspezifische Informationen
HV- Batterie auf Beschädigungen und Transport- Lagereignung überprüfen	EuP	Regelungen für Umgang von bei Unfällen beschädigten HV-Batterien erforderlich
Innerbetrieblicher Transport und Einlagerung		Lager- und Transportvorschriften einhalten
Übergabe der HV- Batterie an Logistikunternehmen / Batterieverwerter inkl. dazugehörigem Servicestecker	Gefahrgutbeauftragter	Vereinfachungsregelung für Verwerter empfehlenswert

A.2.2 Analyse und Anpassung der Informationsangebots- und -bedarfs für den Prozess Transport

Gefahrgutrechtliche Rahmenbedingungen für die Beförderung von Lithiumzellen und Lithiumbatterien

Lithiumbatterien unterliegen grundsätzlich den gefahrgutrechtlichen Transportvorschriften. Grundsätzlich muss jede Zelle und Batterie einem Typ entsprechen, für den nachgewiesen wurde, dass er den Anforderungen der Prüfungen des Handbuchs Prüfungen und Kriterien, Teil III, Unterabschnitt 38.3 erfüllt. Andernfalls kann der Transport nur nach Sondervorschriften oder durch Erteilung behördlicher Ausnahmegenehmigungen erfolgen. Unter der Begriff-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

lichkeit „Lithiumbatterien“ sind die Bauteile “Lithiumzelle“, aus mehreren Zellen bestehende „Zellblöcke, Batteriemodule, Batteriepacks und Batteriebaueinheiten“ erfasst. Die Beförderungsvorgaben der oben genannten gefahrgutrechtlichen Einstufungen, gelten auch uneingeschränkt für die Beförderung von gebrauchten Lithiumbatterien zum Zwecke der Beseitigung oder der Wiederverwertung.

Grundlegende Anforderungen (vergleiche Sondervorschrift 230)

Die Zelle bzw. Batterie ist mit einer Schutzeinrichtung gegen inneren Überdruck versehen oder in einer Weise ausgelegt, dass ein Gewaltbruch unter normalen Beförderungsbedingungen verhindert wird. Die Zellen bzw. Batterien sind mit einer wirksamen Vorrichtung zur Verhinderung von Kurzschlüssen ausgerüstet. Batterien mit mehreren Zellen oder mit Zellen in Parallelschaltung sind mit einer wirksamen Einrichtung zur Verhinderung gefährlicher Rückströme ausgestattet.

Sind die Anforderungen erfüllt, sind die Zellen/Batterien entsprechend den Vorgaben der Verpackungsanweisung P903 zu verpacken.

Gebrauchte Batterien

Für die Beförderung gebrauchter Zellen und Batterien mit den Verkehrsträgern Straße/Schiene gelten die Vorgaben der Verpackungsanweisung P903a und für die Sammlung P903 b. Die Verpackungen müssen den Prüfanforderungen der Verpackungsgruppe II entsprechen. Die Versandstücke dürfen aber nicht 30 kg Bruttogewicht überscheiten.

Im See- und Luftverkehr gibt es diese Regelungen nicht.

Beförderung „gebrauchter“ und/oder „beschädigter“ Lithiumbatterien

Grundsätzlich ist zu prüfen, ob die Batterie sich in einen für den Transport sicheren Zustand befindet. In den Gefahrgutbeförderungsvorschriften ist weder im Landverkehr (ADR/RID) noch im Seeverkehr (IMDG-Code) definiert, unter welchen Bedingungen eine Zelle/Batterie als beschädigt anzusehen ist. Lediglich im Luftverkehr sind in der Sondervorschrift A 154 Kriterien definiert, die ein Transportverbot zur Folge haben (ICAO-TI/IATA-DGR). Unter Beachtung des § 4 GGVSEB, „Sicherheitspflichten“ und § 3 GGVSEB, „Zulassung zur Beförderung“ können somit beschädigte Batterien nicht ohne weiteres zur Beförderung übergeben werden.

Im Ergebnis ist für eine legale Beförderung von beschädigten Batterien eine Einzelausnahme nach den Vorgaben von § 5 GGVSEB nötig. Die Folgen sind gravierend:

- Die grenzüberschreitende Beförderung und damit eine grenzüberschreitende Entsorgung derartigen Zellen und Batterien ist ausgeschlossen.
- Erheblicher zeitlicher, personeller und materieller Aufwand im Zusammenhang mit der Antragstellung zur Erteilung einer Genehmigung.
- Eine effektive und kostengünstige Entsorgung wird erheblich erschwert bzw. im Falle der Notwendigkeit einer grenzüberschreitenden Entsorgung unmöglich.
- Als besonderes Hemmnis ist insbesondere anzusehen, dass eine Ausnahmegenehmigung nach geltendem Recht lediglich für den Einzelfall, also für jeweils einen Transportvorgang erteilt werden darf.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Notwendige Maßnahmen

Um eine reibungslose und rechtskonforme Beförderung in der Logistik, auch der Entsorgungslogistik, zu gewährleisten sind folgende Maßnahmen unumgänglich:

Änderung/Rechtsfortschreibung der Gefahrguttransportvorschriften

a) Änderung der UN Empfehlungen mit folgenden Zielen

- Einführung von Vorschriften zur Beförderung gebrauchter Lithium-Zellen und Batterien.
- Einführung eines Kennzeichens für Zellen/ Batterien, die der SV 230 entsprechen.
- Beschreibung bzw. Definition von Kriterien für beschädigte bzw. als nicht transportsicher zu bewertenden Zellen und Batterien.

b) Änderung des ADR mit folgenden Schwerpunkten

- Änderung der Verpackungsvorschrift für gebrauchte, unbeschädigte Zellen und Batterien analog für neue, unbeschädigte Zellen und Batterien.
- Einführung einer Verpackungsvorschrift für beschädigte sowie als nicht transportsicher einzustufende Zellen und Batterien.
- Klarstellung der Anwendbarkeit der SV 310 für beschädigte sowie als nicht transportsicher zu bewertende Vorserien- und Prototypen-Zellen/ -Batterien.

c) Änderung des IMDG-Code mit folgenden Schwerpunkten

- Einführung von Vorschriften zur Beförderung gebrauchter Zellen und Batterien.
- Einführung einer Verpackungsvorschrift für beschädigte sowie als nicht transportsicher einzustufende Zellen und Batterien.

Der Änderungsbedarf im Gefahrgutrecht ist auf internationaler Ebene in den entsprechenden Gremien einzubringen. Hierfür sind über die Verbände der Wirtschaft Anträge auszuarbeiten, die dann über die nationalen Behördenvertreter in die internationalen Tagungen durchzusetzen sind.

Die umweltgerechte Entsorgung und der Transport zur Entsorgung können nicht voneinander separat betrachtet werden. Bei der Weiterentwicklung der Vorschriften ist ein abgestimmtes Vorgehen zwischen den Ministerien BMU, BMVBS sowie der BAM erforderlich.

A.2.3 Analyse und Anpassung der Informationsangebots- und -bedarfs für den Prozess Lagerung/Sammlung

Im Rahmen des Rücknahmeprozesses von gebrauchten Lithium-Ionen Batteriesystemen sind Lagerorte bei verschiedenen Prozessbeteiligten vorgesehen. Der Prozess beginnt bei den Beteiligten, die den technischen Zustand des Batteriesystems ermitteln und die Entscheidung treffen, ob es sich um ein beschädigtes System oder um ein intaktes System handelt.

Der Ausbau der Batteriesysteme wird durch einen Werkstattbetrieb oder einen Altautoverwertungsbetrieb durchgeführt. Hier werden die Batteriesysteme bis zur Abholung durch den Rücknahmelogistiker zwischengelagert. Je nach Logistikkonzept werden die Batteriesysteme in einem Abfallzwischenlager (Logistikhub) konsolidiert oder direkt zu einem Recyclingbetrieb verbracht. Beim Recycler werden die Batteriesysteme in das Eingangslager verbracht und anschließend dem Recyclingprozess zugeführt. Bei der Gestaltung des Lagerbereiches

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

des Werkstattbetriebes ist zu beachten, dass auch neue Batteriesysteme, die als Ersatz für das ausgebaute System dienen, vor Ort zwischengelagert werden.

Im Arbeitsschritt **AS A.2.3** sollten durch AUDI die bestehenden Sicherheitsvorschriften für die Lagerung von Li-Ionen Batterien sowie die Ausgestaltung von Lagerräumen für Li-Ionen Batterien analysiert werden und gegebenenfalls Optimierungsbedarf identifiziert bzw. abgeleitet werden. Lithium-Ionen Batteriesysteme werden gem. den internationalen Vorschriften über die Beförderung gefährlicher Güter als Gefahrgut der Gefahrklasse 9 (verschiedene gefährliche Stoffe und Gegenstände) zugeordnet. Die Verpackungsgruppe II kennzeichnet ein Gefahrgut mit **mittlerer Gefahr**. Das Gefahrgutrecht betrachtet allerdings nur den Transport, Lageranforderungen werden in der Regel durch das Gefahrstoffrecht behandelt.

Unter dem Begriff Gefahrstoffe sind Stoffe, Zubereitungen und Erzeugnisse definiert, die für die Beschäftigten gefährliche physikalische oder chemische Eigenschaften besitzen. Die Regelungen der Gefahrstoffverordnung zielen darauf ab, den Umgang mit Gefahrstoffen möglichst sicher zu gestalten. Da es sich bei den Batteriesystemen nicht um Stoffe, Zubereitungen oder Erzeugnisse i.S.d. Gefahrstoffverordnung handelt, unterliegen die Batteriesysteme **nicht** den Vorschriften der Gefahrstoffverordnung und den untergesetzlichen Regelwerken.

Da die Batteriesysteme als chemischen Hauptgefahrenträger ein hoch reaktives Batterieelektrolyt enthalten, wurden exemplarisch die Sicherheitshinweise verwendet, die durch die Firma Merck gem. Gefahrstoffrecht für ein Batterieelektrolyt ermittelt wurden. In Ermanglung vorhandener Sicherheitsvorschriften für Li-Ionen-Batteriesysteme könnten diese Sicherheitshinweise als Orientierungshilfe für den Umgang mit den Batteriesystemen genutzt werden. Insbesondere für die beschädigten Batteriesysteme erscheint es sinnvoll, diese Sicherheitshinweise zu beachten. Für die Lagerung der gebrauchten Batteriesysteme (nicht defekte oder Prototypen) in Behältern erscheint die **TRGS 510** „*Lagerung von Gefahrstoffen in ortsbeweglichen Behältern*“ als Orientierungshilfe gut geeignet.

Berufsgenossenschaftliche Vorschriften / Arbeitsschutzregelungen

In Tabelle A-10 dargestellte berufsgenossenschaftliche Vorschriften / Arbeitsschutzregeln wurden bezüglich spezieller Regelungen zum Umgang und zur Lagerung von Li-Ionen Batteriesystemen geprüft:

Tabelle A-10: Auflistung berufsgenossenschaftliche Vorschriften / Arbeitsschutzregelungen

Kurzbezeichnung	Titel
BGV	Berufsgenossenschaftliche Vorschriften für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit
BGR	Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit
BGI	Berufsgenossenschaftliche Information für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit
BGG	Berufsgenossenschaftliche Grundsätze
GUV	Regelwerk für Sicherheit und Gesundheitsschutz der öffentlichen Unfallversicherungsträger
TRBS	Technische Regeln für Betriebssicherheit

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Im Rahmen der Recherche wurden keine speziell auf den Umgang oder die Lagerung von Li-Ionen Batteriesystemen abgestellte Vorschriften identifiziert, so dass derzeit die anerkannten Arbeitsschutzregelungen sinngemäß für den Umgang und die Lagerung der Batteriesysteme zu verwenden sind.

Als Hilfestellung für Altfahrzeugdemontagebetriebe haben die Automobilhersteller bereits einen Leitfaden „Sicherer Umgang mit elektrischen Hybridkomponenten in Altfahrzeugen“ im Internationalen Demontage Informationssystem (IDIS) veröffentlicht. Hierin sind allgemeine Informationen zu Vorsichtsmaßnahmen sowie allgemeine Handhabungs- und Zerlegevorschriften aufgeführt. Dieser IDIS Leitfaden hat jedoch für die Unternehmen keinerlei Bindungswirkung und dient daher lediglich zur Orientierung.

Empfehlung:

- ✓ ***Es wird empfohlen, den beteiligten Unternehmen zukünftig bzgl. der Ausgestaltung von Maßnahmen zum Schutz der Mitarbeiter, konkrete Hinweise und Vorgaben in Form von einer berufsgenossenschaftlichen Vorschrift für den Umgang und die Lagerung von Li-Ionen Batteriesystemen zur Verfügung zu stellen. Eine solche mit der Berufsgenossenschaft abgestimmte Branchenvereinbarung zum Umgang und Lagerung von HV-Lithium-Ionen Batterien in Service- und Handelsbetrieben der Automobilindustrie wurde im letzten Berichtszeitraum durch den Volkswagen Konzern in Zusammenarbeit mit dem TÜV Rheinland initiiert. Eine solche Branchenvereinbarung kann in ähnlicher Weise durch den Verband deutscher Altfahrzeugverwerter adaptiert und an die Mitglieder verteilt werden.***

A.2.4 Identifikation von Informationen aus vorangehenden Prozesse, die während des Recyclingprozesses benötigt werden

Der Informationsbedarf für das Recycling wird bestimmt durch die notwendigen Demontage und Zerlegearbeiten. Im Rahmen dieses Projekts wird der Informationsbedarf auf Seiten des Recyclers nur für Batterien betrachtet die verwertet und deren Inhaltsstoffe recycelt werden sollen. Prüfen der Batterien um sie einer Wieder- oder Weiterverwendung zuzuführen ist hier nicht Basis der Untersuchung.

Die Verarbeitung der Batterie in der Recyclinganlage ist unterteilt in zwei Hauptprozesse:

1. Demontage der Batterien und Separierung in Gehäuse, Elektronik, Kabel und Zellen
2. Recycling der Zellen mit Separierung der Aktivmaterialien, Anoden-, Kathoden- sowie Separatormaterial.

Ziel ist vor allem die Aktivmaterialien für die Rückgewinnung des Lithiums zu erhalten.

Für die Demontage im LithoRec-Prozess sind folgende Informationen zu jeder Batterie notwendig:

- Batterietyp
- Zelltyp und Zellchemie
- Ladezustand
- ggf. Beschädigungen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Mit Hilfe dieser Information kann der Demontagebetrieb die Behandlung durchführen und die Fraktionen für das nachfolgende Recycling bereitstellen. Die Informationsbereitstellung zu Batterietyp, sowie Zelltyp und Zellchemie kann durch vereinheitlichte Kennzeichnungen auf der Batterie erfolgen. Ladezustand und mögliche Beschädigungen sind durch geeignete Diagnosemittel im jeweiligen Prozessschritt zu ermitteln. Alternativ können Begleitdokumente erstellt werden, die für jede Batterie erstellt werden müssten und eindeutig (z.B. über die Batterie-Seriennummer) zuzuordnen sind.

Liegen keine Informationen zu der Batterie vor so ist die Ermittlung der notwendigen Information über die Batterie nur mit Hilfe der Hersteller der Batterien möglich. Ohne diese Informationsbereitstellung sind Zelltyp und die Zellchemie nur über Analysen der einzelnen Zelle zu ermitteln.

A.2.5 Konzeption eines Instrument zur bedarfsgerechten Erfassung und Bereitstellung von Informationen sowie eines Konzepts zur Umsetzung des Instruments in einer Softwarelösung

In den folgenden Ausführungen werden zunächst die Ergebnisse der Informationsangebots- und -bedarfsanalysen der **AS A.2.1** – **AS A.2.4** zusammengeführt und auf Basis der LithoRec-Prozesskette gruppiert. Anschließend werden mögliche Optionen für ein Informationssystem (Informationsinstrument), in dem alle Daten erfasst und bereitgestellt werden, aufgezeigt, prozessspezifische Anforderungen an ein solches Instrument erörtert und ein geeignetes Recyclinginformationssystem abgeleitet (**AS A.2.5**).

A.2.5.1 Informationsfluss entlang der Prozesskette

Zunächst wurde der Informationsfluss entlang der Prozesskette analysiert und bestimmt. Um diesen Informationsfluss bedarfsgerecht abbilden zu können, wurde die Prozesskette um den Schritt der Demontage erweitert. Somit liegt für die Gruppierung der Informationsflüsse eine Prozesskette mit fünf Stufen zugrunde. Diese beginnt mit dem Schritt des Batterieausbaus aus dem Fahrzeug und einer anschließenden Prüfung. Der zweite Schritt umfasst den Transport der Batterien vom Ausbauort zu geeigneten Lagerstätten. Der dritte Schritt beinhaltet die Lagerung und Sammlung, Schritt 4 den Demontageprozess und Schritt 5 das Recycling.

Auf Basis dieser Gruppierung wurden die für den Recyclingprozess relevanten Informationen in Kooperation mit den beteiligten Projektpartnern AUDI, VW, EC und FRZ identifiziert. Dabei wurden die Informationsflüsse in jedem Prozessschritt in produkt- und objektbezogene Informationen unterteilt. Produktbezogene Informationen beinhalten statische Daten einer Batterie bzw. eines Batterietyps, wie z.B. die Batterieidentifikationsnummer, den Namen des Batterieherstellers oder die Abmessungen. Objektbezogene Informationen beinhalten dagegen batteriespezifische bzw. dynamische Daten, wie z. B. das Ausbaudatum der Batterie aus dem Fahrzeug oder Beschädigungen. Eine solche Separierung wird empfohlen, da die produktbezogenen Daten keiner Geheimhaltung unterliegen und so von den Batterieherstellern auf einer frei zugänglichen Datenbank zusammengetragen werden können. Die objektbezogenen Daten können in den einzelnen Schritten der Prozesskette erhoben werden, dürfen jedoch aufgrund ihrer Sensibilität nur von wenigen leseberechtigten Akteuren einsehbar sein.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Nach Erfassung der Bedarfszeitpunkte der relevanten Informationen (Anhang 3) wurde das Informationsangebot bzw. geeignete Erhebungszeitpunkte nach den Kriterien „Zeit“ und „Effizienz“ ermittelt. Das Kriterium „Zeit“ soll sicherstellen, dass alle Daten vor dem erstmaligen Bedarfszeitpunkt erhoben wurden. Das Kriterium „Effizienz“ stellt sicher, dass die Daten zu einem Zeitpunkt innerhalb des zulässigen Zeitraums erhoben werden, an dem der Aufwand minimal ist. Es ist beispielsweise zu erkennen, dass die Angabe des Batterieherstellers erstmals während des Ausbaus und der Prüfung benötigt wird und an dieser Stelle bereits ermittelt werden muss. Im nachfolgenden Prozess Lagerung und Sammlung wird die Angabe ebenfalls benötigt. Bei Kommunikation der Information zwischen den Prozessen würde eine nochmalige Erhebung entfallen.

A.2.5.2 Optionen zur Erfassung und bedarfsgerechten Bereitstellung von Informationen

Nachdem der Informationsfluss entlang der Prozesskette analysiert und bestimmt wurde, ist für die Erfassung und Bereitstellung von Informationen innerhalb des Recyclingnetzwerks ein geeignetes Recyclinginformationssystem entwickelt worden. Dazu wurden vier Optionen der Datenspeicherung identifiziert: eine Datenspeicherung produkt- sowie objektbezogener Daten am Objekt/Batterie sowie eine zentrale elektronische Speicherung beider Datentypen.

Speicherung produktbezogener Daten am Objekt

Das Anbringen von produktbezogenen Informationen am Objekt kann mit Hilfe von Plaketten, Aufklebern oder Laufzetteln erfolgen. Diese Form der Speicherung ist mit geringen Anfangsinvestitionen verbunden, da diese Datenträger einen geringen Materialwert haben und beim Herstellungsprozess der Batterie angebracht werden können. Zudem sind während des Recyclingprozesses keine elektronischen Geräte für ein Auslesen der Daten notwendig. Dem gegenüber steht allerdings ein erhöhtes Risiko eines Datenverlustes durch Beschädigung oder Verlust des Datenträgers.

Um dieses Risiko zu reduzieren, wird die Alternative einer elektronischen Datenspeicherung am Objekt berücksichtigt. Für eine solche Speicherung können z. B. RFID-Chips zur Anwendung kommen. Hierfür sind allerdings höhere Anfangsinvestitionen notwendig, da das Auslesen dieser Chips nur mit entsprechenden Lesegeräten möglich ist. Diese Geräte müssten für jeden Akteur der Prozesskette und z. T. an jedem Arbeitsplatz vorhanden sein. Zudem ist das Auslesen mit diesen Geräten zeitintensiver als ein direktes Ablesen.

Zentrale Speicherung produktbezogener Daten

Eine Alternative zu der Datenspeicherung am Objekt stellt eine zentrale elektronische Speicherung dar. Bei dieser Option werden die technischen Daten eines jeden Batterietyps in einer Datenbank hinterlegt und können über einen Webbrowser eingeholt werden. Diese Art der Informationsbereitstellung produktbezogener Daten wird bereits von der Automobilindustrie über die Plattform „International Dismantling Information System“ (IDIS) gewährleistet. Allerdings ist hierfür an jedem Arbeitsplatz, an dem Informationen benötigt werden, ein Internetzugang notwendig. Zudem ist auch hier die Datenbeschaffung mit einem höheren Zeitaufwand verbunden und ggf. durch Arbeitsschutzbestimmungen (Tragen von Handschuhen) erschwert.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Speicherung objektbezogener Daten am Objekt

Objektbezogene Daten können bedarfsgerecht innerhalb der jeweiligen Prozessschritte durch geeignete Mess- und Diagnosegeräte abgerufen und mittels geeigneter Begleitscheine entlang der Prozesskette weitergegeben werden. Die bedarfsabhängige direkte Bestimmung der objektbezogenen Daten vor Ort bietet hohe Flexibilität bezüglich der Datencharakteristik und vergleichsweise hohe Integrität.

Für die Speicherung der objektbezogenen Daten kann ebenfalls die Option eines RFID-Chips in Betracht gezogen werden. Allerdings weist diese Form entsprechende Nachteile auf (s. o.). Zudem ist hier eine Datenübertragung zwischen Akteuren erschwert bzw. nicht möglich. So ist z. B. die Übermittlung der Information über den Abholort und -zeit an einen Spediteur nicht direkt möglich.

In beiden Optionen der dezentralen Datenspeicherung am Objekt ist eine Geheimhaltung der objektbezogenen Daten nicht gewährleistet.

Zentrale Speicherung objektbezogener Daten

Auch bei der Speicherung objektbezogener Daten ist eine zentrale elektronische Datenspeicherung möglich. Hier können die Informationen für jede Batterie in einer Datenbank abgelegt werden und sind von allen Akteuren mit entsprechender Berechtigung sofort einsehbar. Ein solches System ist in der Lage, große Datenmengen abzubilden und eine Modifikation der Daten ist schnell und kostengünstig durchführbar. Allerdings ist auch hier an jedem Arbeitsplatz ein Internetzugang notwendig und die Datenpflege mit einem erhöhten Zeitaufwand verbunden. Zudem existiert ein hoher Abstimmungsbedarf über die Datencharakteristik, die aufgrund der unterschiedlichen Konzepte von Batteriesystemen insbesondere hinsichtlich der Funktionalität aber auch entlang der Prozesskette unterschiedliche Anforderungen bedeuten können. Weiterhin könnten sich die Kosten einer solchen Datenbank (z. B. durch die notwendige Datenpflege) negativ auf die Wettbewerbsfähigkeit des in LithoRec untersuchten Recycling-Prozesses auswirken, wenn für andere Recyclingverfahren keine Datenbanken benötigt werden.

Bewertung der Speicherung von Daten

Keine der dargestellten Möglichkeiten zur Speicherung produkt- oder objektbezogener Daten erscheint in allen Belangen überlegen. Im Folgenden werden daher nach einer Aufstellung spezifischer Anforderungen an ein Informationsinstrument zwei alternative Konzepte zur Speicherung und Bereitstellung von Daten vorgestellt.

A.2.5.3 Anforderungen an ein Informationsinstrument

Um ein geeignetes Instrument auszuwählen bzw. zu entwickeln, wurden in Zusammenarbeit mit den Partnern des **AP A.2**, also potentiellen Akteuren der Prozesskette, Anforderungen an ein Informationsinstrument speziell für den LithoRec-Recyclingprozess ermittelt und deren Relevanz diskutiert. Dabei wurde eine schnelle Informationsbereitstellung sowie ein schneller Informationsabruf (1) ohne Verwendung von für einen Recyclingprozess spezifischen Auslesegeräten (2) als grundlegende Anforderung definiert. Eine weitere Anforderung ist die Verwendung einer standardisierten Datenstruktur (3), um Informationen zielgerecht und fehlerfrei übermitteln zu können. Zudem müssen die Informationen dauerhaft zugänglich sein (4), d. h. jeder Akteur muss auch auf Informationen zugreifen können, wenn die Batterie bzw.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Komponenten nicht real vorliegen. Diese Anforderung ist v. a. für die Transportplanung hilfreich, da bei dieser die Möglichkeit, Transportpläne jederzeit aktualisieren zu können, bestehen muss. Als weitere Anforderung wurde die Plattformunabhängigkeit des Instruments (5) ermittelt, um mögliche Kompatibilitätsprobleme zu vermeiden. Zudem sollen objektbezogene Informationen nicht frei zugänglich sein, sondern zielgerichtet zur Verfügung gestellt werden können (6). Letztlich soll die Implementierung des Instruments ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweisen (7).

A.2.5.4 Auswahl und Struktur eines geeigneten Informationsinstruments

Aufgrund der Anforderung eines dauerhaften Zugangs zu den Informationen und einer selektiven Datenzugriffsberechtigung entfallen die Optionen einer elektronischen Speicherung objektbezogener Daten am Objekt. Dagegen stellen sowohl ein zentrales elektronisches Recyclinginformationssystem entsprechend der gestellten Anforderungen als auch der bedarfsgerechte Abruf vor Ort und die individuelle Weitergabe entlang der Prozesskette praktikable Lösungen dar. In das zentrale elektronische System könnten zusätzlich die produktbezogenen Daten integriert werden. So können alle Informationen „auf einen Blick“ eingesehen werden. Hinsichtlich der produktbezogenen Informationen ist jedoch auch eine Speicherung am Objekt (u. a. Identifikationsnummer, Aktivmaterialtyp) mittels geeigneter Kennzeichnung zu empfehlen, da diese Daten nicht modifiziert werden, in dieser Form schnell zugänglich sind und keinem Geheimhaltungsinteresse unterliegen. Somit können die Batterien schnell und zuverlässig identifiziert werden.

A.2.5.4.1 Prozessorientierte zentrale Datenbanklösung

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde ein Recyclinginformationssystem, das die beteiligten Akteure der Prozesskette miteinander verbindet und über das auf produktbezogene Informationen zugegriffen und relevante objektbezogene Informationen ausgetauscht werden können schematisch konzipiert.

Die zentrale Stelle in diesem System ist eine Datenbank, in der bereits bei der Herstellung einer Batterie neben den produktbezogenen Daten erste objektbezogene Daten mit Hilfe eines **Batteriedatenblatts** abgelegt werden können. Dieses Datenblatt wird beim Einbau der Batterie in das Fahrzeug sowie bei Modifikationen der Batterie (z. B. Tausch eines Moduls oder einer Zelle) über eine **Batterieidentifikationsnummer** aufgerufen und ergänzt. Der Aufruf des Datenblatts sollte schnell und mit wenig manuellem Aufwand erfolgen. Dieser könnte über das Batteriemanagementsystem, sofern noch aktiv, oder per Barcode/RFID-Chips am System oder Modul erfolgen. Nachfolgend kann das Datenblatt bei den beteiligten Akteuren der Recyclingprozesse mit den entsprechenden Informationen erweitert werden (Abbildung A-6).

Über das Internet werden die Akteure in die Lage versetzt, durch Nutzung definierter Abfragefunktionen auf relevante Informationen zuzugreifen und diese gezielt abzurufen oder zu aktualisieren. Dazu stellt der Browser eines Akteurs eine Verbindung zu einem Webserver her. Dieser Webserver greift über eine definierte Logik auf die zentrale Datenbank zu, extrahiert die angefragte Information und stellt sie wiederum über das Internet zur Verfügung. Die Sicherheit der Daten vor unbefugtem Abruf wird über die Einrichtung der Zugriffsrechte für die Benutzer der Kommunikationsplattform geregelt. Hierfür muss jeder Akteur abhängig von der konkreten Aufgabe und Vertragsgestaltung mit dem Batteriehersteller/Automobil-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

hersteller mit Lese- und Schreibrechten ausgestattet werden. Über diese Vereinbarung wird festgelegt, welche Daten ein Akteur bereitzustellen hat und welche Informationen er abrufen kann. Jedem Benutzer ist eine Firma zugeordnet. Die Firmenzugehörigkeit beeinflusst direkt die Zugriffsmöglichkeit auf die objektbezogenen Informationen, so dass diese nur zwischen den Firmen ausgetauscht werden können, zwischen denen entsprechende vertragliche Vereinbarungen getroffen wurden.

Neben den aufgezeigten Vorteilen einer zentralen Speicherung bietet das vorgestellte Konzept weitere Vorteile. Zum einen ermöglicht die entwickelte Lösung eine breite Nutzung durch unterschiedlich strukturierte Unternehmen vom kleinen und mittelständischen Betrieb bis hin zu großen Firmen. Zum anderen können die in dem Recyclinginformationssystem bereitgestellten Daten von jedem Akteur direkt genutzt werden. Diese direkte Übernahme der Daten in die Planungsinstrumente der einzelnen Akteure lässt die Anwendung von Lösungen zur weiteren operativen Planung zu. Dabei können der Aufbau und die Pflege der Datenbanken durch einen externen Dienstleister übernommen werden.

Für die Implementierung eines solchen Recyclinginformationssystem bestehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Zum einen kann dies herstellerspezifisch, zum anderen herstellerübergreifend implementiert werden. So kann z. B. jeder Automobilhersteller ein solches Informationssystem erstellen und betreiben oder verschiedene Hersteller implementieren ein gemeinsames System. Ein Vorteil eines **herstellerspezifischen Systems** ist die Möglichkeit, das Informationssystem individuell gestalten zu können. Dies erstreckt sich von der Datenmenge bis hin zur Benutzeroberfläche. Allerdings entsteht bei dieser Form ein hoher Koordinationsaufwand für die beteiligten Akteure, da mehrere Systeme parallel verwendet und aufeinander abgestimmt werden müssen. Bei einem **herstellerübergreifenden System** besteht hingegen hoher Abstimmungsbedarf zwischen den Unternehmen bezüglich der Entwicklung und Ausgestaltung des Systems. Die anschließende Implementierung und Anwendung erfordert einen geringen Aufwand. Zudem kann der Datenzugriff reglementiert werden, um einem Datenmissbrauch vorzubeugen. Ein weiterer Vorteil eines übergreifenden Systems ist die Möglichkeit die Pflege und Wartung des Systems durch einen Dienstleister durchführen zu lassen.

A.2.5.4.2 Produktorientierte bedarfsgerechte Individuallösung

Die umfassende webbasierte Datenbanklösung bedingt umfangreiche Abstimmarbeiten aller Zellen-, Batterien- und Elektrofahrzeughersteller für eine ganzheitliche Lösung. Zudem entstehen sowohl Kosten für die technische Umsetzung bei den Beteiligten als auch Kosten für die Ausstattung mit entsprechenden Lese-/ Ausgabe- und Übertragungsgeräten bei den Werkstätten, Transporteuren, Demontage- und Recyclingbetrieben. Weiterhin ist zu prüfen, ob die im LithoRec-Prozess als notwendig identifizierten Daten im gleichen Umfang bei anderen möglichen Recyclingverfahren (z. B. pyrometallurgische Verfahren) benötigt werden.

Da diese Gründe einen Einsatz der Datenbanklösung als schwer umsetzbar erscheinen lassen, wird vorgeschlagen, geeignete Kennzeichnungen auf Batteriesystemen, Modulen und Zellen anzubringen, welche Aufschluss über die Zellchemie geben (z. B. farbig unterscheidbare Symbole „LFP“, „NMC“, „NCA“)

Somit können produktbezogene Informationen ohne großen Abstimmungsaufwand einfach und kostengünstig der gesamten Prozesskette bereitgestellt werden. Objektbezogene Informationen könnten zudem bei Bedarf durch entsprechendes Prüfequipment bei den Prozessbeteiligten ermittelt werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die Bereitstellung der für die Demontage benötigten Anweisungen, wie die Einbaustelle der Batterie im Fahrzeug und benötigte Werkzeuge ist bereits über eine Erweiterung des Datenbank-Systems IDIS erfolgt. Dieses enthält eine perspektivische Ansicht des Objekts, eine tabellarische Auflistung aller technischen Daten sowie eine konkrete Demontageanleitung.

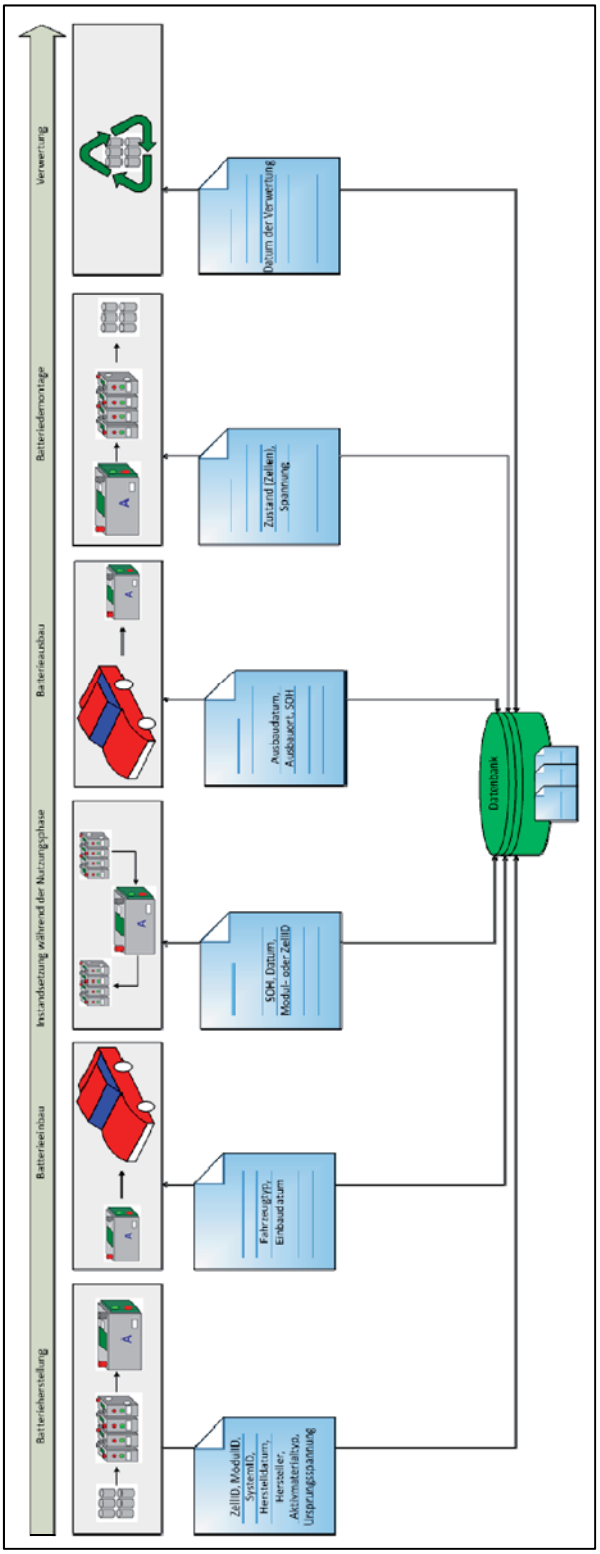


Abbildung A-6: Schematische Darstellung des Recyclinginformationssystems

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

A.3 Entwicklung von Sammelkonzepten

A.3.1 Anforderungsanalyse an potentielle Netzwerke zum Recycling von Li-Ionen-Batterien

Ergebnis des von AIP-TUBS und VW bearbeiteten Arbeitsschritts ist die Analyse potentieller Netzwerkkonstellationen im Rahmen des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien. In den folgen-den Ausführungen werden zunächst die Systemgrenzen festgelegt; Aktivitätsbereiche im System definiert und beschrieben sowie mögliche Netzwerkakteure identifiziert. Aus den gewonnenen Erkenntnissen werden drei mögliche Netzwerkkonstellationen abgeleitet. Abschließend beschreibt ein Anforderungskatalog, welche Anforderungen auf Netzwerk- und Prozessebene zu beachten sind.

Es werden die unten beschriebenen Schritte vom Ausbau bis zur Materialaufbereitung der Batterien sowie die damit verbundenen Akteure betrachtet. Betriebe, die wieder-/weiterverwendungsfähige bzw. aufbereitete Komponenten und Materialien verwenden respektive verwerten, werden nicht in die Ermittlung von Netzwerkkonstellationen aufgenommen. Somit wird die Herstellung neuer Zellen oder Batterien nicht betrachtet.

A.3.1.1 Definition der Systemgrenzen

Entnahme der Altbatterie aus dem Fahrzeug

Die Alterung der Lithium-Ionen-Traktionsbatterie eines Hybrid-/Elektrofahrzeugs und der damit verbundene Kapazitätsverlust sowie irreparable Defekte der Batterie führen zu der Notwendigkeit des Ersatzes der Batterie, deren Lebensdauer unter Umständen deutlich unter der des restlichen Gesamtfahrzeuges liegen kann.[5] Die Aufgabe des Aus- und Einbaus kann aufgrund der damit verbundenen elektrischen Gefahren und der Masse der Batterien ausschließlich von Fachkräften und Spezialwerkzeugen durchgeführt werden. Der Ausbau durch Laien ist eher unwahrscheinlich und wird in der Analyse nicht berücksichtigt.

In den nächsten Jahren, in denen der Absatz vergleichsweise weniger Hybrid-/Elektrofahrzeuge zu erwarten ist, werden nur einzelne Werkstätten über das für den **Ausbau** notwendige Know-how verfügen und entsprechende Fachkräfte sowie benötigtes Werkzeug bereithalten. Insbesondere aus Gewährleistungs-, Garantie- und Kundenbindungsgründen werden diese zumeist herstellergebundene Werkstätten (folgend Vertragswerkstätten) sein. Aufgrund der finanziellen Zusatzbelastung werden herstellerunabhängige Werkstätten (folgend freie Werkstätten) entsprechende Leistungen zunächst nur in Ausnahmefällen anbieten. Mit steigender Population von Hybrid-/Elektrofahrzeugen ist jedoch mit einer wachsenden Zahl (freier) Werkstätten zu rechnen, die den Austausch von Altbatterien als Geschäftsfeld entdecken.

Mit dem Ausbau der Altbatterie werden auch Altfahrzeugdemontageunternehmen (folgend Altfahrzeugdemonteure) im Rahmen der Entsorgung von Altfahrzeugen konfrontiert sein. Als potentielle Entnahmestellen für Traktionsbatterien sind somit grundsätzlich **Vertragswerkstätten**, **freie Werkstätten** sowie **Altfahrzeugdemonteure** in Betracht zu ziehen.

[5] Sarre et al. (2004) erwarten z. B. eine Lebensdauer von 5 Jahren in Elektrofahrzeugen und 15 Jahre in Hybridfahrzeugen für Batterien auf Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminiumoxid-(NCA)-Basis.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Prüfung

Um die Altbatterie sicher und effizient behandeln zu können, ist eine **Prüfung** notwendig. Die Prüfung gibt Aufschluss über den Zustand der Altbatterie und ist Basis für eine Entscheidung über den Verwendungspfad der Batterie. Sie ist Grundlage der Schätzung des monetären Wertes der Altbatterie und des mit der Behandlung verbundenen Aufwandes.

Mit welcher Genauigkeit die Prüfung notwendig ist und mit welchen Werkzeugen und Geräten sie durchgeführt werden kann, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht sicher und hängt insbesondere von der technischen Entwicklung der E-Fahrzeuge und der Batterien sowie von noch zu definierenden Standards ab. Die Prüfung kann grundsätzlich in verschiedenen Intensitäten an mehreren Stellen im Recyclingsystem vorgenommen werden:

- Sicht- und Geruchsprüfung. Die Batterie wird auf offensichtliche äußere Beschädigungen hin überprüft. Diese Prüfung ist sowohl vor als auch nach dem Ausbau aus dem Fahrzeug, vor und nach Transporten und vor der Demontage notwendig.
- Auslesen von Betriebsdaten (bspw. Fahrstrecke, Höchsttemperaturen, aufgetretene Fehler, Spannung, SOH (State of Health) aus dem Fahrzeugsystem, sofern diese Daten nicht nur in einem batterieeigenen Speicher (BMS) abgelegt wurden (Prüfung A). Hierfür kommen entsprechend ausgerüstete Vertragswerkstätten (freie Werkstätten und Altfahrzeugdemonteure nur, wenn sie über entsprechende Diagnosegeräte verfügen) in Betracht, da nur diese Zugriff auf das Fahrzeug haben. Ein einfaches Auslesen kann mit für diesen Zweck entwickelten standardisierten Lesegeräten sowie netzwerkweiten Informationssystemen erreicht werden. Insbesondere die Fahrzeughersteller könnten verstärktes Interesse an der Auswertung von Langzeitleistungsdaten der Batterien haben und ausgewählte Vertragswerkstätten mit entsprechenden Geräten ausrüsten.
- Auslesung von Betriebsdaten aus dem Batteriemanagementsystem (Prüfung B). Diese Prüfung kann sowohl direkt nach als auch entkoppelt von dem Ausbau aus dem Fahrzeug vor der Sortierung und Lagerung erfolgen. Entsprechend kommen o. g. Akteure sowie spezialisierte Entsorgungsdienstleister in Betracht.
- Test und Messung des Zustandes einzelner Komponenten (Prüfung C). Diese Prüfung ist notwendig, wenn das Batteriemanagementsystem nicht hinreichend Aufschluss über den Zustand einzelner Module oder Zellen geben kann. Die Prüfung einzelner Komponenten setzt eine demontierte bzw. eine mit entsprechenden Messleitungen ausgerüstete Batterie voraus. Diese Aufgabe können ausschließlich spezialisierte Entsorgungsdienstleister wahrnehmen.

Für die Prüfung A und Prüfung B kommen **freie und Vertragswerkstätten** sowie **Altfahrzeugdemonteure** in Betracht. Prüfung C muss von **spezialisierten Entsorgungsdienstleistern** durchgeführt werden, die auch Prüfung B vornehmen können.

Lagerung

Zur Zeitüberbrückung, zur Transportbündelung sowie zur Bildung von Recyclinglosen bis zu ihrem Verkauf, ihrer Wiederaufarbeitung, ihrer Entsorgung (zur Materialverwertung) oder ihrer Beseitigung müssen Altbatterien gelagert werden. Um eine Einordnung nach dem Verwendungszweck und dem Typ vornehmen zu können, ist eine Sortierung notwendig.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Grundsätzlich sind bezüglich der Lagerung ein zentrales und ein dezentrales Sammlungskonzept zu unterscheiden. Im **zentralen Sammlungskonzept** existiert genau ein zentrales Lager. Es erscheint insbesondere bei hoher Kapitalintensität, Skaleneffekten und verhältnismäßig niedrigen Transportkosten attraktiv. Eine umgekehrte Ausgangslage spricht für die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit eines **dezentralen Sammlungskonzepts**, in dem mindestens zwei Läger existieren, die jeweils für die Sammlung von Altbatterien aus einer definierten Region zuständig sind. Dieses Konzept ist aufgrund kleinerer Einzugsbereiche und damit durchschnittlich kürzerer Entfernungen insbesondere vorteilhaft, wenn Werkstätten bzw. Altfahrzeugdemonteure nicht über geeignete Kurzzeitlager verfügen. Außerdem spricht die Möglichkeit der Vorsortierung und Transportbündelung für ein dezentrales Sammlungskonzept.

Vor dem Hintergrund möglicherweise nicht oder fehlerhaft geprüfter Altbatterierückläufer sowie zur Nutzung von Lerneffekten ist die Einrichtung vorgeschalteter Prüfstationen (*Prüfung B*) zu untersuchen. Der Lagerung der Altbatterien für längere Zeit sollte eine Ladezustandseinstellung vorausgehen. Während der Lagerung ist möglicherweise eine (kontinuierliche) Überprüfung des Ladezustandes notwendig. Das Lager müsste in diesem Fall über entsprechende Vorrichtungen verfügen. Sowohl die Lagerung beschädigter Altbatterien als auch die längere Lagerung unbeschädigter Altbatterien ist potenziell mit Brand- und Explosionsgefahren verbunden. Die Läger müssen entsprechend dediziert für die Aufbewahrung von Altbatterien Fahrzeugen unter Berücksichtigung (noch zu schaffender) gesetzlicher Vorschriften ausgelegt sein. Für beschädigte Batterien muss zudem eine räumlich getrennte Lagerung, z. B. in feuerfesten Sicherheitscontainern (F90) vorgesehen werden.

Die Lagerung in Verbindung mit Prüfung, Sortierung und Losbildung der Altbatterien kann nur durch den Hersteller der Batterien selbst oder durch spezialisierte Unternehmen erfolgen (im Folgenden **spezialisierte Entsorgungsdienstleister**). Bei Entfall dieser Schritte würden die Altbatterien unsortiert in Mischfraktionen zu dem Demonteur transportiert.

Transport

Die Altbatterien müssen zwischen Entnahmestellen, eventuellen Zwischenlagern und dem/den Demontage- und Aufbereitungswerk(en) transportiert werden. Lithium-Ionen-Batterien sind international als Gefahrgut eingestuft (UN-Nummern 3480 und 3481).[6] Transportvorschriften beispielsweise des Europäischen Übereinkommens über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR) bzw. des Übereinkommens über den internationalen Eisenbahnverkehr (RID) sind zu beachten. Die Gefährdung durch defekte Batterien ist vor dem Transport durch geeignete Maßnahmen zu beseitigen (Deaktivierung). In der folgenden Betrachtung werden als beschädigte erkannte Batterien von den genannten Konzepten ausgeschlossen.

Bei einem **Bringkonzept** liegt die Verantwortung für den Transport der Altbatterie zur nächsten Sammlungsstelle (Lager oder Demontagewerk) bei demjenigen Akteur, der die Batterie dem Fahrzeug entnimmt. Dies würde die Bereitstellung eines geeigneten Transportfahrzeugs und/oder zugelassener Transportbehälter für die Altbatterien bei jedem dieser Akteure voraussetzen. Die gemeinschaftliche Nutzung eines Transportfahrzeugs mehrerer Akteure in räumlicher Nähe ist möglich. Bei einem Vorgehen nach dem **Holkonzept** wird der Altbatte-

[6] Vgl. UN (2008), S. 242 – 255, sowie Kapitel 3.3, Special Provisions 188, 230 und 636 (S. 7, S. 11, S. 636).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

rietransport zentral von den Lagern oder dem Demontagewerk organisiert. Die Ausführung kann durch den Lager- bzw. Demontagewerkbetreiber oder einem externen Logistikdienstleister erfolgen. Auch bei diesem Konzept sind geeignete Transportfahrzeuge und -behälter notwendig. Im **Speditionskonzept** werden die Transportaufgaben zwischen den Entnahmestellen und den Lägern bzw. zwischen den Entnahmestellen und dem Demontagewerk von einem **Logistikdienstleister** (LDL) organisiert. Aufgrund der Anforderungen der Lagerung ist das Speditionskonzept nur im zentralen Sammlungskonzept anwendbar. Für Fahrzeuge und Behälter gelten die gesetzlichen Vorschriften.

Demontage

In der Demontage werden die Altbatterien bis auf Zellebene demontiert. Sie kann, muss aber nicht ausschließlich zu einer stofflichen Verwertung der Altbatterien führen. Vielmehr erscheint es sinnvoll, im Sinne einer Wiederaufarbeitung einzelne defekte Komponenten gegen funktionsfähige auszutauschen, falls die Altbatterie dadurch wieder- oder weiterverwendet werden kann. Zur Beurteilung der Verwendungs- und Verwertungsmöglichkeiten der Altbatterien bzw. deren Komponenten muss mit Hilfe spezieller Messgeräte vor und während der Demontage der Batterien eine ausführliche Prüfung durchgeführt werden (Prüfung C). Zudem ist es möglicherweise vorteilhaft, die Altbatterien vor ihrer Demontage auf eine möglichst geringe elektrische Ladung einzustellen, soweit das Batteriemanagementsystem dies zulässt.

In der Demontage sollten möglichst bau- und/oder zustandsgleiche Altbatterien zu Losen zusammengefasst werden. Die Losbildung, welche eine vorherige Sortierung bedingt, erspart häufige Werkzeugwechsel und ermöglicht die Nutzung von Lerneffekten. Auf diese Weise können Kosten deutlich reduziert werden.

Aufgrund der Komplexität und Variantenvielfalt der Produkte sowie der mit dem Umgang der Altbatterien verbundenen Gefahren (elektrische Spannung, Brand- und Explosionsgefährdung) und der mit einer Teilautomation verbundenen Kapitalintensität kommen für diese Aufgabe nur spezialisierte Unternehmen in Betracht. Dies können insbesondere **spezialisierte Entsorgungsdienstleister**, jedoch auch **Aktivmaterialhersteller** sein.

Aufbereitung

Ziel der Aufbereitung ist die Materialrückgewinnung eines möglichst hohen Anteils der Zellbestandteile, insbesondere des wertstoffhaltigen Aktivmaterials. Dazu werden die Zellen mit mechanischen, hydrometallurgischen und/oder pyrometallurgischen Aufbereitungsverfahren behandelt. Hierzu werden verfahrenstechnische Anlagen benötigt, die mit hohen Investitionen verbunden sind. Vor der Behandlung der Zellen ist möglicherweise eine Einstellung des Ladezustands der Zellen auf „0 Volt“ notwendig.

Die mechanische Aufbereitung der Zellen muss zur Erreichung einer hohen Recyclingeffizienz auf die hydrometallurgischen Prozesse abgestimmt sein. Für die mechanische Aufbereitung kommen **spezialisierte Entsorgungsdienstleister** und **Aktivmaterialhersteller** in Betracht. Hydrometallurgische Verfahren erfordern dagegen das Know-how von Chemieunternehmen, z. B. von **Aktivmaterialherstellern**.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

A.3.1.2 Ermittlung von Netzwerkkonstellationen

Auf Basis der herausgestellten Ausprägungen in den genannten Aktivitäten wurden verschiedene Netzwerkkonstellationen ermittelt.

A.3.1.2.1 Netzwerkkonstellation A – einstufiges Sammlungskonzept

In **Netzwerkkonstellation A** (siehe *Abbildung A-7*) werden Prüfung A und Batterieausbau sowie optional **Prüfung B** von freien und Vertragswerkstätten sowie von Altfahrzeugdemontageunternehmen durchgeführt. Die Altbatterien werden kurzzeitig vor Ort oder, falls keine Lagerungskapazität vorhanden ist, bei einer naheliegenden Vertragswerkstatt zwischengelagert. Die Einsammlung der Altbatterien erfolgt nach dem Holprinzip von einen oder mehreren Recyclingwerken aus, dabei können zur Erhöhung der Auslastung der Transportfahrzeuge Touren gebildet werden. Der Transport kann auch von einem **Spediteur** bzw. **Logistikdienstleister** (LDL) organisiert werden.

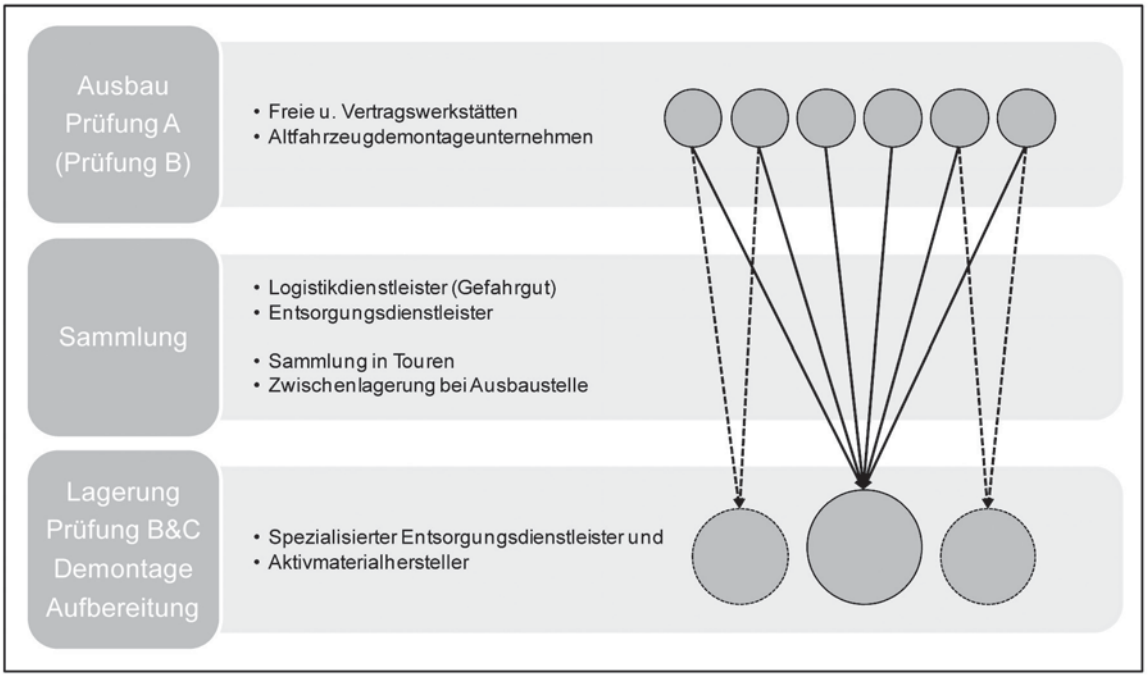


Abbildung A-7: Netzwerkkonstellation A – einstufiges Sammlungskonzept

In den Recyclingwerken findet zunächst eine **Prüfung B** und Sortierung statt. Die Altbatterien werden dort bis zu ihrer weiteren Behandlung **gelagert**. Die Batterien werden, in variantenreinen Losen zusammengefasst, anschließend vor Ort bis auf Zellebene **demontiert**. Vor den einzelnen Demontageschritten wird jeweils **Prüfung C** durchgeführt. Wieder-/weiterverwendungsfähige Altbatterien und Komponenten werden je nach Bedarf aufgearbeitet. Nicht mehr verwendungsfähige Zellen werden der **Aufbereitung** zugeführt. Restmaterial wie Gehäuse und Kabel werden entweder vor Ort aufbereitet oder der externen Behandlung bzw. Beseitigung zugeführt. Die Recyclingwerke werden von **spezialisierten Entsorgungsdienstleistern** und/oder **Aktivmaterialherstellern** betrieben. Diese können, müssen jedoch nicht, rechtlich unabhängig voneinander sein. Die Koordination des Netzwerks wird entweder von jedem Recyclingwerk dezentral für eine vordefinierte Region oder zentral von einem fokalen Unternehmen (bspw. Entsorgungsdienstleister) durchgeführt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

A.3.1.2.2 Netzwerkkonstellation B – zweistufiges Sammlungskonzept mit integrierter Demontage und Aufbereitung

Im Unterschied zur Konstellation A werden in Netzwerkkonstellation B (siehe *Abbildung A-8*) die Altbatterien unverzüglich nach ihrem Ausbau von dezentralen Lagerstätten aus nach dem Holprinzip gesammelt, dort geprüft (Prüfung B), sortiert und gelagert. Direkt wieder-/weiterverwendungsfähige Altbatterien werden von hier aus vertrieben, eine Reparatur ist ebenfalls möglich.

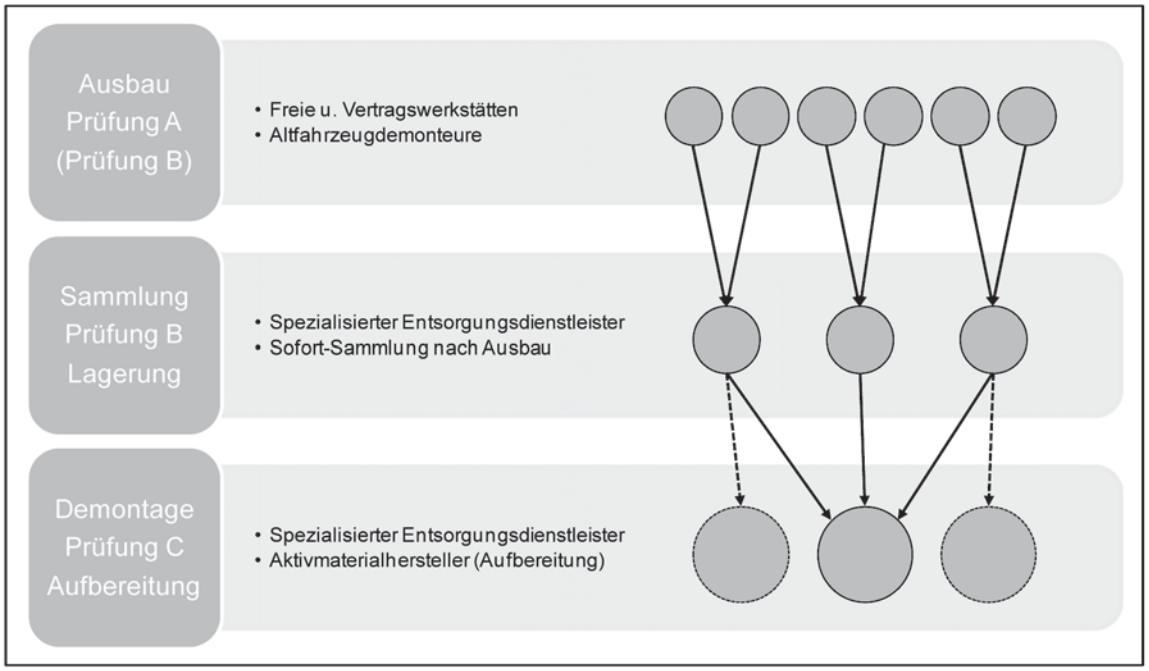


Abbildung A-8: Netzwerkkonstellation B – zweistufiges Sammlungskonzept mit integrierter Demontage und Aufbereitung

Die Lager wie auch die Recyclingwerke werden von **spezialisierten Entsorgungsdienstleistern** betrieben. Die Altbatterien werden erst in Losen zu dem oder den Recyclingwerk(en) transportiert, wenn sie dort aufgearbeitet werden sollen. Die Koordination des Netzwerks wird entweder von jedem Recyclingwerk dezentral für eine vordefinierte Menge von Lagern einer bestimmten Region oder zentral von einem fokalen Unternehmen (bspw. spezialisierter Entsorgungsdienstleister) durchgeführt. Netzwerkkonstellation A und Netzwerkkonstellation B sind nicht konträr; vielmehr ist es möglich, dass mit einem steigenden Aufkommen von Altbatterien ein Übergang von Konstellation A zu B erfolgt, da durch die Einrichtung von zusätzlichen Sammlungsstandorten und anschließende Transportbündelung Transportkosten gespart werden können.

A.3.1.2.3 Netzwerkkonstellation C – zweistufiges Sammlungskonzept mit entkoppelter Demontage und Aufbereitung

Netzwerkkonstellation C (siehe *Abbildung A-9*) geht von einer räumlichen Entkopplungsmöglichkeit von Demontage der Altbatterien und Aufbereitung der Zellen aus. In Differenz zur Netzwerkkonstellation B wird die Demontage der Altbatterien am gleichen Standort durchgeführt wie die Lagerung. Somit kann dort auch die Aufarbeitung von Altbatterien erfolgen. Ein Vorteil dieser Alternative ist, dass der Nutzungspfad der Altbatterien frühzeitig festgestellt werden kann, und gegebenenfalls unnötige Transporte entfallen. Lediglich die Zellen werden

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

sortenrein zu einem oder mehreren Recyclingwerken transportiert. Lagerung und Demontage werden von **spezialisierten Entsorgungsdienstleistern** und die Aufbereitungswerke von **Aktivmaterialherstellern** betrieben. Die Koordination des Netzwerks wird entweder von jedem Demontagewerk dezentral für eine vordefinierte Region oder zentral/dezentral von einem bzw. mehreren Aufbereitungswerk(en) durchgeführt.

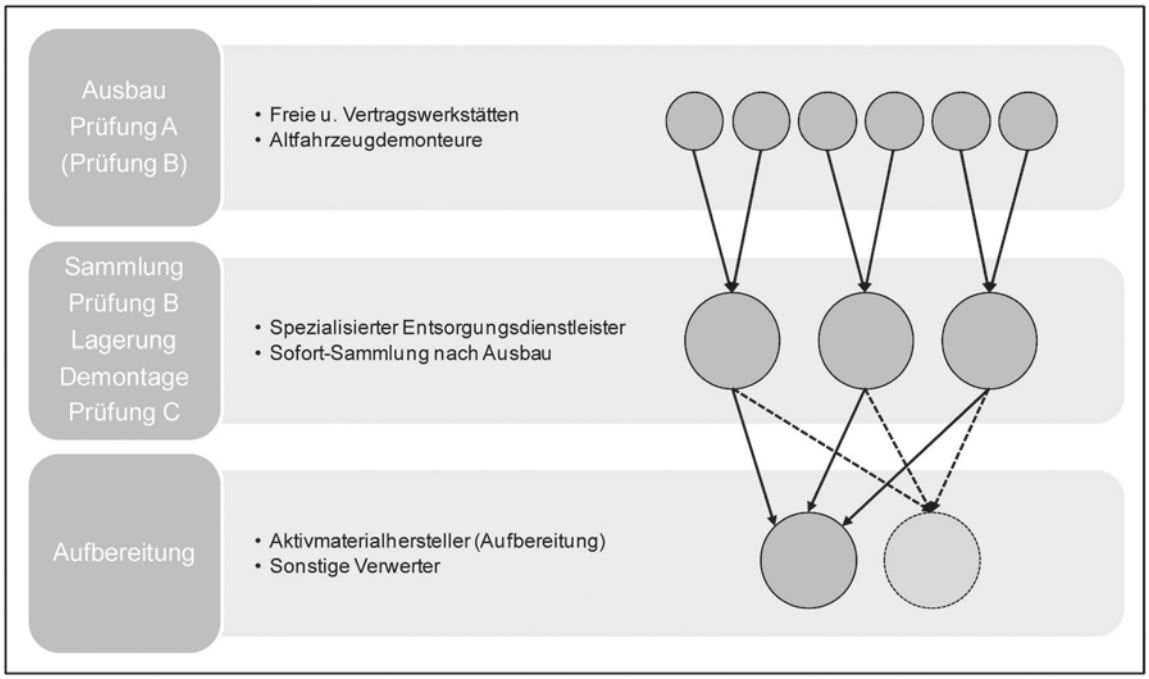


Abbildung A-9: Netzwerkkonstellation C – zweistufiges Sammlungskonzept mit entkoppelter Demontage und Aufbereitung

A.3.1.3 Ableitung eines Anforderungskatalogs

Die netzwerkrelevanten Aktivitäten zur Sammlung und Verwertung gebrauchter Lithium-Ionen-Traktionsbatterien wurden identifiziert und hinsichtlich ihrer möglichen Ausprägungen analysiert. Anhand der ermittelten Netzwerkkonstellationen wurde ein Katalog von Anforderungen auf Netzwerk- und Prozessebene erstellt (siehe Tabelle A-11). Dieser wurde innerhalb der Projektlaufzeit laufend dem Erkenntnisstand angepasst.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tabelle A-11: Anforderungskatalog auf Netzwerk- und Prozessebene und mögliche Akteure

Aktivität	Anforderungen	Spezialisierungsgrad	Mögliche Akteure
+: eingeschränkt geeignet, ++: gut geeignet, +++: hervorragend geeignet			
Entnahme	▪ Geeignete Vorrichtungen, (Mess-) Werkzeuge, KFZ- und Elektrofachkräfte	Mittel	Vertragswerkstätten (+++) Freie Werkstätten (+) Altfahrzeugdemonteure (+)
Prüfung A	▪ Standardisierte Systemlesegeräte und KFZ-Fachkräfte	Niedrig – Mittel	Vertragswerkstätten (+++) Freie Werkstätten (+) Altfahrzeugdemonteure (+)
Prüfung B	▪ Standardisierte (BMS-)Lese-/ Messgeräte und Elektrofachkräfte	Mittel	Vertragswerkstätten (+++) Freie Werkstätten (+) Altfahrzeugdemontageunternehmen (+) Spezialisierter Entsorgungsdienstleister (+++)
Transport A (Sammlung)	▪ Ausschließlich unbeschädigte Batterien ▪ Gefahrgutfachkräfte, Transportfahrzeuge, Transportbehälter	Niedrig	Logistikdienstleister (+++) Entsorgungsdienstleister (Allg.) (+) Spezialisierter Entsorgungsdienstleister (+++)
Lagerung	▪ Dedizierte Lagerung für Batterien aus Fahrzeugen ▪ Prüfstand (für Prüfung B), Elektrofachkräfte, Gefahrgutfachkräfte (Gefahrgutbeauftragter), Lager-/Transportbehälter ▪ Anbindung an Verkehrsinfrastruktur (Autobahn und vorzugsweise Schiene/Wasserwege) ▪ Geeignete Lagerbehälter für beschädigte Batterien	Hoch	Spezialisierter Entsorgungsdienstleister (+++)
Transport B (Bündelung)	▪ Gefahrgutfachkraft (bevorzugt Bahn- oder Schiffstransport), Transportbehälter	Mittel	Logistikdienstleister (+++) Spezialisierter Entsorgungsdienstleister (++)
Prüfung C Demontage	▪ Spezialwerkzeuge, Spezielle Prüf- und Messgeräte, Elektrofachkräfte, Gefahrstofffachkräfte ▪ Anbindung an Verkehrsinfrastruktur (Autobahn und vorzugsweise Schiene/Wasserwege)	Hoch	Spezialisierter Entsorgungsdienstleister (+++) Aktivmaterialhersteller (+)
Aufbereitung	▪ Fachkräfte (Chemiker, Gefahrstoffbeauftragte) ▪ Anbindung an Verkehrsinfrastruktur (Autobahn und vorzugsweise Schiene/Wasserwege) ▪ Räumliche Nähe zu Betrieben der Branche Metallurgie, möglichst auch zu nachgelagerten Stufen, z. B. Zellherstellern	Hoch	Spezialisierter Entsorgungsdienstleister (++) Aktivmaterialhersteller (+++)

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

A.3.2 Entwicklung und Bau von Prototypenwerkzeugen sowie Konzeption verschiedener Batterie-Ausbaukonzepte mit Hilfe entsprechender Ausbaustudien

Ergebnis der Entwicklungsarbeiten ist ein für den universellen Ausbau von HV-Batterien geeignetes Batteriedemontage-KIT, welches in sechs Varianten kombiniert einsetzbar ist. Erfolgreiche Tests der Neuentwicklung wurden an einem AUDI Q5 hybrid und einem Audi A6 hybrid (analog A8 hybrid) durchgeführt. Damit ist die Einsetzbarkeit sowohl bei leicht zugänglicher HV-Batterie im Q5 als auch bei sehr niedriger Einbauhöhe im Kofferraum des A6 und A8 nachgewiesen worden.

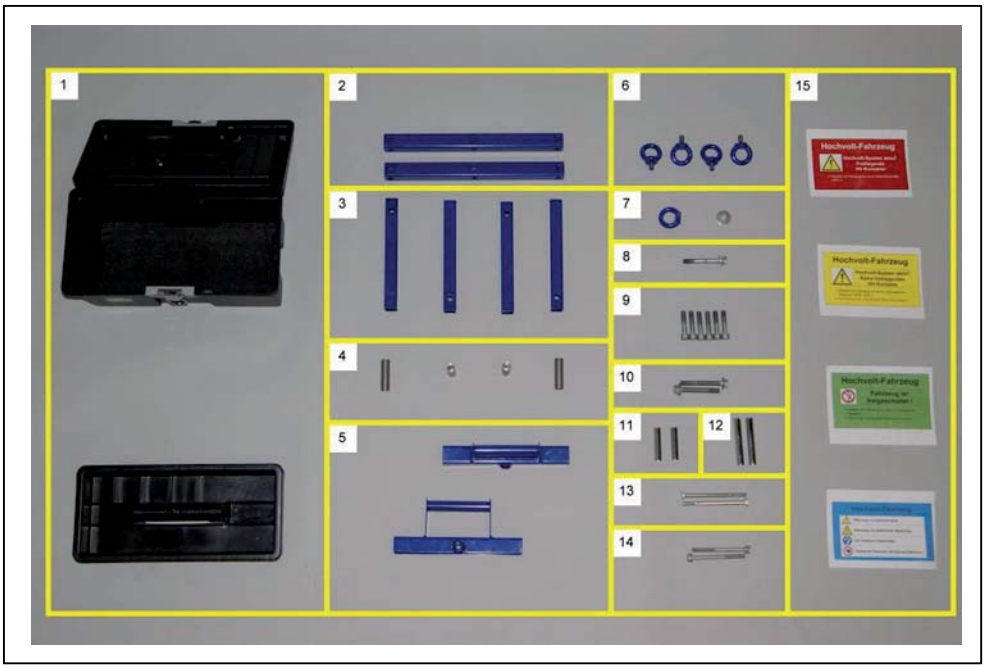


Abbildung A-10: HV - Batteriedemontage-KIT

Das HV-Batteriedemontage-KIT kann in folgenden Zusammenbauvarianten für unterschiedlichste Anwendungsfälle eingesetzt werden:

- Variante (1) Kreuzaufnahme mit Schraubglocken - max. Auszugslänge 70 cm
- Variante (2) Tragegriff – max. Abstand Anschlagpunkte an Batterie 37,5 – 45 cm
- Variante (3) Tragegriff – max. Abstand Anschlagpunkte an Batterie 41,5 – 50 cm
- Variante (4) Einzelstrebe – max. Auszugslänge 50 cm
- Variante (5) Benutzung der Ringösen – in Abhängigkeit vorhandener Anschlagpunkte
- Variante (6) Kreuzaufnahme mit Schrauben und Abstandshülsen - max. Auszugslänge 70 cm

Die einzelnen Varianten sind in einer Bedienungsanleitung detailliert beschrieben. Die konstruktiven Daten sind in schematischen Zeichnungen dargestellt. Für den Einsatz eines handelsüblichen hydraulischen Werkstattkranes als Hebezeug, wird zum universellen Einsatz

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

besonders bei Fahrzeugen mit sehr niedriger Einbauhöhe der HV-Batterien (bspw. A8 und A6 hybrid) ein austauschbarer abgewinkelter Lastarm für den Werkstattkran empfohlen.

Ein Vorschlag mit Text und Fotos, der auch als herstellerspezifische Informationen für IDIS eingesetzt werden kann, ist erstellt worden.

Empfehlung:

- ✓ ***Auch wenn für die AUDI – Modelle mit den Ausbauhilfen eine optimale Lösung für den HV-Batterieausbau gefunden wurde, sollte darüber nachgedacht werden, 4 Schraubglocken als Anschlaghilfen in das Bordwerkzeug (analog des Sicherheitsbit für Radmutter) zu integrieren. Für den Verwerter, der aus dem Altfahrzeug die HV-Batterien ausbaut und auch den Hersteller scheint das eine kostengünstige Variante zu sein.***

A.3.3 Entwicklung und Umsetzung eines Verpackungssystems sowie Konzeption eines Befestigungssystems

Vorhaben dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung eines standardisierten aber modularen Verpackungssystem, das durch die Verwendung verschiedener Boden- und Seitenteile sowie Deckel für die unterschiedlichen Batteriesysteme verwendet werden sollte.

Eine Minimalforderung war die Einstufung der Verpackung als Verpackungsgruppe II nach Verpackungsvorschrift P 903, um alle Lithium-Ionen-Batterien mit UN38.3-Zulassung darin transportieren zu dürfen. Derzeit sind die genauen Abmessungen der bis 2030 anfallenden Batteriesysteme jedoch nicht absehbar. Das nachfolgend vorgestellten Behälterkonzepte beziehen sich daher nicht auf spezifische Batteriesysteme mit definierten Abmessungen, sondern legen grundsätzliche Anforderungen an die Behälter fest.

Nutzung Verpackung bei Batteriesystemtausch

Die Auslieferung der Neubatterien wird nach jetzigem Kenntnisstand aus Kostengründen im Regelfall in zugelassenen Einwegkartonverpackungen erfolgen, die genau auf den jeweiligen Batterietyp zugeschnitten werden. In der nachfolgenden Abbildung A-11 ist solch eine Kartonverpackung beispielhaft aufgeführt. Die Kartonverpackung erfüllt die Prüfanforderungen der ADR Verpackungsgruppe II.

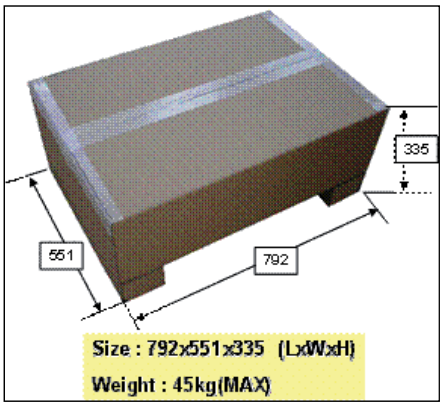


Abbildung A-11: Einwegkartonverpackung Sanyo Batteriesystem für Audi Q5

Da die durchschnittliche Lebensdauer des Batteriesystems wahrscheinlich geringer sein wird als die Nutzungsdauer des zugehörigen Fahrzeuges, ist davon auszugehen, dass ein großer

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Teil der Rücklaufmengen im Rahmen des Auswechselns der Systeme anfällt und damit an der Anfallstelle auch eine jeweils zugelassene Originalverpackung zur Verfügung steht.

Empfehlung:

- ✓ ***Es wird empfohlen, im Rahmen dieses Tauschprozesses den Servicebetrieben die Vorgabe zu machen, dass das alte Batteriesystem in die Originalverpackung des Ersatzbatteriesystems einzusetzen ist. Für den Rücknahmeprozess würden die Batterien damit in einer zugelassenen Verpackung zu Verfügung stehen.***
- ✓ ***Um die Zwischenlagerung bis zur Abholung und das Verladen möglichst sicher und effizient zu gestalten, können je nach Ausgestaltung der Originalverpackung, diese zusätzlich in Standardbehälter (z.B. Euro-Gitterboxen, Paloxen) eingestellt werden. Dies bietet sich insbesondere für die kleinen Bauformen (HEV) an.***
- ✓ ***Wenn die Originalverpackung nicht schon für die Aufnahme einen Hubwagens (Ameise) optimiert ist, ist davon auszugehen, dass das neue Batteriesystem inkl. Verpackung auf einer Palette angeliefert wird. Hierbei ist zu beachten, dass die Originalverpackung auf der Palette entsprechend gesichert ist (z.B. mit Schrumpffolie, Kunststoffumreifungsbänder).***

Mehrwegbehältersystem:

Nicht immer werden individuelle Verpackungen im Rahmen der Rücknahme zur Verfügung stehen. Daher müssen für die Rücknahme auch Behälter zu Verfügung stehen, die einerseits die rechtlichen Anforderungen erfüllen, andererseits auch eine umweltfreundliche und kostengünstige Rücknahme gewährleisten. Vor diesem Hintergrund sind Verpackungen aus Pappe nicht geeignet, da diese den mechanischen Belastungen eines Mehrwegsystems nicht dauerhaft standhalten können. Da ein Palettensystem gefahrgutrechtlich nicht zugelassen ist, kommen aus logistischer Sicht nur Boxen (Kisten) in Frage. Gem. Unterabschnitt 6.1.2.7 ADR kommen folgende Werkstoffe in Frage:

- Stahl
- Aluminium
- Naturholz (einfach oder mit staubdichten Wänden)
- Sperrholz
- Holzfaserwerkstoffe
- Pappe
- Kunststoff (Schaumstoffe oder starre Kunststoffe)

Im Erfahrungsaustausch mit Entsorgungsdienstleistern stellte sich heraus, dass die Werkstoffe Stahl, Aluminium sowie starrer Kunststoff besonders gut für ein Mehrwegbehältersystem geeignet sind. Behälter aus Aluminium oder Stahl sind jedoch im Vergleich zu Kunststoffbehältern erheblich teurer.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Empfehlung:

- ✓ ***Es wird empfohlen, für das Mehrwegbehältersystem zugelassene Kunststoffbehälter der ADR Verpackungsgruppe II zu verwenden. Die Behälter sollten eine hohe Stabilität aufweisen, damit diese im Rahmen des Mehrwegsystems mehrfach verwendet werden können. Diese Kriterien könnten beispielsweise mit der sog. Batteriepaloxe (Akkukasten aus starrem Kunststoff, vgl. Abbildung A-12) erfüllt werden:***



Abbildung A-12: Batteriepaloxe (Akkukasten aus starrem Kunststoff)

Die derzeit am Markt befindlichen Batteriepaloxen sind teilweise gem. ADR bauartgeprüft und für Gefahrgut der Verpackungsgruppe II zugeordnet. Die derzeit bekannten Bauartzulassungen beziehen sich jedoch nicht explizit auf Lithium-Ionen Batteriesysteme (UN3480), so dass vor Einsatz dieses Behältersystems durch die Hersteller ein entsprechender Nachweis der Eignung bzw. eine angepasste Bauartzulassung erwirkt werden muss. Können die Batteriesysteme aufgrund ihrer Bauform nicht so eingestellt werden, dass diese in der Sammelbox nicht verrutschen, sind rutschhemmende Zwischenlagen zu verwenden und evtl. Freiräume mit Polstermaterial auszufüllen. Aufgrund des stabilen Außengehäuses des Batteriesystems und den Schutzvorrichtungen der Anschlüsse (Pole) ist davon auszugehen, dass die HEV- (ca. 38 kg/ Batterie) und die PHEV-Systeme (ca. 140 kg/ Batterie) in zwei Lagen in die Sammelbox eingestellt werden können.

A.3.4 Entwicklung und Umsetzung eines Systems zur Lagerung und Konzeption eines Lagers

In **AS A.3.4** wurden Konzepte und Vorschriften für die Lagerung von Lithium-Ionen-Batterien bei den Demontagebetrieben und Werkstätten, den Sammellagern und den Recyclingbetrieben am Ende der Entsorgungskette erarbeitet. Diese drei Anfallstellen unterscheiden sich wesentlich im Durchsatz. Die Werkstätten und Demontagestellen werden in der Regel geringe Mengen an Lithium-Ionen-Batterien lagern, was vorrangig aus Kosten- und Platzgründen resultiert. Sammel- bzw. Verdichtungslager werden voraussichtlich mit mittleren Mengen arbeiten, da die Batterien kontinuierlich ab einer ökonomisch und logistisch sinnvollen Anzahl / Verdichtung weitergeleitet werden an die Recyclinganlagen. Diese wiederum benötigen Lager für große Mengen an Lithium-Ionen-Batterien um den Recyclingprozess kontinuierlich im ausgelegten Anlagendurchsatz halten zu können.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Da es derzeit keine Vorgaben oder Tabellenwerte in den einschlägigen Rechtsvorschriften für die Lagerung von Lithium-Ionen-Batterien aus dem Automobil-Bereich gibt, ist bei der Konzeption solcher Läger folgendes unbedingt zu beachten:

Für die Lagerung von Lithium-Ionen-Batterien aus dem Automotivebereich ohne Mengenbeschränkung ist generell die Erstellung eines Brandschutznachweises durch die zuständige Bauaufsichtsbehörde oder durch Prüfsachverständige notwendig!

Andernfalls sind im Schadensfall straf- und haftungsrechtliche Folgen möglich!

In Anlehnung an die technischen Regeln für Gefahrstoffe und nach exemplarischer Betrachtung aus Sicht des Brandschutzes sowie Rücksprache mit Batterie- und Automobilherstellern, Verwertern und Systembetreibern zur Sammlung von Lithium-Ionen-Batterien konnten die folgenden zusammenfassenden Mindest-Empfehlungen für Anforderungen an die Lagerung von Lithium Ionen Batterien abgeleitet werden:

Bauliche Lageranforderungen:

	Lagerung in Gebäuden	**Lagerung im Freien**
i.O. Batterien (neu und gebraucht)	• Normallager	• Lagerung in Container mit mindestens 5m Abstand zu Gebäuden oder anderen Lagercontainern (bei Unterschreitung des Abstands ist F90-Container empfehlenswert) • Unterscheidung unterschiedlicher Lagercontainer durch entsprechende Kennzeichnung • Helle Aussenfarbe des Containers
n.i.O. Batterien (neu und gebraucht)	• Nicht zu empfehlen	• Nach Quarantäne in F90-Container

- Ebener befestigter Boden mit ausreichend Manövrierfläche (u.a. für den Transport mittels Gabelstapler)
- Lagerbereich mit ausreichend groß Dimensionierten Ein- und Ausgangsbereich (schneller Abtransport)
- Quarantäne = Karenzzeit für evtl. nachfolgend auftretende exotherme Reaktionen

Technische Lageranforderungen:

- Rauchmeldung mit Aufschaltung bei der Feuerwehr (im Freien: Brandmeldesensorik, akustischer Alarmierung am Container)
- Ausreichende Möglichkeiten zur Brandbekämpfung (Feuerlöscher oder automatische Löschanlage)
- Sicherung vor Unbefugten
- Sicherstellung einer max. Temperaturgrenze < 40°C für i.O. Batterien
- Vermeidung von direkter Sonneneinstrahlung
- Ausreichende Entlüftungsvorrichtungen (Rauch- und Wärmeabzugsöffnung ist entsprechend der DIN 18232-2 zu dimensionieren)
- Ausreichende Beleuchtung innen und außen nach ASR A3.4 Beleuchtung

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Organisatorische Lageranforderungen:

- Die Standorte der Lagerräume sind zweckmäßigerweise an Außenwänden zu wählen
- Keine Reparaturarbeiten an den Batterien im Lagerraum
- Kennzeichnung der Lagerbereiche (Gefahrenhinweise, Ansprechpartner, Vertreter, Verantwortlicher der Prüfung)
- Die Mitarbeiter der jeweiligen Betriebsstätte sind besonders brandschutztechnisch zu unterweisen. Für die jeweiligen Firmen sind Brandschutzordnungen gemäß DIN 14096 in den Teilen A, B und C aufzustellen
- Die Vorgaben der Arbeitsstättenverordnung sind inhaltlich umzusetzen
- Nutzung von Transportbehältern auch als Lagerbehälter (gilt nur für die Normallagerung)
- Bei Behältern und Verpackungen sind Beschädigungen unbedingt zu vermeiden. Beschädigte Behälter oder Verpackungen sind unverzüglich auszutauschen
- Prüfung aller Lagereinrichtungen erstmalig und anschließend in angemessenen Abständen, regelmäßig auf ihre ausreichende Funktion, Zuverlässigkeit und Wirksamkeit, z.B.:
- Einhaltung von Fach- und Feldlasten von Regalen mit Lagerbehältern oder die Unversehrtheit von Regalteilen
- Unversehrtheit von Lüftungskanälen und Erfassungseinrichtungen

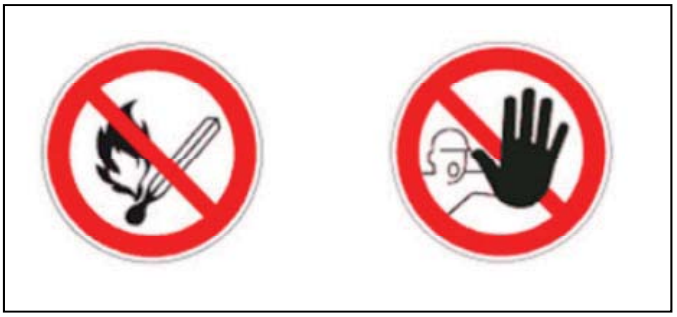


Abbildung A-13: Kennzeichnung von Lagerein- und Ausgängen

A.3.5 Wirtschaftlichkeitsberechnung des gesamten Sammelkonzeptes

Ziel dieses Arbeitsschrittes war die Ermittlung der Kosten und Erlöse, die beim Fahrzeugverwerter, Batterieverwerter und beim Li-Ion-Recycling-Betrieb entstehen, zusätzlich der Kosten/ Erlöse für (Zwischen-) Lagerung(en) und Transport(e).

Da die Mehrzahl der zur Berechnung notwendigen Daten bisher nicht zur Verfügung standen (keine praktischen Erfahrungswerte in Werkstätten und bei Fahrzeug-/ Batterieverwertern), wurde versucht, diese mittels ähnlicher Daten sowie empirischer Versuche zu erheben.

Dazu wurden Batteriesysteme aus verschiedenen Fahrzeugtypen unterschiedlicher Konzepte (Elektro-/ Hybrid) ausgebaut, die Batteriesysteme weiter bis auf Modul-/ Zellebene zerlegt und die Zellen in verschiedenen Ladezuständen einem Shredder zugeführt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die Zeiten aller dieser Arbeitsschritte wurden nachvollziehbar protokolliert und für die einzelnen Arbeitsschritte wurde definiert, welcher Arbeitsvorgang welche Fachausbildung erfordert.

Abhängig von der notwendigen Fachausbildung wurden unterschiedliche Stundenlöhne (auf Vollkostenbasis) ermittelt (einfacher Mitarbeiter im Demontagebetrieb ohne besondere Ausbildung/ Mitarbeiter mit besonderer Ausbildung für Arbeiten an Hochvoltanlagen)

Auf dieser Basis konnten Fahrzeug-bezogene und Batteriesystem-bezogene Batterie-Demontage- und Batterie-Recycling-Personalkosten ermittelt werden.

Für den Transport nicht defekter („transportfähiger“) Batteriesysteme wurde ein Preis/ Tonne ohne Kilometerbegrenzung analog dem Preis/ Tonne für das Sammeln von Starterbatterien angenommen.

Allerdings wurde die Prämisse festgelegt, dass pro Sammeltransport wegen der gesetzlich vorgeschriebenen Transport-Verpackungen für Li-Ion-Batterien nicht max. 20 t Batterien (wie bei den Starterbatterien), sondern lediglich max. 8 bis 9 t pro LKW transportiert werden können.

Für die Lagerkosten der Batterien wurde analog dem Preis für Starterbatterie-Lagerung 1/6 des Transportpreises veranschlagt.- ohne Berücksichtigung der Lagerdauer.

Diese Daten wurden auf einem Tabellenblatt – chronologisch nach den jeweiligen Prozessschritten – zusammengefasst und so variabel gehalten, dass die Kosten/ Erlöse der jeweiligen Arbeitsschritte je nach Fahrzeug und Batterie sowie den Annahmen für Löhne und Transportkosten ermittelt werden.

Nicht berücksichtigt bei dieser Berechnung wurden Batteriesysteme bzw. Module und Zellen, die defekt und ohne weitere Behandlung nicht transportfähig sind. Überlegungen, den ursprünglichen Zustand der Batterien/ Module/ Zellen durch chemische, mechanische und/ oder thermische Behandlung in einen anderen zu überführen, und damit evtl. wieder transportsicher zu machen, bedürfen noch experimenteller Tests und einer Anerkennung durch den Gesetzgeber.

Weiteres Untersuchungsfeld dieses Arbeitspunktes war die Ermittlung der Kosten und Erlöse, die beim Fahrzeugverwerter, Batterieverwerter und beim Li-Ion-Recycling-Betrieb entstehen, zusätzlich der Kosten/ Erlöse für (Zwischen-) Lagerung(en) und Transport(e).Dazu wurden Batteriesysteme aus verschiedenen Fahrzeugtypen unterschiedlicher Konzepte (Elektro-/ Hybrid) ausgebaut, die Batteriesysteme weiter bis auf Modul-/ Zellebene zerlegt und die Zellen in verschiedenen Ladezuständen einem Shredder zugeführt.

Unter diesen Randbedingungen konnten Fahrzeug-bezogene und Batteriesystem-bezogene Batterie-Demontage- und Batterie-Recycling-Personalkosten ermittelt werden.

Für Transport und Lagerung wurde in Anlehnung an die Kosten für anderes Gefahrgut ein Wert abgeschätzt. Die Ergebnisse für Transport Lagerung und Demontage sind in die Ergebnisse für den Projektbereich **PB E** und in die folgenden Untersuchungen in **AS A.3.6** sowie **AS A.3.7** eingeflossen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

A.3.6 Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungsinstruments zur Gestaltung von Netzwerken

Im **AS A.3.6** wurden die drei in **AS A.3.1** identifizierten Netzwerkkonstellationen auf Basis eines erweiterten dynamischen Facility-Location-Problems (FLP) von AIP-TUBS mathematisch modelliert. Mithilfe des Solvers CPLEX wurde fallstudienbasiert unter Zugrundelegung von Annahmen zum Altbatterieaufkommen und von Zahlungen für Transport, Demontage und Aufbereitung von Altbatterien die jeweils optimale logistische Netzwerkstruktur im Planungshorizont ermittelt. Diese beinhaltet:

- Errichtungszeitpunkte, Orte und Kapazitäten von Umschlaglagern,
- Errichtungszeitpunkte, Orte und Kapazitäten von Demontagewerken,
- Errichtungszeitpunkte, Orte und Kapazitäten von Aufbereitungswerken,
- Zuordnung der Transportrelationen von Quellen des Altbatterieaufkommens zu den Umschlaglagern- und Demontagewerken (Einzeltransporte),
- Zuordnung der Transportrelationen von Umschlaglagern zu Demontagewerken (Sammeltransporte)
- Zuordnung der Transportrelationen von Demontagewerken zu den Aufbereitungswerken (Sammeltransporte).

Grundlage für die Optimierung ist jeweils ein Planungshorizont von mehreren Planungsperioden. Eine Planungsperiode kann dabei jeweils ein oder mehrere Jahre umfassen. Die Errichtung von Lagern und Werken erfolgt jeweils zu Beginn einer Planungsperiode. Zum gleichen Zeitpunkt werden auch die entsprechenden Zahlungen fällig. Die Nutzungsdauern der Werke sind im Planungshorizont unbegrenzt. Das Schließen von Werken in nachfolgenden Planungsperioden wird ausgeschlossen. Die Zuordnung der Transportrelationen erfolgt jeweils für eine Planungsperiode (s. u.).

Die Optimierung erfolgt mit dem Ziel der Maximierung des Barwerts der resultierenden jährlichen Zahlungen. Diese Zahlungen umfassen:

- Auszahlungen für die Errichtung neuer Umschlaglager und Demontage- sowie Aufbereitungswerke,
- fixe jährliche zahlungsgleiche Betriebskosten (d. h. exklusive kalkulatorischer Kosten) für den Betrieb der errichteten Umschlaglager, Demontagewerke sowie Aufbereitungswerke,
- zahlungsgleiche auslastungsproportionale Deckungsbeiträge für die Behandlung von Batterien in den Lagern und Werken (inklusive Erlösen und Kosten für den systemexternen Kauf und Verkauf von Roh- und Wertstoffen, für die Beseitigung von Reststoffen und für den Transport dieser Stoffe),
- stoffflussbedingte Zahlungen für den systeminternen Transport von Batteriesystemen und Zellen.

Vorausgesetzt wird jeweils, dass jede Batterie im Netzwerk gesammelt und recycelt wird (100-prozentige Sammel- und Behandlungsquote). Im Folgenden werden die Modellierungsansätze jeweils für die wichtigsten Aspekte des Entscheidungsproblems erläutert. Dies betrifft die modellseitige Abbildung des geographischen Raums, des Altbatterieaufkommens, der logistischen und transformierenden Prozesse, der Kapazitäten und der Stoffströme.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

A.3.6.1 Modellierung des geographischen Raums

Basis für die diskrete Standortplanung bilden 439 Kreise (Geographische Objekte, GOs) der Bundesrepublik Deutschland (Gebietsstands der Bundesrepublik Deutschland auf Kreisebene zum 31.12.2006 des Statistischen Bundesamts).[7] Die geographischen Objekte bilden die Knotenmenge des Standortplanungsproblems und sind gleichzeitig Quellen sowie potentielle Umschlaglager-, Demontagewerk- und Aufbereitungsstandorte (Senken). Im Rahmen einer Standortvorauswahl werden die potentiellen Standorte jedoch auf Teilmengen reduziert. Zur Bewertung von Transporten zwischen den Knoten wurden die durchschnittlichen Entfernungen zwischen den 439 Kreisen berechnet und eine gespiegelte Distanzmatrix mit knapp 193.000 Relationen (Kanten) gebildet. Aufgrund des mit der manuellen Berechnung verbundenen Aufwands wurde ein Tool entwickelt, welches die Routenplanungsfunktion gängiger GIS-Software nutzt und die Distanzmatrix automatisiert berechnet.[8] Anfangs- und Endpunkte der Routen bilden jeweils Straßen nahe der geographischen Mitte der Kreise.

A.3.6.2 Modellierung des Altbatterieaufkommens

Zur Modellierung der Quellen des Altbatterieaufkommens wurde das aggregierte Altbatterieaufkommen nach Fahrzeugtyp auf die genannten 439 Kreise (GOs) verteilt.[9] Die Verteilung erfolgte proportional zum Kraftfahrzeugbestand auf Kreisebene zum 01.01.2007 (Spalte „PKW insgesamt“). Vereinfachend wurde dabei angenommen, dass das Verhältnis des Bestands an PKW mit elektrifiziertem Antriebsstrang bundesweit einheitlich und statisch ist. Regionale Unterschiede werden nicht berücksichtigt, eine Anpassung der Parameter bei besserer Datenlage jedoch möglich. Quellenseitig wird das Altbatterieaufkommen nach HEV, PHEV und BEV differenziert. Zur Komplexitätsreduktion wird das Aufkommen der unterschiedlichen Batterietypen in jedem Verwaltungsgebiet innerhalb der Optimierung in sogenannte **BEV-Äquivalente** (BEV-Äq.) umgerechnet.

A.3.6.3 Modellierung der Prozesse

Zur Abbildung sowohl flexibler zentraler als auch dezentraler Konzepte der identifizierten Netzwerkkonstellationen A, B und C wurden die logistischen und produktionstechnischen Prozesse *Sammeln*, *Umschlagen/Sortieren*, *Lagern*, *Entladen*, *Demontieren*, *Separieren* und *Aufbereiten* modularisiert (siehe Abbildung A-14). Die Prozesse *Ausbau* und *Prüfung* wurden nicht modelliert, da hierzu die konkrete Modellierung sämtlicher Werkstätten und Altfahrzeugdemontageunternehmen erforderlich wäre. Diese Genauigkeit erscheint nicht zweckdienlich, da die Allokation von Altbatteriemengen auf diese Standorte sehr problematisch wäre. Zudem erhöht sie die Komplexität der Modellierung drastisch.

[7] Neuere Daten des Bundesamts für Statistik liegen zwar vor, sind aufgrund der Kreisgebietsreformen in den vergangenen Jahren jedoch mit der zur Berechnung der Distanzen genutzten Software nicht kompatibel.

[8] Die Anwendung wurde in Microsoft C# entwickelt und nutzt die Programmierschnittstelle von Microsoft MapPoint Europa 2010.

[9] Das jährliche aggregierte Altbatterieaufkommen auf Bundesebene in den Jahren 2010 bis 2050 (Ergebnisse des **AP A.1**).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

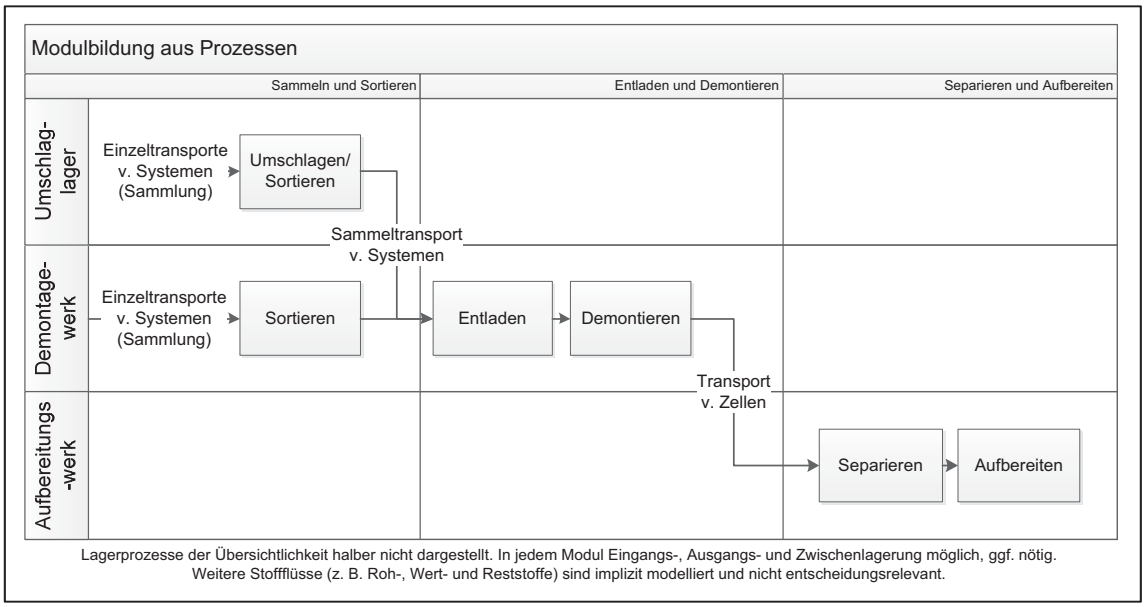


Abbildung A-14: Modulbildung aus Prozessen.

Im Modul **Umschlaglager** finden die Prozesse *Sammeln*, *Umschlagen/Sortieren* und *Lagern* statt. Dieses optionale Modul dient primär der Verdichtung von Transporten zur Nutzung von Skaleneffekten. Altbatterien werden in Einzeltransporten von den Quellen des Altbatterieaufkommens eingesammelt, gegebenenfalls kurzzeitig gelagert und möglichst sortenrein und gebündelt zu Demontagewerken transportiert. Der Begriff „Umschlaglager" verdeutlicht, dass der logistische Prozess des Lagerns nicht ausgeschlossen ist; jedoch nicht im Vordergrund steht. Bei dem obligatorischen Modul **Demontagewerk** handelt es sich um ein um die anschließenden Prozesse *Entladen* und *Demontieren* erweitertes Umschlaglagermodul. Altbatterien können somit sowohl direkt von den Quellen gesammelt als auch von den Umschlaglagern angeliefert werden. Nach gegebenenfalls kurzfristiger Lagerung werden die Altbatteriesysteme weitestgehend entladen und bis auf Zellebene demontiert. Die Zellen werden anschließend nochmals entladen. Bis auf die Zellen finden die einzelnen Fraktionen (z. B. Stahl- und Plastikgehäuse, Kupferkabel, BMS) Eingang in die (lokal) vorhandenen Recyclingstrukturen. Entsprechende Transporte werden als nicht entscheidungsrelevant angenommen und sind somit nicht explizit modelliert, werden jedoch in der monetären Bewertung pauschal berücksichtigt. Die Zellen werden an das Modul **Aufbereitungswerk** geliefert, welches die verfahrenstechnischen Prozesse zur Rückgewinnung der Aktivmaterialbestandteile, *Separieren* und *Aufbereiten*, vereint.

In einem **einstufigen Sammlungskonzept** (Konstellation A) werden die Module Demontagelager und Aufbereitungswerk in einem Standort zusammengefasst. Werden insgesamt nur ein Demontagelager und ein Aufbereitungswerk eröffnet, ist dies mit einem **zentralen Sammlungskonzept** gleichzusetzen, werden mehrere solcher Kombinationen eröffnet, handelt es sich um ein **dezentrales Sammlungskonzept**. Im **zweistufigen Sammlungskonzept mit integrierter Demontage und Aufbereitung** (Konstellation B) ist vor mindestens ein Demontagewerk mindestens ein – räumlich getrenntes – Umschlaglager geschaltet. Demontage- und Aufbereitungswerke sind jedoch grundsätzlich örtlich zusammengefasst. Im Gegensatz dazu ist im **zweistufigen Sammlungskonzept mit entkoppelter Demontage und Aufbereitung** (Netzwerkkonstellation C) mindestens ein Demontagewerk räumlich von einem Aufbereitungswerk getrennt. Dies setzt die räumliche Entkopplungsmöglichkeit der De-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

montage und Aufbereitung und die Möglichkeit des Transports von entladenen Zellen voraus.

A.3.6.4 Modellierung von Kapazitäten

Für die drei Module können unterschiedliche Kapazitäten über beliebig viele Kapazitätsklassen abgebildet werden.[10] Für jede modulbezogene Kapazitätsklasse werden maximale Verarbeitungskapazitäten pro Planungsperiode, spezifische Investitionsauszahlungen für die Errichtung eines Moduls, fixe Auszahlungen (zahlungsgleiche Fixkosten) pro Planungsperiode für den Betrieb eines Moduls sowie variable Zahlungen (zahlungsgleiche Deckungsbeiträge) je verarbeiteter Einheit in dem Modul festgelegt. Die Kapazität eines Umschlaglagers entspricht somit der maximalen Umschlagsleistung [BEV-Äq./Planungsperiode] (nicht der maximalen Lagerkapazität), die Kapazität von Demontagewerken entspricht der maximalen Demontageleistung [BEV-Äq./Planungsperiode], die Kapazität von Aufbereitungswerken entspricht der maximal prozessierbaren Zellmasse [t Zellen/Planungsperiode]. Zu Beginn jeder Planungsperiode können an einer vorgegebenen Menge potentieller Standorte mehrere Umschlaglager oder Werke verschiedener Kapazitätsklassen eröffnet werden.

A.3.6.5 Modellierung der Stoffströme

Die Stoffströme zwischen Quellen, Umschlaglagern und Demontagewerken werden in BEV-Äquivalenten abgebildet. Über entsprechende Entscheidungsvariable werden die Transportrelationen zwischen den Quellen und Senken gesteuert. Dabei erfolgt die Zuordnung einer Quelle zu Umschlaglagern und Demontagewerken jeweils eindeutig für eine Planungsperiode, eine Aufteilung auf verschiedene Werke ist somit nicht möglich. Intertemporal ist diese Zuordnung jedoch dynamisch, um dem kurzfristig-operativen Charakter der Transportplanung gerecht zu werden.

Die **Stückguttransporte** zwischen Quellen einerseits und Umschlaglagern und Demontagewerken andererseits werden auf jeder Strecke entfernungs- und mengenproportional anhand eines einheitlichen, auf BEV-Äquivalente normierten Einzeltransportkostensatzes [EUR / (km*BEV-Äq.)] bewertet. Die durchschnittliche Kapazität und Auslastung der Transportfahrzeuge kann somit implizit über die Festlegung des Einzeltransportkostensatzes durchgeführt werden. Die Zuordnungen der **Sammeltransporte** eines Umschlaglagers zu einem Demontagewerk und die eines Demontagewerks zu Aufbereitungswerken sind mehrdeutig. Somit können die in einem Umschlaglager gesammelten Batterien an verschiedene Demontagewerke und die in einem Demontagewerk separierten Zellen an verschiedene Aufbereitungswerke geliefert werden. Die Sammeltransporte zwischen Umschlaglagern und Demontagewerken (Stufe 1) werden entfernungs- und mengenproportional anhand eines einheitlichen Sammeltransportkostensatzes für den Transport einer BEV-Äquivalenten [EUR / (km*BEV-Äq.)] bewertet. Aufgrund von Transportbündelung und höheren Kapazitäten im Sammeltransport wird der Sammeltransportkostensatz erheblich niedriger als der Einzeltransportkostensatz festgelegt.

Die transformierenden Demontageprozesse im Demontagewerk werden über ein Input-Output-Modell abgebildet. Eingang in das Demontagewerk finden demnach Batteriesysteme (in BEV-Äquivalenten). Ausgang aus der Demontage und Eingang in die Aufbereitung finden

[10] Die Anzahl der abgebildeten Kapazitätsklassen hat jedoch starken Einfluss auf den Lösungsaufwand.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Batteriezellen in metrischen Tonnen (t), die Umrechnung erfolgt über Transformationskoeffizienten. Die Sammeltransporte zwischen Demontage- und Aufbereitungswerken werden entfernungs- und massenproportional anhand eines einheitlichen Stofftransportkostensatzes für den Transport einer Tonne Zellmaterial [EUR / (km*kg)] bewertet.

A.3.7 Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Gestaltung der Netzwerkstruktur

Im Arbeitsschritt **AS A.3.7** wurden von AIP-TUBS verschiedene Fallstudien entwickelt, die jeweils unterschiedliche Fragestellungen bezüglich der Gestaltung der Netzwerkstruktur mit Hilfe des in **AS A.3.6** entwickelten mathematischen Modells untersuchen. Die jeweilige Parametrierung der Fallstudien gliedert sich in eine fallstudienübergreifende und eine fallstudienspezifische Parametrierung, die im Folgenden zunächst erläutert werden. Anschließend werden einige der entwickelten Fallstudien und deren Ergebnisse vorgestellt.

Fallstudienübergreifende Parametrierung

Die **Quellen des Altbatterieaufkommens** entsprechen den o. g. 439 Verwaltungsgebieten (VG) der BRD. Ebenso sind die **Transportdistanzen** für alle Fallstudien gleich. Identische Annahmen werden bezüglich der **Batterietypen** (Normierung bezüglich der Bewertung der Transporte und der Kapazitätskoeffizienten in Umschlaglagern und Demontagewerken, Transformationskoeffizienten, siehe Anhang 5) und der **Transportkosten** (siehe Anhang 6) getroffen. Desweiteren wird das **maximale Einzugsgebiet** von Umschlaglagern und Demontagewerken für die Sammlung von Batterien begrenzt, um den Lösungsaufwand zu mindern und unrealistische Lösungen auszuschließen. Das Einzugsgebiet ist im Modell auf 654 km festgelegt (dies entspricht der maximalen Entfernung vom Verwaltungsgebiet Stadt Kassel zu allen anderen VGs). Geringere Werte würden dazu führen, dass unabhängig vom Aufkommen mindestens zwei Standorte zur Sammlung benötigt würden. Allen Fallstudien gemein ist der durchschnittliche Diskontierungssatz in Höhe von 9 Prozent pro Jahr, mit dem die zukünftigen jährlichen Zahlungen abgezinst werden.

Der **Planungshorizont** der Fallstudien ist auf die Jahre 2012 bis einschließlich 2025 begrenzt (11 Jahre) und in vier Planungsperioden unterschiedlicher Dauer aufgeteilt. Planungsperiode I, II und III beinhalten jeweils drei Jahre (2012–2014; 2015–2017; 2018–2020), Planungsperiode IV beinhaltet vier Jahre (2021–2025).

Fallstudienspezifische Parametrierung

Fallstudienspezifisch kann eingestellt werden, welches **Szenario zum Altbatterieaufkommen** (Szenarien Pessimistisch, Politisch und Realistisch, siehe **AP A.1**) im Rahmen der Optimierung berücksichtigt werden soll. Im Fall der robusten Optimierung können mehrere Szenarien gleichzeitig gewählt werden. Hierfür kann die szenariobezogene **Eintrittswahrscheinlichkeit** festgelegt werden. Für jede Studie kann die Menge der **potentiellen Standorte** für Umschlaglager, für Demontagewerke und für Aufbereitungswerke vorgegeben werden. Hierfür kann studienspezifisch grundlegend auf zwei Datensätze zurückgegriffen werden, die wie folgt erstellt wurden:

(1) VG-10-Standorte: Die Menge der potentiellen Standorte wird anhand einer Kennzahl „Gewichtetes regionales Aufkommen“ begrenzt. Die Kennzahl setzt das Aufkommen um-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

liegender Verwaltungsgebiete in Relation zu der Entfernung zu diesen Verwaltungsgebieten. Aus der nach der Kennzahl geordneten Liste werden wiederum 10 Verwaltungsgebiete mit hohem gewichteten Aufkommen gewählt. Diese Menge wird um die Standorte Kassel und Goslar ergänzt, um sowohl zentrale als auch dezentrale Netzwerkkonstellationen abbilden zu können.

(2) VW-OTLG-Standorte: Potentieller Standort ist jedes Verwaltungsgebiet, in dem ein Standort der „Volkwagen Original Teile Logistik“ (VW OTLG) liegt, und Goslar. Dies führt zu einer Menge von 8 potentiellen Standorten: Darmstadt-Dieburg, Goslar, Landkreis Kassel, Köln, Ludwigsburg, Stadt München, Segeberg und Teltow-Fläming.

Der Standort für ein Aufbereitungswerk wird auf den Landkreis Goslar begrenzt. In diesem Landkreis befindet sich bereits eine Pilotanlage zur hydrometallurgischen Aufbereitung der Firma Chemetall, eine zweite Anlage an einem weiteren Standort zu eröffnen erscheint aufgrund der hohen damit verbundenen Investitionen und der hohen Unsicherheiten bezüglich des Aufkommens zunächst nicht lohnenswert. Die Begrenzung hat auch eine deutliche Reduktion des Lösungsaufwands zur Folge. Um die Netzwerkkonstellation B mit integrierter Demontage und Aufbereitung abbilden zu können, beinhalten die beiden Standortmengen jeweils noch den Landkreis Goslar.

Fallstudienspezifisch können desweiteren **Kapazitätsklassen und klassenspezifische Zahlungen** vorgegeben werden. Im Zeitverlauf wurden die mit Umschlaglagern, Demontagewerken und Aufbereitungswerken verbundenen Zahlungen verschiedener Kapazitätsklassen in Rückkopplung mit den Ergebnissen aus Projektbereich E konkretisiert (siehe Anhang 7, nicht entscheidungsrelevante Werte in Klammern). Die in einer Studie zur Wahl stehenden Kapazitätsklassen können auf eine Teilmenge begrenzt werden.

Interpretation der Ergebnisse

Die im Folgenden dargelegten Studien dienen ausdrücklich nicht der Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lithium-Ionen-Batterierecyclings (entsprechende Untersuchungen werden im Projektbereich E durchgeführt), sondern der Bewertung der entwickelten Netzwerkalternativen. Die im vorgestellten Optimierungsmodell berechneten Kapitalwerte spiegeln nicht die zukünftig zu erwartenden, tatsächlich realisierten Werte wieder. So werden mögliche alternative Verwendungsmöglichkeiten der betrachteten Anlagen und somit Zahlungsflüsse aus anderen Geschäftstätigkeiten ausgeblendet. Gleichfalls werden alternative Optionen zur Rückführung und zur Entsorgung der Altbatterien, die im Fall von äußerst geringen Stückzahlen in Erwägung gezogen würden, vernachlässigt.

A.3.7.1 Fallstudie Politisch/VW-OTLG

In der Fallstudie „Politisch/VW-OTLG“ wird die Struktur eines Netzwerks untersucht, in dem die bestehenden Strukturen des VW-OTLG-Netzwerks genutzt werden und in das auf die Realisation des Altbatterieaufkommens in Höhe des Szenarios „Politisch“ ausgerichtet ist. Aufgrund des hohen Aufkommens in diesem Szenario wird in diesem Netzwerk ausreichend Kapazität bereitgestellt, um auch bei Realisation des Szenarios „Realistisch“ oder „Pessimistisch“ zu jedem Zeitpunkt sämtliche Batterien verarbeiten zu können. Die Fallstudie zeigt die **Optimalität der Netzwerkkonstellation C** mit zunächst zentraler und später dezentraler Sammlung. Demontage und Aufbereitung werden örtlich entkoppelt durchgeführt.

Anhang 8 stellt die im Planungszeitraum aufgebauten Jahreskapazitäten zur Demontage und Aufbereitung dem jährlichen Aufkommen von Altbatterien gegenüber. Es wird deutlich, dass

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

insbesondere die Kapazitätserweiterungen der Aufbereitung zu späteren Zeitpunkten durchgeführt werden könnten. Andererseits wäre zu gegebener Zeit zu überprüfen, ob anstatt der fünf im Planungszeitraum errichteten Anlagen mit jährlichen Kapazitäten von jeweils 8.000 Tonnen Zellen eine Anlage größerer Kapazität zur Nutzung von Größendegressionseffekten errichtet werden sollte. Diese Entscheidungen beeinflussen die hier im Vordergrund stehende Untersuchung zur optimalen Netzwerkstruktur jedoch nicht. Die Standorteröffnungen und die vorgehaltenen Kapazitäten über die Zeit werden im Folgenden periodenweise erläutert.

In der **ersten Planungsperiode von 2012 bis Ende 2014** wird das geringe deutschlandweite Aufkommen zentral von einem im VG Landkreis Kassel errichtetem Demontagewerk kleiner Kapazität gesammelt und verarbeitet. Die Zellen werden von dort aus zum Aufbereitungswerk in Goslar transportiert. Die Verarbeitungskapazität beträgt demnach 14.400 BEV-Äquivalente bei einem Aufkommen von gut 900 BEV-Äquivalenten im Planungszeitraum von drei Jahren.

In der **zweiten Planungsperiode von 2015 bis Ende 2017** erfolgt ein Wechsel der Netzwerkstruktur hin zur dezentralen Sammlung. Die Sammlung in Nord- und Ostdeutschland übernimmt dabei ein neu errichtetes kleines Demontagewerk in Goslar. Der Teil Deutschlands südlich von Main und Mosel wird durch ein neues kleines Umschlaglager in Ludwigsburg bedient, die dort gesammelten Batterien werden auf die beiden Demontagewerke in Kassel und Goslar aufgeteilt. Der Einzugsbereich des bestehenden Demontagewerks Kassel wird auf die Mitte Deutschlands verkleinert. Die Demontagekapazität des Netzwerks im Planungszeitraum beträgt nun 28.800 BEV-Äquivalente, dem stehen etwa 11.200 BEV-Äquivalente gegenüber (ca. 39-prozentige Auslastung). Die geografische Darstellung in Abbildung A-15 zeigt die grundlegende Struktur des Netzwerks im Planungszeitraum. In der Abbildung sind die Einzeltransportströme (sternförmige graue Linien), die Ströme der Sammeltransporte von Umschlaglagern zu Demontagewerken (grüne gebogene Pfeile) und die Zelltransportströme (roter Pfeil) ersichtlich. Die Ströme zwischen zwei Orten sind der Übersichtlichkeit halber nur in Luftlinie dargestellt. Die Linienstärken weisen im Vergleich zu noch folgenden Darstellungen auf den Umfang der Ströme hin.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

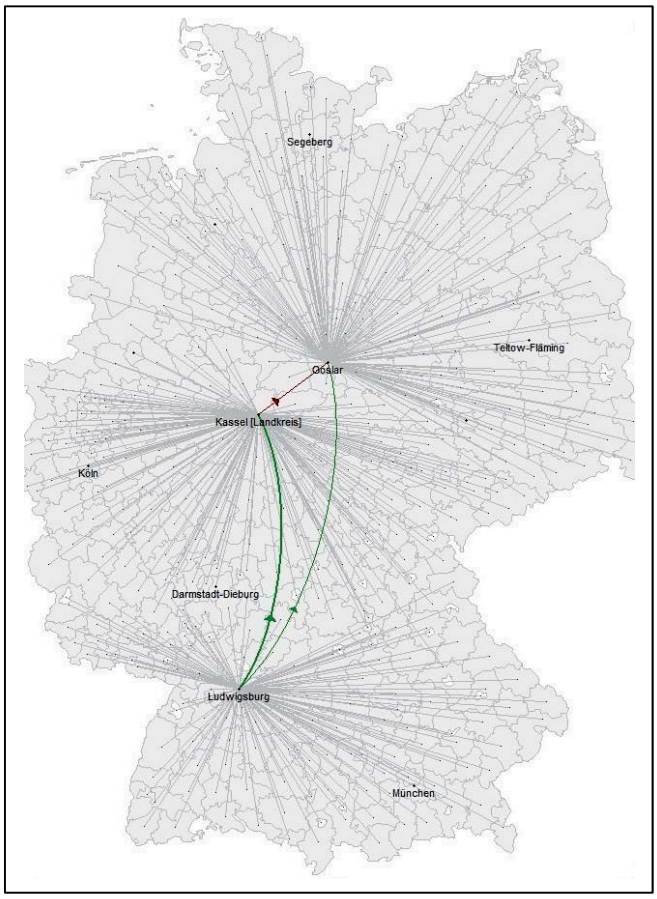


Abbildung A-15: Dezentrale Sammlung in der Fallstudie „Politisch/VW-OTLG“, zweite Planungsperiode 2015 bis Ende 2017

In der **dritten Planungsperiode von 2018 bis Ende 2020** werden zwei weitere kleine Umschlaglager in Köln und Teltow-Fläming und ein großes Demontagewerk in Darmstadt-Dieburg errichtet. Den nun insgesamt sechs Sammelpunkten sind entsprechend kleinere Einzugsgebiete zugeordnet (siehe Abbildung A-16). Die Demontagekapazitäten im Netzwerk erhöhen sich auf 144.000 BEV-Äquivalente im Planungszeitraum, das Aufkommen auf gut 95.000 BEV-Äquivalente (Auslastung 66 Prozent). Um die 19.000 Tonnen Zellen im Planungszeitraum verarbeiten zu können, wird die bisherige Aufbereitungskapazität auf 48.000 Tonnen Zellen erhöht.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

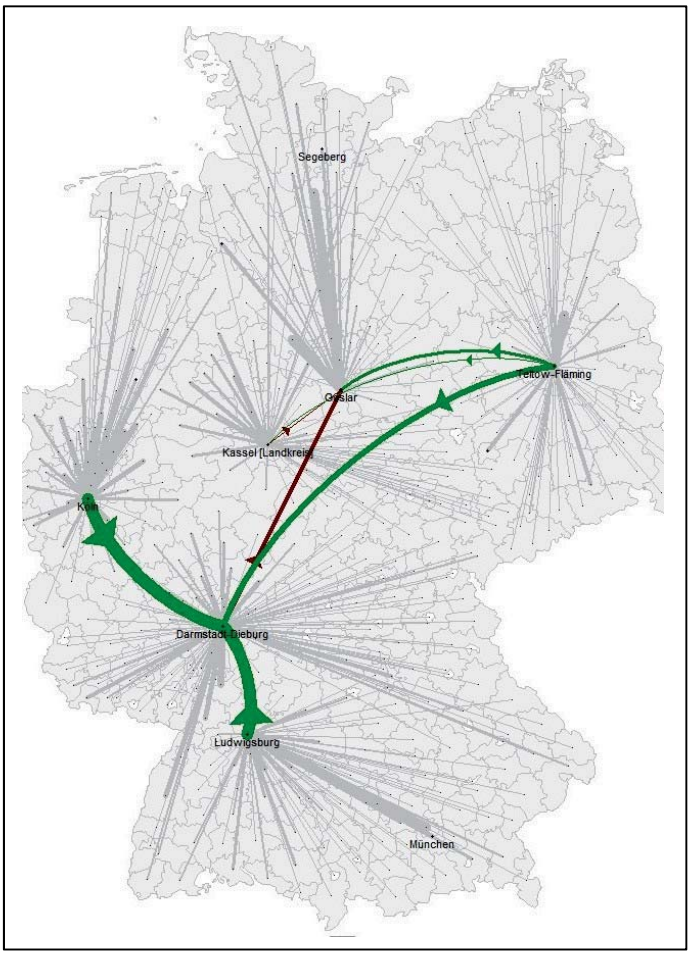


Abbildung A-16: Dezentrale Sammlung in der Fallstudie „Politisch/VW-OTLG“, Dritte Planungsperiode 2018 bis Ende 2020

Das enorm steigende Aufkommen in der längeren **vierten Planungsperiode von 2021 bis Ende 2025** führt zu der Errichtung eines weiteren kleinen Umschlaglagers in Kassel sowie vier weiterer großer Demontagewerke in Segeberg, Köln, München und Teltow-Fläming. Das so entstandene Netzwerk zeichnet sich durch eine stark dezentralisierte Sammlung und Demontage der Batterien aus: neunzig Prozent der Batterien werden direkt von den sieben Demontagewerken gesammelt und verarbeitet, lediglich zehn Prozent der Batterien werden zuvor in Umschlaglagern gesammelt. Die Struktur wird in Abbildung A-17 verdeutlicht. Bei einem Aufkommen im Planungszeitraum von etwa 570.000 BEV-Äquivalenten betragen die Demontagekapazitäten gut 1 Millionen BEV-Äquivalente und die Aufbereitungskapazitäten 200.000 Tonnen Zellen (Auslastung ca. 57 Prozent).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

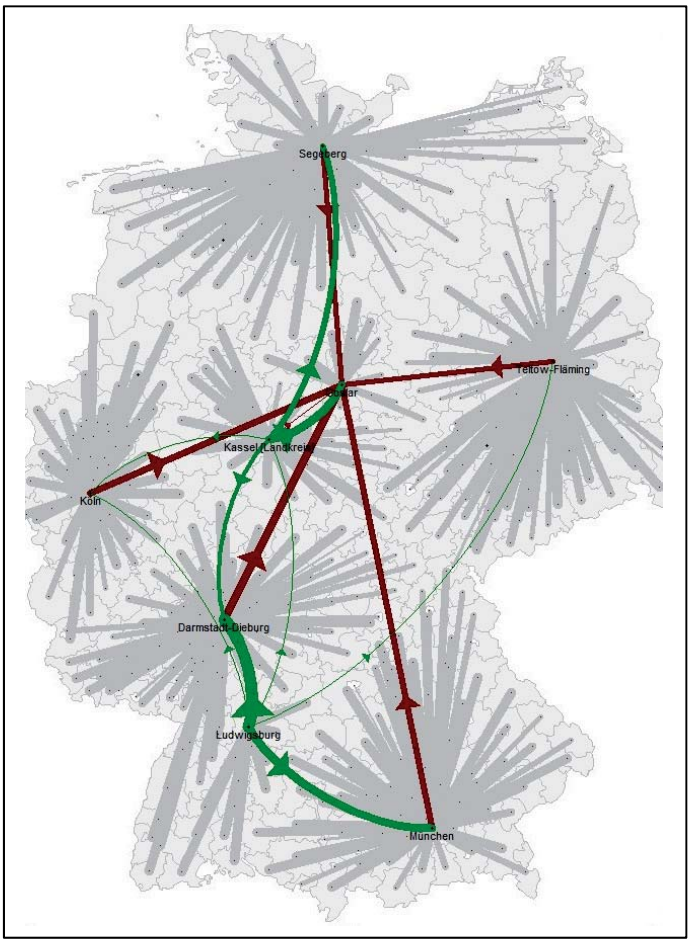


Abbildung A-17: Stark dezentralisierte Sammlung und Demontage in der Fallstudie „Politisch/VW-OTLG“, vierte Planungsperiode 2021 bis Ende 2025

A.3.7.2 Fallstudie Realistisch/VW-OTLG

In der Fallstudie „Realistisch/VW-OTLG“ wird die Struktur eines Netzwerks untersucht, das auf die Realisation des Altbatterieaufkommens in Höhe des Szenarios „Realistisch“ ausgerichtet ist. Aufgrund des geringeren Aufkommens in diesem Szenario wird in diesem Netzwerk möglicherweise nicht ausreichend Kapazität bereitgestellt, um auch bei Realisation des Szenarios „Politisch“ oder „Pessimistisch“ zu jedem Zeitpunkt alle Batterien verarbeiten zu können. Die Fallstudie zeigt die **Optimalität der Netzwerkkonstellation C** mit zunächst zentraler und später dezentraler Sammlung und Demontage. Demontage und Aufbereitung werden örtlich entkoppelt durchgeführt.

In der **ersten Planungsperiode von 2012 bis Ende 2014** wird das geringe deutschlandweite Aufkommen zentral von einem im Landkreis Kassel errichtetem Demontagewerk kleiner Kapazität gesammelt und verarbeitet. Die Zellen werden von dort aus zum Aufbereitungswerk in Goslar transportiert. Die Gesamtverarbeitungskapazität beträgt 14.400 BEV-Äquivalente bei einem Aufkommen von nur 60 BEV-Äquivalenten im Planungszeitraum.

In der **zweiten Planungsperiode von 2015 bis Ende 2017** bleibt die Netzwerkstruktur der ersten Planungsperiode erhalten.

Dem stark steigenden Altbatterieaufkommen entsprechend ist ab der **vierten Planungsperiode von 2021 bis Ende 2025** ein vollständig dezentrales Sammlungs- und Demontage-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

konzept optimal. Neben dem bestehenden Standort in Kassel werden vier kleine Demontagewerke in Segeberg, Köln, Darmstadt-Dieburg und München errichtet. Insgesamt werden im Planungszeitraum demontageseitig Kapazitäten in Höhe von 120.000 BEV-Äquivalenten bei einem Aufkommen von ca. 65.600 BEV-Äquivalenten vorgehalten. Das Aufbereitungswerk ist dabei im Planungszeitraum mit ca. 13.100 Tonnen zu verarbeitender Zellen zu einem Drittel seiner Kapazität ausgelastet.

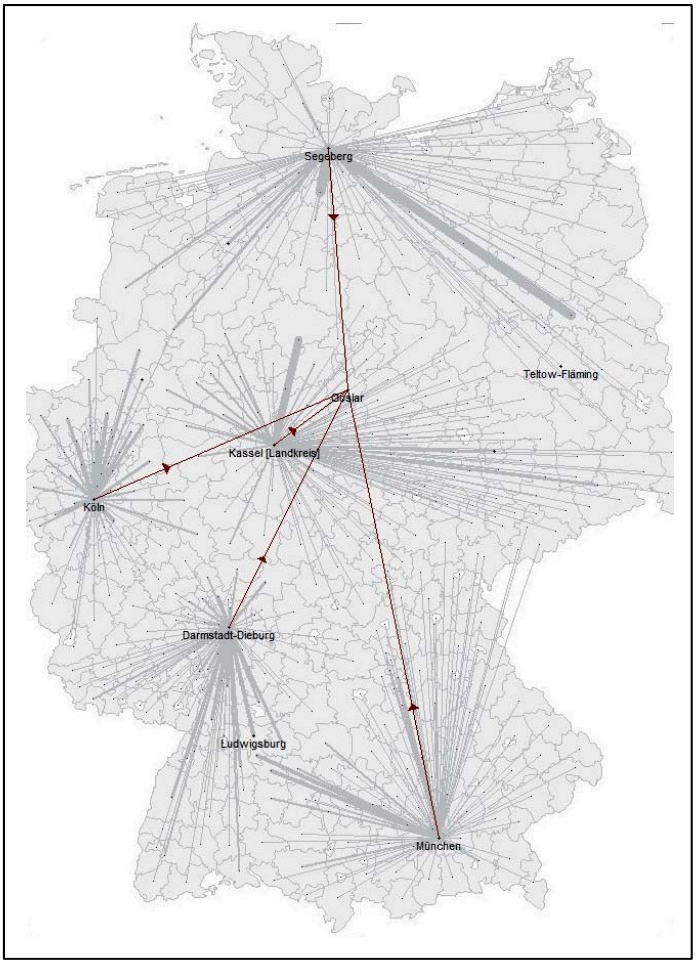


Abbildung A-18: Dezentrale Sammlung und Demontage in der Fallstudie „Realistisch/VW-OTLG“ von 2021 bis Ende 2025

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

A.3.7.3 Fallstudie Realistisch/VG-10

In den oben gezeigten Fallstudien ist die Auswahl der potentiellen Standorte für Umschlaglager und Demontagewerke auf VW-OTLG-Standorte begrenzt. Die Reduzierung der potentiellen Standorte bietet den Vorteil, eine bereits etablierte logistische Struktur in die Planung einbeziehen zu können. Andererseits blendet die Reduzierung möglicherweise sinnvolle und kostenreduzierende Standorte aus. In der Fallstudie „Realistisch/VG-10“ wird daher untersucht, inwiefern bei einer Änderung der Menge der potentiellen Standorte Abweichungen in der Netzwerkstruktur auftreten. Die zur Auswahl stehende Menge wird dabei auf den Datensatz „VG10“ (Standorte mit hohem regionalem Aufkommen) festgelegt. Im Ergebnis sind nur minimale Abweichungen festzustellen, die Struktur bleibt im gesamten Planungshorizont gleich: Sammlung und Demontage werden ab der vierten Planungsperiode dezentral durchgeführt (**Netzwerkkonstellation C**). Die Fallstudie führt im betrachteten Zeitraum von 2012 bis Ende 2025 zu einem höheren Kapitalwert (+0,8 Prozent). Diese geringfügige Verbesserung ist in einer Transportkostenersparnis von 5 Prozent begründet, die sich im Wesentlichen durch die Lage der Standorte in Hamburg (gegenüber Segeberg) und im Rhein-Neckar-Kreis (gegenüber Darmstadt-Dieburg) ergibt. Sie ist jedoch insofern zu relativieren, als dass die gesparten Transportkosten insbesondere im Fall vom Standort Hamburg durch höhere, an dieser Stelle nicht betrachtete Standortkosten egalisiert oder sogar übertroffen werden könnten. Bei einer genauen Standortentscheidung auf lokaler Ebene würde aufgrund praktischer Gründe vermutlich dem Standort Segeberg oder einem anderen, außerhalb von Hamburg liegenden Verwaltungsgebiet der Vorzug gegeben werden. Anhang 9 stellt die Strukturen der Netzwerke der beiden Fallstudien in der vierten Planungsperiode gegenüber.

A.3.7.4 Fallstudie Robust/VW-OTLG

In der Fallstudie „Robust/VW-OTLG“ wird diejenige Netzwerkstruktur gesucht, die unter Berücksichtigung aller drei Szenarien zum Altbatterieaufkommen bei jeweils vorgegebener Eintrittswahrscheinlichkeit zulässig und im Erwartungswert kapitalwertmaximal ist. „Robust“ ist diese Netzwerkstruktur dann zu nennen, wenn sie bei tatsächlicher Realisation einer der Szenarien immer noch zu zulässigen und verhältnismäßig guten Lösungen führt. Dabei wird die installierte Gesamtkapazität pro Planungshorizont an dem Szenario ausgerichtet, welches das höchste Aufkommen aufweist. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Szenarien sind wie folgt festgelegt: Pessimistisches Szenario 20%, Politisches Szenario 30%, Realistisches Szenario 50%.

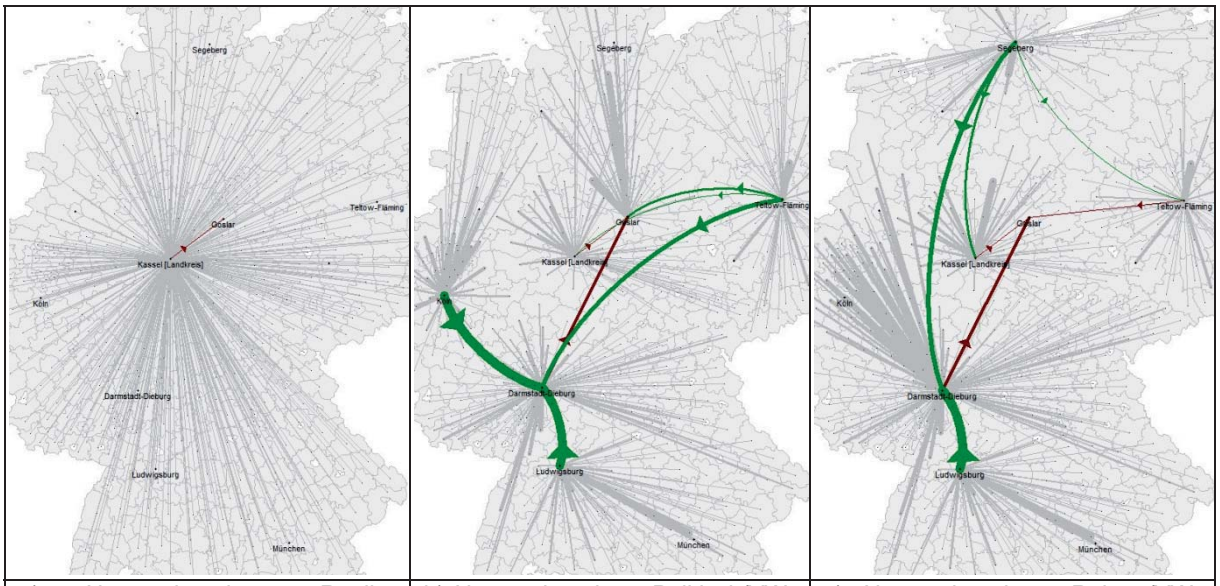
Im Ergebnis zeigt die robuste Netzwerkstruktur große Ähnlichkeiten zu der für das Szenario „Politisch“ optimierten Netzwerkstruktur. Wie in den anderen Fallstudien auch ist in der ersten Planungsperiode eine zentralen Sammlung und Demontage optimal. Ab der zweiten Planungsperiode wird wie in der Fallstudie „Politisch/VW-OTLG“ die dezentrale Sammlung und Demontage vorteilhaft. Der wesentliche Unterschied in der robusten Struktur der Perioden II bis IV im Vergleich zur Struktur der Fallstudie „Politisch/VW-OTLG“ besteht in folgenden Aspekten:

- Planungsperiode II: Das kleine Demontagewerk wird in Teltow-Fläming errichtet (statt in Goslar).
- Planungsperiode III: Das kleine Umschlaglager wird in Segeberg errichtet (statt in Teltow-Fläming). Das Umschlaglager in Köln entfällt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

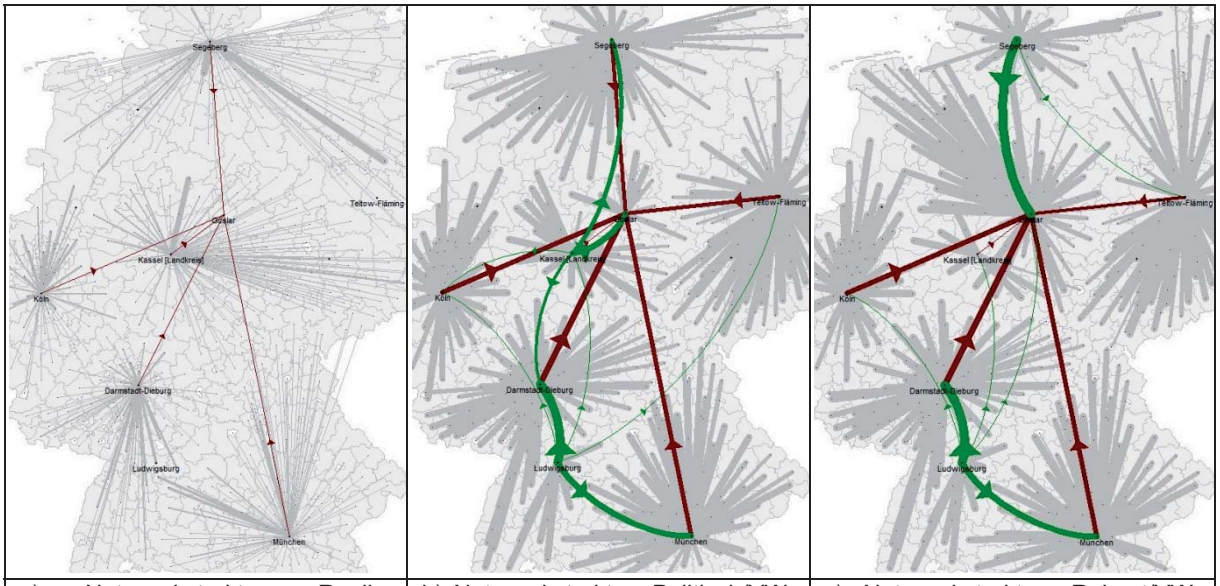
- Planungsperiode IV: Das große Demontagewerk wird in Goslar errichtet (statt in Segeberg). Das Umschlaglager in Goslar entfällt.

Die Unterschiede in den Netzwerkstrukturen werden in Abbildung A-19 für Periode III und in Abbildung A-20 für Periode IV geographisch dargestellt. Die Kapitalwerte der robusten Lösung in Abhängigkeit des eintretenden Szenarios werden in Tabelle A-12 den bei szenariospezifischer Optimierung erreichten normierten Kapitalwerten gegenüber gestellt. Für das Szenario „Realistisch“ wird deutlich, dass die robuste Lösung im Vergleich zur szenariospezifischen Optimierung zu einer enormen Verschlechterung führt. Dies ist darin begründet, dass die installierte Gesamtkapazität durch das Szenario „Politisch“ vorgegeben ist, um die hundertprozentige Sammel- und Behandlungsquote erreichen zu können.



a) Netzwerkstruktur „Realistisch/VW-OTLG“, Periode III	b) Netzwerkstruktur „Politisch/VW-OTLG“, Periode III	c) Netzwerkstruktur „Robust/VW-OTLG“, Periode III

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)



a) Netzwerkstruktur „Realistisch/VW-OTLG“, Periode IV	b) Netzwerkstruktur „Politisch/VW-OTLG“, Periode IV	c) Netzwerkstruktur „Robust/VW-OTLG“, Periode IV

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)

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tabelle A-12: Vergleich der Kapitalwerte in szenariospezifischer und robuster Optimierung

	Kapitalwert Szenariooptimierung [normiert]	Änderung Robuste Optimierung [normiert]
Realistisch	100 %	-59 %
Politisch	100 %	-3 %

A.3.7.5 Ableitung von Handlungsempfehlungen

Herstellerübergreifendes Recyclingnetzwerk

Für die erste Periode ist die Errichtung eines ersten Demontagewerks in der Größenordnung bis 5.000 BEV-Äquivalente/Jahr in der unmittelbaren Nähe des Aufbereitungswerks zu empfehlen: Sowohl die szenariospezifischen Fallstudien als auch die Fallstudie „Robust/VW-OTLG“ weisen darauf hin, dass während der ersten Planungsperiode (2012 bis Ende 2014) ein **zentrales einstufiges Sammelkonzept** (Netzwerkkonstellation A) anzustreben ist. Sämtliche Batterien werden dabei zu einem zentral gelegenen Demontagewerk transportiert und dort bis auf Zellebene demontiert. Die Zellen werden dann ebenfalls einer zentralen Aufbereitung zugeführt.

Die Vorteilhaftigkeit einer Erweiterung des Netzwerks in den Folgeperioden ist stark abhängig von der Höhe des realisierten Altbatterieaufkommens. Tritt nur ein geringes Aufkommen ähnlich dem Szenario „Realistisch“ auf, so bleibt bis einschließlich der dritten Periode das zentrale einstufige Sammel- und Demontagekonzept optimal. Wird dagegen ein ähnlich hohes Altbatterieaufkommen wie im Szenario „Politisch“ registriert, ist ein Übergang zur **dezentralen zweistufigen Sammlung und Demontage** (Netzwerkkonstellation C) empfehlenswert. So wird in der zweiten Periode (2015 bis Ende 2017) ein zweites Demontagewerk in der gleichen Größenordnung von 5.000 BEV-Äquivalenten/Jahr notwendig; zusätzlich sollte ein im Südwesten Deutschlands gelegenes Umschlaglager errichtet werden. In der dritten Periode (2018 bis Ende 2020) würden erstmals ein großes Demontagewerk (ca. 40.000 BEV-Äquivalente/Jahr) sowie eine Erweiterung des Aufbereitungswerks notwendig.

In der vierten Planungsperiode (2021 bis Ende 2025) zeigt sich in allen Fallbeispielen eine Optimalität der dezentralen Sammlung und Demontage, so dass diese langfristig anzustreben ist. Die Strukturen der Fallstudien „Realistisch/VW-OTLG“ und „Politisch/VW-OTLG“ ähneln sich dabei stark bezüglich der Demontagewerkstandorte. In beiden Fallstudien werden Werke in Kassel, Segeberg, Köln, Darmstadt-Dieburg und München errichtet. In der Fallstudie „Politisch/VW-OTLG“ sind diese jedoch mehrheitlich der Größenklasse bis ca. 40.000 BEV-Äquivalente zuzuordnen und werden um Werke in Teltow-Fläming und Goslar sowie um mehrere Umschlaglager ergänzt. Sowohl in der Fallstudie „Realistisch/VW-OTLG“ als auch in „Realistisch/VG-10“ ergeben sich dagegen Netzwerkkonstellationen ohne Umschlaglager, in der sowohl Sammlung als auch Demontage der Batterien dezentral durch mehrere Demontagewerke durchgeführt werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Hemmnisse einer herstellerübergreifenden Sammlung und Behandlung

Grundlegend stellt die herstellerübergreifende Sammlung und Behandlung der Traktionsbatterien aus ökonomischer Sichtweise die zu bevorzugende Lösung dar, da auf diese Weise zum einen Skaleneffekte[11] genutzt werden können und zum anderen aufgrund der Risikoaggregation das Investitionsrisiko für den einzelnen Akteur am niedrigsten ist. Einer übergreifenden Lösung stehen jedoch verschiedene Hemmnisse der einzelnen Automobilhersteller gegenüber:

(1) Der Betrieb eines übergreifenden Netzwerks bedarf langfristiger Verträge und der Koordination zwischen direkten Wettbewerbern.

(2) Die herstellerübergreifende Sammlung und Demontage geht mit Allokationsproblemen hinsichtlich der anfallenden Kosten und der erzielten Erlöse einher.

(3) Die Wiederverwendung von Komponenten in der Fertigung neuer oder aufgearbeiteter Batterien könnte unter Umständen für die Demontage in Nähe der Fertigungsstandorte eines Herstellers und gegen die herstellerübergreifende Demontage sprechen.

(4) Bei herstellerübergreifender Demontage könnten Konkurrenten unter Umständen direkte Einsicht in vertrauliche technische Informationen über Batterien nehmen, z. B. Langzeit-Leistungsstatistiken.

Die Hemmnisse 1 und 2 könnten gemindert werden, in dem die Hersteller ein **Gemeinschaftsunternehmen** gründen und dieses mit der Aufgabe der Sammlung, Demontage und Aufbereitung betreuen. Das Verrechnungssystem der laufenden Kosten könnte dabei in Anlehnung an das System der „Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien“ gestaltet werden.[12] Problematischer erscheint dagegen die Finanzierung der anfänglichen Investitionen in Demontage- und Aufbereitungswerke, wenn diese „fair“ zwischen den unterschiedlich großen Herstellern aufgeteilt werden sollte. Schwierigkeiten ergeben sich dabei vor allem bei der Abschätzung des zu erwartenden Altbatterieaufkommens der einzelnen Hersteller.

Bei Bevorzugung einer örtlichen Konzentration von Herstellung und Demontage (Hemmnis 3) könnte die **Sammlung und Sortierung der Batterien herstellerübergreifend**, jedoch die **Demontage herstellerspezifisch** durchgeführt werden. In diesem Fall würden die in Deutschland produzierenden Automobilhersteller die Sammlung jeweils für ein um ihre Produktionsstätte gelegenes Gebiet für alle kooperierenden Unternehmen übernehmen, die Batterien anschließend nach Hersteller sortieren und in Sammeltransporten an diese übergeben. Zur Ausräumung des Hemmnis‘ 4 müsste die Sortierung und Sammlung jedoch in Umschlaglagern durch Gemeinschaftsunternehmen erfolgen, im Unterschied würde der einzelne Hersteller dabei nicht direkt in den Besitz der Batterien anderer Hersteller gelangen. Die Beurteilung der Vorteilhaftigkeit der beiden Konzepte erfordert jedoch eine genauere methodische Untersuchung.

[11] Sinkende Durchschnittskosten durch Fixkostendegression, Lernprozesse und Kapazitätsgrößenvorteile.

[12] Bei diesem erfolgt die Allokation der Gesamtkosten des Recyclings von Gerätebatterien auf einen teilnehmenden Batteriehersteller anhand der Menge der von ihm in den Jahren zuvor in den Markt gebrachten Batterien. Aufgrund der zu erwartenden besseren Datenlage wäre eine solche Schätzung für den Fall der Traktionsbatterien nicht nötig.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Unberührt von den genannten Hemmnissen erscheint die **herstellerübergreifende Aufbereitung** in allen Aspekten vorteilhaft, zumindest dann, wenn der LithoRec-Prozess ökologisch und ökonomisch anderen Verfahren überlegen ist.

Einfluss der gesetzlichen Regelungen und der erzielbaren Sammelquoten

In den betrachteten Fallstudien wurde jeweils davon ausgegangen, dass sämtliche anfallende Altbatterien zurückgegeben werden und somit tatsächlich in den Zugriff der Automobilhersteller gelangen. Abweichungen der Sammelquoten wurden nur implizit durch die Betrachtung von Szenarien mit unterschiedlich hohem Aufkommen berücksichtigt. Die Erfahrungen aus anderen Recyclingnetzwerken (z. B. dem Altfahrzeugrecycling) zeigen jedoch, dass diese 100-prozentigen Sammelquoten nicht immer eingehalten werden können, da häufig ein bedeutender Teil der einzusammelnden Produkte das System verlässt. Im Allgemeinen wird dieser Anteil im Fall der Traktionsbatterien als gering eingeschätzt und ergibt sich zum Beispiel durch den Weiterverkauf von Elektrofahrzeugen oder deren Batterien in Gebiete außerhalb des Geltungsbereichs der relevanten Gesetzgebung, durch Einbehalt der Eigentümer oder durch Erwerb und Weiterverwendung der Batterien von Dritten.

Durch die gesetzliche Rücknahme- und Recyclingpflicht der Hersteller werden bedeutende Investitionen in leistungsstarke Recyclingnetzwerke notwendig. Angesichts dessen ist es von großer Bedeutung, den Verbleib eines möglichst großen Anteils der gealterten Batterien im System sicherzustellen, sodass diese Zugang in die Netzwerke finden. Entsprechende Maßnahmen könnten beispielsweise direkte Anreize wie Pfandsysteme, vertragliche Verpflichtungen, alternative Geschäftsmodelle oder gesetzliche Exportbeschränkungen darstellen. Ob der Einsatz derartiger Maßnahmen im Falle der Traktionsbatterien notwendig ist, welche Effektivität und Effizienz die einzelnen Maßnahmen aufweisen und wie die Maßnahmen zweckmäßig auszugestalten sind, gilt es, in weiterführenden Forschungsprojekten zu untersuchen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

A.4 Entwicklung von Entladeprozessen für Li-Ionen Batterien

A.4.1 Recherche von Sekundärmärkten für Lithium-Ionen-Batteriemodule

Mögliche Sekundärmärkte für den Einsatz gebrauchter Lithium-Ionen-Batteriemodule werden in Abbildung A-21 gegliedert nach Marktvolumen und Marktpotential dargestellt.[13]

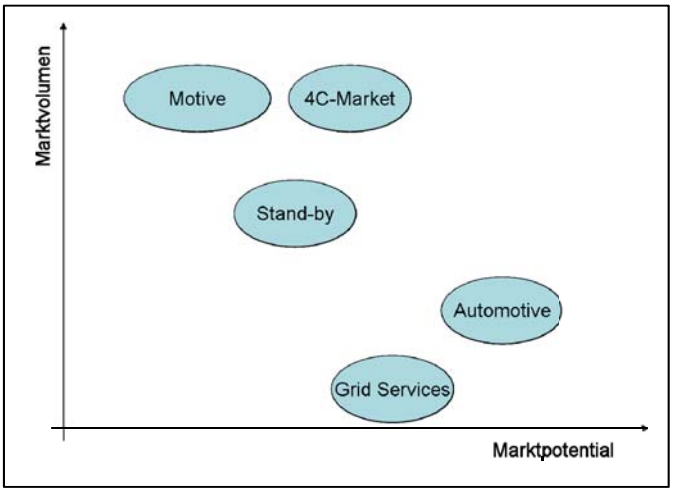


Abbildung A-21: Sekundärmärkte

Für jeden Markt existiert ein Anwendungsportfolio, auf dessen Basis die technischen Anforderungen in **AS A.4.2** ermittelt werden. Einige Beispiele sind in Tabelle A-13 dargestellt.

Tabelle A-13: Anwendungen in Sekundärmärkten

4C-Market	Motive	Automotive	Stand-by	Grid-Services
Portable Geräte	Flurförderfahrzeuge	Starterbatterie	Unterbrechungsfreie Stromversorgung	Peak-Shaving
Consumer-Elektronik	Fahrerlose Transportsysteme	Batterie für ein voll-elektrisches Fahrzeug	Notstromaggregate	Load-Shifting
	Gabelstapler	Hybridbatterie	Starterbatterien für Dieselgeneratoren	Stromhandel

Der Zustand gebrauchter Batterien wird den in **AS A.4.2** ermittelten technischen Anforderungen gegenüber gestellt um die Eignung der Batterien für die einzelnen Anwendungen zu überprüfen.

[13] Vgl. (Takeshita, 2009).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

A.4.2 Erstellung technischer Spezifikationen für die Sekundärmärkte

In **AS A.4.1** wurden die Einsatzbereiche für Batteriemodule- und Systeme identifiziert. In **AS A.4.2** wurden für die unterschiedlichen Anwendungen anhand eines Kriterien-Katalogs die Anforderungen an Batteriesysteme ermittelt. Zu diesem Zweck wurde der Kriterien-Katalog an die Projektpartner verteilt und mit diesen diskutiert.

Weiterhin wurde für jede Anwendung in Absprache mit den Projektpartnern eine Gewichtung der Kriterien vorgenommen. Dies ist notwendig, da für mobile Anwendungen insbesondere die gravimetrische Energie- und Leistungsdichte eine große Bedeutung besitzen. In stationären Anwendungen besitzen diese Kriterien dagegen weniger Bedeutung.

Mit Hilfe dieser Informationen kann nun über ein Bewertungsmodell die Eignung eines Batteriesystems für die unterschiedlichen Anwendungen bestimmt werden. Da der Zustand der rücklaufenden Batteriesysteme zum jetzigen Zeitpunkt nicht bekannt ist, wird eine Abschätzung über die zu erwartenden Eigenschaften getroffen. Die in Tabelle A-14 gezeigten Ausprägungen der Kriterien werden angenommen:

Tabelle A-14: Zellparameter

	Energie-dichte [Wh/kg]	Leis-tungs-dichte [W/kg]	Wir-kungs-grad [%]	Zuverläs-sigkeit [0-10]	Kapazitäts-durch-satz/Zelle [kWh]	Preis [€/kWh]
Zellparameter	70	500	70	7	34,98	70

Diese Annahmen entsprechen einer Leistungsfähigkeit von 50 % einer neuwertigen Lithium-Ionen-Batterie. Werden diese Annahmen im Bewertungsmodell mit den gewichteten Anforderungen abgeglichen ergibt sich die in Tabelle A-15 gezeigte Eignung des Systems für die verschiedenen Anwendungen:

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tabelle A-15: Eignung des Batteriesystems für die identifizierten Anwendungen

	Markt	Eignung Li-Ion EoL
Motive	Flurförderfahrzeuge	8,18
	Fahrerlose Trans-port-systeme	7,67
	Kleintraktion	7,76
Automotive	Starter-Batterie	7,23
	Hybrid-Fahrzeuge	6,21
	Voll-elektrisch	5,61
Stand-by	IT / Telekom	8,30
	USV	7,79
	(Kern-) Kraftwerke	7,48
	Sicherheits-beleuchtung	7,68
	Signal-anlagen	8,53
	Dieselstart	7,54
	Solar	8,35

Dabei wird die Eignung auf Basis einer Skala von 0-10 dargestellt, wobei 10 eine vollständige Eignung für die Anwendung bedeutet.

A.4.3 Analyse existierender Batteriemodule bezüglich der Reparaturtiefe

In **AS A.4.3** werden aktuelle Batteriesysteme untersucht um festzustellen ob eine Reparatur bei Ausfall einer einzelnen Komponente möglich ist. Dazu ist es notwendig, die defekte Komponente identifizieren zu können. Diese umfassen üblicherweise ein Gehäuse, die Leistungselektronik, mehrere Zellverbinder, mehrere Teilmodule und mehrere Einzelzellen. Jede dieser Komponenten besitzt eine eigene Ausfallwahrscheinlichkeit. Die Reparaturtiefe eines Batteriesystems gibt an, ob bei Ausfall einer Komponente der Austausch möglich ist ohne andere Komponenten zu beschädigen und ob die übrigen Komponenten zerstörungsfrei demontiert werden können. Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle A-16, Tabelle A-17 und Tabelle A-18 gezeigt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tabelle A-16: Reparaturtiefe Batteriesystem A

	Wiederverwendung						
		Gehäuse	Leistungs-elektronik	Zell-verbinder	Modul	Zell-verbund	Einzel-zelle
Ausfall	Gehäuse	nein	nein	nein	ja	nein	nein
	Leistungs-elektronik	ja	nein	ja	ja	ja	ja
	Zell-verbinder	ja	nein	nein	nein	nein	nein
	Modul	ja	ja	ja	nein	ja	ja
	Zell-verbund	nein	ja	nein	nein	nein	nein
	Einzelzelle	nein	ja	nein	ja	nein	nein

Beispielsweise ist es für Batteriesystem A nicht möglich, bei einem Defekt der Zellverbinder diese zu tauschen und das reparierte Modul wieder zu verwenden. Insgesamt weist dieses System mehrere Verbindungen auf, die nicht zerstörungsfrei gelöst werden können. Weiterhin besteht kein standardisierter Zugang zu den einzelnen Zellspannungen.

Tabelle A-17: Reparaturtiefe Batteriesystem B

	Wiederverwendung						
		Gehäuse	Leistungs-elektronik	Zell-verbinder	Modul	Zell-verbund	Einzel-zelle
Ausfall	Gehäuse	nein	ja	ja	ja	ja	ja
	Leistungs-elektronik	ja	nein	ja	ja	ja	ja
	Zell-verbinder	ja	ja	nein	ja	ja	ja
	Modul	ja	ja	ja	nein	nein	ja
	Zell-verbund	ja	ja	ja	ja	nein	ja
	Einzelzelle	ja	ja	ja	ja	nein	nein

Batteriesystem B weist keine unlösbaren Verbindungen auf, weshalb ein Großteil der Komponenten ersetzt bzw. die verbleibenden Komponenten wiederverwendet werden können.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tabelle A-18: Reparaturtiefe Batteriesystem C

	Wiederverwendung						
		Gehäuse	Leistungs-elektronik	Zell-verbinder	Modul	Zell-verbund	Einzel-zelle
Ausfall	Gehäuse	nein	ja	nein	ja	ja	ja
	Leistungs-elektronik	ja	nein	ja	ja	ja	ja
	Zell-verbinder	nein	ja	nein	ja	ja	ja
	Modul	ja	ja	ja	nein	nein	ja
	Zellver-bund	ja	ja	ja	ja	nein	ja
	Einzelzelle	ja	ja	nein	ja	nein	nein

Eine Aufnahme der Demontagezeiten und -kosten wurde in **PB B** durchgeführt.

A.4.4 Entwicklung einer Bewertungsmethodik für Batteriemodule und Einzelzellen

Ziel des **AS A.4.4** ist es, eine Bewertungsmethodik zu entwickeln, die zwei aufeinander folgende Entscheidungen erlaubt. Zunächst wird geprüft ob an dem defekten Batteriesystem ein behebbarer Defekt vorliegt. In diesem Fall wird anhand der Reparaturtiefe und des Aufwandes geprüft, ob dieser Defekt repariert wird oder das Batteriesystem dem Materialrecycling zugeführt wird. Dabei hat die Analyse der Reparaturtiefe gezeigt, dass zum aktuellen Entwicklungsstand lediglich leichte mechanische Defekte oder (Software-) Fehler des BMS behoben werden können. Diese Defekte werden am effektivsten mit Hilfe der BMS-Funktionalitäten und der entsprechenden Fehlercodes identifiziert.

Folgende Hindernisse können bei der Bewertung mittels BMS-Funktionalitäten auftreten:

- Unbekannte Fehlercodes und Schnittstellen (Standardisierung)
- Keine Funktionalität des BMS außerhalb des Fahrzeuges (Technik)

Um diese Hindernisse zu umgehen wurde in **AS A.4.5** ein Adapter entwickelt, um Batteriesysteme mittels eines handelsüblichen Diagnose-PCs im ausgebauten Zustand auslesen und bewerten zu können.

Nach aktuellem Stand der Technik sind in den Hybridfahrzeugen der Audi AG folgende Daten der Einzelzellen lebensdauerrelevant:

- Kapazität der einzelnen Zellen
- Innenwiderstand der einzelnen Zellen in Laderichtung
- Innenwiderstand der einzelnen Zellen in Entladerichtung

Diese Daten können teilweise aus dem Batteriemanagementsystem ausgelesen werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Für die Zell- bzw. Modulbewertung ist folgende Bewertungsmethodik anwendbar:

Eine entsprechende Bewertungsmethodik in graphischer Form ist in Abbildung A-22 dargestellt.

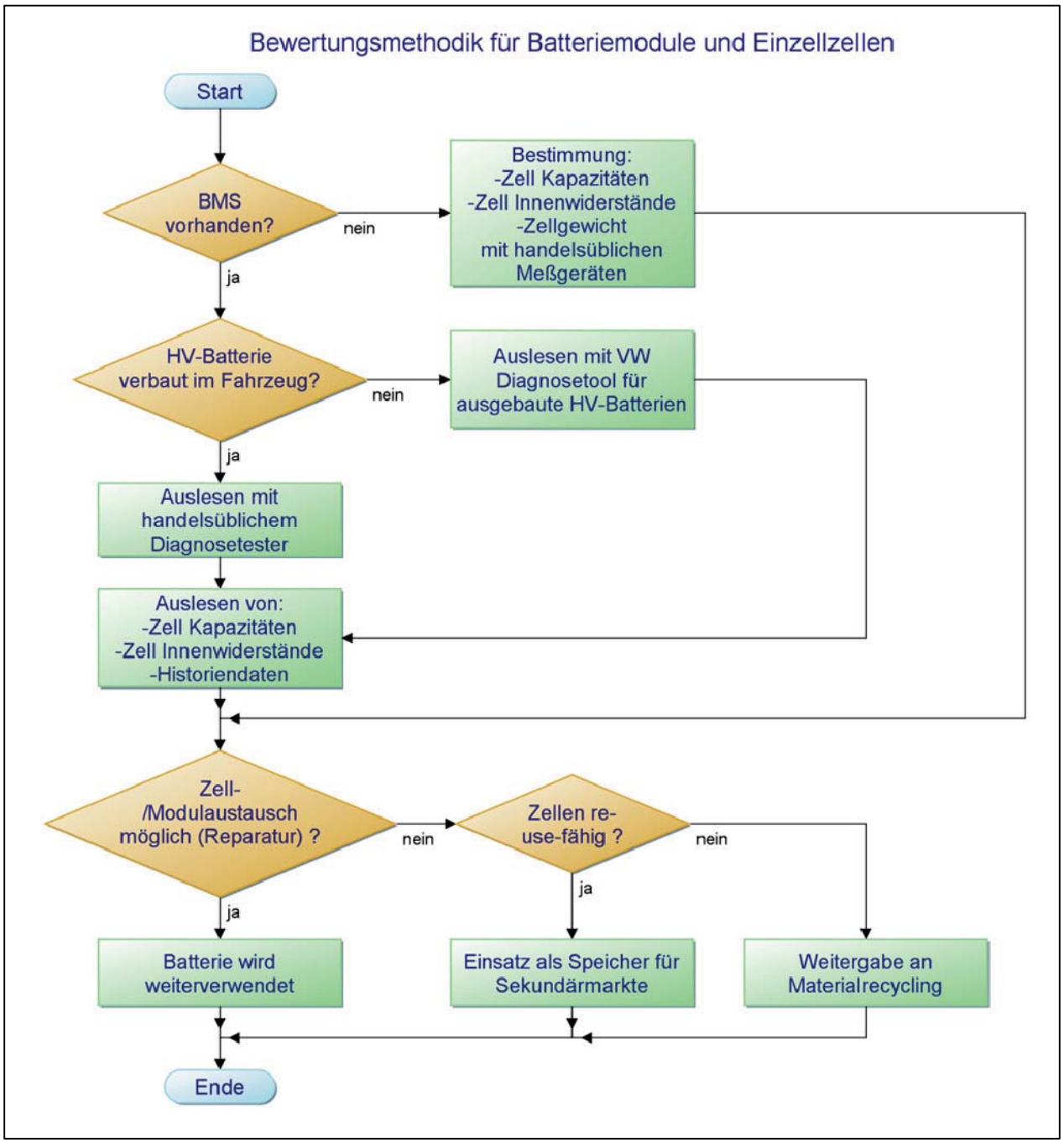
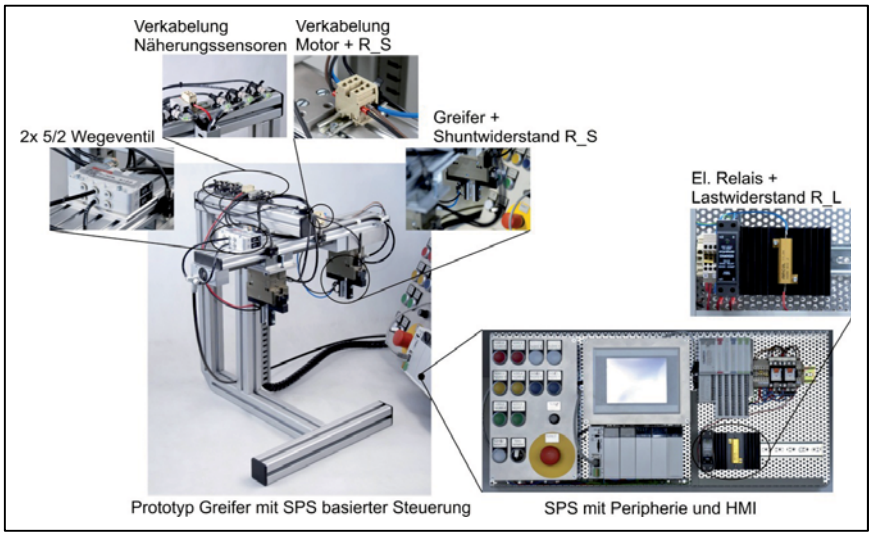


Abbildung A-22: Prüfschema technische Zustände Module und Zellen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

A.4.5 Technische Entwicklung eines teilautomatisierten Testverfahrens

Die in **AS A.4.4** entwickelte Bewertungsmethodik wurde in Zusammenarbeit mit **PB B** in einem teilautomatisierten Testverfahren umgesetzt. Zellen, deren Spannung im nominellen Zellspannungsbereich liegt werden mit Hilfe eines Entladeimpulses auf ihre Funktionsfähigkeit getestet. Die folgende Abbildung zeigt den in **PB B** entwickelten Prototypen mit der Beschaltung zur Innenwiderstandsmessung.



Systemebene:

Weiterhin ermöglicht ein im Projekt LithoRec entwickelter Adapter, die Batterie auch im ausgebauten Zustand zu diagnostizieren. Dafür wurde sowohl die Hard- als auch die Software neu entwickelt, prototypisch umgesetzt und an verschiedenen Fahrzeugkonzepten unterschiedlicher Hersteller getestet.

A.4.6 Verfahrensentwicklung für das Endladewerkzeug

Die in **PB B** bearbeitete Öffnung und Zerlegung der Zellen erfordert eine vorherige Entladung um sicherzustellen, dass während des Bearbeitungsschrittes keine Funken bei Kontakt zwischen Anode und Kathode entstehen. Zu diesem Zweck wird in **AS A.4.6** ein Verfahren für ein Entladewerkzeug zur Zellentladung entwickelt.

Batteriedemontage:

Die Entladung des Batteriesystems erfolgt über einen Wechselrichter, so dass die entladene Energiemenge zur Versorgung auf Basis des 230 V AC-Netzes verwendet werden kann oder über eine Konstantstromsenke. Beide Geräte können äquivalent in dem Verfahren eingesetzt werden. Die Entscheidung hängt lediglich von der erwarteten (ökonomischen) Vorteilhaftigkeit der Nutzung der Restenergiemenge ab.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

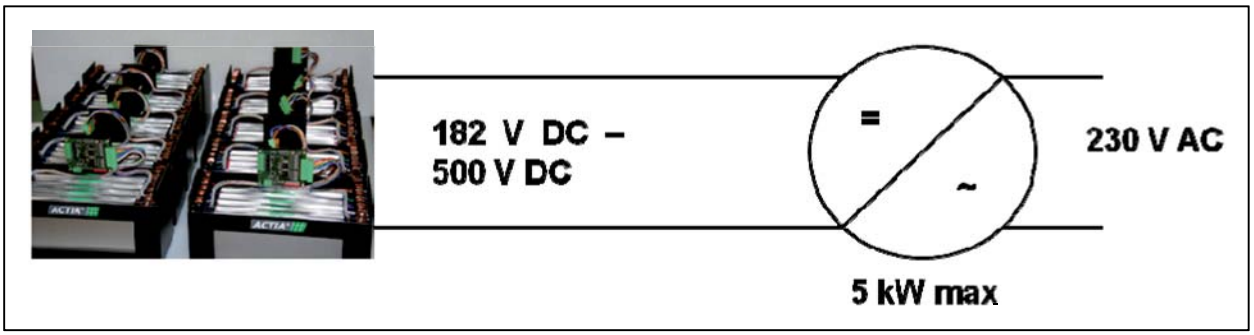


Abbildung A-23: Schematischer Aufbau des Entladeverfahrens von Batteriesystemen

Die Eigenschaften der verwendeten Komponenten werden an den im Projekt getroffenen Annahmen zu den erwarteten Batteriesystemen ausgelegt. Die Überwachung der Batterie erfolgt durch das BMS. Tabelle A-19 zeigt im Rahmen des Projektes gültigen Annahmen zu den Kenngrößen der Batteriesysteme.

Tabelle A-19: Batterieeigenschaften

System	Maßeinheit	HEV	PHEV	BEV
Anzahl Zellen		70	170	250
Energieinhalt System	kWh	1	9	22
Anzahl parallele Stränge		1	2	2
Spannung min.	V	182	221	325
Spannung max.	V	280	340	500

Der Eingangsspannungsbereich des verwendeten Entladegerätes muss einen Bereich von 182 V DC – 500 V DC abdecken. Es wird nur eine geringe Entladerate von 1C zugelassen. Die Voruntersuchungen haben gezeigt, dass eine höhere Entladerate in diesem Entladeschritt die Entladezeit nur minimal reduziert. Durch eine höhere Entladerate würden jedoch die Kosten für das Entladegerät erhöht. Die maximale Leistung beträgt daher 5 kW. Die Zellspannung beträgt nach der Entladung auf Systemebene 2,6 V. Auf diesem Niveau kann die Batterie an die Demontage übergeben und in einzelne Module zerlegt werden. Eine längerfristige Lagerung der Batteriemodule ist zu vermeiden.

Ein besonderes Hindernis bei der Entladung auf Systemebene ist die Schutzfunktion des BMS. Üblicherweise ist ein Batteriesystem im ausgebauten Zustand nicht funktionsfähig, die Schutzrelais sind geöffnet. Eine Entladung auf Systemebene kann nun nur erfolgen, wenn über die Kommunikation mit dem BMS die Funktionsfähigkeit hergestellt werden kann. Eine solche Freischaltmöglichkeit wird jedoch von den Herstellern aus Sicherheits- und Garantieaspekten unterschiedlich bewertet. Alternativ kann, da die Batterie ohnehin demontiert wird, die Schutzfunktion des BMS umgangen und das Entladegerät vom Recyclingunternehmen unter Umgehung der Relais kontaktiert werden.

Zellzerlegung:

Um die Sicherheit bei der Zerlegung der Zellen zu gewährleisten sind die Zellen auf 0 V Zellspannung zu entladen. Hierzu wird ein einfaches resistives Entladeverfahren bei den Partnern angewendet. Im Rahmen einer Automatisierung der Prozesskette kann die Entladung der Zelle durch den in **PB B** entwickelten Greifer erfolgen. Die Zellspannung bei Übergabe

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

an die Zellzerlegung beträgt 2,6 V, da die Zellen auf Systemebene auf diese Spannung entladen wurden.

A.4.7 Technische Entwicklung eines teilautomatisierten Endladewerkzeuges

Zellzerlegung:

Abbildung A-24 zeigt die Umsetzung der Entladung auf Zellebene bei FRZ

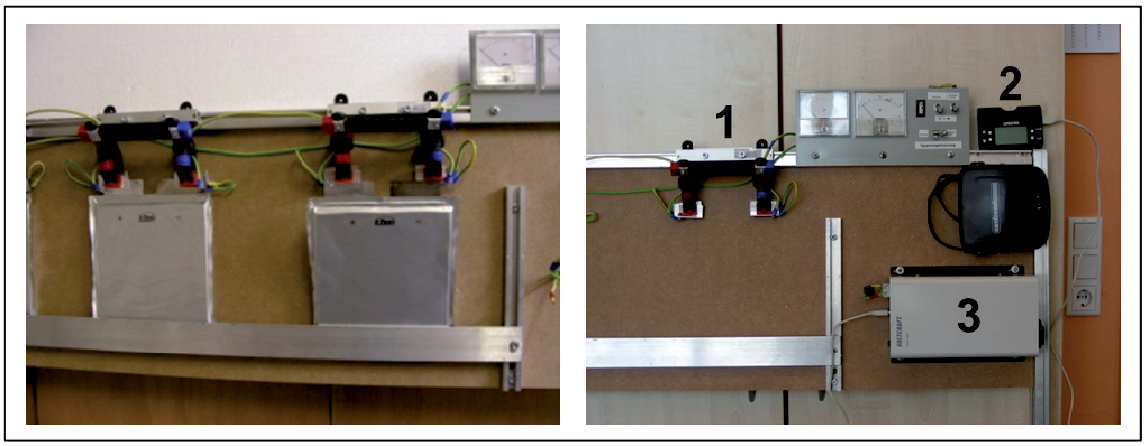


Abbildung A-24: Aktuelle Zellentladung und Greiferlösung

Es werden modifizierte Klemmen (1) verwendet, um die Zellen auch bei unterschiedlichen Kontaktgeometrien an die Entladevorrichtung koppeln zu können. Ein mit einer Luftkühlung versehener 120 W Widerstand entlädt die Zellen (2). Weiterhin kann ein Wechselrichter angeschlossen und die Batterie mit einer Last von bis zu 300 W entladen werden (3). Der Entladevorgang wird von einem Strom- und Spannungs-Messgerät überwacht. Erreicht die Reihenschaltung der Zellen eine Spannung von 9V wird der Wechselrichter automatisch abgeschaltet.

In Ergänzung zu diesem Verfahren wurde ein Entladewerkzeug entwickelt um die kontinuierliche Entladung von Einzelzellen über einen Wechselrichter teilautomatisch zu gestalten. Um einen möglichst kontinuierlichen Betrieb des Wechselrichters zu gewährleisten wird eine Schaltung aufgebaut, die es erlaubt Li-Ion-Zellen ohne eine Funktionsunterbrechung des Wechselrichters zu entladen und entladene Zellen zu tauschen. Diese wird modular aufgebaut und besteht aus den Komponenten:

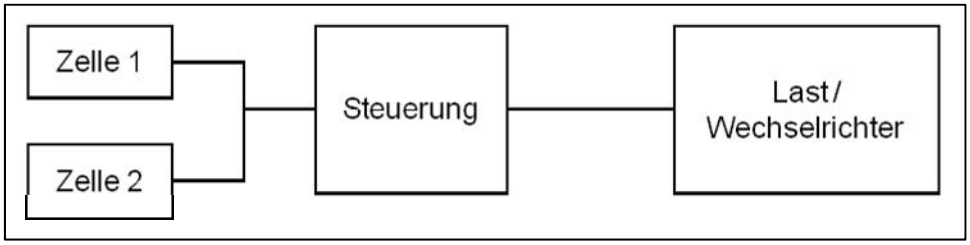


Abbildung A-25: Prinzip Schaltbild Entladewerkzeug

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

A.4.8 Erprobung des Prototypen

Das Entladeverfahren und das entwickelte Entladewerkzeug wurden bei FRZ getestet. Den Verlauf einer Zellspannung während der Entladung über den Wechselrichter zeigt Abbildung A-26 zeigt.

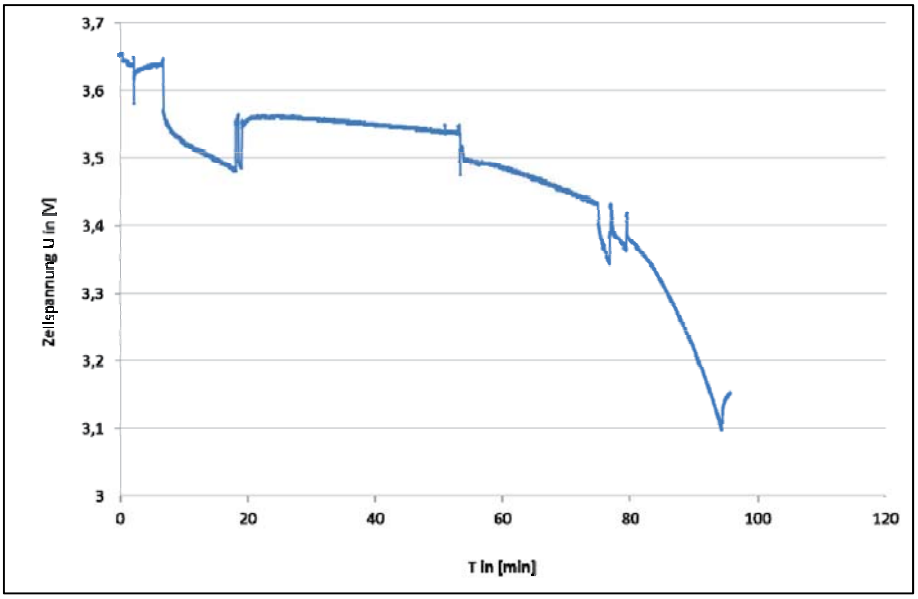


Abbildung A-26: Zellspannungsverlauf während der Entladung

Bei Erreichen einer Zellspannung von 3,1 V sank die Gesamtspannung am Wechselrichter auf unter 9 V, so dass die Entladung unterbrochen und anschließend am Widerstand fortgeführt wurde. In der Darstellung sind weiterhin Bereiche mit unterschiedlicher Entladelast zu erkennen. Diese entstanden, da am Wechselrichter unterschiedliche Geräte betrieben wurden.

Weiterhin wurde bei der Erprobung der Effekt stark unterschiedlicher Ladezustände der zu entladenen Zellen geprüft. Es wurden 3 Zellen mit einer Spannung von 3,3 V und eine Zelle mit einer Spannung von < 2 V an die Entladevorrichtung angeschlossen. Auf diese Weise soll geprüft werden, ob die Klassifizierung anhand der Spannungslage vor der Entladung sinnvoll und notwendig ist.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

B Entwicklung von Demontage- und Recyclingprozessen

Ziel des **PB B** ist die Entwicklung und Prüfung von Methoden und Verfahren zur Wiedergewinnung von Batteriesystemkomponenten. Nach den genannten Arbeitspaketen wird das Batteriesystem sukzessive zerlegt, um neben Polymer- und Metallfraktionen sowie Batterieelektronik (BMS) die Wertkomponenten auf Zellebene zu erschließen. Hierbei handelt es sich um Elektrolytsalze und insbesondere um die metallhaltigen Aktivmaterialien. Für die verschiedenen Aufbereitungsstrategien werden mittels hydrometallurgischer Verfahren Lithiumrohstoffe zur Synthese neuer, recycelter Aktivmaterialien zurückgewonnen.

Dies erfolgt durch die Aufteilung in folgende Arbeitspakete:

- **AP B.1**: Mechanische Demontage in Einzelkomponenten
- **AP B.2**: Aufbereitung und Verwertung von Elektrolyten
- **AP B.3**: Mechanische, thermische und chemische Aufbereitung der Einzelkomponenten
- **AP B.4**: Hydrometallurgische Aufbereitung und Verwertung von NE-Metallen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

B.1 Mechanische Demontage in Einzelkomponenten

B.1.1 Produktanalyse und Strukturierung der Demontage

Fahrzeugbatterien bilden komplexe Systeme unterschiedlicher Größe, Gewicht und Aufbau. Ihre Konzeption richtet sich in erster Linie an den Einbau und den Platz im Fahrzeug. Weiterhin sind eine Vielzahl von Zellen je Batterie enthalten die in der Regel als Flach- (Pouchzellen) oder Rundzellen vorliegen. Die Anordnung der Zellen in Modulen und die Schaltung innerhalb der Batterien beeinflusst ebenfalls die Abmessungen. Batteriegewichte können von 10 kg bis zu mehreren hundert Kilogramm je System variieren.

Ziel der Demontage ist die Erzeugung von Fraktionen die in nachfolgenden Prozessen weiterverarbeitet werden können.

Erster Schritt ist die Identifizierung der Batterie sowie der Zustand der Zellen anhand der beigefügten oder angebrachten Informationen. Nach heutigem Stand sind keine einheitlichen Batterien im Recycling zu erwarten. Bauform, Zelltyp, Zellanordnung, Kühlsystem und Verbindungsstrukturen unterscheiden sich deutlich.

Die Demontage erfolgt daher manuell unter Zuhilfenahme von üblichen manuellen oder maschinellen Werkzeugen. Es müssen Steck-, Klebe-, Niet- und Schraubverbindungen gelöst werden um die einzelnen Komponenten zu trennen. Gleichzeitig ist sicherzustellen, dass die vorhandenen elektrischen Ladungen nicht zu Kurzschlüssen oder Beeinträchtigungen der Bauteile oder Personen führen.

Für die Demontagearbeiten an Batterien sind Elektrofachkräfte oder elektrotechnisch unterwiesene Personen einzusetzen. Grundsätzlich gilt, dass an elektrischen Anlagen und Betriebsmitteln nur Elektrofachkräfte arbeiten dürfen. Da Elektrofachkräfte in vielen Betrieben jedoch nicht ständig zur Verfügung stehen, kann der Unternehmer für bestimmte Arbeiten elektrotechnisch unterwiesene Personen einsetzen.

Die Elektrofachkraft weist ihre Qualifikation z.B. durch eine Ausbildung zum Elektrogesellen oder -facharbeiter nach. Als elektrotechnisch unterwiesene Person gilt, wer durch eine Elektrofachkraft für eine bestimmte Arbeit angelernt, über die übertragenen Aufgaben und die Gefahren unterrichtet sowie über die notwendigen Schutzeinrichtungen und Schutzmaßnahmen unterwiesen wurde.

Ziel des **AS B.1.1** ist die Durchführung einer Produktanalyse und Strukturierung der Demontage von Lithium-Ionen-Batteriesystemen. Durch IWF-TUBS wurde eine erste Produktanalyse eines bereitgestellten Batteriesystems in Form einer Testdemontage durchgeführt. Abbildung B-1 zeigt Ausschnitte aus der erstellten Fotodokumentation der Testdemontage.

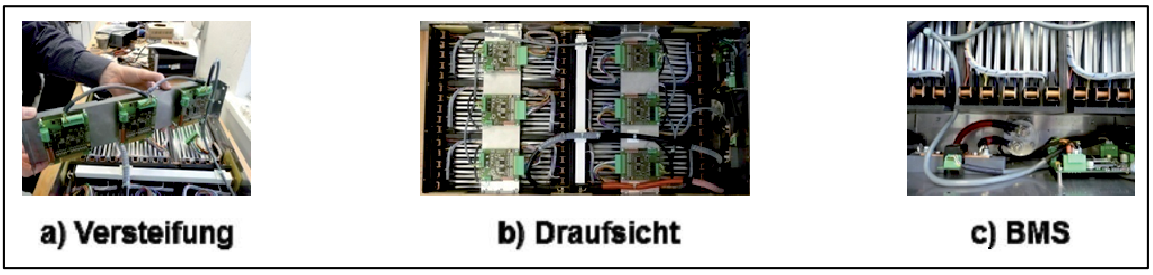


Abbildung B-1: Eindrücke der Testdemontage des Batteriesystems A

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

In Abbildung B-2 sind Ausschnitte aus der erstellten Fotodokumentation der Testdemontage des Batteriesystems B zu sehen. Der Batteriesystemaufbau war grundlegend anders, da es kein gemeinsames Systemgehäuse für die Module gab.

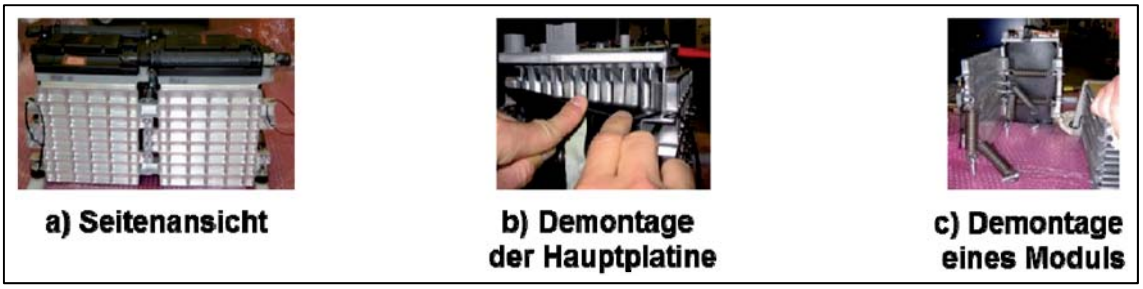


Abbildung B-2: Eindrücke der Testdemontage des Batteriesystems B,

Im Rahmen der Testdemontage wurden wesentliche Demontage-Kenndaten des Batteriesystems aufgenommen. Folgende Informationen wurden dokumentiert:

- Demontagezeiten für Baugruppen / Bauteile,
- Demontierte Baugruppen / Bauteile, sowie deren Material, Gewicht, Größe, Form und Zugänglichkeit,
- Verwendete Werkzeuge für die Demontage einer Baugruppe / eines Bauteils,
- Art der Verbindung zwischen Bauteilen / -gruppen,
- Vorrangbeziehungen,
- Bewertung der Automatisierbarkeit der einzelnen Demontagevorgänge,
- Zu beachtende Sicherheitsaspekte bei den einzelnen Demontagevorgängen.

Tabelle B-1 gibt einen exemplarischen Überblick der Demontage-Kenndaten für den Prozessschritt „Öffnung des Batteriesystems durch Deckeldemontage“.

Tabelle B-1: Dokumentation von Demontageprozessen (Beispiel)

Nr.	Name des Prozessschritts	Vorgänger	Anzahl	Zeit (Min.)	Demontiertes Teil	Werkzeug	Verfahren
1	Öffnung des Batteriesystems durch Deckeldemontage	-	1	2:13:53	Deckel	Akkuschrauber	Schrauben

Verbindung	Demontageart	Sicherheitsaspekte	Automatisierbarkeit	Elementtyp	Material	Gewicht (g)
Schrauben (20 x M3 10mm)	Zerstörungsfrei	Kontaktierung des Gehäuses prüfen	Teilweise	Bauteil	Edelstahl	1216

Größe (mm)	Form	Zugänglichkeit	Basisteil	Bemerkungen
753	Flacher Block	Gut	Gehäuse	Sehr aufwendiger Demontageschritt, schlechte Qualität der Schrauben, Tisch sollte beidseitig begehbar oder drehbar sein

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die Demontage des Deckels dauerte ca. 2 Minuten und 14 Sekunden. Hierbei handelt es sich um die in der Testzerlegung gemessene Demontagezeit, die nicht dem tatsächlichen Aufwand eines industriellen Demontageprozesses entspricht. Dieser wird u.a. durch stochastische Schwankungen, die generelle Leistungsfähigkeit sowie Lerneffekte des Personals beeinflusst (vgl. [OHLENDORF 2006]).

Die aufgrund der Vielzahl der Schrauben (Anzahl n = 20) aufwendige Demontage des Deckels wurde mit Hilfe eines Akkuschraubgerätes vorgenommen. Ein Vorgänger-Prozessschritt existierte nicht. Die Handhabung des Batteriesystems war aufgrund des hohen Gewichts erschwert, sodass im Hinblick auf die Demontagesystemplanung vorgeschlagen wird, einen beidseitig begehbaren Tisch oder eine drehbare Lagerung des Batteriesystems vorzusehen. Weiterhin wird vorgeschlagen, die Kontaktierung des Gehäuses grundsätzlich vor diesem Demontageprozessschritt zu prüfen, um Gefährdungen der Mitarbeiter durch etwaige Stromschläge auszuschließen. Die Automatisierbarkeit des Prozessschritts wurde zunächst nur überschlägig mit „teilweise“ automatisierbar bewertet.

Analog wurden die Demontage-Prozessschritte für das betrachtete Batteriesystems bis zur Demontage einzelner Zellen durchgeführt und dokumentiert. Diese Daten dienen als Grundlage für weitere Auswertungen, z.B. der Ermittlung optimaler Demontagesequenzen. Sie sind zudem Grundlage für die Konzeption und prototypische Umsetzung des Hilfsmittels zur integrierten Produktbewertung hinsichtlich Demontagefreundlichkeit, Recyclingeffizienz und Umweltwirkung in der Entsorgung von Batteriesystemen in **PB F**.

Erstellung von Verbindungsgraphen

Teilschritt 1 der Methodik zur systematischen Analyse und Bewertung von Batteriesystemen umfasst die Erstellung von Verbindungsgraphen für die analysierten Batteriesysteme. In Abbildung B-3 ist der Verbindungsgraph für das Batteriesystem A dargestellt.

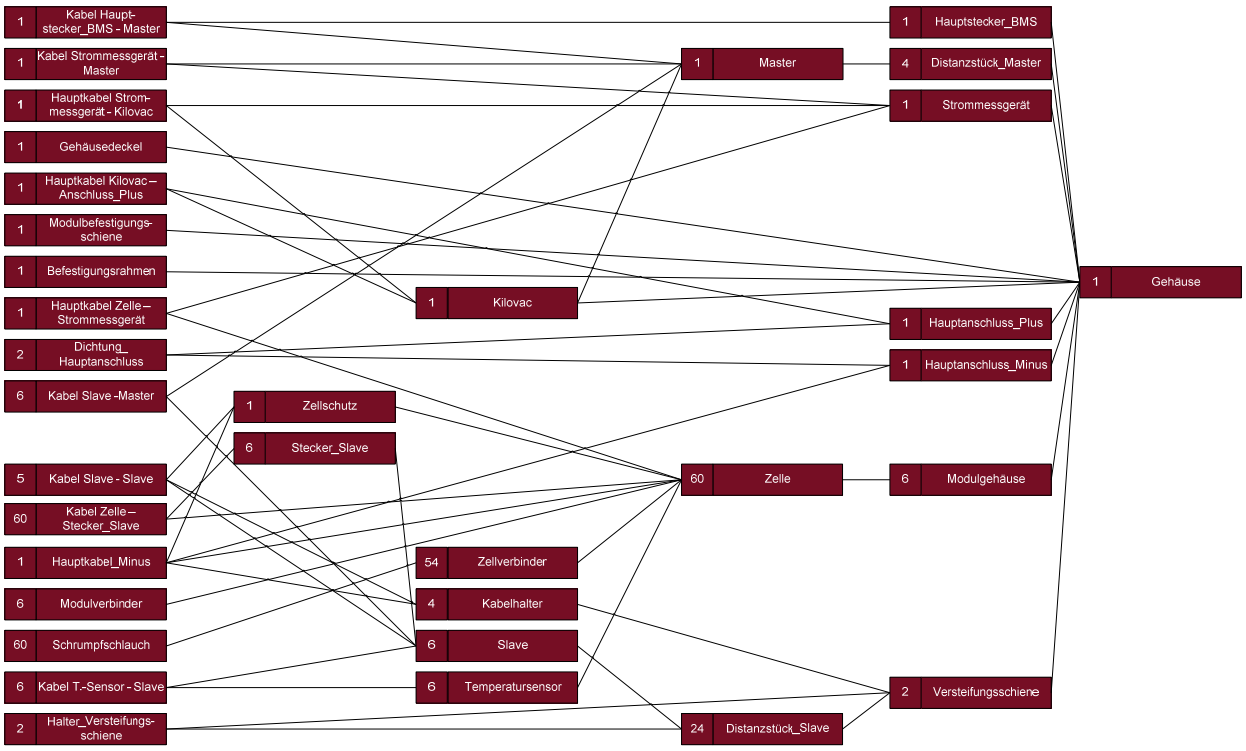


Abbildung B-3: Verbindungsgraph

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Der Verbindungsgraph zeigt die beim Batteriesystem A vorhandenen Verbindungen zwischen verschiedenen Bauteiltypen. Der Verbindungsgraph lässt keine Rückschlüsse auf die Art und Anzahl der Verbindungen zu. Es können jedoch bereits erste Erkenntnisse über mögliche Komplexitätstreiber für die Demontage (z.B. hohe Anzahl unterschiedlicher Bauteiltypen, Vielzahl an Verbindungen zwischen Bauteiltypen) ermittelt werden. Weiterhin lassen sich durch den Verbindungsgraph erste Rückschlüsse auf den Aufbau und die Struktur eines Batteriesystems ziehen. In Abbildung B-3 lässt sich der komplexe Produktaufbau anhand der vielen Verbindungslinien zwischen den jeweiligen Bauteilen erkennen. Analog zum hier dargestellten Batteriesystem A wurde ein zweiter Verbindungsgraph für das Batteriesystem B erstellt. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in **AS B.1.6** zur Ableitung von Anforderungen für die demontage- und automatisierungsgerechte Batteriegestaltung ein.

Demontagevorranggraphen und Ermittlung von Kenngrößen der Demontage

Als zweiter Teilschritt der Methodik erfolgt die Erstellung von Demontagevorranggraphen. Die bisher erhobenen Daten wurden in das in **AS F.1** entwickelte Hilfsmittel zur Analyse von Batteriesystemen integriert. Auf Basis der Daten wurden Demontagesequenzen und -zeiten für werthaltige Bauteile (z.B. Lithium-Zelle, BMS, etc.) der Batteriesysteme bestimmt und in jeweilige Demontagevorranggraphen überführt. Der Demontagevorranggraph für ein Batteriemodul des Systems A ist in Abbildung B-4 dargestellt.

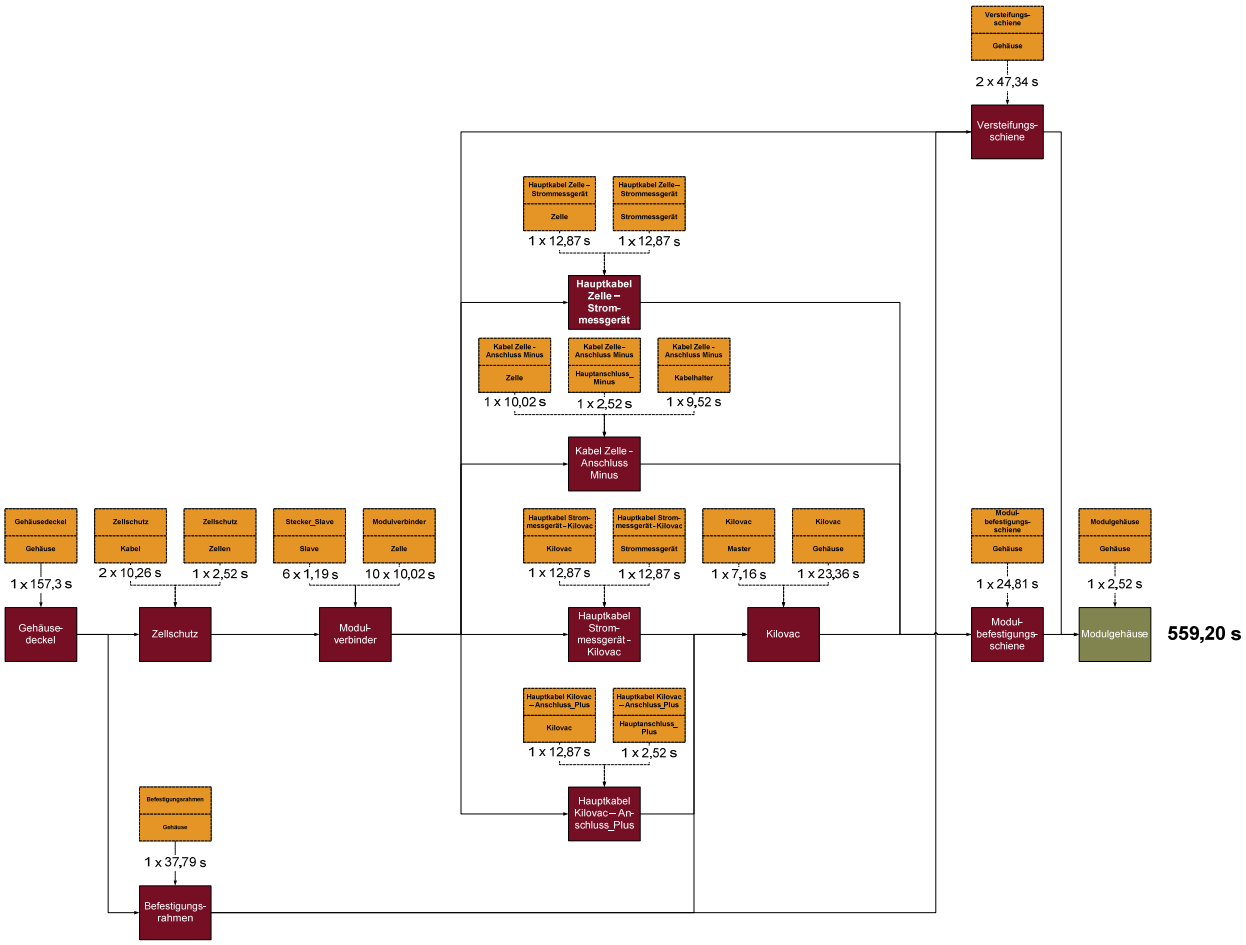


Abbildung B-4: Demontagevorranggraph

Die Demontagereihenfolge ist von links nach rechts dargestellt. In Abbildung B-4 ist der Gehäusedeckel vor dem Zellschutz zu demontieren, um die Modulverbinder demontieren zu

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

können. Die in Gelb dargestellten Boxen zeigen die jeweiligen Verbindungen zwischen Bauteiltypen an, z.B. eine Schraubverbindung. Das jeweils obere Objekt ist vom unteren zu lösen. Zur Demontage des Zellschutzes sind demnach die Verbindungen zum Kabel zu den Zellen zu lösen. Das Lösen der zweifachen Verbindung zum Kabel dauert jeweils 10,26 Sekunden. Die Gesamtdemontagezeit beträgt 559,20 Sekunden.

Die Demontage der betrachteten Batteriesysteme bis auf Zellebene ist mit ca. 57 und 101 Minuten sehr zeit- und damit kostenintensiv. Dies ist bei Batteriesystem A durch eine Vielzahl konstruktiver Vorrangbeziehungen zu erklären. Batteriesystem B weist demgegenüber einen einfachen modular gestalteten Aufbau auf. Aufgrund der genutzten Technologie zur Zellkontaktierung (in diesem Fall eine Schweißverbindung) ist die Demontage aller Zellen ohne entsprechend gestaltete Spezialwerkzeuge und das zugehörige Expertenwissen aufwendiger als die Demontage aller Zellen bei Batteriesystem A.

B.1.2 Konzepte für teilautomatisierte Demontageschritte

Die von IME ACTIA an die TU-BS übergebenen Module und Batteriesysteme wurden zu Projektbeginn einer Demontage durch das IWF-TUBS zugeführt. Dabei wurden Rückbauzeiten, Demontageschritte, Vorrangbeziehungen aufgenommen und mit einer Softwarelösung vom IWF-TUBS bewertet. Das IK-TUBS konnte über diese Arbeiten erste Konstruktions- und Verbesserungsvorschläge erarbeiten und vorstellen. Weiterhin wurden Batteriesysteme von AUDI und VW der TU-BS zur Demontage zur Verfügung gestellt. Die AUDI- und VW-Batteriesysteme wurde analog zum IME ACTIA Batteriesystem durch die TU BS demontiert, dokumentiert und hinsichtlich Recyclingfähigkeit bewertet. Die Ergebnisse liegen der TU-BS vor.

Der Rückbau wurde durch Mitarbeiter der TU-BS vorgenommen, dokumentiert und in einer Software von IWF-TUBS strukturiert und bewertet. Für anfallende Demontageschritte wurden die Automatisierungsmöglichkeiten beurteilt und bewertet.

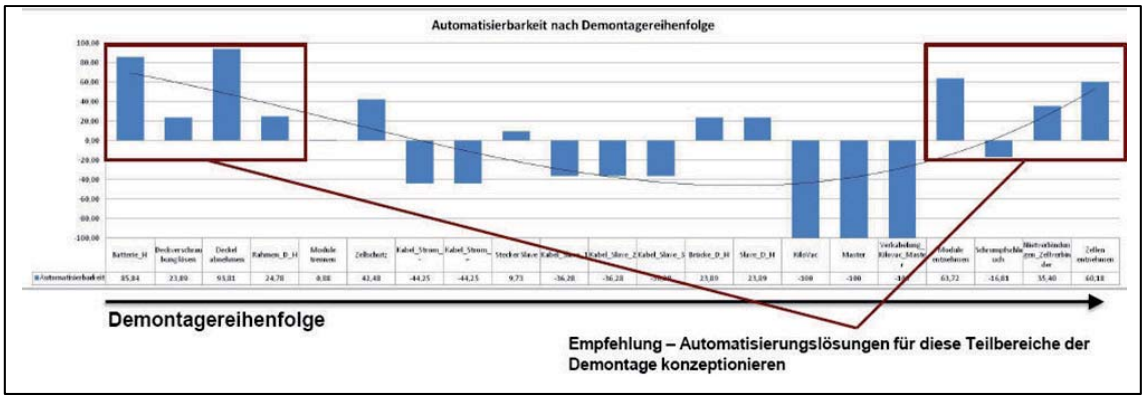


Abbildung B-5: Beispielhafte Bewertung der Automatisierbarkeit

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

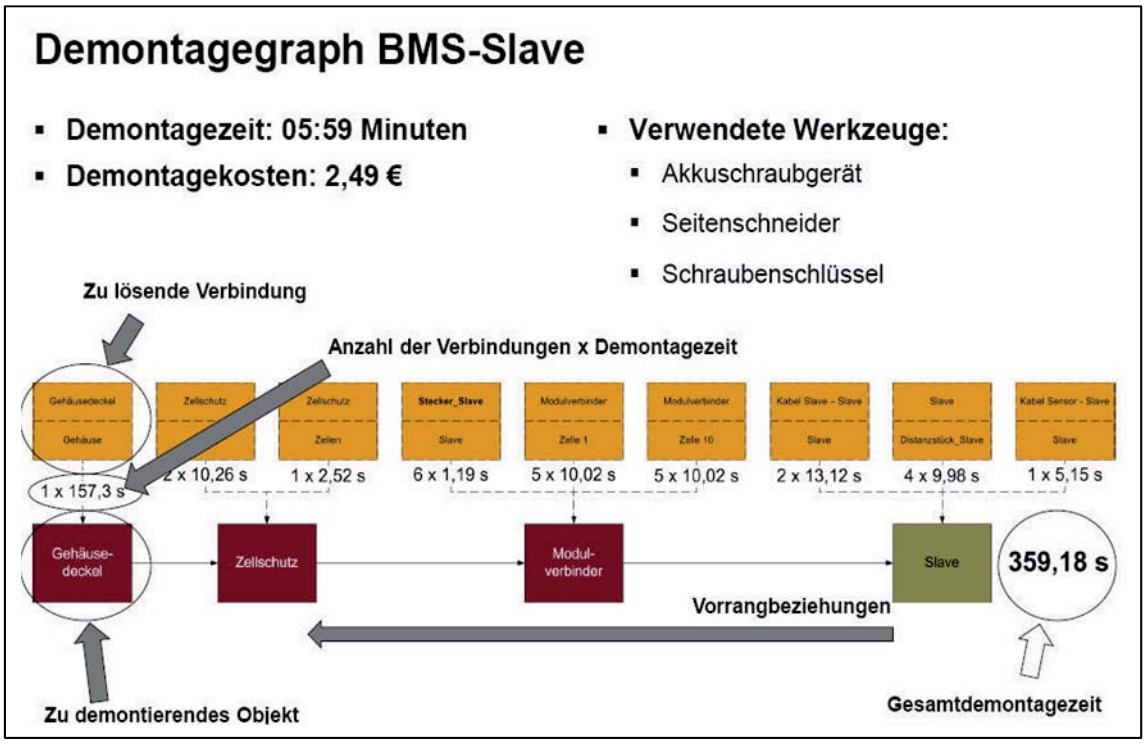


Abbildung B-6: Beispielhafte Bewertung der Demontage

Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse für Demontagearbeiten wurde von IWF-TUBS vorgenommen. Die Ergebnisse sind abhängig von der Komplexität der Batteriesysteme und zumindest für den Modulrückbau teilautomatisch effizient realisierbar. Die Batteriesystemöffnung nebst Modulrückbau wird aus heutiger Sicht manuell effizienter möglich sein.

Ausgehend von der in **AS B.1.1** durchgeführten manuellen Demontage der Batteriesysteme und den generierten Kennwerten wie z.B. Demontagemontagezeit, zu lösende Verbindung etc. wurde eine Systematik zur Bewertung der Automatisierbarkeit entwickelt und angewendet. Hierbei sind sowohl die Einzelschritte, als auch die gesamte Demontagereihenfolge einer Bewertung unterzogen worden. Grundlage der Bewertungssystematik ist ein 20 gewichtete Kriterien umfassender Kriterienkatalog. Dabei wurden folgende übergeordneten Kategorien wurden berücksichtigt:

- Verfahrensbezogene Kriterien (z.B. Komplexität einer Demontagebewegung)
- Sicherheitsbezogene Kriterien (z.B. Abstand zu einem Potenzial)
- Teilebezogene Kriterien (z.B. Teilegewicht in kg)
- Wirtschaftliche Kriterien (z.B. Dringlichkeit der Automatisierung)

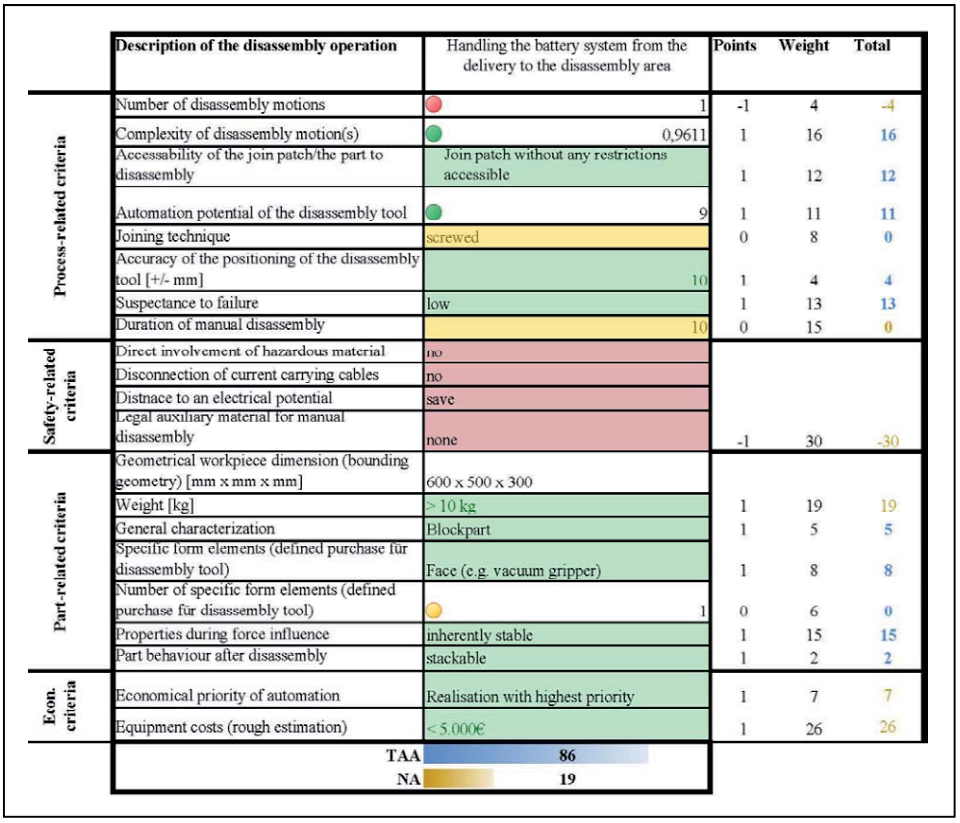
Die Kriterien werden den Kennzahlen

- (technische) Automatisierbarkeit eines Demontageschritts (TAD)
- Notwendigkeit der Automatisierung (NA)

zugeordnet. Abbildung B-7 zeigt die englische Version des erstellten Kriterienkatalogs für verfahrensbezogene, sicherheitsrelevante und ökonomische Kriterien der Bewertung des Demontageschritts „Handhabung des Batteriesystems vom Anlieferungsort zum Demonta-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

geplatz“. Die für die Bewertung relevanten Kriterien wurden auf der Skala -1, 0, 1 (negative, neutrale, positive Kriterienerfüllung hinsichtlich Automatisierung) bewertet und durch Multiplikation mit dem Gewichtungsfaktor zu einer Gesamtbewertung zusammengefasst. Die Gewichtungsfaktoren wurden mit der Methode des Paarweisen Vergleichs ermittelt. Die Summe aller Bewertungsergebnisse wird gemäß der Zuordnung durch die Kennzahlen TAD und NA ausgedrückt.



	Description of the disassembly operation	Handling the battery system from the delivery to the disassembly area	Points	Weight	Total
Process-related criteria	Number of disassembly motions	1	-1	4	-4
	Complexity of disassembly motion(s)	0,9611	1	16	16
	Accessability of the join patch/the part to disassembly	Join patch without any restrictions accessible	1	12	12
	Automation potential of the disassembly tool	9	1	11	11
	Joining technique	screwed	0	8	0
	Accuracy of the positioning of the disassembly tool [+/- mm]	10	1	4	4
	Suspectance to failure	low	1	13	13
	Duration of manual disassembly	10	0	15	0
Safety-related criteria	Direct involvement of hazardous material	no			
	Disconnection of current carrying cables	no			
	Distnace to an electrical potential	save			
	Legal auxiliary material for manual disassembly	none	-1	30	-30
Part-related criteria	Geometrical workpiece dimension (bounding geometry) [mm x mm x mm]	600 x 500 x 300			
	Weight [kg]	> 10 kg	1	19	19
	General characterization	Blockpart	1	5	5
	Specific form elements (defined purchase für disassembly tool)	Face (e.g. vacuum gripper)	1	8	8
	Number of specific form elements (defined purchase für disassembly tool)	1	0	6	0
	Properties during force influence	inherently stable	1	15	15
	Part behaviour after disassembly	stackable	1	2	2
Econ. crieria	Economical priority of automation	Realisation with highest priority	1	7	7
	Equipment costs (rough estimation)	< 5.000€	1	26	26
	TAA	86			
	NA	19			

Abbildung B-7: Kriterienkatalog (Englisch)

Die ermittelten Demontageschritte wurden anhand dieser Systematik bewertet und die Kennzahlen TAD und NA sowohl für den Einzelschritt als auch für die gesamte Demontagesequenz ermittelt. Für die Auswertung der Einzelschritte wurde eine Portfoliodarstellung verwendet (siehe Abbildung B-8). Die Kennzahl TAD wurde auf der Ordinate, NA auf der Abszisse aufgetragen. Die Auswertung der entsprechenden Quadranten I-IV führt auf die für das Projekt relevanten Bereiche 1 und 2:

1. Fokus „*LithoRec*“: Die Demontagesequenzen werden einer Systemgestaltung zugeführt.
2. Mittlerer/hoher Forschungsbedarf kann identifiziert werden: innerhalb der Projektlaufzeit nicht realisierbar

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

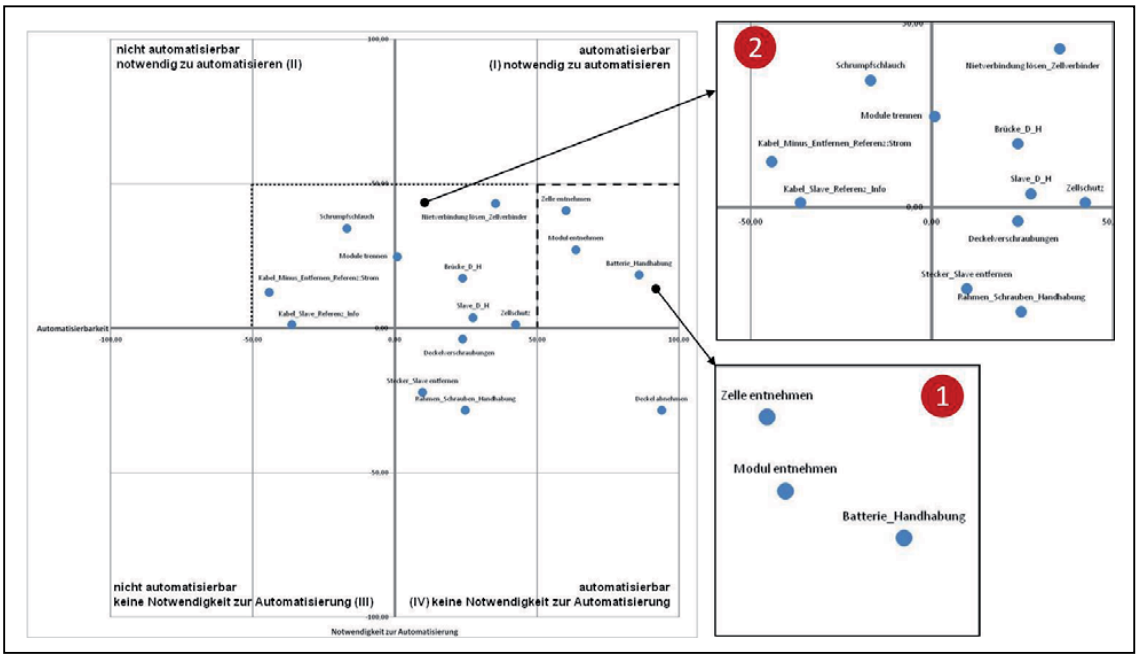


Abbildung B-8: Portfoliodarstellung zur Bewertung der Automatisierbarkeit für den Einzelschritt

In der prozessorientierten Darstellung wurden die Kennwerte für TAD und NA entsprechend der Demontagereihenfolge dargestellt. In Bereichen mit mehreren „gut“ automatisierbaren, aufeinanderfolgenden Einzelschritten kann somit ein Potenzial zur Integration dieser Demontageabfolgen in eine (teil-)automatisierte Anlage identifiziert werden. Die Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, dass die Demontageschritte

- Handhabung einer Batterie vom Anlieferungsort zum Demontageplatz
- Modul aus einem Batteriesystem entnehmen
- Zelle aus einem Modul entnehmen

der weiteren Konzeptionierung zugeführt werden konnten. Zur Konzeptentwicklung für die (teil-) automatisierte Demontage wird die VDI-Richtlinie 2221 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“ [VDI 2221] herangezogen, um systematisch den Konkretisierungsgrad der gewählten Demontageschritte zu erhöhen.

Für den Schritt „Handhabung eines Batteriesystems vom Anlieferungsort zum Demontageplatz“ wurden drei Automatisierungskonzepte mit unterschiedlichem Automatisierungsgrad und Werkereinsatz aufgezeigt. Die Ergebnisse werden in der folgenden Tabelle B-2 zusammenfassend dargestellt:

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tabelle B-2: Zusammenstellung der Konzepte für die Handhabung eines Batteriesystems vom Anlieferungsort zum Demontageplatz

Automatisierungsgrad	Werkereinsatz [Personen /Schicht]	Handhabungsgerät	Greifer	Bemerkungen
100%	0,05 (Wartung etc.)	Industrieroboter KUKA KR 100-3 comp	2 x Schmalz Vakuum-Flächengreifer FXC	planare Greiffläche notwendig
50%	1	Knickgelenkausleger Dalmec Posifil Säulengerät PFC	2 x Schmalz Vakuum-Flächengreifer FXC	Traglast bis 120 kg,
0%	2	Stundensatz pro Werker von 30 €/h und 15 sec. pro Handhabungsvorgang bei einer Auslastung von 80 %		

Für die erste Abschätzung, ab welcher Stückzahl pro Zeiteinheit eine höher-/vollautomatisierte Lösung vorzuziehen ist, erfolgte eine wirtschaftliche Gegenüberstellung der Konzepte anhand der Maschinenstundensatz- und Kostenvergleichsrechnung. Nachteilig an dieser statischen Methode ist, dass nur zukünftige Entwicklungen nicht betrachtet werden können und dass Investitionsentscheidungen nicht ausschließlich auf den Kosten beruhen. Dennoch kann dieses Verfahren für eine erste Abschätzung angewendet werden, da die zahlreichen unbekannten Faktoren in der Demontagesystemgestaltung eine genauere Betrachtung nicht zulassen.

Nach der manuellen Demontage von drei verschiedenen Batteriesystemen hat sich gezeigt, dass die Formvarianz der einzelnen Batteriemodule so groß ist, dass trotz positiver Bewertung dieses Demontageschritts eine Konzeptionierung nicht sinnvoll ist, so dass die Grobplanung für ein Automatisierungssystem zur Handhabung einer Batteriezelle priorisiert zu behandeln. Dies geschieht unter besonderer Berücksichtigung der **AS B.1.4** und **AS B.1.5**.

Die Konzeptphase zur Ausgestaltung eines Elements zur Demontage wird innerhalb dieses AS beschrieben, die mechanische Konstruktion, Steuerungsarchitektur und Bediensoftware im **AS B.1.4**. Nach der beschriebenen Bewertungssystematik wurde der Schritt „Zelle aus Modul entnehmen“ positiv bewertet, was maßgeblich durch eine hohe Sicherheitsrelevant beeinflusst wird. da z.T. geladene Batteriezellen gehandhabt werden müssen und sich direkt die Zuführung der Zellöffnung anschließt. Diese sollte aufgrund der direkten Beteiligung gesundheitsschädlicher Materialien einen hohen Automatisierungsgrad aufweisen. Dieser Demotageschritt wird im Folgenden dahingehend relativiert, dass ein System zur Handhabung von Batteriezellen entwickelt wird, da sich während der manuellen Demontage gezeigt hat, dass die Batteriezellen nicht zerstörungsfrei getrennt werden können oder so dicht nebeneinander angeordnet sind, dass ein Greifer nicht adäquat positioniert werden kann, um einen sicheren Griff zu gewährleisten. Dafür wurden der Flexibilitätsgedanke und die Zustandserkennung in die Entwicklung integriert. Auf Basis dieser gewählten Aufgabe „Entwicklung eines Greifers für die Handhabung verschieden formatiger Pouch-Batteriezellen mit in-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

tegrierter Spannungsmessung und Innenwiderstandsbestimmung“ wurde eine Anforderungsliste erstellt, Teilaufgaben des Systems definiert und ein Lösungsraum durch einen morphologischen Kasten geschaffen. Aus diesem wurden mögliche Systemlösungen gewählt und gegenübergestellt. Parallel wurde ein kommerziell verfügbarer Greifer als Subsysteme recherchiert und bewertet. Ein Auszug aus der Anforderungsliste ist in Tabelle B-3 dargestellt:

Tabelle B-3: Auszug aus der Anforderungsliste für die Greifvorrichtung

Gliederung	Nr.	Bezeichnung	Werte, Daten	Anf. Art
Funktionale Anforderungen	1.1	Greifbarkeit verschiedener Batteriegrößen ermöglichen		F
	1.2	Positionierung des Greifers ermöglichen	automatisch	F
	1.3.	Messbarkeit der Batteriespannung/ Innenwiderstand ermöglichen	darstellbar	F
	1.4	Verfahrgeschwindigkeit der Führung	> 25 mm/s	M
	1.5	Elektrische Spannung des Motors	U=24V DC	F
	1.6.	Gesamtgewicht Greifer	< 5kg	M
Störeffekte vermeiden	2.1	Verfahrbarkeit im Betrieb vermeiden		F
	2.2	Messabweichung der Spannung	< 0,1 V	M
Räumliche Anforderungen	3.1	Montage des Greifersystems vereinfachen (Modularität)		W
	3.2.	Führung der Verkabelung einfach gestalten		W
Wirtschaftliche Anforderungen	4.1	Anzahl der Norm- und Zukaufteile maximieren		F
Normative Anforderungen	5.1	Baukastenprinzip anstreben		W
…	…	…	…	…

Das Ergebnis dieser Greiferkonzeptionierung und –dimensionierung ist in [Schmitt, 2011] veröffentlicht. An dieser Stelle sollen die Funktionalitäten des Greifers zusammenfassend dargestellt werden. Die Hauptanforderung ist das sichere Greifen verschieden formatiger Pouch-Zellen. Zu diesem Zweck wurden zwei Parallelbackengreifer gewählt, deren Abstand durch eine Spindel-Linearachse verändert werden kann. Angetrieben wird die Achse durch einen DC Motor mit Planetengetriebe. Die Position der Greifer wird durch induktive Näherungssensoren bestimmt. Dies lässt jedoch nur eine geringe Positioniergenauigkeit zu, die allerdings ausreichend ist für die Anforderungen in der Demontage. Auftretende geometrische Änderungen der Batteriezellen kann mit einfachem Verschieben der Näherungssensoren erreicht werden. Ein gesondertes Umprogrammieren der SPS ist nicht notwendig. Als Greifflächen wurden die Kontakte der Batteriezellen gewählt, um eine in-process Zustandsbestimmung der Zelle zu realisieren. Als Kennwerte sollen der aktuelle Spannungswert gemessen sowie der Innenwiderstand bestimmt werden, da diese Daten schnell und mit der angestrebten Steuerungstechnik auswertbar sind. Gesonderte, kostenintensive Messtechnik sollte vermieden werden. Ferner wurde eine (modular) SPS basierte Steuerung des

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Greifersystems gewählt, um möglichst industrielle, teilweise genormte Standardkomponenten zu verwenden. Das Prinzip des Greifersystems und der Steuerungsarchitektur werden in Abbildung B-9 dargestellt. Die detailliertere Beschreibung der maßgeblichen Subsysteme und Funktionalitäten wird in **AS B.1.4** beschrieben.

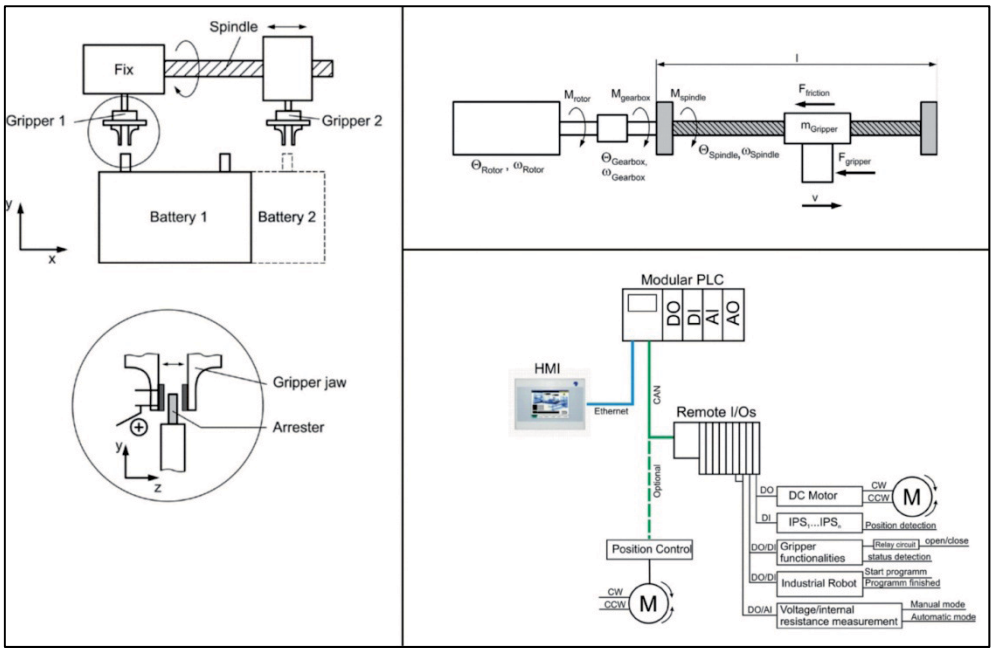


Abbildung B-9: Prinzip der Greifvorrichtung (links); Parameter zur Motorauslegung (oben rechts) und Steuerungsarchitektur (unten rechts)

B.1.3 Entwurf alternativer Demontagesysteme (Layout, Verkettung von Arbeitsstationen/-plätzen)

In mehreren gemeinsamen Arbeitsmeetings (EC, IWF-TUBS, I+ME) wurden Demontagemöglichkeiten vorrangig von Batterien und Modulen besprochen (mit Ausnahme für Zelldemontage – da wird noch Input von den Beteiligten Projektpartnern erwartet) und hinsichtlich geeigneter Arbeitsplatzgestaltung und Prozesstechnik evaluiert. Um die richtige konzeptionelle Auslegung zu beschreiben, hat das IWF-TUBS physikalisch technische Funktionen, wirtschaftliche und sicherheitsrelevante Anforderungen aufgenommen und in Bezug zu Trägersystem, Antriebssystem, Transportsystem, Wirksystem gebracht. Die Zusammenfassung und schematische Abbildung eines möglichen Demontageprozesses wird vom IWF-TUBS vorgestellt und beschrieben.

Alternative Demontagesysteme sind gekennzeichnet durch Verkettung der Arbeitsschritte und einen zunehmenden Grad an Automatisierung. Wichtig ist die Verkettung der Schritte die auch bei kleinen Mengen an Altbatterien erforderlich sind.

Zunächst bestimmt ein hohes Maß an manuellen Tätigkeiten die Demontage. Zur Unterstützung der Prozesse sind Handhabungsmittel wie hydraulische Hebevorrichtungen und Transportsysteme mit Rollenbahnen vorzusehen. Vor allem für die erste Zuführung zur Batterie-Identifikation, Sortierung und anschließenden Entladestation sind Hebevorrichtungen not-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

wendig. Durch die Gefahrgutvorschriften sind die Batterien für den Transport in speziellen, geeigneten und zugelassenen Behältern verpackt. Es ist davon auszugehen, dass die Batterien aus diesen Behältern direkt in das Demontagesystem eingebracht werden. In der Regel fehlen den Batterien Aufnahmemöglichkeiten wie z.B. Ösen für das Anschlagen von Hebezeugen. Durch das hohe Batteriegewicht sind Systeme mit Greifern oder Saughebern vorzusehen die die Batterien aus den Behältern auf ein Transportsystem z.B. Rollenbahn heben.

Für große Batterien die Abmessungen von bis zu 2 m Länge und 1,5 m Breite aufweisen können sind Inselstationen für die Demontage vorteilhafter. Eine Zerlegstrecke erlaubt in der Regel nur den Zugriff von zwei Seiten. Bei den großen Systemen ist die Erreichbarkeit von allen Seiten notwendig

Neben der Verkettung der Demontageschritte ist die Automatisierung von Demontageprozessen wie die Batterieöffnung, Zellentnahme und die Zellöffnung mit Füllmaterialentnahme (Stack/Wickel) sinnvoll. Allerdings ist hier ein hohes Maß an einheitlichen Batteriesystemen notwendig. Erfahrungen aus der Elektroaltgeräteverwertung von Telefonen, Computern und Monitoren zeigen, dass Automatisierungen schnell an ihre Grenzen stoßen.

Nur geringste Änderungen an Bauteilen wie z.B. Anordnung und Art der Verbindungen und Schrauben sind für die Automatisierung der Demontage nachteilig.

Ziel dieses Arbeitsschrittes ist es, die einzelnen Stationen des Demontagesystems auszuwählen und die benötigten Elemente zu definieren und überschlägig zu dimensionieren. Hierbei wurden neben den Arbeitsstationen auch die Transporteinrichtungen betrachtet, die der Verkettung der einzelnen Stationen dienen. Alle Elemente wurden dann zu einem gesamten Demontagesystem zusammengeführt und in einem Gesamtlayout zusammengefasst. Die Auslegung der verschiedenen Alternativen des Demontagesystems erfolgt nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten.

Die angelieferten Batteriesysteme werden zwischengelagert und dann in einem ersten Schritt entladen. Die Entladung wird in den **AS A.4.6** bis **AS A.4.8** beschrieben. In einem nächsten Zwischenschritt wird das Batteriesystem nach verschiedenen Kriterien wie z. B. der Bauart und dem Zustand, grob vorsortiert. Eine Vorsortierung entsprechend der Herstellertypen macht die Variantenvielzahl beherrschbarer und erlaubt es, größere Chargen eines Batterietyps zu verarbeiten. Über ein Fördermittel werden die Li-Ion-Batteriesysteme weiter in eine Reinigungskabine und dann zu den Demontagestationen oder -plätzen transportiert. Dort werden die Verbindungen der Batteriesysteme mit den entsprechenden Werkzeugen aufgetrennt und die einzelnen Baugruppen und -teile sowie die formlosen Stoffe separiert. Der Vorgang der Demontage kann, je nach Batterietyp, sowohl zerstörend als auch nicht zerstörend durchgeführt werden. Die demontierten Baugruppen und -teile können dann als Fraktionen abtransportiert, gereinigt und eventuell wieder- oder weiterverwendet werden. Die nicht verwert- bzw. verwendbaren Komponenten werden der Entsorgung zugeführt. Die freigelegten Zellen der Lithium-Ionen-Batteriesysteme werden dem Prozess der Zellöffnung zugeführt. Die Zellöffnung geschieht dann entsprechend der im **AP B.2** erarbeiteten Techniken, wodurch Sekundärrohstoffe gewonnen werden können. Der allgemeine Ablauf der Demontage von Batteriesystemen wird in Abbildung B-10 schematisch dargestellt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

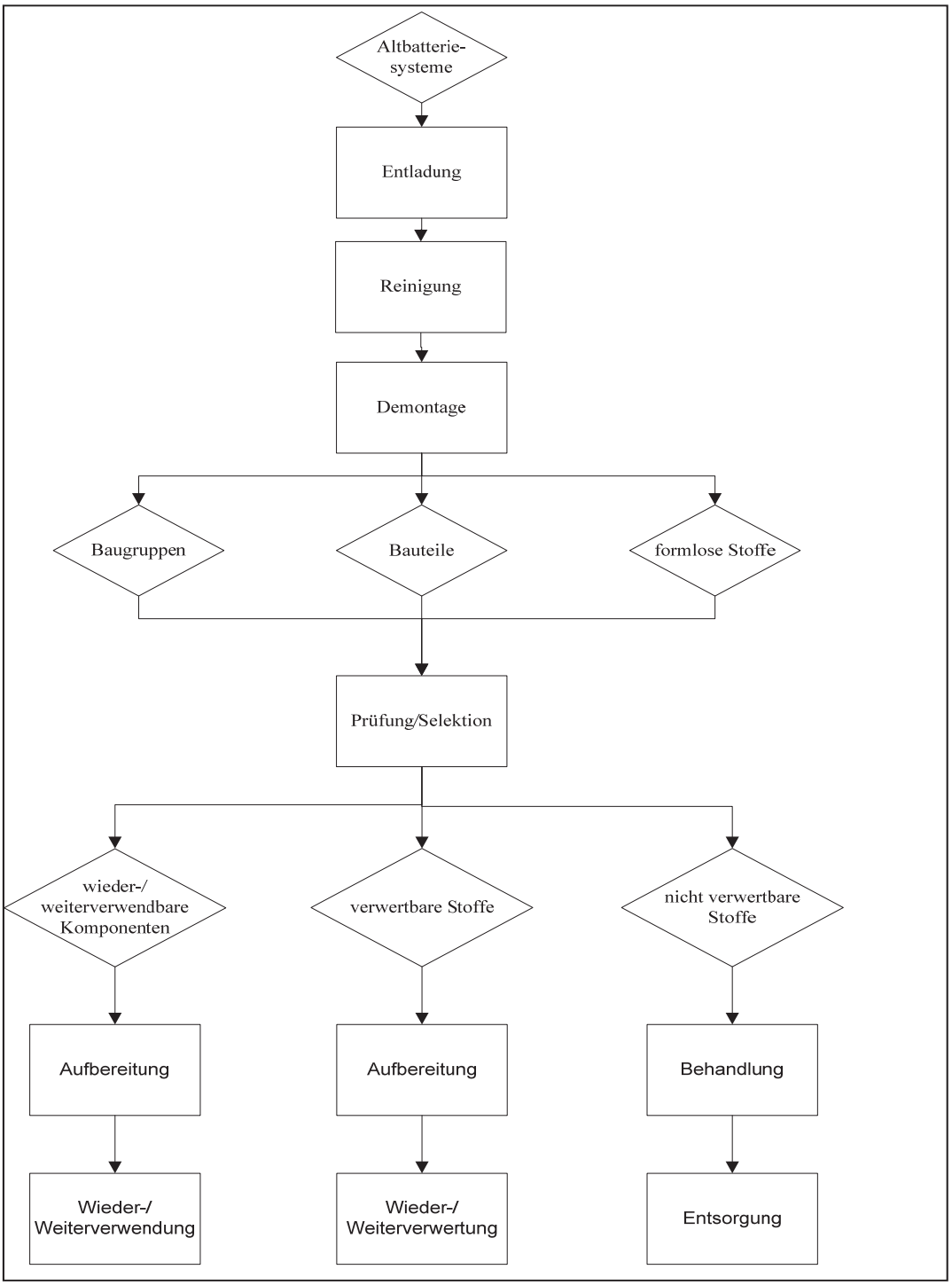


Abbildung B-10: Schema der allgemeinen Demontage von Batteriesystemen[14]

[14] in Anlehnung an IREAK (1999), S. 36.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Verwertungsalternativen für Lithium-Ionen-Batterien

Anhand der im **PB A** definierten Szenarien, die jeweils ein unterschiedliches Batteriesystemaufkommen mit sich bringen, werden entsprechend zwei unterschiedliche Verwertungsalternativen entwickelt und ausgestaltet, um den steigenden Anforderungen in zeitlichen Verlauf der Batterierücknahme und –verwertung gerecht werden zu können. Die Grundlage liefert dabei das „realistische“ Szenario aus **PB A** aus den Jahren 2015 und 2030. Auf Grund des erheblich höheren Altsystem-Aufkommens im Jahr 2030 wird weiterhin noch auf das „politische“ Szenario eingegangen und erörtert, welche zusätzlichen Maßnahmen für die erhöhte Altbatteriemenge getroffen werden müssten.

Szenarioübergreifende Aussagen

Aus **PB A** wird neben dem massebezogenen Altbatterieaufkommen auch eine Festlegung der durchschnittlichen Batteriesystemgewichte vorgenommen. Aus der Kombination dieser zwei Datensätze lässt sich das mengenbezogene Altbatterieaufkommen (Stückzahlen) berechnen (s. Tabelle B-4). Hier werden wieder nur die beiden „realistischen“ Szenarien „2015 realistisch“ und „2030 realistisch“ genauer betrachtet.

Tabelle B-4: Rücklaufmengen der Batteriesysteme (Stückzahl) für die Szenarien „2015 realistisch“ und „2030 realistisch“

Rücklaufmengen Batteriesysteme	„2015 realistisch“	„2030 realistisch“
Gesamt [Stk/a]	526	114.311
HEV [Stk/a]	158	4.845
PHEV [Stk/a]	321	69.360
BEV [Stk/a]	47	40.106

Weiterhin wird angenommen, dass die Anzahl der einzelnen Batteriezellen pro Batteriesystem einen durchschnittlichen Wert von 70 Zellen bei Hybrid Electric Vehicles, 170 Zellen bei Plug-In Hybrid Electric Vehicles und 250 bei Battery Electric Vehicles betragen. Diese Werte sind für alle Szenarien gleich.

Szenario „realistisch 2015“

Für das Szenario „2015 realistisch“ dienen die im Projekt vorliegenden Batteriesysteme als Grundlage zur Demontageauslegung. Diese Batteriesysteme lassen keine zerstörungsfreie Demontage der Batteriezellen zu. Eine Wieder- und Weiterverwendung der Zellen kommt somit nicht in Frage.

Die Anzahl der unterschiedlichen Batteriesysteme wird auf zehn festgelegt. Die für eine automatisierte Zelldemontage ausschlaggebende Vereinheitlichung der Zelltypen, bzw. eine Minimierung der verwendeten Zelltypenanzahl ist hier nicht gegeben. Für dieses Szenario wird davon ausgegangen, dass sowohl Pouchzellen, als auch Rundzellen in den Batteriemodulen im Einsatz sind.

Basierend auf den Demontageuntersuchungen, die im Rahmen des LithoRec-Projektes durchgeführt wurden, wird für das Szenario „2015 realistisch“ eine durchschnittliche Demon-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

tagezeit von 100 Minuten angesetzt. Dabei handelt es sich um eine 100 prozentige manuelle Demontage. Es werden keine Automatisierungsschritte im Demontagevorgang umgesetzt.

Davon ausgehend, dass in diesem Szenario „2015 realistisch“ insgesamt im ganzen Jahr 526 Batteriesysteme zurückkommen, deren Variantenzahl hoch ist, die nicht zerstörungsfrei demontiert werden können, kann anhand der Eignung von Organisationsausprägungen festgestellt werden, dass die geeignetste Form der Demontageorganisation der Einzelplatz ist.

Es liegt hier ein objektbezogenes Organisationsprinzip vor, bei dem manuell das Batteriesystem demontiert werden muss. Aufgrund der hohen Variantenflexibilität wird auch der Materialfluss flexibel gestaltet, so dass er an die unterschiedlichen Demontagezeiten angepasst werden kann. Der Materialzufluss findet zentral aus einem zentralen Lager statt, der Materialabtransport wird dezentral von den einzelnen Arbeitsplätzen organisiert.

Die Batteriesysteme werden auf einem Werkstückträger platziert und mittels eines Staplers aus dem Lager zu den Arbeitsplätzen transportiert. Es werden keine Halte- oder Spannvorrichtungen verwendet, damit der Werker das Werkstück frei bewegen kann.

Tabelle B-5 stellt in Form eines Morphologischen Kastens das Demontagesystem für das Szenario „2015 realistisch“ dar.

Tabelle B-5: Morphologischer Kasten der Demontagesysteme für Szenario „2015 realistisch“

Produkt	*Produktgruppe*	**LITB**				
Organisation	*Organisationsprinzip*	**Objekt**	Verrichtung			
	Anordnungsstruktur	**Einzel-platz**	Zelle	Insel	Netz	Linie
Demontage-prozess	*Automatisierungs-grad*	**manuell**	hybrid	automa-tisiert		
	Materialfluss	starr	**flexibel**			
	Vorsortierung	**mit**	ohne			
	Demontage	**zerstö-rend**	nicht zerstö-rend			
Materialfluss	*Materialzufluss*	**zentral**	dezentral			
	Materialabtransport	zentral	**dezentral**			
	Lagerung/Sortierung	**zentral**	dezentral			
Betriebs-mittel	*Roboterart*	Portal	Knickarm	Scara	Koordina-ten	
	Greifer	Backen	Vakuum	Magnet	Stift	
	Werkstückträger	mit	**ohne**			
	Halte- und Spannein-richtungen	mit	**ohne**			
	Fördermittel	Rollen-bahn	Tragketten-förderer	Kreisför-derer	Power-and-Free-Förderer	**Stap-ler**

Auf Grund der geringen Menge an rückläufigen Batterien, ist es ausreichend, einen allgemeinen Arbeitsplatz zur Verfügung zu stellen, der zur Batteriedemontage, aber alternativ auch zur Demontage von anderen Produkten verwendet werden kann. Bei 526 Batteriesystemen müssen, von 252 Arbeitstagen im Jahr ausgehend, 2,1 Batteriesysteme am Tag zer-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

legt werden. Die durchschnittliche Demontagezeit pro Batteriesystem liegt bei 100 Minuten. Somit können die Batteriesysteme innerhalb von 3,5 Stunden demontiert werden. Somit ist ein einzelner Demontageplatz ausreichend. Die benötigten Werkzeuge umfassen die Standardwerkzeuge, wie Schraubendreher, Hammer und Schraubenschlüssel, sowie Zangen. Spezialwerkzeuge sind nicht vorgesehen.

In Abbildung B-11 ist ein mögliches Layout für einen solchen Arbeitsplatz dargestellt.

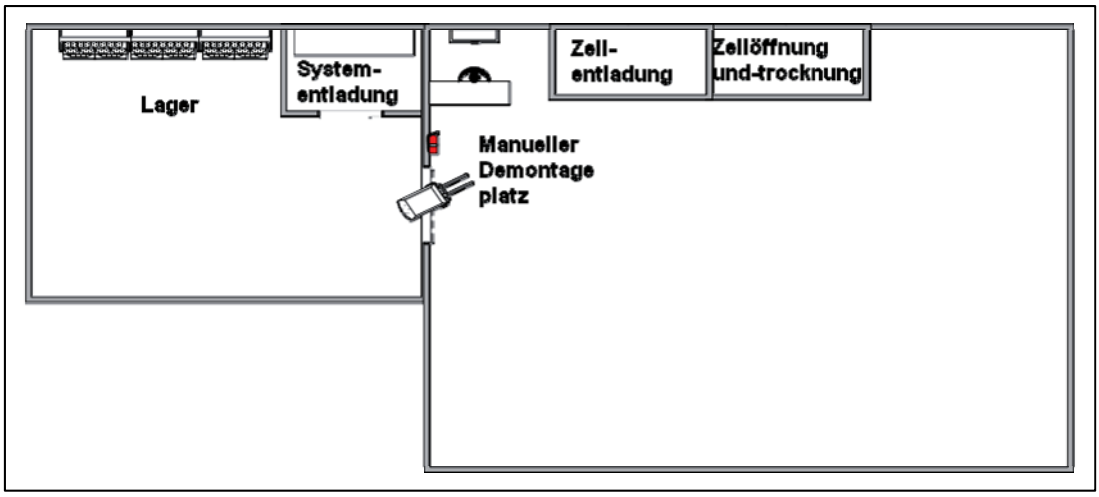


Abbildung B-11: Layout eines Demontagesystems für Szenario „2015 realistisch“

Bei dem Szenario “2015 realistisch“ ist es auch möglich, eine Verkettung der Arbeitsstationen über Rollenbänder vorzunehmen. So würden die Batteriesysteme per Gabelstapler in der Systementladung aufgegeben und dann mittels Rollenbänder zum manuellen Demontageplatz und danach zur Zellentladung und Zellöffnung, bzw. Zelltrocknung weitergeschleust.

Szenario „2030 realistisch“

Da auf Grund der rasanten technischen Entwicklung davon ausgegangen werden muss, dass sich die Batteriesysteme im Jahr 2030 grundlegend von den heute verfügbaren Systemen unterscheiden, dient als Grundlage der Auslegung des Demontagesystems im Jahr 2030 ein Batteriesystem, das auf Basis der Vorschläge aus **PB F** entwickelt wurde. Entsprechende konstruktive Veränderungen an den Batteriesystemen werden als bereits umgesetzt angesehen und beeinflussen so die Auslegung des gesamten Demontagesystems. Teil der Optimierungsvorschläge werden Maßnahmen sein, die eine zerstörungsfreie Demontage der Batteriesysteme bis auf Zellebene ermöglichen. Dies ist bei den aktuellen Batteriesystemen nicht möglich. In den „2030“-Szenarien wird davon ausgegangen, dass Pouchzellen und Rundzellen verwendet werden.

Auf Grund von technischen Normierungen seitens der Politik und der Industrie und basierend auf wirtschaftlichen Synergieeffekten wird davon ausgegangen, dass die Anzahl unterschiedlicher Batteriesysteme von derzeit angenommenen zehn Systemen sich auf drei unterschiedliche Traktionsbatteriesysteme reduzieren wird.

Im Gegensatz zum Szenario „2015 realistisch“ wird in diesem Szenario von einem hohen Automatisierungsgrad von ca. 70 Prozent ausgegangen. Die Gesamtdemontagedauer beträgt 30 Minuten, da das Batteriesystem demontagefreundlich konstruiert wurde und somit auch den hohen Automatisierungsgrad zulässt. Die manuelle Demontage beträgt 10 Minuten, während für die automatisierte Demontage 20 Minuten veranschlagt werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Im Szenario „2030 realistisch“ liegt die Rücklaufmenge der Batteriesysteme gesamt bei 114.311 Einheiten. Da von einem Automatisierungsgrad von 70 % ausgegangen wird und die Variantenvielfalt gering ist, sowie die Menge der zu verarbeitenden Batteriesysteme hoch ist, wird das Organisationsprinzip der Demontagelinie gewählt, die nach dem Verrichtungsprinzip aufgebaut ist. Die einzelnen automatisierten Stationen der Demontagelinie sind an der Verrichtung einer spezifischen Tätigkeit orientiert. Die Demontage verläuft zerstörungsfrei.

Der Materialfluss ist flexibel gestaltet und ohne Vorsortierung ausgelegt. Die ankommenden Batteriesysteme sind mit einem Strichcode versehen, anhand dessen, über einen Scanner, die technischen Daten der Batterie eingelesen werden können und die entsprechend benötigten Programme der Demontageroboter geladen werden können. Sowohl Materialzufluss, als auch die Lagerung sind zentral organisiert, der Materialabtransport läuft dezentral.

Tabelle B-6: Morphologischer Kasten der Demontagesysteme für Szenario „2030 realistisch“

Produkt	*Produktgruppe*	**LITB**				
Organisation	*Organisationsprinzip*	Objekt	**Verrichtung**			
	Anordnungsstruktur	Einzelplatz	Zelle	Insel	Netz	**Linie**
Demontageprozess	*Automatisierungsgrad*	manuell	**hybrid**	automatisiert		
	Materialfluss	starr	**flexibel**			
	Vorsortierung	mit	**ohne**			
	Demontage	zerstörend	**nicht zerstörend**			
Materialfluss	*Materialzufluss*	**zentral**	dezentral			
	Materialabtransport	zentral	**dezentral**			
	Lagerung/Sortierung	**zentral**	dezentral			
Betriebsmittel	*Roboterart*	Portal	**Knickarm**	Scara	**Koordinaten**	
	Greifer	**Backen**	Vakuum	Magnet	Stift	
	Werkstückträger	**mit**	ohne			
	Halte- und Spanneinrichtungen	**mit**	ohne			
	Fördermittel	**Rollenbahn**	Tragkettenförderer	Kreisförderer	Power-and-Free-Förderer	**Stapler**

Unabhängig von der Annahme, dass die Batteriesysteme nach dem Muster der in **AP F** entwickelten Vorschläge aufgebaut sind, ist es notwendig Einzelarbeitsplätze nach dem Muster des Szenarios „2015 realistisch“ bereitzuhalten, um evtl. noch vorhandene alte Batteriesysteme verwerten zu können und um beschädigte Batteriesysteme verarbeiten zu können.

Abbildung B-12 gibt eine Übersicht, wie das Layout eines Demontagesystems mit automatischen und manuellen Stationen aussehen könnte.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

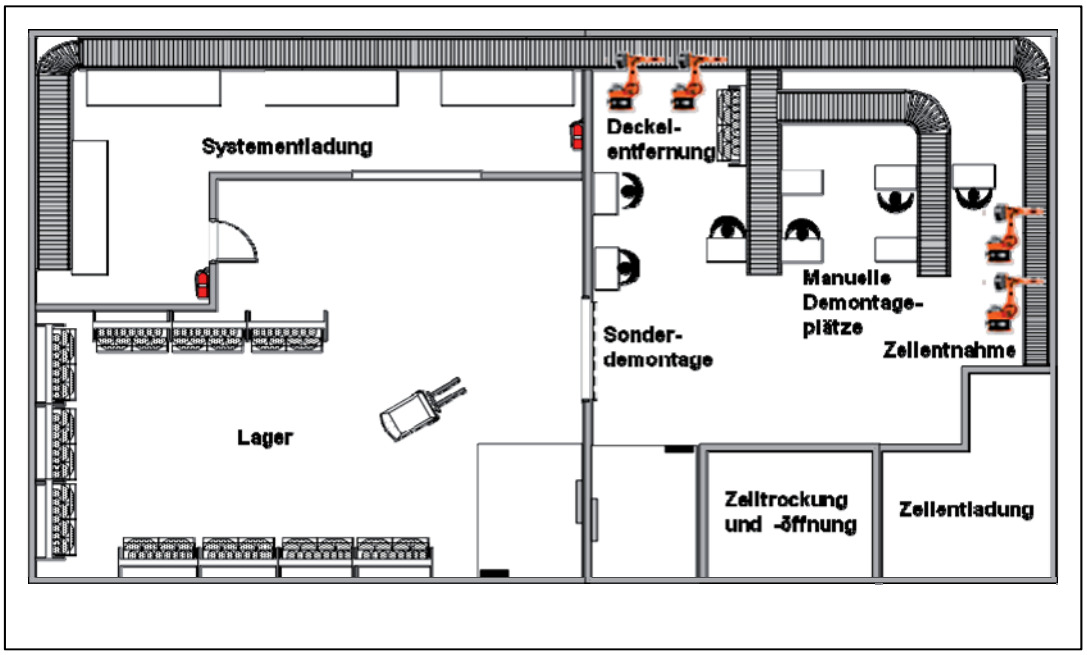


Abbildung B-12: Layout eines Demontagesystems für Szenario „2030 realistisch“

Zur Entnahme der Batteriezellen wird der Greifer verwendet, der in den Arbeitsschritten **AS B.1.4** und **AS B.1.5** entwickelt und getestet wird.

Szenario „2030 politisch“

Für das Szenario „2030 politisch“ gelten dieselben Grundannahmen wie für das Szenario „2030 realistisch“. Einziger Unterschied ist die rückläufige Stückzahl an Batteriesystemen. Analog zu den Ergebnissen aus **PB A** ergeben sich Mengen, die im Schnitt etwa achtmal so groß sind, wie die Rückläufe aus dem Szenario „2030 realistisch“ (s. Tabelle B-7).

Tabelle B-7: Rücklaufmengen der Batteriesysteme (Stückzahl) für das Szenario „2030 politisch“

Rücklaufmengen Batteriesysteme	„2030 politisch“
Gesamt [Stk/a]	924.819
HEV [Stk/a]	18.947
PHEV [Stk/a]	668.150
BEV [Stk/a]	237.722

Die Gesamtmenge der rückläufigen Batterien summiert sich auf ca. eine Million Systeme. Diese hohe Menge muss bei der Auslegung des Demontagesystems Berücksichtigung finden. Im Szenario „2030 politisch“ liegt die Rücklaufmenge der Batteriesysteme gesamt bei 924.819 Einheiten. Das ist etwa die achtfache Menge des Szenarios „2030 realistisch“. Da abgesehen von der Gesamtmenge die Voraussetzungen zwischen den beiden 2030 Szenarien identisch sind, kann man zwei Wege einschlagen. Entweder das Demontagesystem von „2030 realistisch“ wird hochskaliert und es werden 40 Arbeitsplätze eingerichtet oder alternativ wird ein zweiter Standort eröffnet, der in Summe mit dem ersten Standort 40 Arbeitsplätze in zwei Schichten betreibt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die technische Auslegung der Demontagesysteme zum Szenario „2030 politisch“ ist analog zu der Auslegung des Demontagesystems zum Szenario „2030 realistisch“.

Im **AS B.1.3** wurden mit Hilfe eines Ablaufschemas und morphologischer Kästen, sowie der Szenariotechnik verschiedene Demontagesysteme entwickelt, die in Abhängigkeit der Rücklaufmenge der Altbatterien dimensioniert wurden. Der Übergang zwischen den zwei hier dargestellten Szenarien wird nicht sprunghaft von statten gehen. Es ist nicht möglich, diesen Übergang an einer bestimmten Stückzahl an zu verarbeitenden Batterien festzumachen. Vielmehr wird bei steigender Anzahl der Altbatterien eine graduelle Umstellung der Demontage stattfinden, die zuerst in einer Erhöhung der manuellen Demontageplätze mit Verkettung der Demontagestationen durch Rollenbahnen stattfindet. Wenn die Voraussetzungen für die Automatisierung erfüllt sind (z.B. Minimierung der Batteriearten oder Modularisierung der Batterien in standardisierte Module und Baugruppen), werden die manuellen Arbeitsplätze nach und nach automatisiert, soweit das möglich ist. Auf Grund der unsicheren Datenlage zu den zukünftigen Batteriesystemen ist es hier nicht möglich, genaue Aussagen bezüglich der benötigten Stückzahlen zu treffen, die die graduelle Veränderung des Demontagesystems nach sich ziehen.

B.1.4 Ausgestaltung der Elemente des Demontagesystems

I+ME hat im Rahmen von *LithoRec* eine Softwarefunktionserweiterung erstellt, die auf dem Mehrmarkendiagnosegerät „MultiDiag“ integriert wurde. Mit dieser Erweiterung und dem ACTIA-Werkstattdiagnose-PC konnte für Batteriesysteme eine erste Systemerkennung, eine Zustandsanalyse und bei Last-/Ladebetrieb eine dynamische Charakteristik abgebildet und protokolliert werden. Diese Diagnosetechnik für Batterien wurde den Projektpartnern vorgestellt. Sie ist eine technische Basis für die Bewertung von Batterien. Die geschaffene Funktionalität ist aber noch nicht ausreichend, um einen Einsatz als komplettes Batteriediagnosegerät für sämtliche Batterietechniken abzudecken, oder um als Zustandstester für die Analyse, Bewertung und Prognose von Lithiumbatterien vollumfänglich einsetzbar zu sein. Erst die Kombination mit Last-/Ladetechnik und ggf. mit Rollenlaufständen sowie die Konfiguration von Prüfprozeduren macht diese Prüfumgebung zur Bewertung von Batterien kompletter. Hauptproblematik ist insbesondere der Zugang zu unbekannten Batterie- und BMS-Systemen und die Vielfalt von Steckerbelegungen sowie Art und Umfang von OBD und CAN Konfiguration (Protokollen). Servicetechniker und Recycler haben darüber hinaus unterschiedliche Informationsinteressen. Der Servicefall erfordert z.B. das Sichern von Fehler- und Garantiedaten, das Diagnostizieren von Defekten und die Bewertung von Reparatur- und Wiedereinsatzfähigkeit. Recyclingfirmen wollen vorrangig Informationen über Systemspannung, Zellenzahl, die Art der Elektrochemie, etwaige Risiken und Sicherheitsprobleme sowie Rückbauinformationen. Fazit: Der Auf- und Ausbau von Batteriediagnosetechnik wird und muss sich weiter fortzusetzen - insbesondere aufgrund einer wachsenden Vielfalt an Batterie- und Systemtechnik. Eine erste ausbaufähige Basisfunktionalität für Batteriediagnose wurde als Prototyp im Rahmen von *LithoRec* realisiert. Abbildung B-13 zeigt das MultiDiag Mehrmarkendiagnosegerät für Fahrzeugtechnik, welches mit einer Batterieanalyse-Basissoftware, für die externe Zustandsbestimmung von großformatigen Lithiumbatterien aufgebaut wurde:

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.



Abbildung B-13: Diagnosegerät Multi-DIAG

Über entsprechende Messungen, Systemprozeduren und Prognoseberichte, könnte die Weiterverwendung von Lithiumbatterien bzw. ein Komponententausch bestimmt werden. Für nicht weiterverwendbare bzw. „nicht reparable“ Batterien verbleiben nur der Systemrückbau und die fachgerechte Entsorgung über einen anerkannten Batterierecyclingweg.

Prüfeinrichtungen zur Erkennung von Restladungen der Batterie:

Prüfeinrichtungen müssen abgestimmt sein auf die jeweilige Batterie. Es werden batteriespezifische Geräte mit abgestimmten Anschlussmöglichkeiten benötigt. Den Recyclingbetrieb erreichen unterschiedliche Batterien aus Elektrofahrzeugen oder Hybridfahrzeugen. Die Batterien sind von verschiedenen Herstellern und weisen unterschiedliche Alterungszustände auf. Ein universelles Gerät zu Prüfung von Restladung existiert nicht und ist Aufgrund der Batterievielfalt nicht zu konzipieren. Darüber hinaus sind die meisten Batterien von außen durch entfernen eines „Disconnectors“ abgeschaltet und ohne Öffnung der Batterie sind auch mit einem handelsüblichen Messgerät weder Spannung noch Stromstärke zu messen.

Eine Aussage über den Ladezustand oder die Messung der Kapazität der Batterien ist daher meist nicht möglich. Hier lässt sich über die ggf. zu messende Spannung nur ein grober Rückschluss auf den Batteriezustand – geladen, defekt – ziehen.

Eine sichere Entladung der Batterie ist nur möglich wenn die Zellen separat an ein Entladegerät angeschlossen sind und einzeln entladen werden. Da dieses aber bedingt, dass die Batterie vollständig demontiert ist und die Zellen einzeln vorliegen, ist die Demontage einer vollständig entladenen Batterie, welches aus Sicherheitsgründen anzustreben ist, derzeit praktisch nicht möglich.

Solange die Zellen oder Zellblöcke elektrisch nicht voneinander getrennt vorliegen, besteht durch die gespeicherte Restenergie eine elektrische Gefährdung für das Demontagepersonal.

Aus diesem Grund ist auf entsprechenden Arbeitsschutz und Schutzkleidung zu achten.

- Tragen von elektrisch isolierender und lichtbogenfester Schutzkleidung (Jacke, Hose) für Arbeiten unter Spannungen nach VDE
- Tragen von elektrisch isolierenden Handschuhen und Schuhen nach VDE

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- Nutzung von isolierten Werkzeugen
- Isolierung von gelösten Verbindungen bis zur endgültigen Demontage der Verbindungen.

Folgende Werkzeuge und Hilfsmittel sind bei der Demontage nötig:

- Pneumatisch oder elektrisch angetriebener Schrauber
- Seitenschneider (möglichst isoliert)
- Kabelschere (möglichst isoliert)
- Bolzenschneider
- Torx- Bit Tx 15, 20, 25,
- Schraubendreher Tx 15 (möglichst isoliert)
- Kreuzschraubendreher (möglichst isoliert)
- Inbus-Bit 4mm, 5mm, 6mm
- Steckschlüssel und Maulschlüssel M6, M8, (möglichst isoliert)
- Montierhebel
- Spannungsprüfer mit Messeigenschaften
- Isolierband/breites Klebeband
- Elektrischer Trennschleifer oder Meißel

Die Demontage der Batterien sollte auf Schwerlasttischen in einer Höhe von mindestens 1 m erfolgen. Für große Batterien ist eine Inseldemontage vorzusehen. Für kleine Batterien (Hybridbatterien) ist eine verkettete Demontage mit Rollenbahnen geeignet.

Ziel in diesem AP für das IWF-TUBS war es eine detaillierte Ausgestaltung eines Elements des Demontagesystems vorzunehmen und prototypisch umzusetzen. Nach der Analyse und Bewertung der manuellen mechanischen Demontage sowie der Demontagereihenfolge erschien es sinnvoll eine Greiferlösung für die automatisierte Handhabung der Batterien zu entwickeln.

In **AS B.1.2** hat die Anforderungserhebung und Konzeptionierung des Greifersystems stattgefunden. Die mechanische Konstruktion, die Auswahl/Auslegung der Steuerungshard- und -software sowie die Programmierung, der Aufbau und die Inbetriebnahme war Gegenstand dieses AS. Die Beschreibung der genannten Entwicklungsschritte erfolgt zusammenfassend anhand der wesentlichen Subsysteme und der Funktionalitäten der Greifvorrichtung. Eine Übersicht sowie maßgebende Einzelkomponenten der Greifvorrichtung sind in Abbildung B-14 dargestellt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

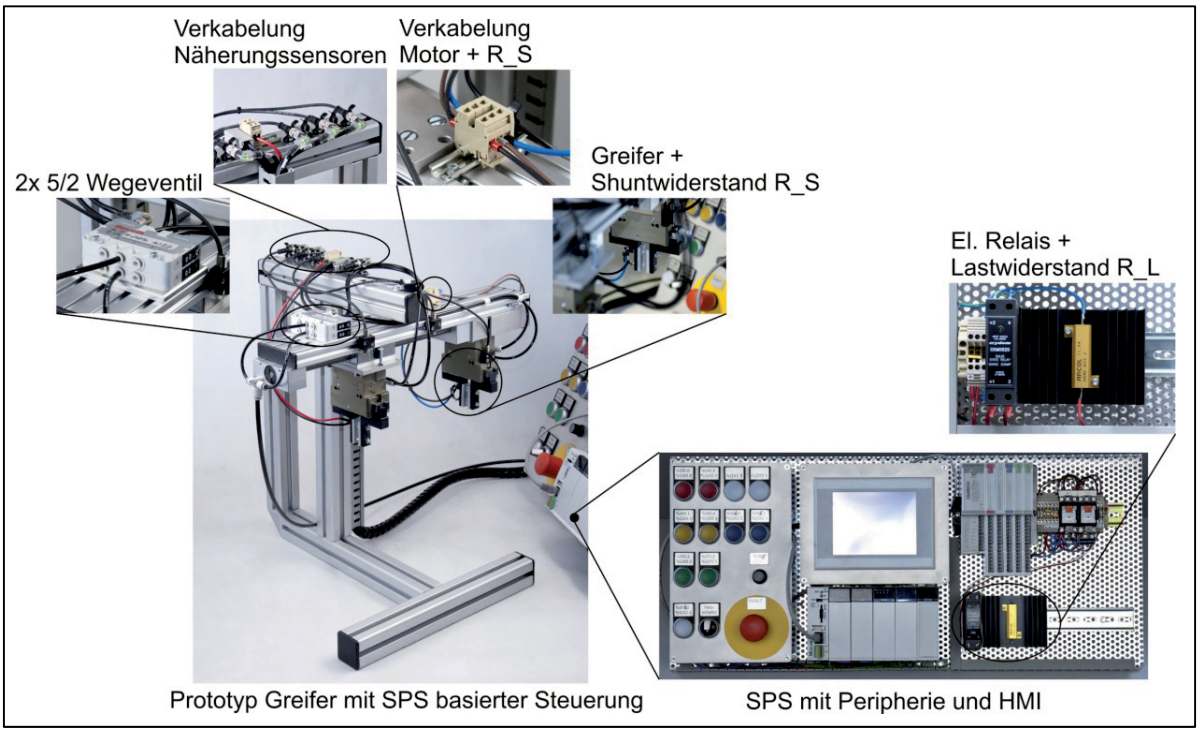


Abbildung B-14: Greifersystem mit einzelnen Subsystemen und Komponenten

Greifersystem

Das Greifersystem besteht aus zwei koaxial angeordneten, pneumatisch betriebenen Parallelbackengreifer der Fa. Schunk. Das Öffnen und Schließen kann durch induktive Näherungssensoren detektiert werden. Beschaltet werden die Greifer durch zwei 5/2 Wegeventile der Fa. Bosch Rexroth. Die Greiferbacken sind aufgrund der integrierten Funktionalitäten und der notwendigen Isolation von der Batterie zum Greifer aus PP hergestellt. Aufgeschraubt ist eine Al-Platte von der auch die elektrischen Leitungen zur Spannungsmessung und zum Messwiderstand (Shuntwiderstand R_S) abgehen.

Antrieb und Linearachse: Zur Verstellung einer Greiferseite wurde eine IGUS Linearachse mit Spindel und Schlitten verwendet. Angetrieben wird diese Achse durch einen DC Motor mit Planetengetriebe.

Trägersystem: Die mechanischen Komponenten sowie die Näherungssensoren zur Positionierung sind an einer ITEM Profilschiene befestigt. Das Gesamtsystem ist ebenfalls an einem Profilschienenaufbau aufgehängt, um den Versuchsbetrieb zu vereinfachen.

Steuerungshardware: Um flexibel gegenüber Systemveränderungen zu sein und um die Möglichkeit zu haben weitere Peripherie zu integrieren wurde eine modulare SPS der Fa. Möller mit digitalen und analogen I/O´s sowie Remote I/O´s verwendet. Zur Prototyperstellung bot sich weiterhin an, ein Schaltpanel zu entwerfen, um Einzelfunktionen zu testen. Als Mensch-Maschine-Interface (HMI) wurde auf dieses Panel ein 5,7`` Touchscreen Display integriert. Der Motor wird über eine Relaisschaltung angesteuert, gleiches gilt für den Lastwiderstand R_L, Hier wurde allerdings aufgrund des kurzzeitig hohen, fließenden Stroms ein elektronisches Relais ausgewählt.

Spannungsmessung und Innenwiderstandsbestimmung: Die Spannungsmessung kann direkt über die 0-10 V Analogeingänge der SPS erfolgen, da dieser Spannungsbereich von einer Lithium-Batteriezelle nicht überschritten wird. Die Umrechnung des Messwerts erfolgt

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

bezogen auf die Auflösung des Analogeingangs (14 Bit). Die Innenwiderstandsbestimmung erfolgt, wie schon erwähnt durch Differenzspannungsmessung über zeitabhängiges Zuschalten eines Lastwiderstands R_L. Der Spannungsabfall wird über einem Shuntwiderstand R_S direkt an der Greiferbacke wiederum über einen Analogeingang der SPS gemessen. Dies verbessert das Messergebnis, da Leitungswiderstände und –längen so weniger Einfluss auf die Messung ausüben.

Software, Bedienkonzept und Visualisierung: Das Greifersystem wird über ein Touchscreen Display bedient. Folgende Funktionsumfänge werden hierbei von der Software bereitgestellt:

- Manuelle Greiferpositionierung
- Manuelles Öffnen und Schließen der Greifer
- Automatische Greiferpositionierung entsprechend der induktiven Näherungsschalter
- Manuelles Aufnehmen der Messwerte
- Automatisches Aufnehmen der Messwerte jeweils bei einem Öffnen-/Schließvorgang der Greifer
- Visualisierung der letzten zehn Messdaten Spannung und Innenwiderstand als Balkendiagramm und farbige Einordnung in verschiedene Bereiche
- Anzeigen des aktuellen Spannungswertes

Die Software wurde entsprechend der DIN 61131 mit der Programmierumgebung CoDeSys erstellt. Das Bedienkonzept wird anhand der Abbildung B-15 verdeutlicht. Screenshots der entwickelten Visualisierung und Bedienung zeigt die Abbildung B-16. Weitere technische Details sind in [Schmitt, 2011] enthalten.

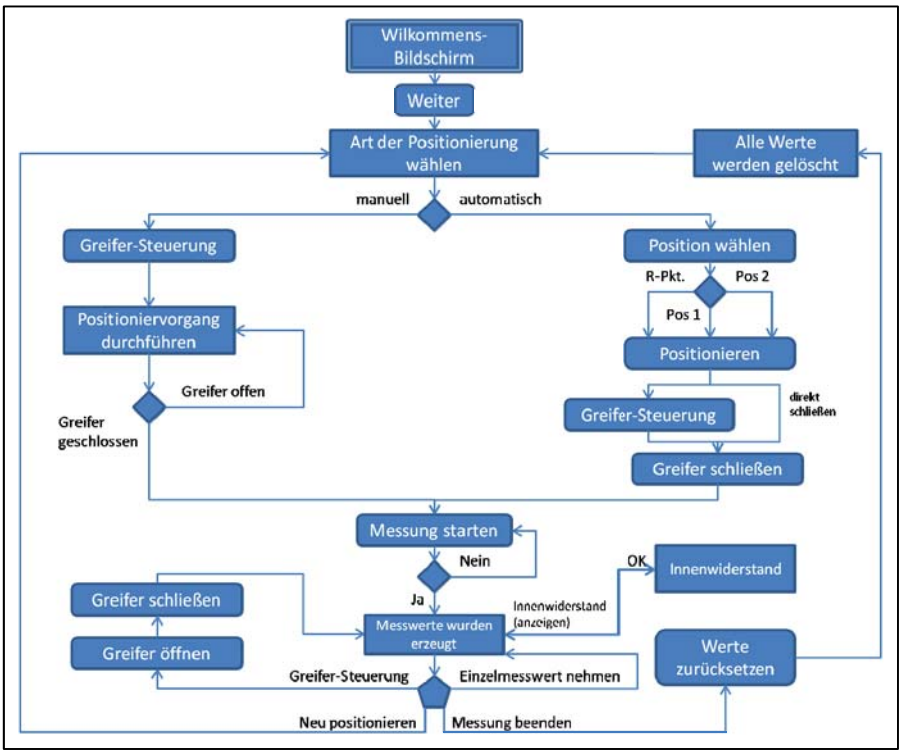


Abbildung B-15: Bedienkonzept des Greifersystems

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.



Abbildung B-16: Screenshots der Visualisierung

B.1.5 Durchführung von Demontageversuchen / Erprobung

Im Projekt wurden Daten und Informationen hinsichtlich der Batteriedemontage strukturiert und analysiert, unter Berücksichtigung von Baugruppen, Vorrangbeziehungen, Kosten, einer Lebenszyklusbetrachtung mit Ökobilanzierung. Diverse Informationen z.B. über Stücklisten und Montageschritte sowie CAD-Zeichnungen hat I+ME im Rahmen von **AP B** mit der TU-BS ausgetauscht. Eine Katalogisierung und Gruppierung von Baugruppen und Batteriekomponenten wurde in gemeinsamen Arbeitsmeetings vorgenommen.

Im Projekt wurde ermittelt, ob Demontagen manuell, teilautomatisiert oder vollautomatisiert durchführbar sind. Die zurück gewonnenen Ausgangsmaterialien (Lithium, Elektrolyte, metallische Trägerfolien) wurden hinsichtlich Wiederverwendbarkeit und Neunutzung zumindest im Laborumfeld bewertet.

I+ME hat im Rahmen des Projektes nicht nur an der Demontage eigens hergestellter Batteriesysteme mitgearbeitet, sondern auch ein unbekanntes Batteriesystem eines Nutzfahrzeugherstellers demontiert.

Dabei war ein externer Zugang zur Zellüberwachungselektronik (BMS) über RS 232 oder CAN am Fremdsystem nicht möglich, und die Demontage von Batteriekomponenten durch Verkleben oder Schweißverbindungen entsprechend erschwert. Die Steckerbelegung war unbekannt und konnte nicht oder nur durch Reverse Engineering zeitaufwendig ermittelt werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Zur Untersuchung der Demontageprozesse wurden unterschiedliche Fahrzeugbatterien demontiert. Die Batteriegewichte lagen zwischen 35 und 220 kg pro Batterie. Die Abmessungen sind sehr unterschiedlich und können bis zu 2 m Länge und bis zu 1,5 m Breite aufweisen. Die Batterien sind für den Einbau im Fahrzeugkofferraum oder als Unterbodenbatterie ausgelegt. Durch die unterschiedlichen Batteriesysteme ist eine vollaustomatisierte Demontage nicht realisierbar. Allerdings sind derzeit mehrheitlich nicht-Serienbatterien im Rücklauf. Daher ist eine Automatisierung der Demontage ggf. bei großen Stückzahlen gleichartiger Batterien ggf. zukünftig möglich.

Handling/Vorbereitung zur Demontage

Abmessung und Gewichte der Batterien erfordern einen Demontageplatz der mindestens von zwei Seiten zugänglich sein muss. Als praktikabel für die großen Batterien hat sich dabei eine Demontageinsel (Arbeitstisch) erwiesen. So hat man die Möglichkeit von allen Seiten an die zum Teil schwerzugänglichen Verschraubungen und Steckverbinder zu gelangen. Für kleine Batterien (z. B. aus Hybridfahrzeugen) ist eine Demontagestrecke z.B. mit Rollenbahne geeignet. Hier kann die Batterie entsprechend gedreht und für den Arbeitsschritt manuell positioniert werden.

Die Batterien sollten auf geeigneten Holz oder Kunststoffpaletten liegend zu den Demontageplätzen transportiert werden. Die Batterien haben nur fahrzeugspezifische Befestigungs- oder Lastaufnahmemöglichkeiten. Dadurch ist der Transport möglichst liegend auf Paletten notwendig. Vor allem bei den großen und schweren Batterien besteht beim Anheben ohne Transportgestell die Gefahr dass die Batterie sich durchbiegt und ein Kurzschluss erzeugt wird.

Demontage

Für die Demontage kommen übliche Werkzeuge zum Einsatz. Eingesetzte Schraubendreher oder Schraubenschlüssel sollten jedoch isoliert sein. Bei Fahrzeugbatterien, die am Unterboden installiert und dort auch Feuchtigkeit ausgesetzt sind, können die Gehäuseschrauben stark oxidiert sein, so dass die Verbindungen zerstörend durch Meißel oder Trennschleifer zu entfernen sind. Grundsätzlich sollten immer zwei Personen die Demontage einer Batterie durchführen. Dies gilt vor allem für die großen Traktionsbatterien, da hier Gehäuseteile so groß sind, dass sie nicht allein entfernt werden können.

Schritt 1: Entfernung des Disconnect-Steckers und Spannungsprüfung

Dieser Schritt sollte bei den Zerlegungen solcher Systeme an erster Stelle stehen. Zum einen werden durch das Entfernen des Disconnector die Stromkreisläufe teilweise getrennt und die Spannung reduziert. Außerdem stehen hier Kontakte zur Verfügung, um die Spannung des Batteriesystems zu messen.

Schritt 2 –Öffnung des Gehäuses

Die Gehäuseteile können mit bis zu 100 Schrauben verbunden sein. Dabei sind Schrauben baulich so nahe an dem Gehäuse das mit Winkelaufsätzen oder sehr langen Verlängerungen gearbeitet werden muss. Angeschraubte Halterungen die der Befestigung im Fahrzeug dienten müssen ebenfalls abgebaut werden da Sie in der Regel durch das Gehäuse mit dem inneren Rahmen verschraubt waren und sich das Gehäuse sonst nicht öffnen lässt. Bei kleineren Batterien sind in der Regel an allen Seiten Schrauben zu öffnen. Die Batterie muss hierbei mehrfach gedreht werden

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Darüber hinaus sind zwischen den Gehäuseteilen Dichtungen eingeklebt. Nach dem Entfernen aller Schrauben können die Gehäuseteile mit Hilfe von Montierhebeln getrennt werden.

Nach Entfernen des Gehäusedeckels liegen die einzelnen Komponenten der Batteriesystems vor. Den Hauptteil bilden die Zellen die in der Regel zu Paketen von bis zu 20 Zellen zusammen gefasst sind und 50 % bis 70 % der gesamten Batteriemasse ausmachen. Je nach Auslegung der Batterie und Größe können über 100 Zellen in einer Batterie enthalten sein. Weiterhin enthält die Batterie 5-8 % des Gesamtgewichtes an Kabeln, Kupferleitungen und Elektronik. Einige Batterien können auch Wasser- oder luftgeführte Kühlsysteme enthalten.

Im Folgenden sind die weiteren Schritte der Demontage aufgeführt. Die Reihenfolge und Vorgehensweise kann aber für andere Bauformen abweichen. Hauptziel ist die Separierung der Zellen und die Trennung der Zellblöcke untereinander um die elektrischen Spannungen im System auf ungefährliche Werte zu reduzieren.

Schritt 3 – Entfernung des Kühlsystems

Ein ggf. vorhandenes Kühlsystem verdeckt Anschlüsse und Verbindungen daher ist dies als erstes zu entfernen. Ein Luftkühlsystem besteht aus gesteckten Kunststoffkanälen und ist in der Regel leicht zu entfernen. Bei einem Flüssigkeitskühlsystem sollten Öffnungen an Rohren für das Kühlwassersystem mit Klebeband oder Stopfen kurzfristig geschlossen werden, damit das Austreten von Restflüssigkeiten in das spannungsführende System nicht zu Kurzschlüssen führen.

Schritt 4 – Lösen der Verbindungen zum Zellkontroller

Jede Zelle hat eine separate Verbindung zum Zellkontroller. Meist sind diese Verbindungen als Stränge für ein Zellpaket zusammengeführt. Werden die elektrischen Verbindungen zum Zellkontroller getrennt so kann dies zu Überspannungen in der Elektronik führen und diese zerstören (Brandgefahr). Um dies zu verhindern ist die richtige Reihenfolge einzuhalten mit der die Verbindungen getrennt werden. Dazu bedarf es aber die genauere Kenntnis des Schaltplans oder mindestens einer Nummerierung der Zellpakete. Werden die Steckverbindungen an den Zellblöcken beginnend mit der höchsten Nummer rückwärts bis zur niedrigsten abgezogen, wird eine Überspannung im Zellkontroller vermieden. Bei den Steckverbindungen handelt es sich um herstellerspezifische Stecker die meist nur mit Spezialwerkzeug zu öffnen sind. Eine Öffnung der Stecker von Hand ist mit Handschuhen schwierig bis unmöglich, daher muss äußerst vorsichtig gearbeitet werden. Sofern die Stecker nicht zu öffnen sind können die Kabel auch durchgeschnitten werden. Allerdings muss dies Aderweise erfolgen sonst wird eine Kurzschluss erzeugt der mindestens das Werkzeug zerstört.

Schritt 5 – Rückbau der Stromkreise

Als nächster Schritt werden die Kupferleitungen die die Zellblöcke verbinden abgeschraubt und dadurch den Stromkreis zu unterbrochen. Freiliegende Enden der Verbindungen sind bis zum endgültigen Ausbau mit Tape zu isolieren. Je nach Anzahl der Zellen pro Zellpaket und der internen Verbindung (in Reihe oder Serienverbindung) kann nun relativ gefahrlos die weitere Zerlegung vorgenommen werden da die Spannung pro Zellpaket nur eine geringe Gefährdung (elektrisch, chemisch) darstellt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Schritt 6 – Entfernung der Zellpakete

Die Zellpakete sind auf unterschiedliche Weise befestigt. Bei einigen Modellen waren die Zellpakete mit Haltespangen fixiert. Zur Entlastung notwendiges Spezialwerkzeug war nicht vorhanden. Daher wurde mit Klebeband die Haltespangen der Zellpakete gesichert und diese mittels Bolzenschneider durchtrennt. Die Pakete konnten nun entnommen werden und je nach anschließender Weiterverarbeitung in einzelne Zellen zerlegt werden.

Schritt 7 – Entfernen der Elektronik

In der Batterie sind elektronische Bauteile wie Steuerplatine und Zellkontroller verbaut. Weiterhin sind eine umfangreiche Verkabelung und Stromschienen der Elektronik untereinander aber auch mit den Zellen vorhanden. Da die Steckverbindungen meist schwer zu lösen sind werden mit einer Kabelschere die meisten Verbindungen getrennt und die Fraktionen entnommen.

Tabelle B-8: Fraktionen nach der Demontage der Batterien

Bauteil	Herkunft/ Material	Anteil [%]	Ca. Wert (€/kg)
Batteriezellen	*Unbekannt bei gebrauchtem Zustand*	50 - 70	
Aluminium	Kühlleitungen/ Gehäuse	1 - 4	1,20
Reststoffe/Abfall	Gummi, Klebeband, Verbinder, Klettverschlüsse	< 1	-0,20
Kunststoffe	Kühlleitungen, Gehäuseteile	0 - 3	0,00
Eisen/Metallteile	Schrauben, Spannfedern	1 - 2	0,15
Kabel	Kabel	2 – 6	1,50
Elektronik	Platinen	2,5 - 3,5	1,00
Stromschienen	Kupfer mit Kunststoff ummantelt	0 - 3	3,80
Eisen	Gehäuse	18 – 44	0,15

Zur Validierung der Greiferfunktionalität „sicheres Greifen verschieden formatiger Pouch-Zellen“ auf der einen und der integrierten Zustandsbestimmung auf der anderen Seite wurden Versuche mit drei unterschiedlichen Zellen durchgeführt. Die Versuchszellen haben unterschiedliche Kontaktabstände und Geometrien. Das Greifen der Batterien mit den zwei Parallelbackengreifern kann als sicher bezeichnet werden, wobei keine Querbeschleunigungen, beispielsweise durch Roboterbewegungen, aufgebracht wurden. Bei der Auslegung des Greifers wurde die Greifkraft aufgrund der unbekannten Einbauverhältnisse der Batteriezellen im Modul bewusst überdimensioniert, so dass eine ausreichende Sicherheit gegeben sein sollte. Optimierungspotenzial bieten die Greiferbacken, die derzeit aus einem Kunststoff mit geringem Elastizitätsmodul bestehen, dies führt bei Greifen zu einer Verbiegung, wenn Kontakte der Batteriezelle einer Dicke > 2 mm gegriffen werden. Hier wird eine Umkonstruktion unter Verwendung des Werkstoffs PEEK angestrebt. Weiterhin kann die Stärke der Aluminiumplatten auf den Greifern reduziert werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Zur Validierung der Funktionalitäten der in-process Zustandsbestimmung wurden beim Greifen der jeweiligen Versuchszelle zehn Werte für die Spannung gemessen. Durch Aufschalten des Lastwiderstandes für 3 sec. und der dadurch resultierende Spannungsabfall wurde der Innenwiderstand bestimmt. Diese Methode kann auch als Differenzspannungsmessung bezeichnet werden. Hier wurden ebenfalls zehn Werte dokumentiert. Die statistische Auswertung der Daten für die drei Pouch-Batteriezellen zeigt eine geringe Standardabweichung (siehe Abbildung B-17) und damit die Robustheit der Methode. Die Daten wurden durch das ELENIA-TUBS in **AP A.4** überprüft.

Nutzen der integrierten Zustandsbestimmung bzgl. Demontage: Motivation der Integration der Spannungsmessung und Innenwiderstandsbestimmung lag bei der schnellen und prozessparallelen Erfassung des Batteriezustands. Als Kennwerte wurden die Zellspannung und der Innenwiderstand gewählt, da diese während eines Handhabungszyklus (< 5 sec.) bestimmt werden kann. Aus den gewonnenen Daten kann eine Vorbeurteilung der Zellen stattfinden, um sie nach der mechanischen Demontage des Batteriesystems zu sortieren. Hierbei können Spannungsbereiche bspw. für die Weiterverwendung der Batterien definiert sowie Rückschlüsse auf die Alterung durch den Innenwiderstand gezogen werden.

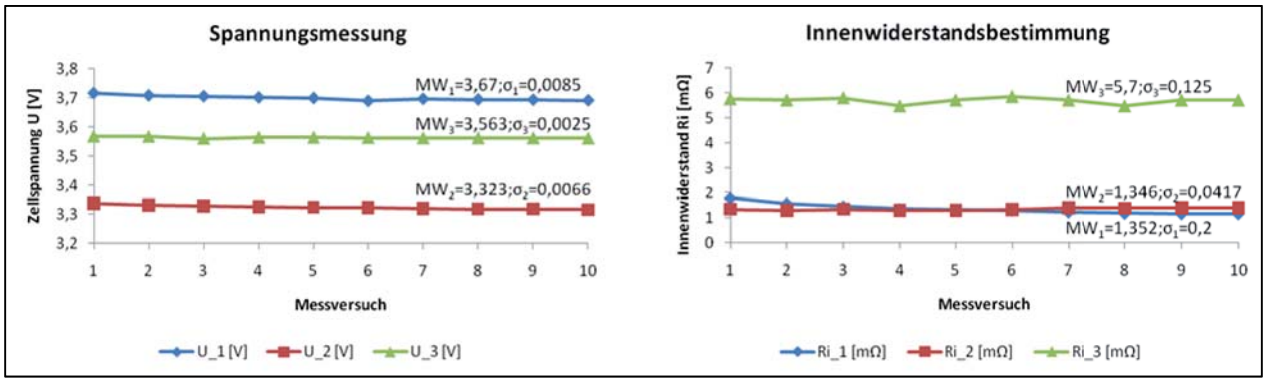


Abbildung B-17: Auswertung der Messungen

Abschließende Bewertung zur Automatisierung der Demontage:

In den vorangegangenen **AS B.1.2** bis **AS B.1.4** sind Konzepte für die (teil-)automatisierte Demontage und die Demontagesystemgestaltung aufgezeigt worden. Wesentliche Hindernisse für einen hohen Automatisierungsgrad seien an dieser Stelle nochmals zusammengefasst, um die Herausforderungen zukünftiger Arbeit im Bereich der Standardisierung und Normung zu verdeutlichen.

Standardisierung und Normung: Der letzte Aspekt zielt auf die Variantenvielfalt in der Demontage ab. Da prinzipiell jedes rückläufige Batteriesystem aufgrund des unbekannten Lebenswegs eine eigene Variante darstellt, die nicht einem einheitlichen Demontageprozess unterliegt, ist die Ausgestaltung von automatisierten Anlagen oft nicht zielführend, da die Stückzahlen für die Amortisation dieser nicht gegeben sind. Weiterhin erhöht sich diese Variantenvielfalt mit der Anzahl der Hersteller, Produktgenerationen und Konstruktion weiter.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Handlungsempfehlungen:

- Standardisierung der geometrischen Abmessungen der Batteriezellen
- Demontagefreundliche Verbindungstechnik.
- Modulare Bauweise
- Zugänglichkeit der Verbindungsstellen
- Verkabelungen minimieren

Umgebungsbedingungen in der Demontage: Die Umgebungsbedingungen in der Demontage erfordern sehr dezidierte Automatisierungslösungen. Staub und Schmutz sowie nicht definierte Lichtverhältnisse verhindern in der Regel den Einsatz von leistungsfähiger Sensorik, wie beispielsweise Kameratechnik. Das automatisierte Erkennen von verschiedene Batteriesystemen oder Positionen einzelner Bauteile ist schwer zu realisieren und somit ist die Etablierung einer durchgängigen Automatisierung massiv beeinträchtigt. Eine Änderung dieser Bedingungen kann nur Stückzahlintensität und eine gewisse Sortenreinheit gewährleistet werden, was wiederum gesonderte Rückführungskonzepte erfordert. Ein anderer Weg sind Systeme, die durch spezielle Verfahren programmiert werden, wie z.B. Teach-In oder Play-back Routinen. Hierbei werden beispielsweise Bewegungsabläufe durch Nachahmen programmiert, die durch die Automatisierungsgeräte anschließend ausgeführt werden. Zwingend erforderlich ist die Gestaltung von Arbeitsabläufen, die manuelle Tätigkeiten sowie (teil-)automatisierte Arbeitsschritte enthalten (hybride Arbeitsplätze), wodurch allerdings der Aspekt der Arbeitssicherheit weitere detailliertere Untersuchungen nach sich zieht.

Handlungsempfehlung:

- Keine „High-Tech-Lösungen“ anstreben, solange die Stückzahlen es nicht zwingend erfordern
- Einsatz von Technik mit Änderungsflexibilität (Bsp. vereinfachte Umprogrammierung)
- Etablierung hybrider Arbeitsplätze

Ausbildungsanforderungen: Automatisierte Produktionslinien erfordern hochqualifiziertes Personal zur Instandsetzung und Wartung der Anlagentechnik. In der Demontage ist manuelle Tätigkeit mit einem eher geringen Ausbildungsgrad und dementsprechendem Lohnniveau vorherrschend, Die Demontagekosten würden durch Einsatz automatisierter Anlagen steigen, da die Verfügbarkeit hinsichtlich der Demontagebedingungen schwer ein zufriedenstellendes Maß erreichen. Selbiges gilt für die (Änderungs-)Flexibilität.

Handlungsempfehlungen:

- Hybride Arbeitsplätze
- Automatisierung mit gesteigertem Fokus auf Flexibilität i. S. v. Umrüstbarkeit
- Automatisierung von einzelnen Recycling-Verfahrensstufen (Zellöffnung u. ä.)

Detailliertere konstruktive Handlungsempfehlungen werden im Folgenden gegeben.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

B.1.6 Ableitung von Anforderungen für eine demontage- und automatisierungsgerechte Batteriegestaltung

Die dabei gemachten Erfahrungen, Empfehlungen und alle Ableitungen wurden den Projektpartnern in den Arbeitsmeetings als Zwischenstand vorgestellt und entsprechend besprochen. Beispielhaft können aufgeführt werden:

- modularer Batteriesystemaufbau
- keine verschweißten Gehäuse
- extern ausgeführte Kommunikationsstecker
- farblich markierte Zellen
- Abstimmung auf Zellformstandard
- Kennzeichnung der Batterien mit grundlegenden Informationen
- Anzeige des Ladezustandes und des Batteriezustandes an der Batterie.
- Vermeidung von unterschiedlichen Schraubverbindungssystemen
- Notwendigkeit zum Gebrauch für Spezialwerkzeug zum Lösen von Steckern oder Trennung von Verbindungen sollte vermieden werden.
- Keine Klebe-, Niet- oder Lötverbindungen von Teilen die für die Demontage getrennt werden müssen.

Die abgeleiteten Anforderungen wurden an die involvierten Projektpartner übermittelt, die diese innerhalb der Unternehmen an die zuständigen Ansprechpartner im Bereich F&E/Produktentwicklung weitergeleitet haben.

Im Rahmen der LithoRec-Öffentlichkeitsarbeit und über die Mitgliedschaft einzelner Projektpartner in der Nationalen Plattform Elektromobilität wurden wichtige Anregungen und Erkenntnisse frühzeitig vorgestellt, kommuniziert und besprochen.

Die Erfahrungen zeigen, dass eine automatisierte Demontage oder Zellentnahme mit den derzeit vorhandenen Batteriesystemen technisch nicht möglich ist. Zum Erreichen der Zellen sind umfangreiche Steckverbindungen, Kühlleitungen und Halteklammern zu entfernen. Die Zellentnahme ist dann nur noch ein unwesentlicher Teil der Arbeit.

Aus der Produktanalyse, die in **AS B.1.1** durchgeführt wurde, ergeben sich Anforderungen an die Demontagefreundlichkeit der Batteriesysteme. So ist eine Vereinheitlichung der der Verbindungsarten (z.B. Schraubverbindungen oder Clipsverbindungen) aber auch der Spezifikationen der einzelnen Verbindungsarten anzustreben. Beispielsweise führt der Einsatz von Innensechskant-Schrauben in Kombination mit Kreuz-Schrauben oder Innenstern-Schrauben zu einem erhöhten Bedarf an Werkzeugwechseln. Dies ist ebenfalls der Fall, wenn gleichartige Schrauben verschiedener Größe einen Werkzeugwechsel notwendig werden lassen. Prinzipiell kann die Aussage getroffen werden, dass in der Produktplanungsphase bereits die

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Grundlagen des Design for Disassembly, Design for Recycling und Design for Environment beachtet werden sollten, damit der Aufwand bei der Demontage der Batteriesysteme möglichst gering gehalten werden kann und somit die Kosten für die Demontage in der gesamten Prozesskette niedrig bleiben. Neben den bereits erwähnten Verbindungsarten sollen hier noch eine möglichst einfache Baustruktur, sowie die Auswahl von möglichst wenig unterschiedlichen Materialien als Beispiele aus dem Design for X genannt werden.

Bezüglich der Automatisierbarkeit lässt sich sagen, dass bereits in der Planung der Batteriesysteme demontageverfahrensbezogene Kriterien, wie z.B. Komplexität einer Demontagebewegung, sicherheitsbezogene Kriterien, wie z.B. Abstand zu einem Potenzial, aber auch teilebezogene Kriterien (z.B. Teilegewicht in kg) und wirtschaftliche Kriterien, hier z.B. die Dringlichkeit der Automatisierung, Beachtung finden sollten. Anhand der Kriterien, die in **AS B.1.2** vorgestellt wurden, können sich dann auch Automatisierungskonzepte, bzw. Teil-Automatisierungskonzepte erstellen lassen.

Die bisherigen Untersuchungen haben auch gezeigt, dass es notwendig sein wird, dass bestimmte Informationen zur Demontage der Batteriesysteme vom Hersteller zur Verfügung gestellt werden müssen. So ist es notwendig, dass Informationen bereitgestellt werden über Schadstoffe, die den Recyclingprozess stören könnten, und Sicherheitsinformationen für die Demontage, wie z.B. die Reihenfolge von zu lösenden Steckverbindungen, um eine Schädigung der Zellen zu verhindern.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

B.2 Aufbereitung und Verwertung von Elektrolyten

Die Aufbereitung und Verwertung des Elektrolyten ist ein wichtiger Bestandteil der Recyclingprozesse von Lithium-Ionen-Batterien und wird in Kooperation des IPC-WWU und des Recycling Unternehmens FRZ durchgeführt. Wertstoffe, die zurückgewonnen werden können, sind Lösungsmittel (EC, DEC) und Leitsalze. Aufgrund der hohen Reaktivität des Elektrolytsalzes gegenüber Wasser (Luftfeuchtigkeit) und der damit verbundenen schwierigen und kostspieligen Handhabung beim Öffnen der Zellen müssen in einem ersten Schritt sichere Öffnungskonzepte entwickelt werden. Hierzu werden vom IPC-WWU zwei alternative Konzepte entwickelt, die neben Sicherheitsaspekten eine anschließende Rückgewinnung der Lithiumsalze (Methodenentwicklung für $LiPF_6$) in einem Destillationsprozess (**AS B.2.3**) mit anschließender Rekristallisation (**AS B.2.4**) sicherstellen. In einem weiteren Schritt wird von IPC-WWU die Prozessentwicklung zur Rückgewinnung der Lithiumsalze und Lösungsmittel untersucht.

B.2.1 Entwicklung von Öffnungskonzepten

Ziel von **AS B.2.1** ist es zunächst, Konzepte zur sicheren Öffnung von Lithium-Ionen-Batterien zu entwickeln, die eine Aufarbeitung und Verwertung des Elektrolyten ermöglichen. Dabei wurden zwei Öffnungskonzepte verfolgt, die optional auch kombiniert werden können:

1. Öffnung unter Inertgasbedingungen

Eine feuer- und explosionssichere Umgebung wird durch das Inertgas realisiert. Jedoch liegt der Elektrolyt als Fluid vor, was das Handling bei der Trennung von Zellgehäuse und Separator-/Elektrodenverbund erschwert und die Ausbeute bei der Elektrolytrückgewinnung mindern kann.

2. Öffnung unter tiefgekühlter Atmosphäre

Die Batteriesysteme werden vor dem Öffnen auf ca. -60 °C abgekühlt, um stark exotherme Reaktionen (Feuer-, Explosionsgefahr) zu unterbinden. Anschließend werden die abgekühlten Batterien geöffnet und das Gehäuse von den anderen Batteriekomponenten (Elektroden, Separator, Elektrolyt) getrennt.

Abschließend sollen diese zwei Konzepte miteinander kombiniert werden, um eine möglichst optimale Rückgewinnung zu realisieren.

Die zu öffnende Zelle wird mit Hilfe eines Widerstandes in der IPC-WWU entladen.

Einige Zellen wurden tiefentladen, um sie auf eventuell auftretende Kupferabscheidungen auf der Kathode zu überprüfen. Mittels ICP-OES (Induktiv gekoppeltes Plasma – Optische Emissionsspektrometrie) konnte kein Kupfer in den entsprechenden Materialien nachgewiesen werden. Die entladene Zelle wird dann in eine Glove-Box eingeschleust. Für die weitere Zerlegung der Zelle ist, vor allem im Hinblick auf Sicherheitsaspekte sowie die Aufarbeitung des Elektrolyten, wichtig das in der Zelle vorhandene Leitsalz möglichst vollständig zu entfernen. Zu diesem Zweck werden mit Hilfe einer Kanüle ca. 25 ml Dimethylcarbonat injiziert. Das injizierte Dimethylcarbonat wird durch Bewegen der Zelle (15 Minuten) verteilt. Anschließend kann die Lösung mit einer Spritze abgezogen und für weitere Arbeitsschritte in

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

luftdichte Probengefäße verbracht werden. Nach dem Ausschleusen der Zelle kann diese mit geeignetem Werkzeug geöffnet werden.

Der Elektroden-Stack wird durch einen U-förmigen Einschnitt, bei dem die Stromableiter unberührt bleiben, freigelegt. Nach dem Freilegen des Stacks können die Stromableiter nahe der Elektroden-Stacks nacheinander durchtrennt werden.

Hierbei ist darauf zu achten, dass zum einen die Stromableiter der Anode und Kathode nicht gleichzeitig durchtrennt werden und zum anderen, dass bei dem Durchtrennen der Elektroden-Stack nicht beschädigt wird und so ein Kurzschluss entstehen kann. Nun kann der Elektroden-Stack entnommen und in die Einzelkomponenten zerlegt werden (siehe Abbildung B-18).



Abbildung B-18: Elektroden-Stack (IPC-WWU)

Die Öffnungskonzepte für den Labormaßstab wurden an über 100 Zellen fortlaufend optimiert. Weiterhin wurde die Öffnung auch in einer Glovebox unter Inertgas durchgeführt. Diese Methode zeigte die gleichen Ergebnisse wie die Öffnung in einem Abzug. Die Öffnung unter tiefgekühlter Atmosphäre wurde so getestet, dass Zellen mit flüssigem Stickstoff gefroren wurden und dann entweder unter Inertgas Atmosphäre in der Glovebox oder in einem Abzug geöffnet wurden. Für den Labormaßstab hat sich aber gezeigt, dass die Öffnung unter tiefgekühlter Atmosphäre völlig ausreichend ist. Plötzliche Entzündungen des Materials etc. können schnell und unkompliziert mit flüssigem Stickstoff gelöscht werden.

B.2.2 Trockenlegung der nassen Batteriezelle

Ein wesentlicher Aspekt dieses Arbeitsschrittes ist die Ausbeute bei der anschließenden Elektrolytrückgewinnung. Die zu entwickelnden Konzepte für die Trockenlegung der nassen Batteriezelle sollten darauf abzielen unter Berücksichtigung der Sicherheitsaspekte eine Zersetzung des Elektrolyten zu verhindern, um so beim anschließenden Aufarbeitungsprozess eine möglichst hohe Ausbeute zu erzielen.

Die zuvor getrennten Einzelkomponenten (**AS B.2.1**) werden nochmals mit Dimethylcarbonat gewaschen und anschließend getrocknet. Die Trocknung wird durch Lagerung in einem Ab-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

zug bzw. einer Glovebox erreicht, die für diese Zwecke völlig ausreichend war. Für den Transport wurden die einzelnen Komponenten vakuumverpackt.

B.2.3 Prozessentwicklung eines geeigneten Destillationsverfahrens für die Elektrolytrückgewinnung

Zentraler Augenmerk wird in **AS B.2.3** auf die Rückgewinnung der wertvollen Lithiumsalze des Elektrolyten gelegt. Das IPC-WWU etabliert zu diesem Zweck in einem ersten Schritt einen Destillationsprozess zur schonenden Destillation des Elektrolyten. Das FRZ prüft die Etablierung des Destillationsprozess in der Praxis und gewinnt mit einer auszuwählenden und zu installierenden, geeigneten flüssigen Abscheidungsmethode erste Elektrolytflüssigkeiten zurück. Die Auswahl und Eignung des zu beschaffenden Geräts erfolgt auf Basis der Ergebnisse des IPC-WWU. Der im Separator/Elektrodenverbund enthaltene Elektrolyt wird bei erhöhter Temperatur im Vakuum entfernt, in einer Kühlfalle gesammelt und durch Destillation zurück gewonnen. Der vom IPC-WWU zu entwickelnde Destillationsprozess und die anschließende Rekristallisation soll durch FRZ auf die technische Realisierbarkeit mit Hilfe von Kondensatabscheidern zum Sammeln der Flüssigkeiten untersucht werden. Die unterschiedlichen Verfahren müssen von FRZ mit Know-how Input des IPC-WWU anhand der technischen Realisierbarkeit, der erzielten Ausbeuten, der eingesetzten Materialien und ihrer Energiebilanz verglichen und bewertet werden.

Die Destillationsergebnisse zeigten, dass sich in allen Fraktionen weiterhin das Leitsalz wieder findet. Die Untersuchungen wurden mit dem induktiv gekoppelten Plasma mit optischer Emissionsspektroskopie durchgeführt.

Weiterhin setzte aufgrund der Temperatur eine Zersetzung des Leitsalzes und der organischen Carbonate (Zerfall in z.B. EMC, siehe Abbildung B-19) ein.

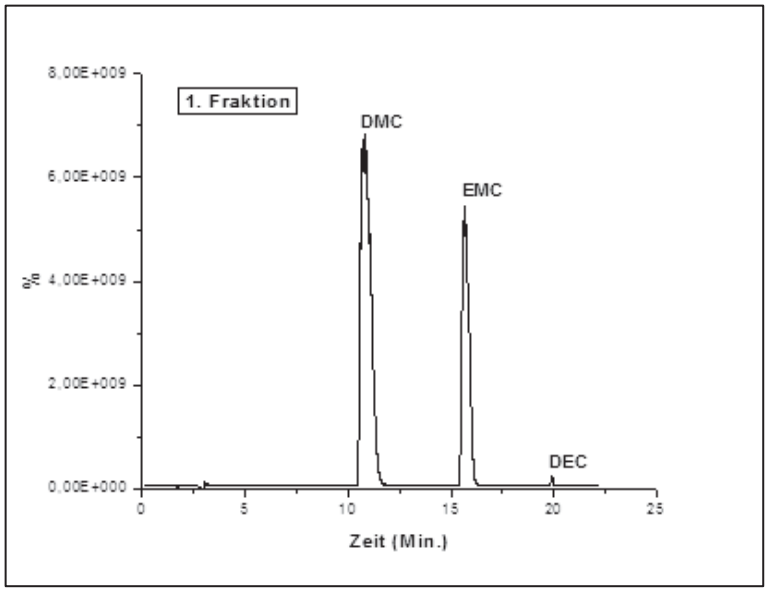


Abbildung B-19: Untersuchung der 1. Fraktion des Destillationsprozesses mittels GC-MS (IPC-WWU)

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Zusätzlich konnten die verschiedenen organischen Carbonate nicht vollständig voneinander mittels der Destillation getrennt werden, was in Abbildung B-20 deutlich wird.

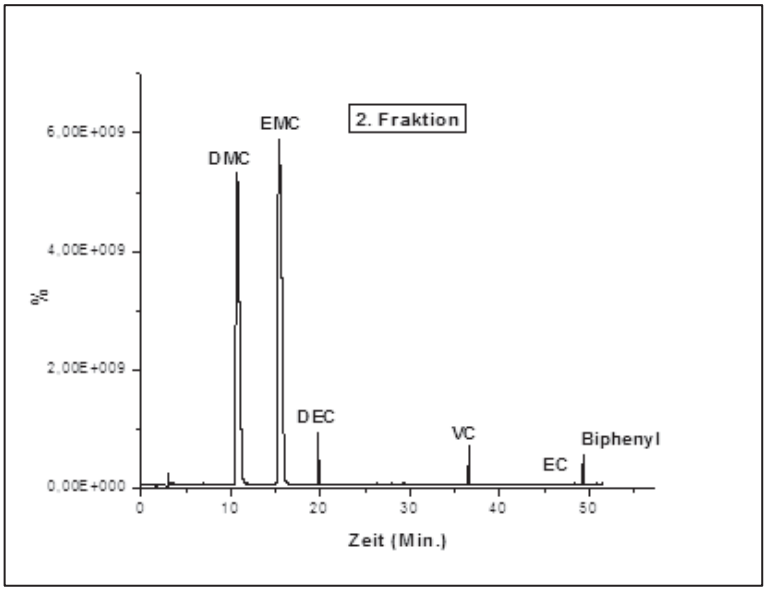


Abbildung B-20: Untersuchung der 2. Fraktion des Destillationsprozesses mittels GC-MS (IPC-WWU)

Daher muss das Destillationsverfahren für die Elektrolytrückgewinnung genauer betrachtet und parallel nach entsprechenden Alternativen gesucht werden. Die Extraktion mit überkritischem CO_2 bietet sich als viel versprechende Alternative an und erste Tests im Rahmen des Projektes waren viel versprechend.

B.2.4 Prozessentwicklung der alkalischen Rekristallisation der Leitsalze

Es ist bekannt, dass das chemisch sehr verwandte Kalium Hexafluorophosphate (KPF 6) aus heißen alkalischen Lösungen rekristallisiert werden kann. Daher werden in **AS B.2.4** zwei wesentliche Prozessschritte zur Rekristallisation von LiPF 6 aus dieser Lösung untersucht. Dies sind:

- Herauslösen des LiPF 6 mittels heißer alkalischer Lösung
- Rekristallisation des LiPF 6

Da das Leitsalz nicht per Destillationsverfahren (**AS B.2.3**) vom Elektrolyten getrennt werden konnten, wurde auf den Schritt der Rekristallisation verzichtet, da die vorherige Zersetzung des Leitsalzes eine Rekristallisation sowie Aufreinigung obsolet macht.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

B.3 Mechanische, thermische und chemische Aufbereitung der Einzelkomponenten

B.3.1 Demontage der trockenen Zellen und Sortieren

Am IPAT-TUBS wurden zur wissenschaftlichen Begleitung der EC exemplarische Zellen manuell zerlegt, um die Zusammensetzung der einzelnen Zellen zu bestimmen. So wurden die Massenanteile des Elektrolyten, der Kupferfolie, der Aluminiumfolie, der Kathoden- sowie der Anodenbeschichtung, des Separators und weiterer Zellbestandteile, wie beispielsweise der Zellhülle bestimmt.

Die Zellen müssen dazu zunächst auf elektrische Ladung überprüft und ggf. entladen werden. Beim Handling von Elektrolyt, bestehend aus leicht brennbaren und teilweise reizenden Lösungsmitteln, bspw. Mischungen aus Diethylcarbonat, Dimethylcarbonat und Ethylencarbonat, sowie dem Leitsalz Lithiumhexafluorophosphat sind Sicherheitsmaßnahmen wie das Tragen von Arbeitsschutzkleidung, einer Schutzbrille, Butylkautschuk-Handschuhen und die Verarbeitung unter einem geeigneten Abzug zu ergreifen. Des Weiteren ist das Entstehen von Funken beim Öffnen der teilweise recht solide gearbeiteten Zellhüllen zu vermeiden, da sich das leicht brennbare Elektrolytlösungsmittel sonst entzünden könnte.

So ergab sich schnell, dass eine händische Zerlegung und damit ein mögliches händisches Demontieren und Sortieren der Zellen unter Beachtung der Sicherheitsmaßnahmen, wirtschaftlich nicht erstrebenswert ist. Zur realistischeren Betrachtung der Zerlegeprozesse wurde, wie von EC beschrieben, die vorhandene Aufbereitungstechnik eingesetzt.

Dabei konnte nach einer Grobzerkleinerung einer Rotorschere der Separator über Windsichtung abgetrennt werden. Über weitere Feinzerkleinerung in einer Schneidmühle konnten dort ca. 80 Gew.-% der Elektrodenbeschichtung abgetrennt werden. Zur Rückgewinnung der restlichen 20 % müssen die Erkenntnisse aus dem nachgeschalteten **AP B.3** Anwendung finden. Eine komplette sortenreine Trennung von Beschichtung und Trägerfolien ist so industriell anwendbar möglich.

B.3.2 Aufbereitung und Verwertung von Zellgehäuse, Separator und metallischen Komponenten

Maschinelle Zellzerlegung:

Für die maschinelle Zellzerlegung wurde eine Doppelrotorschere verwendet. In dieser Maschine werden Materialien durch schneidende Beanspruchungen zerkleinert. Das Schneidwerk dieser Maschine ist langsam laufend, wodurch sich der Verschleiß in Grenzen hält.

Die Demontageversuche erfolgten mit kompletten Batteriezellen, welche zuvor auf unter 3V entladen wurden. Die Zellen wurden einzeln in die Doppelrotorschere gegeben. In der Zerkleinerungsmaschine wurden die Zellen durch die Schneidbeanspruchungen in Stücke zertrennt, deren Korngröße im Bereich von 1 bis 8 cm liegen. Weiterführend kann das nun vorliegende Gemisch aus Elektrodenfolien, Gehäuseteile, Separator und Elektrolyt getrocknet werden und an die Folgeprozesse weitergegeben werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Aufbereitung und Verwertung von Zellgehäuse, Separator und metallischen Komponenten

Dieser Arbeitspunkt des Projektes beschäftigt sich mit der Aufbereitung der demontierten Komponenten, wie Zellgehäuse, Separator, metallische Kontaktkomponenten und Dichtungsmaterialien.

Der Verbund aus Stromsammler und Elektrodenbeschichtung (Elektrode, Anode und Kathode) soll dabei als Ganzes oder in bereits zerkleinerten Stücken an die Arbeitsschritte **AS B.3.3** bis **AS B.3.6** zur weiteren Aufbereitung übergeben werden. Hierzu wurde von EC der Einfluss unterschiedlicher Zerkleinerungstechniken und Zerkleinerungsgrade auf die nachfolgenden Prozesse geprüft. Das allgemeine Ziel ist die Aufbereitung und Rückgewinnung der Aktivmaterialien sowie die Gewinnung einer möglichst reinen Kupfer- und Aluminiumfolie. Die von EC durchgeführten Versuche zur Aufbereitung von Lithium- Ionen- Batterien erfolgten mit, zuvor demontierten und trocken gelegten Batteriezellen. Ziel dieser Aufbereitungsversuche war eine Separierung der Aktivmaterialien sowie die Gewinnung einer möglichst reinen Kupfer- und Aluminiumfraktion. Für diese Versuche wurden verschiedene Zerkleinerungstechniken sowie Sieb- und Dichtesortierverfahren eingesetzt.

Aufbereitungsversuche:

Zerkleinerungsversuche erfolgten zunächst mit kompletten Batteriezellen (Pouchzellen) in einer Laborschneidmühle mit einem 10 mm Siebkorb. Nach der Zerkleinerung hatte das Mahlgut eine Partikelgröße von kleiner 10 mm.

Die Auswertung zweier Zerkleinerungsschritte und Siebungen in Verbindung mit Separationstechniken ergab eine Rückgewinnung des Aktivmaterials von ca. 40 % der Aufgabemasse. ca. 53 % lagen als Kupfer- und Aluminiumfraktion vor und ca. 7 % bildeten die Fraktion des Separatormaterials. Kupfer- und Aluminiumpartikel liegen nun noch als Gemisch vor. Die Oberflächen dieser Metallfolienpartikeln sind teilweise noch mit Aktivmaterial und Graphit beschichtet, wodurch die Trennung in eine saubere Aluminium- und Kupferfraktion erschwert wird. An dieser Stelle sollte eine weitere Nachreinigung der Metallpartikel erfolgen (IPAT-TUBS), wobei die Aktivmaterial- und Graphitbeschichtung abgetragen wird und saubere Aluminium- und Kupferpartikel zurück bleiben.

Das Gemisch aus sauberen Aluminium- und Kupferfolienpartikel lässt sich dann mit Hilfe von Dichtesortierverfahren sortenrein trennen. Die dann vorliegenden Metallfolienpartikel (Al, Cu) müssen für den weiteren Einsatz in der Rohstoffindustrie in eine geeignete Form gebracht werden. Die Folienpartikel müssen mit Hilfe einer Brikettierpresse zu Materialpartikeln mit definierter Form und Größe gebracht werden. Nur so ist es möglich, diese Metalle in einem Schmelz- oder Hochofenprozess einzusetzen.

Weitere Aufbereitungsversuche wurden mit zuvor in einer Doppelrotorschere demontierten und trocken gelegten Batteriezellen durchgeführt. Hierbei wurden Zellen mit massiven Gehäusen (Fe, Al) und Anschlusskontakten verarbeitet. Der erste Schritt bei der Aufbereitung dieser Zellen bestand darin, die zerkleinerten Gehäuseteile und Anschlusskontakte aus dem übrigen Gutstrom auszuschleusen. Dieser Schritt ist nötig, da diese stabilen, massiven Teile die Siebeinsätze der nachfolgenden Zerkleinerungsaggregate beschädigen würden. Die Gehäuseteile wurden entweder mit Hilfe eines Magneten (Fe- Gehäuse) oder mittels Schwerteilaustrag durch Querstromsichtung (Al- Gehäuse) aus dem übrigen Gutstrom ausgetragen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Das dann vorliegende Materialgemisch aus Aluminium- und Kupferfolienpartikeln mit Aktivmaterialbeschichtung sowie Separatormaterial und einige Isolationsummantelungen wurden ebenfalls auf der oben beschriebenen Weise weiter verarbeitet. Aus diesem Material konnte ebenfalls eine große Menge Aktivmaterial separiert werden und eine saubere Aluminium- und Kupferfolienfraktion erzeugt werden.

Es wurden unterschiedliche Zelltypen (Rundzellen, Prismatische-Zellen, Pouchzellen) verarbeitet. Nach den vorliegenden Ergebnissen beträgt die durchschnittliche Ausbeute bezogen auf die Gesamtmasse (incl. Elektrolyt) der Zellen:

Kupfer	ca. 11 %
Aluminium	10 -15 %
Beschichtungsmaterial von Anode und Kathode	ca. 50 %
Eisen (nur bei Eisenummantelten Zellen)	10 %
Abfall (Separator, Kunststofffolien)	ca. 3 %

B.3.3 Verfahrensentwicklung der trockenen Separation der Aktivmaterialien vom Stromsammler

AS B.3.3 befasst sich mit der Entwicklung von Verfahren zur Separation der Beschichtungsmaterialien, welche die Wertkomponenten Co, Ni und Li in Lithiummetalloxiden enthalten, von den Stromsammlerfolie (Al, Cu). Eine Trennung von Stromsammlerfolie und Aktivmaterial ist für die folgende hydrometallurgische Aufarbeitung des Aktivmaterials essentiell, da die Al-Stromsammlerfolie sich wie die Aktivmaterialien in saurem Milieu löst und somit den Aufarbeitungsprozess entscheidend stört. Da während der maschinellen Öffnung und Separation der Batteriezellen das Aktivmaterial nicht komplett von den Stromsammlerfolien abgetrennt wird, ist es von großer Bedeutung den Separationsschritt von Aktivmaterial und Stromsammlerfolie noch einmal getrennt zu untersuchen.

Trockene Separation

Für die Parametrisierung wurde auf Grund der Ergebnisse eines Verfahrens-Screenings die Prozessierung mit der Schneidmühle gewählt. Variiert wurden die Prozess- und physiochemischen Parameter wie Rotorumfangsgeschwindigkeit, Rotorausführung (Scheiben- und Schnittrotor), die Temperierung des Prozessraumes (Kühlung) und die Vorbehandlung des Mahlgutes durch Trocknung oder Kühlung durch CO_2-Schnee. Außerdem wurde ein weiterer Prozessschritt zur Desagglomeration in die Prozesskette des Recycling aufgenommen, der eine direkte Fertigung von Elektroden aus den recycelten Materialmischungen (insb. nicht zyklisierter Elektrodenausschuss aus der Produktion) und damit eine direkte Weiterverarbeitung des abgelösten Beschichtungspulvers ermöglicht. Das entwickelte Verfahren ist für alle in LithoRec zu untersuchenden Elektrodentypen (zyklisierte-, nicht zyklisierte- und Ausschusselektroden) geeignet und wird im Folgendem gemäß Arbeitsplan für weitere Produkte angewendet.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

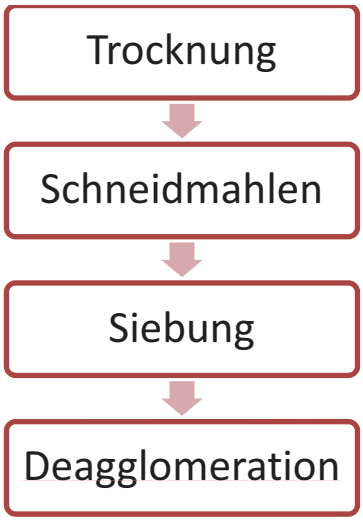


Abbildung B-21: Prozessfließbild der Trockenen Separation

Einer Trocknung der mit Elektrolytlösungsmittel befeuchteten Elektrodenstücke bei moderaten Temperaturen folgt ein Mahlschritt in einer Schneidmühle. Getrennt werden Stromsammlerfolie und Beschichtungspulver durch Siebklassierung. Die erhaltenen Pulver werden im Anschluss in einer Prallmühle desagglomeriert.

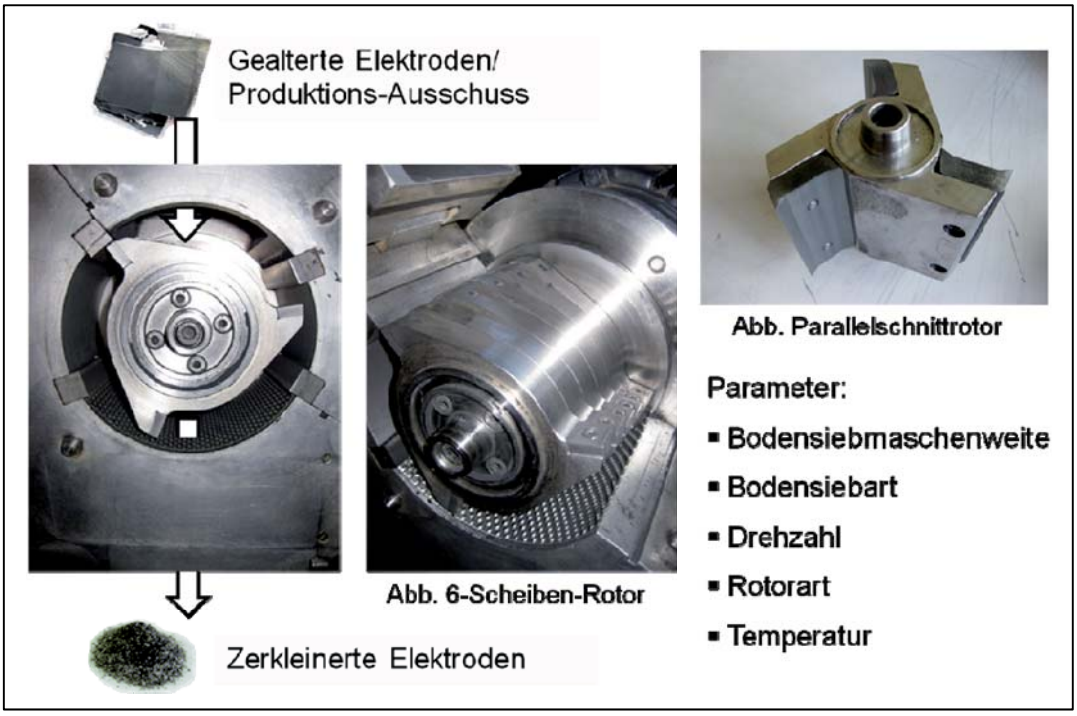


Abbildung B-22: Mechanische Separation in der Schneidmühle

Einfluss der Rotorumfangsgeschwindigkeit u

In Abbildung B-23 ist der Anteil der Feinfraktionen nach Siebung des Schneidmahlgutes des Elektrodenausschusses in Abhängigkeit von der Rotorumfangsgeschwindigkeit aufgetragen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

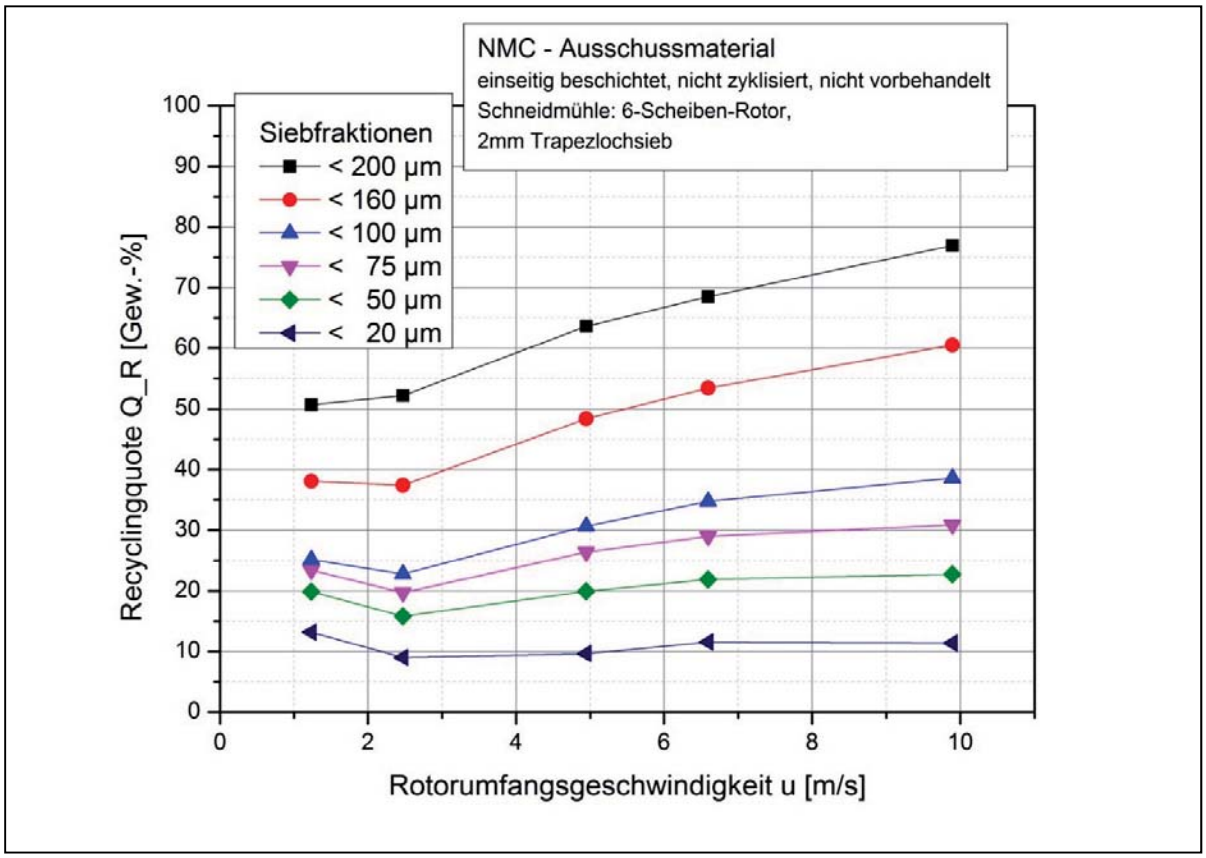


Abbildung B-23: Anteil der Feinfraktionen nach Beanspruchung in Schneidmühlen bei variierter Rotordrehzahl für die Klassierung (Siebung) bei verschiedenen Trennkorngrößen (6-Scheiben-Rotor, 2mm Trapezlochsieb)

Eine Analyse der Feinfraktion mittels Atomabsorptionsspektrometrie ergab, dass die abgelöste Beschichtung 99 % der Feinfraktion ausmacht. Es ist ersichtlich, dass sich der Anteil der Feinfraktion mit zunehmender Drehzahl erhöht. Aus diesem Grunde wurde für weitere Versuche zunächst die mit der Schneidmühle maximal mögliche Umdrehungszahl gewählt. Für diesen Prozessparameter zeigten sich nach Untersuchungen des Aluminiumgehalts variierende Gehalte in der Feinfraktion x < 200 µm. Es wurden Massenanteile zwischen 0,7 wt-% und 1,0 wt-% mittels Atomadsorptionsspektroskopie (AAS) ermittelt. Da mit der Erhöhung der Rotordrehzahl der Feinfraktionsanteil und damit die Recyclingquote steigt, die Aluminiumverunreinigung sich jedoch nicht simultan erhöht, ist für noch folgende Untersuchungen eine Erhöhung der Schneidmühlendrehzahl interessant.

Beurteilung des trockenen Recyclingverfahrens

Das eingeführte Verfahren zur mechanischen Separation ist mit geringem apparativem Aufwand und geringen laufenden Kosten im großtechnischen Maßstab zu verwirklichen. Zudem gelangen Recyclingquoten von bis zu 91 Gew.-% der auf den dem Prozess zugeführten Elektroden befindlichen Beschichtungsmasse. Eine weitere sich derzeit in der Patentierung befindliche Prozessvariante erreicht eine sortenreine Abtrennung von über 99 Gew.-% des kathodischen Aktivmaterials. Auf der einen Seite werden Maßnahmen zum Schutz vor Staub und zu dessen Beseitigung eingerichtet werden müssen. Auf der anderen Seite werden im trockenen Prozess keine zusätzlichen Lösungsmittel gebraucht, welche Personen- und Umweltschutzmaßnahmen erfordern, gegebenenfalls energieintensiv wieder abgetrennt werden müssten oder das Zwischenprodukt verunreinigen würden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Aluminiumkontamination ist für die direkte und erneute Verarbeitung zu Elektroden laut den Ergebnissen aus **AP C.3** nicht (Verwertung von Elektrodenausschussmasse) hinderlich. In dem von der CM entwickelten hydrometallurgischen Recyclingprozess werden Konzentrationen > 1 Gew.-% auf Grund potentieller Knallgasbildung als kritisch eingestuft. Des Weiteren beeinflussen Aluminiumverunreinigungen den Prozess der Neusynthese von Aktivmaterialien aus Übergangsmetallsalzlösungen bei der HCST negativ. Auf dieser Basis können die Prozesse bzw. die Recyclingstrategie gezielt parametriert und so der maximal tolerierbare Aluminiumgehalt für die beiden Verwertungstypen eingestellt werden. Unter Umständen wird in Folge dessen ein weiterer oder zur Siebung alternativer Abtrennschritt gewählt, welcher weitere Investitions- und Betriebskosten nach sich ziehen kann. Dieser Prozess befindet sich in der Patentierung und gewährleistet eine Herabsetzung der Kontamination mit Folienpartikeln auf unter 0,1 Gew.-%. Unter der Annahme, dass das rekonditionierte Pulver (Ausschussware) einer direkten Verarbeitung zu Elektroden – mit oder ohne anschließender Zugabe von inaktiven Elektrodenkomponenten– zugeführt werden kann, wäre der Prozess des Recyclings der unzyklisierten Ausschussmaterialien wirtschaftlich, da Einnahmen von 55 €/kg NMC multipliziert mit dem NMC-Gehalt des wiedergewonnen Pulvers überschaubaren Kosten gegenüberstehen würden.

Auch als vorbereitender Schritt zur hydrometallurgischen Prozessierung ist ein Separationsschritt, welcher Beschichtung und Stromsammlerfolien zu > 99% sortenrein trennt elementar. Neben der erhöhten Ausbeute im Bereich des Aktivmaterials, erhöht sich die Effektivität späterer Prozessschritte da metallische Verunreinigungen auf diesem Wege später nicht aufwendig abgetrennt werden müssen. Des Weiteren kann reines Aluminium wieder aufgearbeitet werden und der Kupfer auch ohne Verunreinigungen weiterverarbeitet werden.

Auch der Schritt der Separation zyklisierter Beschichtungsmaterialien von dem Stromsammler ist als einzelner Prozessschritt in Großmaßstab durchführbar und kann daher wirtschaftlich gestaltet werden. Entscheidend für den Prozess des konzeptionellen Batterierecyclings sind somit die vorgelagerten Schritte, insbesondere die Demontage von Batteriesystemen, -modulen und Zellen bis auf Zellkomponentenbasis.

Als Basis für diesen AS dienten Ergebnisse aus Vorversuchen zu Extraktionen von käuflich erworbenem NCA und LFP. Diese Grundlagen wurden auf die innerhalb dieses AS von IPAT-TUBS zur Verfügung gestellten Arbeiten übertragen und weiter ausgearbeitet.

Schwerpunkt dieses AS war die Analyse und Prüfung der Verwertbarkeit der vom IPAT-TUBS zur Verfügung gestellten Kathodenmaterialien mittels hydrometallurgischer Methoden.

Als Kathodenmaterialien kam NMC aus formierten Zellen und als Ausschussware in Form des auf dem Aluminiumstromableiter applizierten NMC sowie LFP aus zyklisierten Zellen zum Einsatz. Die Materialien wurden im Rahmen dieses AP mittels Schneidmühlen- und Siebprozessen gewonnen. Die Eingangsmaterialanalysen wurden vom analytischen Labor der Chemetall durchgeführt. Schwerpunkt der Analysen war insbesondere der Aluminiumgehalt und die generelle chemische Zusammensetzung der Materialien. Hierdurch war es unter anderem möglich, auch Querkontaminationen des Kathodenmaterials, beispielsweise durch Werkzeugabrieb während des Schneidmühlenprozesses, festzustellen. In weiterführenden Arbeiten wurden die Kathodenmaterialien mittels saurer, oxidativ bzw. reduktiv wirkender Medien hydrometallurgisch aufgearbeitet und die zurück gewonnene Menge an Lithium analysiert.

Nach der Extraktion der Materialien wurde die Aufarbeitung der Extraktionslösungen mittels Fällungsreaktionen geprüft, um im Anschluss vorgereinigte Lithiumsalzhaltige Lösungen zu

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

erhalten, die als Basis für einen späteren Ionenaustausch zur Erzeugung hochreiner Lösungen geeignet sein müssen.

Der AS lieferte CM somit wichtige Erkenntnisse über die hydrometallurgische Prozessierbarkeit mit nachfolgender Aufarbeitung der zur Verfügung gestellten Materialien; gleichzeitig dienten die Ergebnisse dem IPAT-TUBS als unverzichtbarer Hinweis zur zielgerichteten Fortführung der Arbeiten an der trockenen Separation der Aktivmaterialien vom Aluminiumstromableiter.

B.3.4 Verfahrensentwicklung der nassen mechanischen Abtrennung der Elektrodenbeschichtungen vom Stromsammler und deren mechanische Trennung

Die nasschemische Abtrennung der Elektrodenbeschichtungen basiert auf der Auflösung der Verbundstruktur der Beschichtung durch die Lösung des Binders Polyvenylidenfluorid (PVdF) in dem Lösungsmittel N-Methyl-2-pyrrolidon (NMP). Im Gegensatz zum Einbringen mechanischer Energie bei der rein-mechanischen Separation wird hier die chemische Lösungsreaktion als Verfahrensprinzip eingesetzt.

Im Arbeitsschritt zur Verfahrensentwicklung der nasschemischen Abtrennung der Elektrodenbeschichtungen vom Stromsammler und deren mechanische Trennung wurde ein Verfahren zur Abtrennung entwickelt, elementare Beobachtungen zum Prozess wurden gemacht und Verfahrensparameter, wie Wahl eines Lösungsmittels, Temperatur, Vorlagestückgröße, Rührerumfangsgeschwindigkeit und Trennkorngröße, identifiziert und variiert. Die separierte Beschichtung wurde einerseits nach weiterer Aufbereitung in **AS B.3.5** durch iPAT-TUBS zur weiteren hydrometallurgischen Prozessierung in **AP B.4** an die CM übergeben und andererseits in **AS C.3.3** von iPAT-TUBS und LTA als rekonditioniertes Material eingesetzt. Beide Prozesswege waren erfolgreich.

Der am iPAT-TUBS entwickelte nasschemische Prozess setzt sich aus den Abbildung B-24 dargestellten Prozessschritten zusammen. Zunächst wurden die Elektroden grob vorgeschnitten, damit man sie im nächsten Schritt besser rühren konnte. Es folgte das Lösen in gerührtem Lösungsmittel N-Methyl-2-pyrrolidon für 20 Minuten bei einer Temperatur von 90 °C. Nach dem Absieben der Folienstücke über ein 50 µm-Edelstahlsieb wurde die Lösung zentrifugiert. Der Bodensatz wurde bei 140 °C getrocknet, gemörsert und in einer Prallmühle zu einem homogenen Pulver desagglomeriert. Da der Schritt des Mörserns bei geeigneter Trocknung beispielsweise über Sprühtrocknung entfällt, wurde er nicht im Fließbild berücksichtigt.

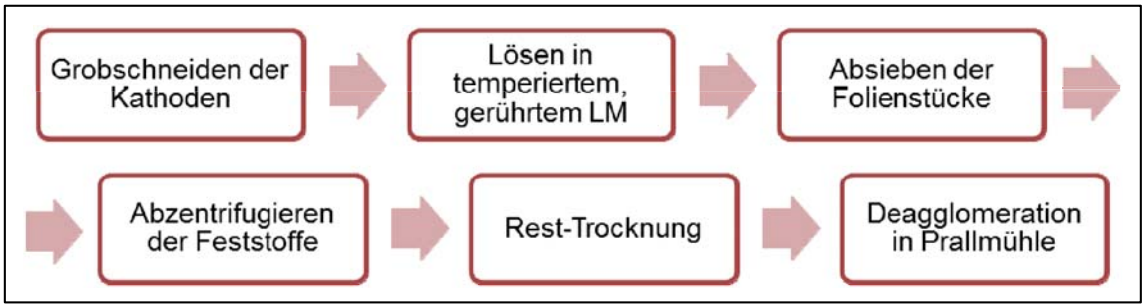


Abbildung B-24: Verfahrensfließbild Nasschemische Separation der Beschichtung von Batterie-Elektroden

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die Quote der recycelten Beschichtung beträgt auf dem jetzigen Stand 95 Gew.-%. Weiterhin wird nach der weiteren Aufarbeitung durch iPAT-TUBS in **AS B 3.5** eine beschichtungsfähige und hydrometallurgisch weiterzuverarbeitende Partikelgrößenverteilung, welche der ursprünglichen Partikelgrößenverteilung der Ausgangsmaterialien sehr ähnelt, erreicht. Der Restgehalt an Aluminium wurde in einem Vorversuch per Atomabsorptionsspektroskopie auf ca. 0,06 % bestimmt.

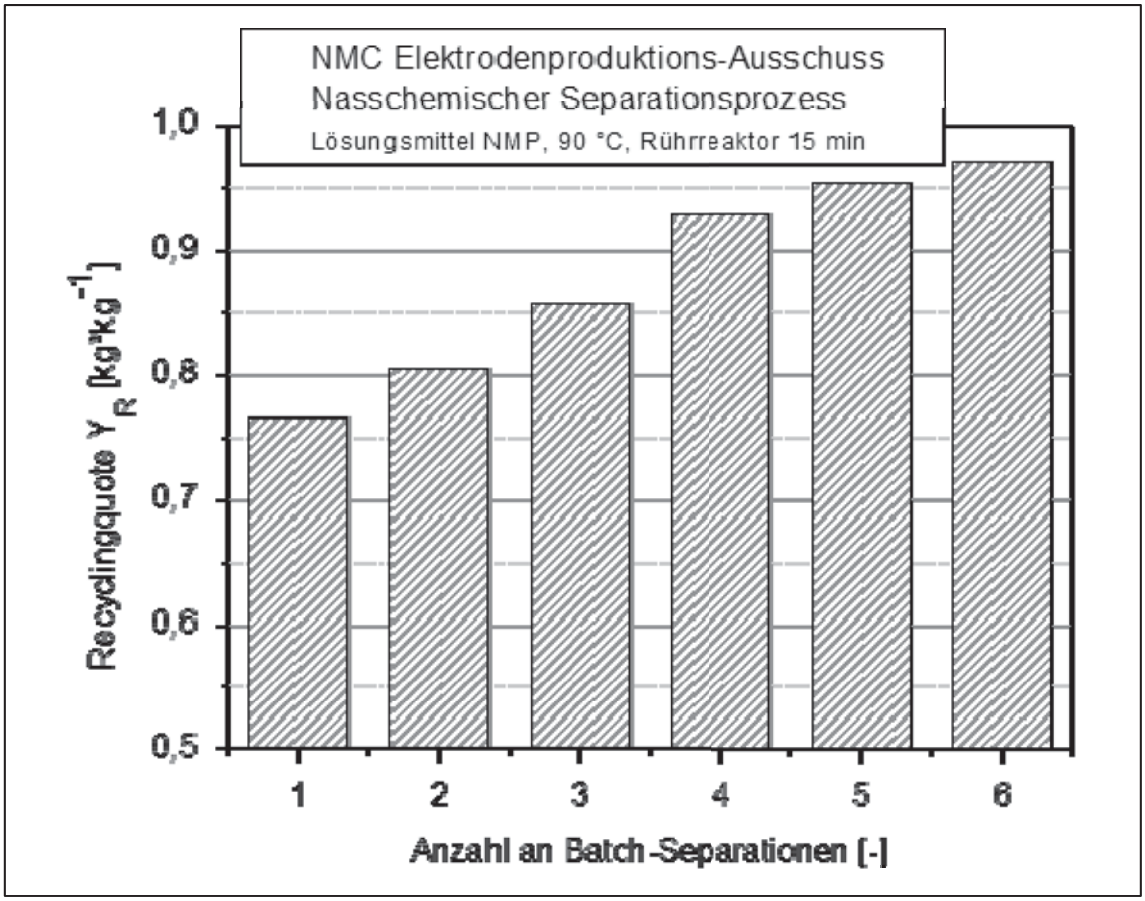


Abbildung B-25: Recyclingquote über Anzahl der Batch-Lösevorgänge

In Abbildung B-25 wird gezeigt, wie sich der Anteil der zurückgewonnenen Beschichtung bezogen auf die Masse der eingebrachten Beschichtung, im Folgenden Recyclingquote genannt, mit der Anzahl der batchweisen Lösungsvorgänge verändert. Das kontinuierliche Ansteigen von einer Recyclingquote von 76,5 Gew.-% nach der ersten Prozessierung auf 97 Gew.-% nach der sechsten Prozessierung ist nicht im eigentlichen Lösungsvorgang, sondern vielmehr mit prozesstechnischen Unzulänglichkeiten der batchweisen Fest/Flüssig-Trennung zu erklären. So benetzt die Suspension bei sinkendem Flüssigkeitsspiegel während der Siebung an der Folien/Flüssigkeits-Grenzfläche die zurückbleibenden Folienstücke.

Es bleiben - besonders zwischen den Folienstücken - Aktivmaterialien und Restlösungsmittel zurück. Dieser Effekt kann durch eine Kreislaufführung gefilterten Lösungsmittels verhindert werden. Der Flüssigkeitsspiegel würde nicht sinken, und zudem würde umgepumptes Lösungsmittel die Folienstücke durch eine scherende Strömung spülen (siehe Abbildung B-26).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

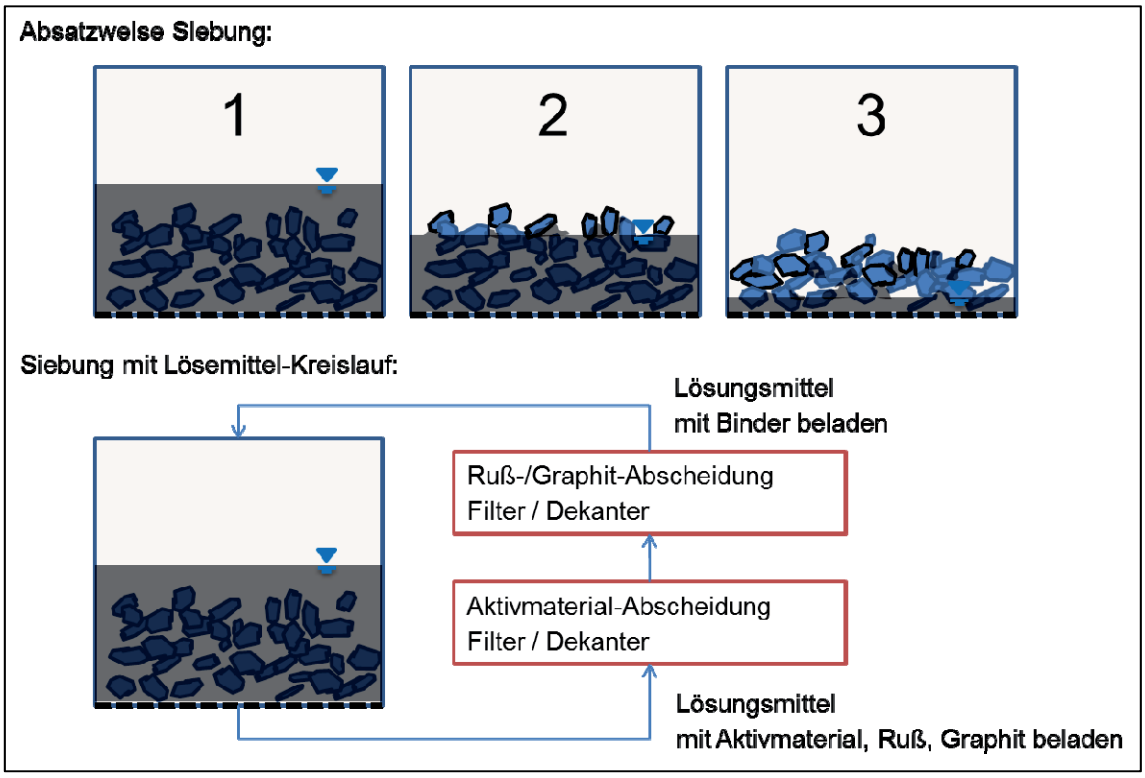


Abbildung B-26: Wirkmechanismus Batch-Filtration (oben), Fahrweise mit Lösungsmittel-Kreislauf (unten)

Des Weiteren wurden für die Nasschemische Separation die in Abbildung B-27 abgebildeten alternativen Prozessschritte zu den im oberen Bildbereich abgebildeten Operationen identifiziert.

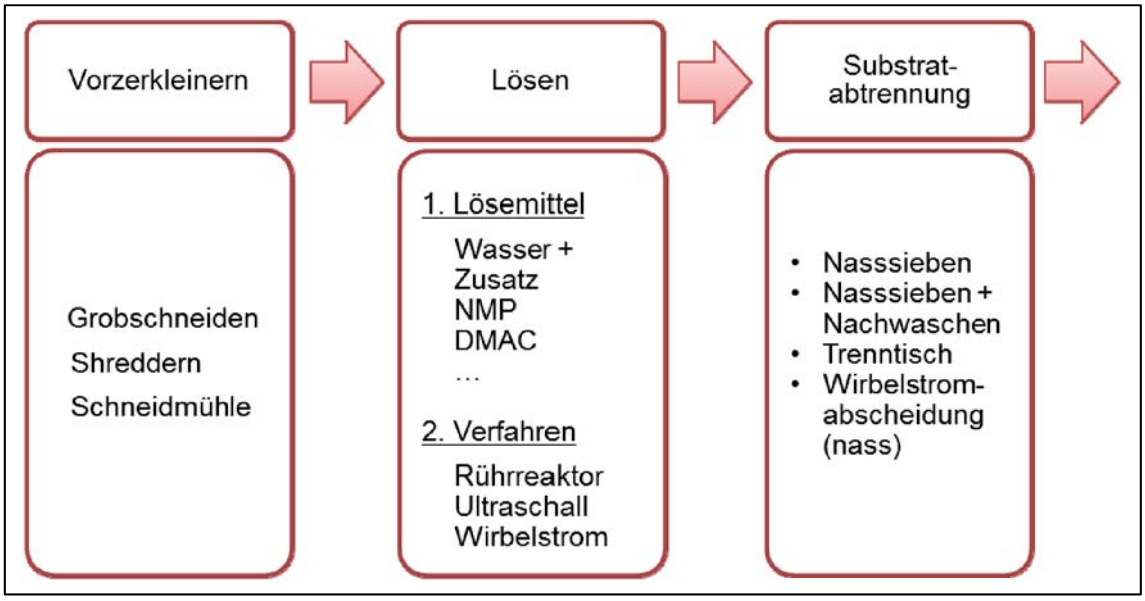


Abbildung B-27: Verfahrensfließbild zu Prozessalternativen der Nasschemischen Separation der Beschichtung von Batterie-Elektroden

Im Rahmen dieses AP wurden Kathodenmaterialien vom iPAT-TUBS zur Verfügung gestellt, die eine „nasse“ Separation durchlaufen haben. In diesem Fall wurde die Extraktion des Bin-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

ders mit organischem Lösungsmittel untersucht. Hierüber sollte ein schonendes Ablösen der Stromableitfolie erreicht werden. Die Proben wurden im analytischen Labor der Chemetall untersucht und anschließend im präparativen Labor extrahiert und aufgearbeitet.

Die Proben wiesen deutlich geringere Aluminiumgehalte auf, als die trocken separierten Proben und zeigten gleiches Extraktionsverhalten.

Allerdings darf hier nicht außer Acht gelassen werden, dass der Umgang mit organischen Lösungsmitteln vielen Regularien (Ex-Schutz, VOC-Richtlinie,…) unterliegt und somit nach Möglichkeit vermieden werden sollte. Des Weiteren sollten die Kathodenmaterialien letztlich vor einer Weiterverarbeitung keine organischen Lösungsmittel mehr enthalten, was eine weitere Trocknung notwendig macht.

Aus diesem Grund wurde in Absprache zwischen der CM und dem IPAT-TUBS entschieden, möglichst auf eine Separation mit organischen Lösungsmitteln zu verzichten.

B.3.5 Aufbereitung hochkonzentrierter, partikulärer Aktivmaterialsuspensionen

Das Ziel dieses Arbeitsschrittes ist Weiterbearbeitung der erhaltenen Aktivmaterialsuspensionen, um einerseits ein hydrometallurgisch weiterzuverarbeitendes Produkt zu erhalten und andererseits mit dem erhaltenen Aktivmaterial eine direkte Wiederbeschichtung unternehmen zu können.

Zur Konzentrierung der Suspension wurde zunächst das Zentrifugieren getestet. Dieses Verfahren hat sich im Labormaßstab bewährt und war das einfachste Verfahren zur schnellen Bereitstellung der separierten Beschichtung für weitere Arbeitsschritte. Jedoch ist eine Konzentrierung durch Fliehkrafttrennung durchaus auch in den industriellen Maßstab zu übertragen. Hier würde ein Scale-Up der ermittelten Trennparameter auf einen Dekanter in Frage kommen.

Der Einsatz einer Rahmenfilterpresse ist aufgrund des aggressiven Lösungsmittels NMP im Labormaßstab schwierig, jedoch industriell denkbar. Eine erste Konzentrierung während des in **AS B.3.4** vorgeschlagenen Umlaufpumpens des Lösungsmittels mittels einer porösen Filterkerze oder Querstromfiltration ist denkbar.

Zur weiteren Aufarbeitung der getrockneten nasschemisch separierten Beschichtung sowie der physikalisch separierten Beschichtung wurde vom iPAT-TUBS die Desagglomeration in einer Prallmühle eingeführt. Durch diesen innovativen Schritt ist es einerseits möglich die gewonnene Beschichtung wieder direkt über ein Standard-Beschichtungsverfahren ohne - die Beschichtungshomogenität störende Agglomerate - auf eine Trägerfolie aufzubringen. Andererseits wird durch die Desagglomeration die nachgeschaltete hydrometallurgische Aufarbeitung durch CM erleichtert.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

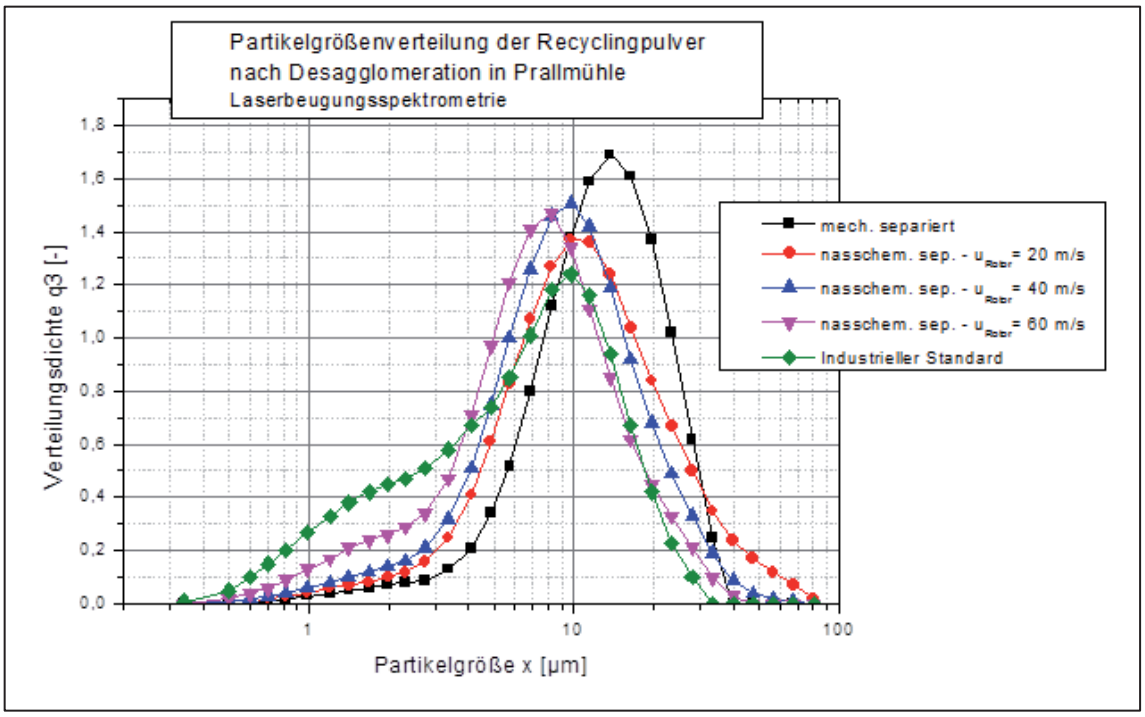


Abbildung B-28: Partikelgrößenverteilung der wiedergewonnenen Beschichtung nach Desagglomeration in Prallmühle

Die ermittelten Alternativen zur Aufkonzentrierung und weiteren Aufarbeitung der wiedergewonnenen Beschichtung sind in Abbildung B-29 zusammengetragen.

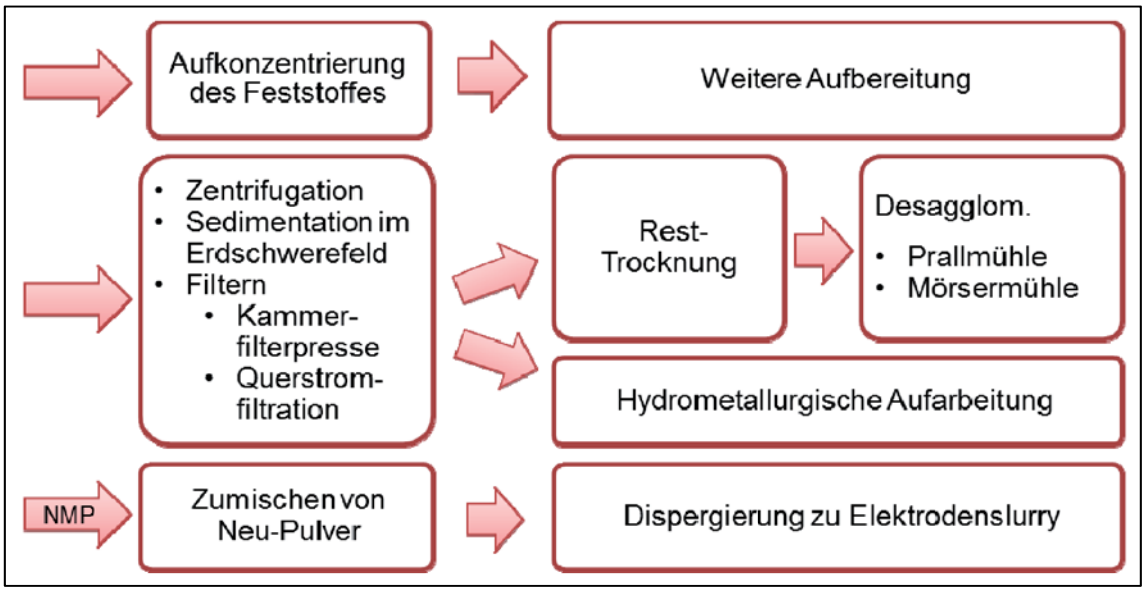


Abbildung B-29: Aufkonzentrierung und weitere Aufarbeitung nach der nasschemischen Separation

Die Herstellung, der in diesem AS von CM zur Verfügung gestellten Feststoffsuspensionen, erfolgte durch das IPAT-TUBS. In Abhängigkeit der Aufarbeitungsmethoden wiesen die Suspensionen, hergestellt aus NMC und LFP verschiedener Quellen (Ausschussware sowie formierte und zyklisierte Zellen) sowie zyklisiertes NCA, vor allem unterschiedliche durchschnittliche Partikelgrößen auf. Das Eingangsmaterial wurde im analytischen Labor von CM untersucht, wobei hier zunächst die allgemeine chemische Zusammensetzung im Vordergrund stand. Bei Materialproben aus Graphit-Anoden war zudem insbesondere der Kupfergehalt und der Lithiumgehalt von besonderem Interesse; bei Proben aus Kathodenmateria-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

lien war eines der Hauptaugenmerke der metallische Aluminiumgehalt und die Anwesenheit von Querkontaminationen des Materials, die durch die mechanische Aufarbeitung durch IPAT-TUBS möglich ist.

Schwerpunkt dieses AS bildete die Fragestellung, welchen Einfluss die Morphologie der Partikel sowie die Partikelgröße auf die Rückgewinnung der Rohstoffe haben, d.h. inwieweit eine Veränderung im Reaktionsverhalten der Materialien während der Extraktion festzustellen war. Parameter die hier von besonderem Interesse waren, waren die Suspendierbarkeit der Materialien im Extraktionsmedium, das Verhalten während der Extraktion, wie z.B. die Neigung zur Schaumbildung, und der Einfluss der Materialien auf die Extraktionsgeschwindigkeit und Rückgewinnungsquote. Die Ergebnisse wurden dem IPAT-TUBS kommuniziert und flossen in die weiteren Prozessentwicklungen bei der Herstellung der Materialien in Form von Feststoffsuspensionen ein.

B.3.6 Extraktion der Bindersysteme aus Elektrodenmaterialien in Abhängigkeit der Trennungsalternativen

In **AS B.3.6** wurden Extraktionsprozessen zur Entfernung der Bindersysteme aus den Elektrodenmaterialien in Abhängigkeit der Trennungsalternativen erarbeitet, um die Wiederverwendbarkeit der Bindersysteme zu untersuchen.

Der Arbeitsschritt Extraktion der Bindersysteme aus Elektrodenmaterialien in Abhängigkeit der Trennungsalternativen ist planmäßig beendet worden. Der Binder wird durch das Lösungsmittel NMP im **AS B.3.4** extrahiert und kann ohne einer weiteren Aufarbeitung zu bedürfen zusammen mit diesem wieder als Binderformulierung eingesetzt werden. Dazu wird der Bindergehalt des Slurries/des Lösungsmittels über eine Thermogravimetrische Analyse ermittelt und der Binder-, Aktivmaterial- und Additivgehalt durch gezielte Zugabe der jeweiligen Inhaltsstoffe auf die gewünschte Zusammensetzung erhöht.

In der rein-mechanischen Abtrennung ist eine Binderextraktion zur direkten Wiederverwendung als Beschichtungs- oder Beimengungsmaterial nicht notwendig, da an Beschichtungen aus rekonditionierten Ausschussmaterialien bewiesen werden konnte, dass der Binder noch voll funktionsfähig ist. Dazu wurden Haftfähigkeitstests an den Recycling-Kathoden durchgeführt, welche eine mit Neuelektroden vergleichbare Haftung zwischen Stromsammlerfolie und Beschichtung zeigten. Auch in der weiteren hydrometallurgischen Aufarbeitung bei CM erwies sich der Binder als nicht störend.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

B.4 Hydrometallurgische Aufbereitung und Verwertung von NE-Metallen

Das vorliegende Projekt hatte die Wiedergewinnung von NE-Metall-Wertstoffen aus HEV/PHEV/EV Lithiumionenbatterien, insbesondere Lithium und Übergangsmetalle, zum Ziel. Für diese zu entwickelnden bzw. zu optimierenden Verfahren sollten Pilotanlagen am Produktionsstandort Langelsheim/Harz errichtet werden, um die Verfahren auf Praxisfähigkeit zu prüfen.

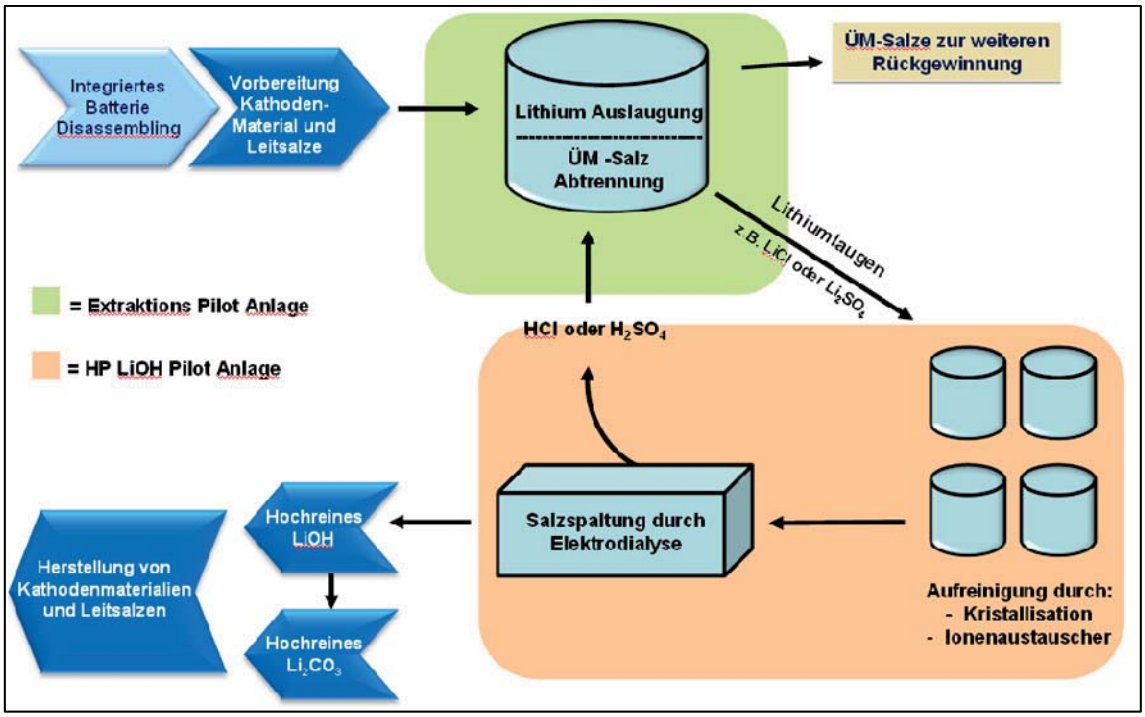


Abbildung B-30: Projektschema Hydrometallurgisches Batteriematerialrecycling

Bild 1: Projektschema Hydrometallurgisches Batteriematerialrecycling

Das Gesamtziel wurde durch folgende Projektschwerpunkte erreicht, die in Abbildung B-30 dargestellt sind:

Die vorkonditionierten Materialien der End-of-life-Batterien aus **AP B.3** des Verbundprojekts LithoRec wurden zunächst in Laborverfahren zur Wertstoffgewinnung geprüft, aufgearbeitet und optimiert. Dabei handelte es sich primär um Extraktionsprozesse mit starken Säuren. Es wurden dabei - in enger Zusammenarbeit mit dem LithoRec-Verbund - Materialien aus realen, existierenden Batterien, die formiert (einmal geladen) waren, Batteriematerialien aus realen, gealterten Zellen (zyklisiert), als auch beschichtete Folien aus dem Produktionsausschuss der Kathodenmaterialproduktion in die Untersuchungen einbezogen.

Die lithiumhaltigen Extrakte wurden in hochreines, für Batterien direkt wiederverwendungsfähiges Lithiumhydroxid (LiOH) umgewandelt und aufgereinigt. LiOH kann bei Bedarf auch auf einfache und bekannte Weise in Lithiumcarbonat überführt werden.

Dieses Verfahren wurde aus einer Kombination von rein chemischen Trenn- und Reinigungsverfahren sowie als zentralem Element aus einem elektrochemischen Membranverfahren (Elektrodialyse) aufgebaut.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Der auf diese Weise erzeugte hochreine Lithiumrohstoff (primär Lithiumhydroxid) wurde auf seine Verwendungsfähigkeit für die Synthese von Lithiumleitsalzen und Kathodenmaterialien geprüft. Insbesondere kann er als Rohstoff für die Erzeugung des fluorfreien Leitsalzes bzw. Additiv Lithium bis-(oxalato)borat (LiBOB) dienen.

Die erarbeiteten und optimierten Laborverfahren zur Extraktion und Abtrennung von Lithium- und Übergangsmetallsalzen sowie zur Reinigung mittels Ionentauscher und Salzspaltung mittels Elektrodialyse müssen in einer Pilotanlage getestet, verifiziert und validiert werden. Dies ist unabdingbar, um die Prozessfähigkeit des Recyclingsystems zu demonstrieren und zu validieren, um so die Basis für die Auslegung einer Großanlage schaffen zu können.

Eine solche Pilotanlage zur Extraktion stand nicht zur Verfügung und sollte parallel zu den Labor-Optimierungsverfahren errichtet werden, um die Erprobung und Validierung der Prozesse durchführen zu können. Diese Optimierung soll nach Projektabschluss aufgenommen und zum Abschluss gebracht werden.

B.4.1 Laborarbeiten zu den hydrometallurgischen Extraktions- und Reinigungsverfahren

AP_CM_1.0 Vorbereitende Arbeiten

Im Rahmen der Vorbereitung zu den durchzuführenden Laborarbeiten wurde eine umfassende Literaturrecherche, insbesondere hinsichtlich des hydrometallurgischen Recyclings von Kathodenmaterialien sekundärer Lithiumionenbatterien durchgeführt.

Die immer wieder in der Literatur beschriebene allgemeine Route behandelt den Aufschluss von Lithiumkobaltoxid mittels Mineralsäuren wie Salpeter-, Schwefel- oder Salzsäure unter der beschleunigenden Wirkung von Wasserstoffperoxid bei erhöhter Temperatur. Anschließend erfolgen verschiedene Aufarbeitungsschritte zur Isolierung der gewünschten Produkte.

Hydrometallurgische Aufarbeitungen von Kathodenmaterialien wie beispielsweise Lithiummanganoxid, Lithiumkobaltmangannickeloxid und Lithiumeisenphosphat sind in der Literatur kaum beschrieben.

Die Artikel beschreiben i. A. die Rückgewinnung der Übergangsmetalle Kobalt, Nickel, Mangan und Kupfer. Die Rückgewinnung von Lithium, wie sie insbesondere im Rahmen des durchgeführten Projekts im Vordergrund stand, wird i. A. nicht beschrieben.

Zur schnelleren Zugänglichkeit der Inhalte wurden von besonders hilfreich erscheinenden Literaturstellen Zusammenfassungen geschrieben und an die beteiligten Mitarbeiter verteilt.

Weitere Recherchen, die zum erfolgreichen Verlauf des Projekts notwendig waren, behandelten die Themen Ionenaustausch, Elektrodialyse und Filtrationsmethodik. Diese wurden über die gesamte Projektlaufzeit durchgeführt.

Für die Extraktionen der verschiedenen Kathodenmaterialien wurden verschiedene Apparaturen, je nach Ansatzgröße und Extraktionsbedingungen aufgebaut.

Für die Durchführungen im Labormaßstab wurden Rundkolben, ausgestattet mit Rührer, Rückflusskühler, Heizquelle und ggf. Tropftrichter, eingesetzt oder kleine Glasreaktoren verwendet.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Für Ansätze im Technikumsmaßstab wurde ein 30 l-Doppelmantelreaktor mit Thermostat eingesetzt.

Ein wesentlicher Reinigungsschritt beinhaltete die Abtrennung von Niederschlägen, die während der Aufarbeitung der Extraktionslösungen anfielen. Hierzu wurden zwei Filtrationsmöglichkeiten erprobt, zum einen die Separation über Porzellanfilternutschen, zum anderen wurde bei einigen Versuchen die Filtration über Druckfilter durchgeführt.

Für Kristallisationen wurde eigens eine Glasapparatur aufgebaut. Diese ermöglichte es, kontinuierlich die Lithiumsalz-Lösung, in der sich das zu kristallisierende gelöste Salz befand, unter vermindertem Druck nachzuspeisen und den Feststoff zu kristallisieren.

Die wesentlichen Einflussfaktoren bei chemischen Reaktionen bzgl. Geschwindigkeit und Gleichgewichtseinstellung sind Temperatur, Reaktionsdauer, Art und Konzentration des Lösungsmittels und ggf. eines Reaktionsbeschleunigers. Die Variation der genannten Parameter wurde ebenfalls in der Literatur beschrieben. Ein weiterer wichtiger Faktor ist das Kathodenmaterial/Lösungsmittel-Verhältnis.

Alle o.g. Parameter wurden bei der Aufstellung der Versuchspläne berücksichtigt.

AP_CM_1.1 Aufschluss-, Lösungs- und Extraktionsverfahren für diverse Elektrodenmaterialien (Frischqualitäten)

Da zu Projektbeginn noch keine Materialien aus recycelten Batterien zur Verfügung standen, wurden zur Erarbeitung der Grundverfahren reine in Lithiumionenbatterien verwendete Materialien für den Aufschluss und die Gewinnung der Metallsalzkomponenten aus der flüssigen Phase eingesetzt.

Die Verwendung solcher reinen Stoffe hat den Vorteil, die angestrebten Verfahren komplikationsfrei und zeiteffizient entwickeln und bewerten zu können.

Lithiumkobaltoxid und Lithiumnickelkobaltaluminiumoxid konnten käuflich als Frischware erworben werden und wurden, im für die Extraktionsversuche notwendigen Umfang, physikalisch und chemisch analysiert.

Der Aufschluss von Lithiumkobaltoxid und, in diesem Zusammenhang, die Variation der verschiedenen Versuchsparameter ist in der Literatur sehr gut und ausführlich beschrieben. Deshalb wurde gerade bei diesem Kathodenmaterial das Hauptaugenmerk darauf gelegt eine andere gangbare Route zu finden.

So wurden in der Literatur keine Beschreibungen zu Aufschlüssen in basischen Medien gefunden. Nichtsdestotrotz sollte im Rahmen des Projekts auch diese Möglichkeit erprobt werden. Für die Reaktionen wurden verschiedene Natronlaugekonzentrationen mit und ohne Einsatz von Wasserstoffperoxid als Reaktionsbeschleuniger eingesetzt. Bei einer mehrstündigen Extraktionsdauer wurde bei allen durchgeführten Versuchen Lithium nur in geringen Konzentrationen in der Extraktionslösung nachgewiesen, die Route wurde aus diesem Grund nicht weiter verfolgt.

In Prozessen der chemischen Industrie treten verdünnte Säuren als Nebenprodukte immer wieder auf, die anschließend entweder entsorgt oder teuer aufgearbeitet werden müssen. Der Einsatz solch verdünnter Säuren für Extraktionszwecke wäre somit eine elegante Mög-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

lichkeit diese als Rohstoff weiter zu verwenden. Daher wurde als zweite Variante die Extraktion mit verdünnter Salzsäure bei Raumtemperatur erprobt. Diese Variante zur Extraktion von Lithiumkobaltoxid erwies sich allerdings ebenfalls, als ungebräuchlich. Als Ergebnis bleibt festzuhalten, dass es möglich war, bereits größere, aber keine quantitativen Mengen des Lithiums mit 3 %iger Salzsäure bei Raumtemperatur zu extrahieren.

Lithiumnickelkobaltaluminiumoxid konnte jedoch auf Basis der bereits vorliegenden Literaturangaben für Lithiumkobaltoxid unter reduktiven, salzsauren Bedingungen zu nahezu 100% aufgeschlossen werden.

Lithiummanganoxid und Lithiumeisenphosphat konnten ebenfalls käuflich als Frischware erworben werden und wurden, im für die Extraktionsversuche notwendigen Umfang, physikalisch und chemisch analysiert.

In Analogie zum Lithiumkobaltoxid wurden für Lithiummanganoxid ebenfalls Versuche mit verschiedenen Natronlaugekonzentrationen mit und ohne Einsatz von Wasserstoffperoxid als Reaktionsbeschleuniger bzw. mit 3 %-iger Salzsäure durchgeführt. Im Fall von Lithiummanganoxid ließ sich Lithium nach Extraktion in alkalischem Medium ebenfalls nur in geringen Konzentrationen in der Extraktionslösung nachweisen. Mit 3 %-iger Salzsäure konnten bereits größere, aber noch keine quantitativen Mengen des Lithiums bei Raumtemperatur extrahiert werden.

Insbesondere für Lithiummanganoxid wurde die Extraktion mittels Oxalsäure ausführlich erprobt. Da Oxalat mit Mangan(II) einen schwerlöslichen Feststoff bildet, sollte die Reaktion lediglich Oxalsäure-vermittelt (ohne weitere Chemikalien) durchgeführt werden.

Die Oxalsäure-Route zeigte sich hier als sehr elegante Variante, da Oxalsäure als Reduktionsmittel für die im Kathodenmaterial vorliegenden Mangan(III)- und Mangan(IV)-Ionen wirkt und dadurch den Aufschluss des Kathodenmaterials beschleunigen kann. Gleichzeitig wird das generierte Mangan(II) als Oxalat gefällt.

Die Reaktion ist exotherm, was sich ebenfalls reaktionsbeschleunigend auswirkte und eine zusätzliche Wärmequelle überflüssig machte. Die Reaktionsbedingungen konnten derart optimiert werden, dass letztendlich fast 100 % des im Kathodenmaterial enthaltenen Lithiums extrahiert werden konnten.

Anhand von Lithiumeisenphosphat wurde die „klassische“ Variante mittels Mineralsäuren (Schwefel- und Salzsäure) mit und ohne Wasserstoffperoxid erprobt.

Ohne Zugabe von Wasserstoffperoxid lag bei allen durchgeführten Reaktionen die Lithiumausbeute bei 30 – 40 %. Wobei die Extraktionslösung auch unerwünscht hohe Anteile von Eisen und Phosphat aufwies.

Unter Wirkung von Wasserstoffperoxid konnten Ausbeuten von > 95 % Lithium erhalten werden. Zudem wiesen die Extraktionslösungen nur noch geringe Mengen Eisen und Phosphat auf. Dies ist darin begründet, dass sich Eisen(II) aus dem Kathodenmaterial mit Wasserstoffperoxid zu Eisen(III) umsetzt, was mit gelöstem Phosphat, bei dem sich einstellenden pH-Wert zu schwerlöslichem Eisen(III)-phosphat reagiert.

Bei der Herstellung von Lithiumionenbatterien wird das Kathodenmaterial im entladenen Zustand mit dem Anodenmaterial (ebenfalls im entladenen Zustand und somit lithiumfrei) verbaut. Bei der ersten Ladung kommt es zur Interkalation von Lithium-Ionen in das Anodenma-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

terial. Lithiiertes Anodenmaterial war aus diesem Grund nicht als Frischware käuflich zu erwerben. Zu den Ergebnissen von Materialmischungen realer Systeme siehe AP_CM_1.3.

Die Kreislaufführung wurde anhand des Lithiummanganoxid/Oxalsäure-Systems erprobt. Hierzu wurde in einer ersten Extraktionsreaktion Lithiummanganoxid aufgeschlossen und die Extraktionslösung isoliert. Im zweiten Schritt wurde diese Extraktionslösung mit weiterem Lithiummanganoxid versetzt und eine weitere Extraktion unter erneuter Zugabe von Oxalsäure durchgeführt, sodass letztendlich die Anreicherung von Lithium in der Extraktionslösung möglich war.

Bei den Aufschlüssen mit Mineralsäuren wurden zur Ausbeuteerhöhung des Lithiums alle Niederschläge mit Wasser gewaschen. Hier besteht die Möglichkeit das Waschwasser mit der eigentlichen Extraktionslösung zu vereinen, was sich insgesamt durch die Volumenzunahme in einer Konzentrationserniedrigung niederschlägt.

Möchte man dies umgehen bietet sich hier die Möglichkeit, dasselbe Waschwasser in mehreren Extraktionen nacheinander erneut zum Waschen von Niederschlägen mit anhaftendem Lithiumsalz einzusetzen, bis eine für eine wirtschaftliche Aufarbeitung ausreichende Konzentration an Lithium im Waschwasser vorliegt.

AP_CM_1.2 Abtrennung/Isolierung von Reinstoffen aus AP_CM_1.1

(1. Separations-/Reinigungsschritt)

Bei allen Abtrennungen von Übergangsmetallsalzen aus den Extraktionslösungen wurde die Fällung als schwerlösliches Metallsalz gewählt. Anschließend wurde über mehrere Waschvorgänge mit anschließenden Filtrationen anhaftende Extraktionslösung entfernt, um die Lithiumausbeute zu erhöhen und somit die Übergangsmetallsalze lithiumfrei zu erhalten.

Zur Optimierung der Fällungsreaktionen wurden verschiedene pH-Werte erprobt, wobei sich letztendlich herausstellte, dass Fällungen im stark alkalischen Bereich zur Abtrennung geeigneter sind, als Fällungen im schwach alkalischen Bereich.

Parallel hierzu wurden verschiedene Filtrationen getestet, um möglichst effiziente Produktisolierungen zu erzielen. Geprüft wurden in diesem Zusammenhang Filtrationen bei unterschiedlichen Drücken unter Einsatz verschiedener Filtermedien mit verschiedenen Porengrößen.

Die isolierten Übergangsmetallhydroxide wurden vor der Weiterverarbeitung getrocknet, um die Versuche durchgängig bilanzieren zu können.

Zur Isolierung von Übergangsmetallsulfaten wurde im nächsten Schritt zunächst einfaches Verlösen in Schwefelsäure bei verschiedenen Temperaturen untersucht.

Überraschender Weise ließen sich die untersuchten Übergangsmetallhydroxide selbst in stark saurem Medium kaum lösen und somit nicht in das entsprechende Übergangsmetallsulfat überführen.

Hier erwies sich letztendlich eine Umsetzung in Säure unter Zugabe von Reduktionsmittel als erfolgreiche Route. Mittels dieser Methode gelang schließlich die notwendige komplette Verlösung zu sauren Übergangsmetallsulfatlösungen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die oben beschriebene Methode wurde im Folgenden bei der Herstellung aller weiteren Übergangsmetallsulfate eingesetzt.

Zur Vorreinigung der Li-Laugen bzw. Isolierung reiner Lithiumverbindungen wurden zwei Methoden erprobt.

Die erste Methode eignet sich zur Isolierung von Lithium in Form des Carbonats. Diese Route ist besonders zur Isolierung des Lithiums aus stärker verunreinigten Lösungen geeignet, bei welchen die Anwendung eines Ionenaustauschers nicht geeignet ist. Hier wurde exemplarisch die Fällung von Lithium als Lithiumcarbonat durch Einleiten von Kohlendioxid in die Extraktionslösung durchgeführt. Nach Filtration des schwerlöslichen Lithiumcarbonats wurde dieses in der Hitze von der Mutterlauge getrennt (Lithiumcarbonat ist in warmer Lösung schlechter löslich, als in kühler). Durch erneutes Suspendieren des gewonnenen Salzes in VE-Wasser und erneutes einleiten von Kohlendioxid wurde das Lithiumcarbonat in Form des Lithiumhydrogencarbonats wieder in Lösung gebracht. Aus dieser Lösung wurde letztlich durch Austreiben des gelösten Kohlendioxids in der Siedehitze Lithiumcarbonat auskristallisiert und in Reinform erhalten.

Die erhaltenen Extraktionslösungen enthielten nach 1. Separation der Übergangsmetalle i. A. derart niedrige Übergangsmetallkonzentrationen, dass eine Abreicherung restlicher Mengen über Ionenaustauscher erprobt wurde und erfolgreich bis in den einstelligen ppm-Bereich durchgeführt werden konnte.

Im speziellen Fall des Lithiumeisenphosphats musste eine eigene Vorreinigungsroute entwickelt werden. Hier kann gelöstes Phosphat bei Überschreitung des Löslichkeitsprodukts zur unerwünschten Fällung von Lithiumphosphat und somit zu Ausbeuteverlusten führen, deshalb wurde zur Abreicherung von Phosphat Eisen(III)-sulfat zugesetzt und anschließend überschüssiges Eisen(III) als Hydroxid gefällt. Diese Route ermöglichte es, auf äußerst elegante Art und Weise, ohne Einbringen weiterer Fremdstoffe/Verunreinigungen, Phosphat und ohnehin enthaltenes Eisen(III) preiswert abzureichern.

AP_CM_1.3 wie 1.1, aber Materialien aus LithoRec bzw. (bei Nichtverfügbarkeit) von Mischungen aus 1.1 und Elektrolytresten

Für die Versuche dieses Arbeitspakets wurden vom IPAT-TUBS die Kathodenmaterialien Lithiumeisenphosphat (formiert) und Lithiumnickelmangankobaltoxid (Ausschussware und zyklisiertes Material) zu Verfügung gestellt.

Die zur Verfügung gestellten Materialien durchliefen bei IPAT-TUBS unterschiedliche Formen der Aufarbeitung, welche sich, vom Verständnis der Chemetall her gesehen, grob in die Bereiche Schneid-/Sieb-/Ultrazentrifugenprozess, NMP-Extraktion (N-Methyl-2-pyrrolidon) und Mechanische Separation gliedern.

Allen gemeinsam war das Ziel, möglichst quantitativ das Kathodenmaterial von der Aluminiumableitfolie abzutrennen, mit möglichst hoher Ausbeute an Kathodenmaterial und geringer Verunreinigung an Aluminium.

Grundlage der Versuche innerhalb dieses AP bildeten die Ergebnisse der Untersuchungen an Frischmaterialien aus AP_CM_1.1. Hier zeigte sich, dass die Wasserstoffperoxid-beschleunigten Reaktionen hinsichtlich Extraktionsausbeute und -geschwindigkeit zu bevor-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

zugen sind, deshalb wurden im Rahmen dieses AP alle Reaktionen unter Wasserstoffperoxid-Zugabe in Mineralsäuren durchgeführt.

Als wesentliches Ergebnis lässt sich festhalten, dass sich die Versuchsparameter aus AP_CM_1.1 auf die vom IPAT-TUBS zur Verfügung gestellten Materialien übertragen ließen.

Beim Lithiumeisenphosphat fiel auf, dass im Vergleich zum Frischmaterial die Lithiumausbeute etwas vermindert und der Gehalt an Eisen- und Phosphationen in der Extraktionslösung signifikant erhöht war.

Dies führt bei den Realmaterialien somit zu einem höheren Reinigungsaufwand.

Das Lithiumnickelmangankobaltoxid löste sich bei Wahl geeigneter Reaktionsbedingungen in allen Fällen vollständig auf, d.h. alle Wertstoffe wurden in der Extraktionslösung analytisch nachgewiesen. Als Rückstand wurde das Gemisch aus Binder und Graphit erhalten.

Zur Überprüfung der Prozessierbarkeit von Mischungen aus verschiedenen Kathodenmaterialien wurden Lithiumeisenphosphat/Lithiumnickelmangankobaltoxid-Mischungen auf das Extraktionsverhalten hin untersucht.

Die Mischungen ließen sich mit der optimierten Reaktionsbedingung extrahieren. Bei der 20:80-Mischung wurde Lithium nahezu quantitativ extrahiert. Bei der 80:20 Mischung konnte erwartungsgemäß deutlich weniger Lithium extrahiert werden.

Zur Überprüfung der Prozessierbarkeit von Mischungen aus Kathodenmaterial, Anode und Separator wurden Lithiumnickelmangankobaltoxid/Anode/Separator-Mischungen auf ihr Extraktionsverhalten hin untersucht. Das Gewichtsverhältnis von Kathode zu Anode/Separator Betrug etwa 1,5 zu 1.

Lithium ließ sich in allen Fällen nahezu quantitativ extrahieren.

Reines Anodenmaterial wurde gegen Ende des Projekts für analytische Zwecke, insbesondere hinsichtlich des Kupfer- bzw. Lithiumgehalts, von IPAT-TUBS zur Verfügung gestellt. Das Material wies nur marginale Mengen an Lithium auf (< 0,3 %), was, da es sich aus Material mit Ursprung aus einer entladenen Zelle handelte, erwartungsgemäß ist. Aluminium wurde ebenfalls, da es sich um händisch vorsortiertes Material handelte, nur in geringer Menge gefunden (< 0,1 %). Der Kupferanteil wurde mit 2,4 % bestimmt, dies erscheint aus Sicht der Chemetall für eine noch nicht optimierte Separation als sinnvoller Wert.

Lithiumeisenphosphat enthält herstellungsbedingt Spuren von Sulfid, die in Reaktion mit Säuren giftiges, brennbares Schwefelwasserstoffgas erzeugen. Im Rahmen dieses APs wurde deshalb zur Gewährleistung des Gesundheits- und Umweltschutzes und zur Erörterung einer eventuell auftretenden Explosionsschutzproblematik nach einer möglichst einfachen Analysenmethode gesucht, mit der Spuren von Schwefelwasserstoffgas detektierbar sind.

Zur Konzentrationsbestimmung des während der Zugabe von Lithiumeisenphosphat zur Schwefelsäure schwach wahrnehmbaren Schwefelwasserstoffgeruchs wurde bei mehreren Versuchen mittels Dräger-Röhrchen-Messsystem die Schwefelwasserstoffkonzentration gemessen. Die Messungen erfolgten jeweils direkt über der Extraktionssuspension.

In allen Fällen ließ sich eine Verfärbung des Anfangsbereichs des Dräger-Röhrcheninhalts nur erahnen. Die Konzentrationen wurden mit ≤ 5 ppm bestimmt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die zur Verfügung gestellten Kathodenmaterialien enthielten ansonsten keine feststellbaren Gehalte an Rest-Organika oder Verunreinigungen aus Leitsalzen und Elektrolyten, deren gesonderte Abtrennung notwendig gewesen wäre.

AP_CM_1.4 Isolierung von Reinstoffen aus AP_CM_1.3

Die Isolierung der Übergangsmetallsalze und Übergangsmetallsulfat-Lösungen wurde zunächst im Labormaßstab an verschiedenen Kathodenmaterialien erprobt und die Proben an HCST und das IPC-WWU für analytische Zwecke versandt. Anschließend erfolgte die Herstellung im Technikumsmaßstab für HCST. Aus diesem Material wurde bei HCST neues Kathodenmaterial hergestellt.

Beim pH-Wert des theoretischen Fällungsbereichs von Aluminium sollte zunächst Aluminium als Hydroxid gefällt und abfiltriert werden. Es zeigte sich jedoch, dass Aluminium nicht quantitativ abgereichert werden konnte.

Anschließend wurden die Übergangsmetallionen bei einem adjustierten pH-Wert als Hydroxide gefällt, abfiltriert und gewaschen.

Die getrockneten Übergangsmetallhydroxide wurden nachfolgend unter Zugabe von Wasserstoffperoxid in Schwefelsäure gelöst und die Lösung für Technikumsversuche an HCST verschickt.

Im Verlauf des Projekts zeigte sich anhand der Realsysteme, dass die Lithium enthaltenen Extraktionslösungen sehr gut und nahezu verlustfrei (bezogen auf die Ausbeute an Lithium) von allen unerwünschten Metallionen über Hydroxidfällungen, Filtrationen und Waschvorgänge abgereichert werden konnten.

Die Lösungen wiesen einen derart geringen Gehalt an Verunreinigungen auf, dass eine direkte weitere Reinigung mittels Ionenaustauscher durchgeführt werden konnte.

Die entwickelte Aufarbeitungsmethode von Lithiumsalz-Lösungen aus Lithiumeisenphosphat (oben beschrieben) wurde erfolgreich auf die Realsysteme übertragen.

AP_CM_1.5 Aufreinigung (high purity) von Li-Laugen aus AP_CM_1.2 und AP_CM_1.4 für Elektrodialyse

Als Ausgangsstoff für elektrodialytische Verfahren kommen im Allgemeinen nur hochreine Salz-Lösungen in Frage. Insbesondere müssen mehrwertige Kationen abgereichert werden.

Die Versuche mittels Ionenaustauscher hatten im Wesentlichen die drei Hauptaspekte Reinigungseffekt, Austauschkapazität und Regenerierung zum Ziel.

Hierzu wurden Ionenaustauscheranlagen, bestehend aus eigens angefertigten beheizbaren Ionenaustauschersäulen und Dosierpumpen aufgebaut. Die Hersteller der Ionenaustauscherharze verfügten nicht über Erfahrungen mit den hier zu reinigenden Lithiumsalz-Lösungen, sodass in diesem Fall nicht auf bereits vorhandene Fachkenntnisse zurückgegriffen werden konnte. Es stellte sich heraus, dass die Erfahrungen, die von natriumhaltigen Systemen her stammen, nicht auf lithiumhaltige Systeme übertragen werden konnten. Deutliche Unterschiede zeigten sich u. a. bei der Austauschkapazität. Diese stellte sich beim Li-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

thium-System als wesentlich geringer heraus. Zur Optimierung von Kapazität und Reinigungseffekt mussten diverse Ionenaustauscherharze (basisch, sauer und chelatisierend) bei verschiedenen Versuchsparametern (pH-Wert, Temperatur und Konzentration der Lösungen) erprobt werden, um ein möglichst effizientes Arbeiten zu ermöglichen.

Letztendlich gelang es, hochreine Lithiumsalz-Lösungen mittels Ionenaustausch herzustellen, die von der Verunreinigungssignatur für die EDBM-Anlage geeignet waren.

Die Lithiumsalzlösungen müssen vor Einspeisung in die Elektrodialyse vollkommen feststofffrei sein, was z.B. durch eine Membranfiltration erreicht werden kann.

Zur Feinfiltration der Lithiumsalz-Lösungen vor der EDBM wurde die Mikrofiltration genutzt. Diese Vorfiltration hat generell den Zweck, die Standzeit der EDBM-Membranen zu verlängern, da ein frühzeitiges Verblocken der Membranen durch ungelöste Stoffe vermieden werden kann. Somit können längere Standzeiten erreicht werden.

Des Weiteren wurde die Nanofiltration erprobt. Hierzu wurde ein Nanofiltrationsstand aufgebaut und die generelle Eignung dieser Methode bei unterschiedlichen Parametern (z.B. pH-Wert, Konzentration, Druck, Verunreinigungssignatur) zur Reinigung von Lithiumsalz-Lösungen getestet. Als Ergebnis bleibt festzuhalten, dass sich diese Methode zur Reinigung als geeignet erwies. In Abhängigkeit der eingestellten Parameter konnten mehrwertige Ionen, die in der EDBM stören würden, sehr gut abgereichert werden.

Die Versuche mittels Ionenaustauscher hatten, neben dem Reinigungseffekt und der Austauschkapazität Untersuchungen zur Regenerierung zum Ziel. Das Ionenaustauscherharz wurde mit unterschiedlich heißen Regenerierungsflüssigkeiten durchströmt. Über eine Analyse und Bilanzierung der Verunreinigungen im Waschwasser konnte eine Optimierung durchgeführt werden. Nach Herstellerangabe wird das Harz mit Säure und Lauge regeneriert. In den Versuchen wurde das Harz ausschließlich mit unterschiedlich konzentrierter Salzsäure regeneriert und der Einfluss auf die Kapazität untersucht.

AP_CM_1.6 Optimierung Elektrodialyse

Die Zielstellung bei der Elektrodialyse mit bipolaren Membranen ist es, ein Salz (hier Lithiumchlorid bzw. -sulfat) mittels elektrischen Stroms in die korrespondierende Säure (Salz- bzw. Schwefelsäure) und Lauge (Lithiumhydroxid) zu spalten.

Die Elektrodialyse-Versuche zum Langzeitverhalten wurden zunächst mit einem externen Dienstleister unter Berücksichtigung der bekannten Daten durchgeführt. Hierzu wurde eine detaillierte Planung der Probennahme während der Versuche erarbeitet und die Klärung der analytischen Methoden zur Bestimmung der Konzentration der Edukte und Produkte herbeigeführt.

Es zeigte sich, dass der Aufbau eigenen Knowhows bei der Elektrodialyse unabdingbar ist und es wurde eine Labor-EDBM-Anlage beschafft. Nach Einarbeitung in die Thematik wurden literaturbekannte Referenzversuche zur Ermittlung der Reproduzierbarkeit der Daten durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurden verschieden konzentrierte Natriumchlorid-Lösungen elektrodialysiert. Dabei wurde festgestellt, dass die Produkte aus unserer Zelle erhöhte Verunreinigungslevel an Chlorid- und Natriumionen aufwiesen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die ersten EDBM-Versuche fanden im Batch-Verfahren statt. Hierbei wurden zunächst Versuchsparameter wie Spannung, Strom, Druck und Konzentration variiert, um eine optimale Produktausbeute, bezogen auf die eingesetzte Ladungsmenge zu erzielen. Die Standzeit bei verschiedenen Parametern unter Berücksichtigung der entsprechenden Produktqualität wurde ermittelt. Schwerpunkt war die Konzentration der Lithiumhydroxid- und Salzsäure-Lösung bei der Durchführung der Experimente.

Im Anschluss aller Optimierungsversuche und -arbeiten wurde die EDBM-Anlage vom Batch-Betrieb in eine kontinuierlich arbeitende Anlage umgebaut. Nur durch diesen Umbau ist es letztendlich möglich, die Bedingungen in der Pilotanlage im Labormaßstab zu simulieren und ein tatsächliches Langzeitverhalten zu erproben.

Hierzu wurde die Anlage mit eigens angefertigten Vorlage- bzw. Auffangbehältern ausgestattet und mit zusätzlichen Pumpen erweitert.

Im nächsten Schritt erfolgten Versuche zur Erhöhung der Produktqualität hinsichtlich der Reinheit des Lithiumhydroxids.

Zur Erklärung:

Die verschiedenen Lösungen werden über Pumpen innerhalb des Membranstapels (Parallelanordnung einzelner Membranen zur Vergrößerung der Membranfläche) über Kanäle in die drei verschiedenen Membrankammerbereiche, an den Membranoberflächen vorbeigepumpt. Hierbei findet über verschiedene Ionenaustauschprozesse über die Membranen die Salzspaltung statt. Methodenbedingt kommt es über die Membranoberflächen auch zur unerwünschten Permeation von Ionen durch die Membranen und innerhalb der Membrandichtungen auch zu unerwünschten Übergängen von Ionen zwischen den Kammern, z.B. Chlorid bzw. Sulfat im Lithiumhydroxid.

Zur Verringerung der o. g. Effekte, die zur beschriebenen Produktverunreinigung führen, wurden zunächst die Konzentrationen der Lösungen in den verschiedenen Kammern variiert, um möglichst ungünstige Permeationseffekte zu verringern. Hierbei konnten keine wesentlichen Verbesserungen erzielt werden.

Im nächsten Ansatz wurden Versuche durchgeführt, bei welchen die Säure in regelmäßigen Zeitabständen mittels VE-Wasser verdünnt wurde, um Permeationen und ggf. Austausch über Leckagen zwischen der Säure und der Laugenkammer zu verringern. In diesem Fall zeigten sich ebenfalls keine Verbesserungen der Produktqualität.

Die Reinheitsoptimierung erfolgte schließlich über die Demontage des Membranstapels und den Austausch der Membrandichtungen. Hierbei konnte eine derart hohe Verringerung der Verunreinigungssignatur erreicht werden, dass schließlich aus den hier erhaltenen Lithiumhydroxid-Lösungen hochreines Lithiumhydroxid-Kristallisat gewonnen werden konnte.

AP_CM_1.7 Aufreinigung ÜM-Salze aus AP_CM_1.2 und AP_CM_1.4 in Batteriequalität bzw. Umwandlung in gängige Batterierohstoffe

Die Übergangsmetallsalze sollten derart aufgereinigt werden, dass sie direkt für die erneute Herstellung von Batteriematerialen für den nächsten Generationszyklus verwendet werden können.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Grundlegende Versuche zur Umwandlung der Übergangsmetallhydroxide mit anorganischen Säuren (Salzsäure, Schwefelsäure, Salpetersäure) in die entsprechenden Salze wurden nach bekannten Synthesevorschriften durchgeführt. Analytische Untersuchungen der Salze auf Verunreinigungen und Anpassung der Analysenmethoden schlossen sich an.

Des Weiteren wurden Zentrifugenexperimente zur Trocknung der Übergangsmetallsalze bei unterschiedlichen Parametern durchgeführt. Es wurde untersucht, welche Restfeuchtigkeitsgehalte bei entsprechenden Energiemengen erreicht werden können. Die Übergangsmetallsalze wurden bei verschiedenen Temperaturprogrammen und unter Verwendung von Vakuum getrocknet. Schließlich wurden die Versuchsergebnisse auf hygroskopische Lithiumsalze übertragen. Folgende Parameter wurden untersucht: Suspensionsdichte, Zentrifugengeschwindigkeit, Dauer der Zentrifugation und Aufgabe des Materials.

Weitere Möglichkeiten der Aufreinigung wurden erprobt. Durch verschiedene Kristallisationsmethoden (Kühl- bzw. Verdampfungskristallisation) konnte die Qualität der ÜM-Salze erhöht werden.

B.4.2 Pilotanlage für säurebasierte Extraktionen und fluorfreie Leitsalzherstellung

Engineering/Montage

Umfangreiche Genehmigungsunterlagen wurden nach behördlichen oder gesetzlichen Vorgaben erstellt und administrative Aufgaben wahrgenommen. Diese Aktivitäten resultierten u.a. in der Ausstellung des Genehmigungsbescheids nach BImSchG. In gleichem Maße wurden sicherheitsrelevante Aspekte erarbeitet, die von unabhängigen Instituten (z.B. TÜV Nord) geprüft wurden. Bei der Beurteilung der Gefahren nach GefStoffV wurden zusätzlich auch Wartungs- und Reparaturarbeiten und mögliche Nebenprodukte berücksichtigt. Die Gefährdungsbeurteilung spezifiziert die erforderlichen Maßnahmen zum Schutz der Beschäftigten und Dritter vor Gefahren durch inhalative Exposition und durch Hautkontakt.

Die Ergebnisse eines DFSS-Workshops gemeinsam mit der F&E-Abteilung sind direkt für o.a. Aktivitäten verwandt worden. Um den späteren Betrieb der Anlage bestmöglich sicherstellen zu können wurden Design Reviews der virtuellen Anlage (3D-Modell) mit dem Betriebspersonal durchgeführt.

Im Arbeitspaket Verfahrenstechnik wurde aus dem Verfahrenskonzept das Verfahrensdesign entwickelt und ein Detailverfahrensfließbild erstellt. Ein Schwerpunkt war vor allem das Design der Feststoffförderung und Dosierung, da bei den zu verwendenden Rohstoffen von unterschiedlicher Körnung, spezifischer Dichte sowie Schüttdichte ausgegangen werden musste. Die Aggregate wurden ausgelegt und der Prozessablauf hinsichtlich der entsprechenden Materialanforderungen und Reaktionsanforderungen im Detail spezifiziert.

Das externe Detailengineering und weitere Ingenieursleistungen wurden beauftragt und planmäßig abgeschlossen. Von Chemetalls Seite wurden die Arbeiten durch die eigene Ingenieursabteilung unterstützt und begleitet.

Im Detailengineering erfolgte eine vertiefte verfahrenstechnische Auslegung der Apparate unter Berücksichtigung der Informationen aus den Ergebnissen der Aufstellungsplanung, EMSR, Stahlgerüst- und Bühnenbau, sowie den Ergebnissen aus den erfolgten Versuchen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

bei verschiedenen Herstellern und Institutionen. Die aus dem Detailengineering resultierenden Konstruktionszeichnungen, R+I-Fließbilder, Aufstellungspläne und Rohrleitungsisometrien mit Halterungszeichnungen wurden erstellt, geprüft und zur Montage freigegeben. Gemäß den daraus resultierenden Massenauszügen für Rohrleitungen, Armaturen und EMSR-Technik wurde das sogenannte Bulk-Material beschafft.

Als erstes wurde, bedingt durch die lange Lieferzeit, ein vorgezogenes Detailengineering für den Trockner abgeschlossen, welches zur Beauftragung der Konstruktion des Trockners führte.

Wichtige Meilensteine des Detailengineerings waren der Abschluss der Aufstellungsplanung und die Stahlbauleitplanung. In der Aufstellungsplanung wurden die Anlagenteile aufgrund von verfahrens- und sicherheitstechnischen Vorgaben, aber auch unter Berücksichtigung von Wartungs- und Bedienungsnotwendigkeiten optimal angeordnet.

Die Planung, Konstruktion und Berechnung von Stahlkonstruktionen für die Ausrüstung und Verrohrung erfolgte auf Basis von statischen und dynamischen Belastungsberechnungen.

Sonderunterstützungen waren in diesem Zusammenhang ein relativ aufwendiger Teil.

Im 1. Bauabschnitt wurde der Stahlbau/Rohbau einschließlich der notwendigen Beschichtungen, die Package Unit Feststoffhandling und weitere Schüttgutversuche, die Bedienungseinrichtungen (Krananlage /Hebezeuge für Materialtransport) und die Brüdenaufbereitung bestellt.

Technikumsversuche mit Feststoffen wurden bei den jeweiligen potentiellen Lieferanten durchgeführt. Die Korrosionsuntersuchungen für die Leitsalzherstellung wurden bewertet und Materialien für Umbauarbeiten bestellt.

Die Prüfung und Fertigungsfreigabe der Konstruktionszeichnungen für die Equipments und Bedienungseinrichtungen wurde beendet. Zur Fertigungsüberwachung bei den Lieferanten wurden diverse mehrtägige Besuchstermine gemeinsam mit dem technischen Einkauf durchgeführt, z. B. jeweils 2 Kontroll-/Abnahmetermine für den Reaktor/Mischer und das Feststoffhandling. Das Feststoffhandling, der Reaktor/Mischer, die Vakuumsysteme und Teile der Brüdenaufbereitung wurden geliefert und montiert. Die Montageüberwachung wurde zeitgleich mit dem Einbau der Equipments und Rohrleitungen, Armaturen und EMSR-Technik begonnen. Funktionsbeschreibungen zur Festlegung der Steuerungsabläufe und die Vorgaben für die Schaltschrankplanung wurden gemeinsam mit den Lieferanten und der EMSR-Fachabteilung bearbeitet. Angebote für die Erstellung der Schaltpläne und den Schaltschrankbau wurden eingeholt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.



Abbildung B-31: Hauptprozesskomponenten

Ein Probelauf des Reaktors/Mischers wurde erfolgreich durchgeführt. Der Anschluss der Heiz-/Kühlanlage für den Reaktor/Mischer wurde fertig gestellt. Der Ausdehnungsbehälter und die Umwälzpumpe der Heiz-/Kühlanlage wurden für den Reaktor/Mischer adaptiert.

Einige im Gebäude vorhandene Rohrleitungen mussten angepasst werden, damit die neuen Equipments gemäß der Planungs- und Herstelleranforderungen platziert und angeschlossen werden konnten.

Es wurde sichergestellt, dass die Fertigungsüberwachung, Druck- bzw. Dichtigkeitsprüfung sowie die Abnahme prüfpflichtiger Rohrleitungen nach den Vorgaben der Druckgeräterichtlinie und der Werknorm der Chemetall durchgeführt wurden. Die Isolierung der entsprechenden Rohrleitungen und Anlagenkomponenten wurde abgeschlossen.

Der elektrische Anschluss sowie die Kontrolle und Funktionsprüfung der elektrischen, mess- und steuerungstechnischen Ausrüstung und die Justierung dieser sind durchgeführt worden. Die in den Funktionsbeschreibungen zur Festlegung der Steuerungsabläufe festgelegten Alarm-, Verriegelungs-, und Abschaltpunkte wurden geprüft. Hier sind besondere Anforderungen des Extraktionsprozesses hinsichtlich des Explosionsschutzes berücksichtigt worden. Die Programmierung und Visualisierung der steuerungstechnischen Abläufe wurde fertiggestellt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.



Abbildung B-32: Feststoffhandling

Nach der mechanischen Fertigstellung wurde der Probebetrieb gemäß Inbetriebnahmefahrplan begonnen. Einweisungen und Schulungen des Betriebsleiters sowie der Mitarbeiter und des Technikpersonals wurden parallel zur Inbetriebnahme der einzelnen Anlagenkomponenten durchgeführt.

Erste Probeansätze zur Herstellung eines Leitsalzes wurden in den Hauptkomponenten der Anlage erfolgreich durchgeführt. Während des Probebetriebes wurden diverse Änderungen (u.a. auch aufgrund von Reklamationsmeldungen) an verschiedenen Teilen der Pilotanlage vorgenommen. Diese Änderungen mussten veranlasst, überwacht und dokumentiert werden. Zuletzt wurde die ATEX-Bescheinigung für den Trockner/Reaktor von der benannten Stelle erarbeitet und übergeben sowie die letzte Anlagenkomponente (Schweißmaschine für die Abfüllanlage) ausgeliefert.

Die Bedienungsanleitungen der Lieferanten wurden geprüft und teilweise überarbeitet. Gemäß den technischen Vorgaben aus der Lieferantendokumentation wurde eine übergreifende Bedienungsanleitung erstellt und während des Probebetriebes an die speziellen Erfordernisse angepasst. Ein Betriebshandbuch wurde erstellt.

Weiterhin wurden die notwendigen Angaben für das spätere Instandhaltungsmanagement zusammengestellt und zur Erfassung der Equipments und Ersatzteile in das SAP-System eingegeben.

Die §29a-Prüfung der Anlage (Übereinstimmung der genehmigten mit der tatsächlich gebauten Anlage) wurde vom TÜV-Nord erfolgreich durchgeführt. Hierzu wurde der tatsächliche bauliche Zustand der Anlage im Vorhinein durch eine as-built Aufnahme der R+I-Fließbilder dokumentiert, sowie in die Alarm- und Gefahrenabwehrpläne eingepflegt.

Die behördlichen Auflagen bzw. Nebenbestimmungen aus dem Genehmigungsbescheid wurden erfüllt.

Um die Umsetzung des Laborprozesses in die Pilotanlage zu erleichtern und sicherer zu gestalten (z. B. aufgrund möglicher Kontamination), wurden im Bereich der Extraktion weitere Versuche beauftragt. Die Anforderungen an die Pilotanlage für die Extraktionsversuche hinsichtlich Explosionsschutz, der Verwendung von Gefahrstoffen und Anlagensicherheit

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

wurden mit den Fach- und Sicherheitsabteilungen sowie mit den Produktionsmitarbeitern vor Ort und in Besprechungen ermittelt und bewertet. Die Ergebnisse wurden in einem Bericht zusammengefasst und in das Verfahrensdesign für die Extraktionsversuche implementiert.

Stahlbau

Die zu bauende Anlage wurde in ein vorhandenes Gebäude auf dem Werksgelände installiert. Dies erforderte besondere Berücksichtigung speziell beim Bau- und Stahlbau. Zunächst mussten nicht mehr tragfähige Plattformen und Bühnen, sowie nicht mehr benötigte sonstige Komponenten demontiert werden. Bestandteil der Stahlkonstruktionen waren auch neue Innentreppen. Aus Sicherheitsgründen wurde außerdem eine neue Außentreppe installiert. Das Außentor musste umgebaut und ein Spritzschutzvorhang umgesetzt werden.

Um den Trockner später in das Stahlgerüst einhängen zu können, musste eine Montageöffnung im Dach des Gebäudes geschaffen werden.

Die Demontagen konnten bereits im 1. Halbjahr abgeschlossen werden.

Es wurden Baupläne für Reaktor- und Equipment-Plattformen und Vorgaben für die Vergabe der Rohbau- und Stahlbauaufträge erstellt.

Die Stahlbauleitzeichnungen und statischen Berechnungen wurden durch den bestellten Prüfingenieur geprüft und im Anschluss an die beauftragten Stahlbauunternehmen zur Erstellung der Fertigungszeichnungen übergeben. Der in 2 Bauabschnitte unterteilte Stahlbau wurde getrennt verhandelt und gem. der Verhandlungsergebnisse an 2 Stahlbauunternehmen vergeben. Beim 1. Bauabschnitt handelte es sich im Wesentlichen um einfache Bauteile ohne Schnittstellen zu den Equipments wie z. B. Treppen und Gebäudeöffnungen, Tore etc. Im 2. Bauabschnitt mit wesentlich komplexeren Bauteilen wurden Stahlbühnen für die Apparate konstruiert und ausgelegt. Hierbei mussten einerseits die Betriebsgewichte für unterschiedliche Kathodenmaterialen und andererseits zahlreiche verfahrens-/sicherheitstechnische Vorgaben sowie die optimale Wartung und Bedienung der Apparate berücksichtigt werden.

Während der Errichtung der Stahlbühnen und Treppen erfolgte die Sicherheits- und Gesundheitskoordination durch einen bestellten Koordinator und gleichzeitig die Montageüberwachung. Die Termin- und Kostenverfolgung sowie regelmäßige Sicherheitsbegehungen fanden fortlaufend statt.

Diverse Abnahmeprüfungen wurden durchgeführt (Abnahmen Prüfstatiker, TÜV-Abnahmen der Anlagen für wassergefährdende Stoffe, Sachverständigenabnahmen der Hebezeuge/Krane).

Für die Entstaubungsfilter und den neuen Ausdehnungsbehälter der Heiz-/Kühlanlage wurden gemäß Design-Review Wartungsbühnen mit Steigleitern eingeplant. Die dafür notwendigen Stahlbauleitzeichnungen und statischen Berechnungen wurden erarbeitet.

Der Schlussabnahmeschein liegt vor. Notwendige Änderungen während des Probebetriebes wurden ausgeführt.

Weitere Aktivitäten nach Projektabschluss

Beschaffung von Kathodenmaterial und Chemikalien. Finale Überprüfung des Verfahrensdesigns und des Sicherheitskonzeptes für die bereitgestellten Materialien. Anschließende In-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

formation der Genehmigungsbehörde über die geplanten Pilotversuche. Erstellung des Detailversuchsplanes. Start der Pilotversuche und Auswertungen.

B.4.3 Pilotanlage für Aufreinigung mittels Ionenaustauscher und Salzspaltung mittels Elektrodialyse

Prinzipiell ist sowohl eine Membranelektrolyse (EMP) als auch eine Elektrodialyse mit bipolarer Membran (EDBM) zur Aufreinigung von lithiumhaltigen Solen einsetzbar. Zu Beginn des Projekts wurde davon ausgegangen, die EDBM für Li2SO4 und die EMP für LiCl zu verwenden.

Da kein Recycling-Material aus lithiumhaltigem Kathodenmaterial vorhanden war, mussten die notwendigen Voruntersuchungen und Charakterisierungen der Prozessschritte mit einer synthetischen Ersatzsole („Masterbrine“) durchgeführt werden. Im Rahmen eines „Design for Six-Sigma Workshops“ wurde eine vorläufige Produktspezifikation für LiOH erarbeitet, die einen Abgleich des Verunreinigungsmusters des Ersatzsystems mit den später verwendeten Solen aus dem Recyclingverfahren ermöglichte.

Der verfügbare Stand des Wissens hinsichtlich der elektrochemischen Herstellung von LiOH wurde im Hinblick auf die Verwendung in diesem Vorhaben geprüft. Dabei hat sich gezeigt,

dass für die elektrochemische Überführung lithiumhaltiger Solen in LiOH eine gezielte Aufreinigung dieser Solen erforderlich ist, weil die Permselektivität der verfügbaren Membranverfahren nicht ausreichend ist.

Für die Abtrennung von zweiwertigen kationischen Verunreinigungen wurde entschieden, ein entsprechendes Ionentauschersystem einzusetzen. Die Auslegungsdaten für das Ionenaustauschersystem im Hinblick auf Durchflussrate und pH-Wert wurden hausintern ermittelt und verifiziert.

Zur Reduzierung von anionischen Verunreinigungen wurde ein Membranfiltrationsverfahren untersucht. Die Erprobung der Membranfiltration wurde in Zusammenarbeit mit einem externen Dienstleister durchgeführt.

In früheren Untersuchungen wurde bereits die prinzipielle Eignung von elektrochemischen Verfahren zur Überführung von Lithiumsalzen in LiOH gezeigt. Ein grundlegendes Prozessmodell für die Membranelektrolyse (EMP) war vorhanden. Die erste Prüfung der Daten ergab aber die Notwendigkeit, weitere Parameter zu bestimmen, um später insbesondere den sicheren Betrieb der Anlage zu gewährleisten.

Um den sicheren Betrieb der Membranelektrolyse (EMP) zu gewährleisten wurde auf Basis eines „Design of Experiments“ ein Versuchsplan aufgestellt und mit einem externen Forschungsdienstleister abgearbeitet. Gegenstand der Untersuchung war unter anderem das Verhalten der sicherheitskritischen Gase Chlor und Wasserstoff im Hinblick auf die Löslichkeiten in unserem Stoffsystem. Auf dieser Basis wurde die Prozessführung und -überwachung auf der Produktseite angepasst. Weiterhin konnte die Aussagefähigkeit des Prozessmodells für das Verhalten in Abhängigkeit von pH-Wert und Stromstärke bei der Membranelektrolyse bestätigt werden. Es diente als Grundlage für die verfahrenstechnische Auslegung der Pilotanlage.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

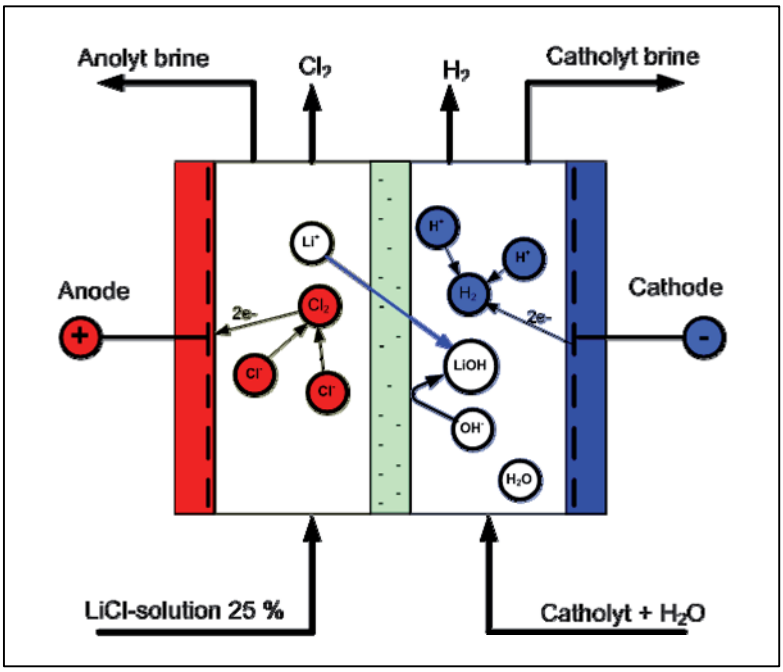


Abbildung B-33: Funktionsweise einer Elektrolyse mit monopolarer Membran

Parallel dazu wurden mit der synthetischen Ersatzsole („Masterbrine“) Vorversuche mit einem Elektrodialyseverfahren (EDBM) durchgeführt. Bei dieser Methode wird die Dissoziation des Wassers durch eine bipolare Membran verstärkt. Die lithiumhaltige Sole wird in die entsprechenden anorganischen Säuren und Laugen unter zu Hilfenahme von anionen- bzw. kationenselektiver Membranen überführt. Insbesondere die Entstehung von gasförmigem Chlor wird dabei vermieden.

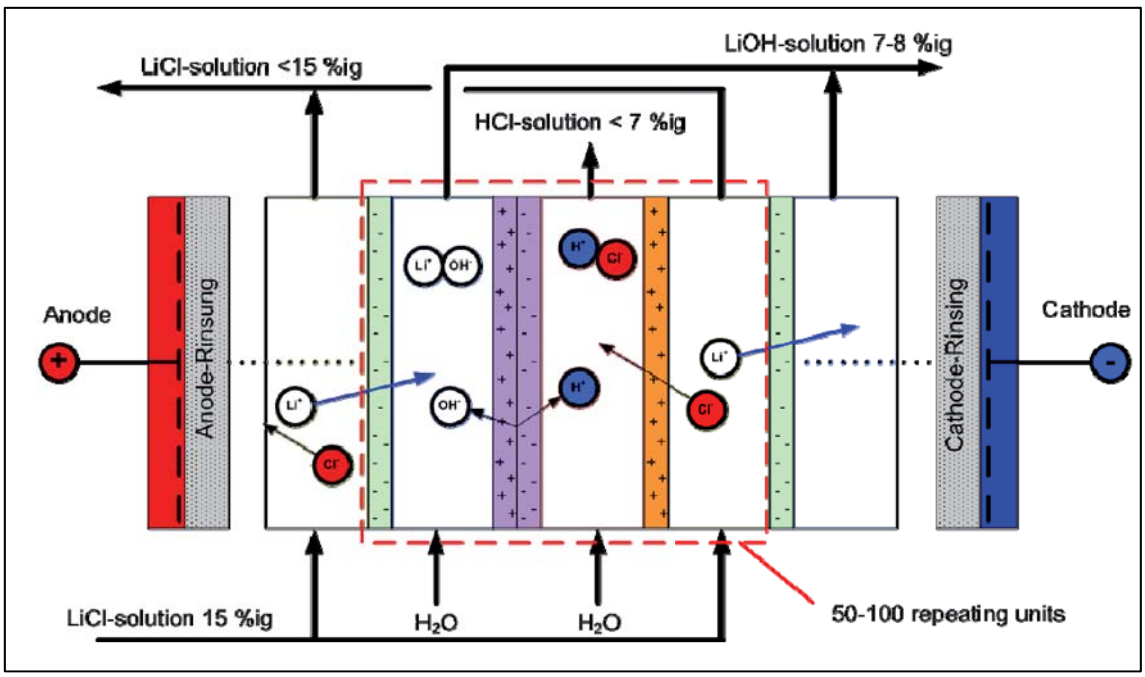


Abbildung B-34: Funktionsweise einer Elektrodialyse mit bipolarer Membran

Nachdem die FuE-Arbeiten zusammen mit externen Forschungseinrichtungen abgeschlossen wurden, wurde das Process Layout (Planung Verfahrenstechnik) für diese beiden Technologien vorangetrieben und zum Ende gebracht. Im Anschluss wurden die technischen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Verhandlungen mit zwei Lieferanten aufgenommen. Parallel wurden Angebotsspezifikationen für die Gas- und Flüssigkeitsbehandlungsanlagen vollständig erarbeitet, die genau wie die Elektrodialyseanlagen eine lange Lieferzeit haben, um diese rechtzeitig zu bestellen. Im Zuge dessen wurde bereits ein erstes SHE-Review (Safety-Health-Environment) durchgeführt, um die Auswirkungen des Vorhabens auf die Umwelt zu beurteilen.

Im Rahmen der Untersuchungen zur elektrochemischen Salzspaltung hat sich folgendes gezeigt:

- Die EDBM eignet sich sowohl für die Herstellung von Lithiumhydroxid aus Lithiumsulfat als auch aus Lithiumchlorid
- Der Vergleich zwischen EMP und EDBM für LiCl zeigte annähernd gleiche Produktqualitäten, i.e. Chloridgehalt in der LiOH-Lösung
- Die Versuche mit der EDBM konnten aufgrund des geringeren apparativen Aufwands (keine Behandlung gasförmiger Nebenprodukte) mit größeren Membranflächen durchgeführt werden, so dass eine Überführung in den Pilotmaßstab besser als bei der EMP möglich ist
- Für die EDBM wurde ein Dauertest (1.000 h) mit LiCl-Lösung erfolgreich durchgeführt
- In der Entwicklungszusammenarbeit mit den beiden führenden europäischen Herstellern für EMP konnte keine gemeinsame Basis für den Schutz des durch Chemetall erworbenen Knowhows für den elektrochemischen Prozessschritt gefunden werden, da die Anlagen nur mit einem Lizenzmodell vertrieben werden
- Anlagen für die EDBM werden ohne Lizenzmodell vertrieben, wie es bei Equipment für die chemische Industrie üblich ist

Auf Basis dieser Ergebnisse war es sinnvoll, die elektrochemische Salzspaltung sowohl für die LiCl-Lösung als auch für die Li2SO4-Lösung mit einer EDBM durchzuführen.

Eine Gegenüberstellung beider Konzepte zeigt die Unterschiede des verbesserten Konzepts:

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

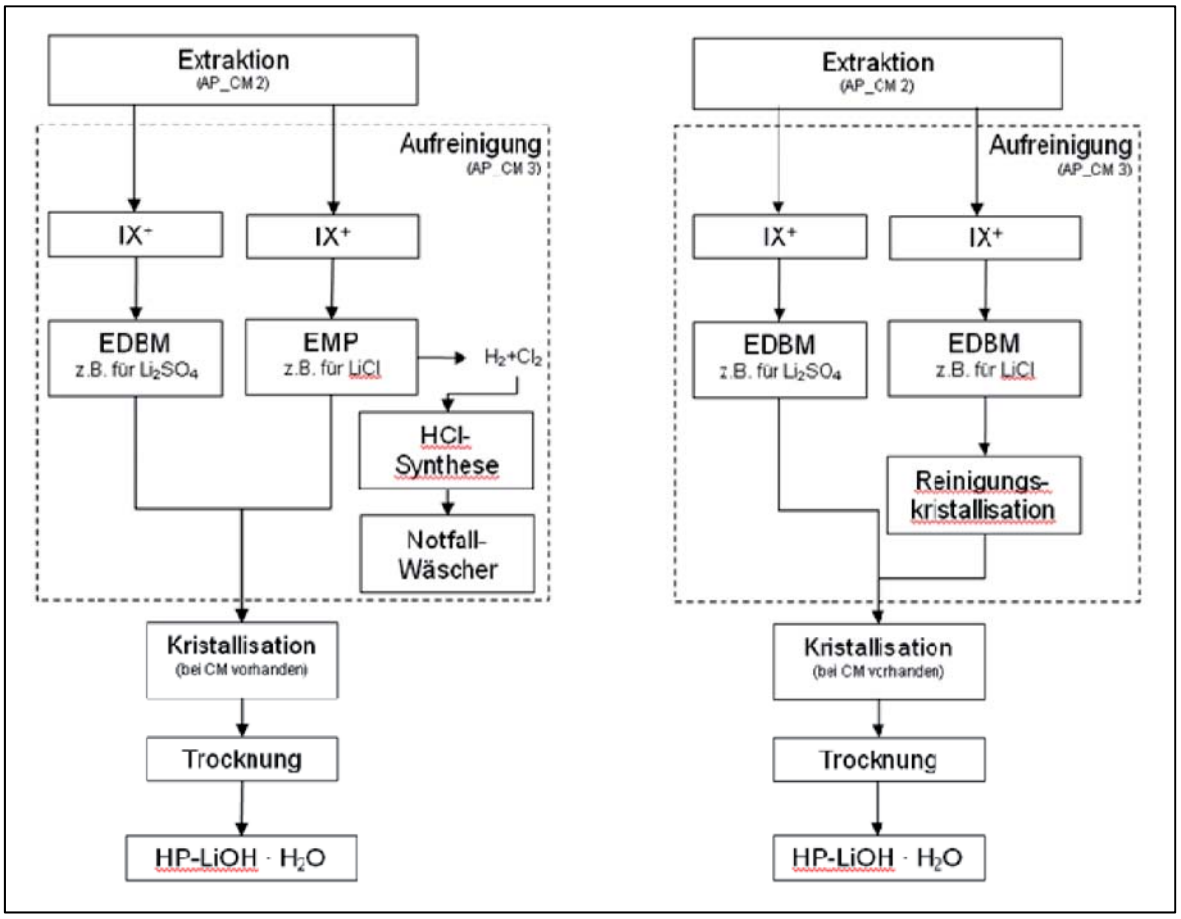


Abbildung B-35: Ursprüngliches und verbessertes Verfahrenskonzept

Im verbesserten Konzept wurde die EMP durch eine EDBM ersetzt. Da bei diesem Verfahren kein Chlorgas freigesetzt wird, entfallen die HCl-Synthese und das Notfallwäschersystem. Zusätzlich ist allerdings eine Reinigungskristallisation erforderlich.

Das mit dem Ursprungskonzept notwendige Notfallwäschersystem bestand aus den Komponenten Wäscherkolonne, Venturiwäscher, Kühler, Pumpen und Behälter. Die weggefallene HCl-Synthese beinhaltete Chlorgaskühler, Kondensatfilter, Absorptionsbehälter, Filter, Behälter und die eigentliche Chlorwasserstoffverbrennung.

Die Reinigungskristallisation im verbesserten Konzept wird für die LiOH-Lösung als Zwangsumlaufverdampfer mit externem Wärmetauscher ausgeführt. Der Kristallisationsprozess wird bei Unterdruck durchgeführt. Der Unterdruck im Kristallisationsapparat wird mit einem Kondensator und einer Vakuumpumpe für die nicht kondensierbaren Gase eingestellt. Das Kristallisat wird mit einer Zentrifuge von der Mutterlauge abgetrennt und auf der Zentrifuge mit VE-Wasser gewaschen. Anschließend wird der Feststoff in VE-Wasser gelöst (8 % ige LiOH-Lösung) und der vorhandenen Kristallisation zugeführt.

Zusammenfassend waren die Vorteile des modifizierten Konzepts die Verminderung des Scale-Up-Risikos, die Vermeidung der Behandlung gefährlicher Gase (Cl_2 und H_2) und die Sicherstellung des Knowhow-Schutzes. Darüber hinaus war sichergestellt, dass die geplanten Kosten und der Fertigstellungstermin eingehalten werden. Mit dem modifizierten Verfahrenskonzept wird ein allgemein verwendungsfähiges hochreines Lithiumhydroxid hergestellt.

Es wurde ein Lieferant ausgewählt, der sowohl in der Herstellung von Membranen als auch bei der Auslegung und Fertigung von EDBM-Anlagen langjährige Erfahrungen aufweist.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Bei diesem Lieferanten wurden entsprechende Versuche durchgeführt, um die EDBM-Technologie auf die lithiumhaltigen Lösungen zu adaptieren. Es konnten sowohl Membranen für die LiCl-Lösungen als auch für die Li2SO4-Lösungen geliefert werden. Hierdurch war es möglich, eine Komplettlösung für den Anlagenteil EDBM inklusive Verrohrung, Kreislaufbehälter, mess- und regelungstechnische Ausrüstung sowie das zugehörige Engineering und die Inbetriebnahme zu erhalten.

Durch die Lieferung beider EDBM-Zellen von einem Hersteller konnte der durch die Refokussierung aufgetretene Zeitverlust eliminiert und der Kostenrahmen eingehalten werden.

Nach Treffen der Entscheidung, die modifizierte Prozessvariante weiterzuverfolgen, wurden die verfahrenstechnischen Arbeiten umgehend aufgenommen, um die Ausschreibungen so schnell wie möglich fertig zu stellen. Im Dezember 2010 konnten bereits die Aufträge für die Hauptpositionen Elektrodialysemodule und die Reinigungskristallisation vergeben werden.

Die Höhe der Reinigungskristallisationsanlage (18 m) und der allgemeine Platzbedarf aller geplanten Anlagenteile erforderten eine Erweiterung eines bestehenden Gebäudes, die außerhalb des Förderprojekts realisiert wurde.

Im Basic Engineering wurde für die Vorbehandlung der Rohsalzlösung sowie die Aufbereitung der Nebenprodukte das Verfahren entwickelt. Zusätzlich wurde die prozessbegleitende Analytik zusammen mit dem Qualitätslabor in Langelsheim erarbeitet. Die Werkstoffe und die Komponenten für die EMSR-Technik wurden mit den Lieferanten festgelegt. Die Aufstellungsplanung der Großapparate wurde in Zusammenarbeit mit den Lieferanten durchgeführt. Die Pilotanlage wurde durch das Gewerbeaufsichtsamt als Versuchsanlage bewertet und war daher hinsichtlich BImSchG genehmigungsfrei.

Das Detail Engineering umfasste u.a. die Ausplanung des im Basic Engineering entwickelten verfahrenstechnischen Prozesses. Vergabeverhandlungen wurden mit den Lieferanten für Ionenaustauscher, Behälter, Pumpen und weiteres Equipment durchgeführt.

Für den Hauptprozess wurden die Rohrleitungsverlaufsplanung durchgeführt und die Infrastrukturleitungen ausgeplant. Die sicherheitstechnische Betrachtung wurde mittels Ausfall-Effekt-Analysen für die einzelnen Anlagenteile durchgeführt. Die Montagearbeiten wurden ausgeplant und vergeben. Für den reibungslosen Ablauf der Baustelle wurde die Einbindung der Montagetätigkeiten in den Produktionsalltag und die Infrastruktur am Standort Langelsheim vorbereitet.

Noch während des Detail Engineerings wurde mit der Montage begonnen. Im Tanklager wurden drei weitere Behälter mit Rührwerk für die Lagerung von Ausgangs-, Zwischen- und Produktlösungen installiert. Zur Einbindung in den Anlagenverbund wurden die zu- und abführenden Rohrleitungen aus der Extraktionsanlage bzw. zur Kristallisationsanlage im Produktionsbetrieb Lithium Spezialsalze montiert.

Im Mai 2011 wurden die acht Gestelle der Elektrodialysemodule und die dazugehörigen Gleichrichter geliefert. Aufgrund ihrer Größe wurden diese Anlagenteile mit Hilfe eines Krans durch eine Dachluke auf die oberste Bühne des Gebäudes eingebracht. Des Weiteren wurden Filter, Wärmetauscher und die Stripkolonnen auf der neuen Zwischenbühne positioniert und die Behälter in der unteren Ebene aufgestellt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Anfang Juni wurde mit der Rohrleitungsmontage für die Elektrodialyse-Anlage begonnen. Nach Abschluss wurde die EDBM-Anlage einer Druckprüfung unterzogen. Die EMSR-Montage der EDBM schloss sich an. Die EDBM Anlage wurde als Komplettsystem geliefert und installiert.



Abbildung B-36: EDBM-Anlage



Abbildung B-37: Behandlung Salzlösung

Umfangreiche Sicherheitsanalysen mit Schwerpunkt auf das Betriebsmittelsystem wurden durchgeführt. Das Anlagenpersonal wurde intern geschult.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Der Kristallisationsapparat (Verdampfer, Heizkammer und Umwälzleitung) wurde in den neu errichteten Stahlbau eingebracht und montiert. Die Rohrleitungsmontage der Kristallisation, der Brine-Aufbereitung und für die Betriebsmittelversorgung wurde vorgenommen. Im Anschluss erfolgte die EMSR Montage Kristallisation, Brine-Aufbereitung und Betriebsmittel.

Das Ionentauschersystem muss bei definierten Konzentrationen, pH-Werten und Temperaturen betrieben werden. Die Rohsalzlösungen aus dem Extraktionsschritt (Vorprozess) weisen für diese Parameter eine relativ große Schwankungsbreite auf. Daher wurden in der sogenannten Brine-Aufbereitung Prozessbehälter für die Konzentrationsanpassung und pH-Wert Einstellung vorgesehen und ein Strömungserhitzer für die Einstellung des Temperaturniveaus. Der Ionentauscher wurde als Gesamtsystem geliefert. Die Montage wurde im August vorgenommen.

Die Prozessparameter für den Betrieb des Ionentauschers wurden in unserem Labor entwickelt und werden in der Pilotphase nach Projektende validiert und optimiert. Nach dem Ionentauscher wird die Lösung bis zur Freigabe zwischengelagert. In unserem Qualitätslabor in Langelsheim wurde ein bestehendes Analyseverfahren (ICP) im Hinblick auf die Spurenanalytik optimiert. Für die Entnahme der repräsentativen Proben wurde ein neues halbautomatisches Probennahmeverfahren konstruiert und umgesetzt, wodurch ein besonders sicheres und kontaminationsfreies Probenhandling möglich ist. Die freigegebene Rohsalzlösung wird anschließend in einen Vorlagebehälter überführt und in einer Kreislaufleitung dem EDBM Prozess zur Verfügung gestellt.

Die installierte EMSR-Technik wurde einer umfangreichen Funktionsprüfung unterzogen. Das Atmungssystems (Inertisierung) wurde montiert. Das komplette Rohrleitungssystem wurde Druckprüfungen unterzogen. In Vorbereitung der Inbetriebnahme wurde eine Sicherheitsanalyse durchgeführt. Eine externe Schulung des Anlagenpersonals wurde vorgenommen. Die Montage der Anlage wurde vollständig abgeschlossen und die automatisierte Regelung der Anlage mit einer Wasserfahrt erprobt. In einem ersten Betriebsversuch wurde aus einer LiCl-Lösung das Produkt LiOH und Salzsäure hergestellt. Im Rahmen der Pilotbetriebsphase nach Projektende werden Anlagenparameter hinsichtlich Stabilität des Prozesses und Qualität des Produkts optimiert.

Zusammengefasst wurden im Rahmen dieses Projekts ca. 60 Einzelequipments und Equipmentgruppen mit insgesamt 2,3 km Rohrleitungen montiert. Zur Prozesssteuerung wurden 380 Mess- und Regeleinrichtungen mit insgesamt 15 km Kabelwegen installiert.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

C Entwicklung von Herstellungsprozessen für „Recycling-Batterien“

Eine eingehende Qualitätskontrolle bzw. Charakterisierung der Grundstoffe für die Aktivmaterialsynthese ist von zentraler Bedeutung. Einerseits handelt es sich um die Endprodukte der metallurgischen Rückgewinnung von Lithium- und Übergangsmetallsalzen (**AP B.4**, CM), andererseits handelt es sich um die Ausgangsstoffe für die Aktivmaterialsynthese (SC, HCST in **AP C.2**). Die Ausgangs- und Eingangskontrolle soll sicherstellen, dass der Aktivmaterialsynthese nur Grundstoffe mit ausrechendem Potential zugeführt werden. Durch die Charakterisierung der Grundstoffe wird ein fundiertes Verständnis über den Zusammenhang zwischen der Prozessführung des Recyclings (**AP B.3**), der Rohstoffqualität sowie der hydrometallurgischen Rückgewinnung (**AP B.4**) erhalten. Für den Betrieb des kleinsten Reaktors zur Herstellung des NMC-Aktivmaterials benötigt HCST mindestens 200 Liter einer 10 % igen Übergangsmetallsalzlösung. Die hierfür erforderlichen Mengen an formierten und zyklisierten Materialien waren im Projekt nicht verfügbar. Ferner hätten diese im Rahmen des Projektes von den anderen Projektpartnern nicht verarbeitet und die entsprechenden Vorstufen nicht bereitgestellt werden können. Daher wurde zwischen den Partnern die Untersuchung von Proben mit gezielter Kontamination bzw. von simulierten Lösungen im Labormaßstab vereinbart. Da alle Partner Erfahrungen im Bereich des Up-Scaling haben, wurden keine negativen Auswirkungen dieses alternativen Vorgehens auf das Gesamtergebnis erwartet. Die Stoffe durchlaufen den unten abgebildeten Prozess und werden so ausreichend auf ihre Qualität geprüft.

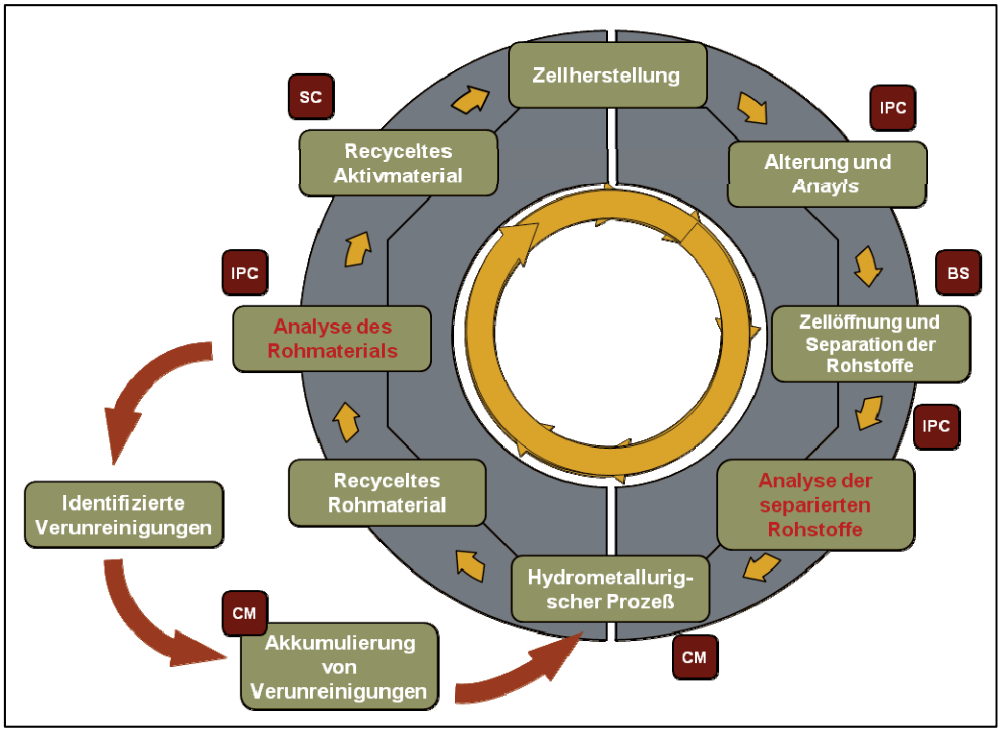


Abbildung C-1: Geänderter Recycling Zyklus

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

C.1 Charakterisierung der recycelten Grundstoffe

In Absprache mit CM wurde durch HCST eine Spezifikation für recycelte Übergangsmetalle / Übergangsmetallsalzlösungen und recycelte Lithiumgrundstoffe (LiOH, Li_2CO_3) erstellt. An späterer Stelle (**AS C.2.3**) wird sich zeigen, dass eine aufwändige Abtrennung aller Nebenbestandteile unter Umständen nicht zwingend notwendig ist und eine Abtrennung nachweislich störender Kationen (insbesondere Al) aus den Recyclinglösungen eine kostengünstige Variante sein kann.

C.1.1 Erstellen einer Rohstoff-Spezifikation für die recycelten Lithium-Rohstoffe durch die Aktivmaterialhersteller

Die Einhaltung der oben genannten Spezifikation wurde bei Projektbeginn als unabdingbare Voraussetzung für eine reproduzierbare Darstellung der Aktivmaterialien gesehen. Die Ergebnisse der projektinternen Absprachen zu den Spezifikationen der Übergangsmetalllösungen sind in Tabelle C-1 wiedergegeben. Fett gedruckte Werte bedeuten, dass eine Einhaltung der Spezifikationen vermutlich schwierig zu realisieren bzw. zu kontrollieren sein würde. Die Konzentration aller nicht aufgelisteten Metalle sollte kleiner als 5 ppm sein sollte. Darüber hinaus sollten die Lösungen frei von kristallinen Bestandteilen sein (vgl. in H_2O unlösliche Bestandteile).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tabelle C-1: Spezifikationen der NiSO4- / CoSO4-Lösungen für LNCAO (links) und LNMCO (rechts)

Bestandteil	**Gehalt (LNCAO)**	**Gehalt (LNMCO)**
Nickel (Ni)	15,0 ± 0,5 g/l	34,01 ± 0,5 g/l
Kobalt (Co)	85,0 ± 0,5 g/l	34,15 ± 0,5 g/l
Mangan (Mn) [1)]	**max. 20 ppm**	31,83 ± 0,5 g/l
Kupfer (Cu)	max. 10 ppm	max. 10 ppm
Aluminium (Al)	max. 20 ppm	max. 20 ppm
Eisen (Fe)	max. 15 ppm	max. 15 ppm
Silicium (Si)	max. 10 ppm	max. 10 ppm
Titan (Ti)	max. 10 ppm	max. 10 ppm
Zirkonium (Zr)	max. 10 ppm	max. 10 ppm
Zink (Zn)	max. 10 ppm	max. 10 ppm
Phosphor (P)	max. 10 ppm	max. 10 ppm
Fluor (F)	max. 10 ppm	max. 10 ppm
Chlor (Cl)	max. 1.000 ppm	max. 1.000 ppm
Kohlenstoff (C) [2)]	**max. 20 ppm**	**max. 20 ppm**
in H_2O unlösliche Bestandteile	**max. 25 ppm**	**max. 25 ppm**
pH (min. – max.)	2 – 6	2 – 6

[1)] für Mn besteht das Problem der Durchmischung der Aktivmaterialien bei unterschiedlichen Batterietypen durch Behandlung in gleichen Anlagen
[2)] TOC (total organic content), unter Vorbehalt

Neben den Spezifikationen der Übergangsmetalllösungen wurden auch solche für die einzusetzenden Li-Verbindungen erstellt. Die Ergebnisse sind in Tabelle C-2 und Tabelle C-3 wiedergegeben.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tabelle C-2: Spezifikationen für LiOH•H2O

	HCST	Nach Rücksprache mit CM	SC
LiOH	min. 56,5%		55,1 – 56,1%
Na + K	max. 0,3%		max. 0,01%
Fe_2O_3	max. 0,001%		max. 0,01%
Mg	max. 0,01%	0,2%	max. 0,003%
Ca	max. 0,016%	0,2%	max. 0,003%
CO_2	max. 0,35%		max. 0,35%
Cl	max. 0,05%		max. 0,003%
in H_2O unlösliche Bestandteile	max. 0,1%		max. 0,01%

- nicht aufgeführte Metalle < 5 ppm

Tabelle C-3: Spezifikationen für Li2CO3

	HCST	Nach Rücksprache mit CM	SC
Li_2CO_3	min. 99%		min. 99,9%
Na	**max. 0,1%**	**Na + K = 0,2 %**	max. 0,002%
K	**max. 0,001%**		max. 0,002%
Mg	**max. 0,01%**	**0,2%**	max. 0,003%
Ca	**max. 0,016%**	**0,2%**	max. 0,003%
Fe_2O_3	max. 0,003%		max. 0,003%
Cl	**max. 0,015%**	**0,04%**	max. 0,002%

- nicht aufgeführte Metalle < 5 ppm

Zusammenfassend ist festzustellen, dass bei einer Einhaltung der definierten Spezifikationen die Synthese von Aktivmaterialien aus recycelten Vorprodukten ohne Kompromisse möglich sein sollte.

Da Chlorid- und Sulfatverunreinigungen in den Aktivmaterialien besonders zu beachten sind, hat SC als Aktivmaterialhersteller für Lithiumhydroxid maximale Mengen von Chlorid und Sulfat spezifiziert (siehe Tabelle C-4).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tabelle C-4: Rohstoffspezifikation von Lithiumhydroxid Monohydrat

	Min.	Typ.	Max.
Li content (%)	15,8		
Assay ($LiOH.H_2O$) (%)	55,5	56,0	56,5
Chloride (ppm)			50
Sulfate (ppm)			200

C.1.2 Bewertung der recycelten Lithium- und Übergangsmetallsalze im Vergleich von kommerziellen und recycelten Primärrohstoffe

Die recycelten Wertstoffe durchliefen verschiedene Charakterisierungs- und Bewertungsstufen. Dies war erforderlich, um für den Recycling Prozess ein ausgewogenes Maß aus Qualität, Effizienz und Wirtschaftlichkeit zu realisieren. Hierzu musste von allen beteiligten Partnern eine sich wiederholende (iterative) Analyse und Bewertung der erhaltenen Wertstoffe im Kontext der verschiedenen vorgelagerten Separations- und Aufreinigungsschritte als auch der nachgelagerten möglichen Verwendung stattfinden. Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden SC mehrere gezielt mit Lithiumsulfat kontaminierte Lithiumhydroxid-Monohydrat-Proben (Bereich 20 – 1000 ppm Sulfat) und eine größere Menge Lithiumhydroxid-Monohydrat (battery grade) von CM zur Verfügung gestellt. In Form von Simulationsversuchen sollten hierbei die tolerierbaren Sulfat- Gehalte im Lithiumhydroxid ermittelt werden. Für HCST wurden im Labor von CM Extraktionen von Lithiumnickelmangankobaltoxid (zyklisiert) im Technikumsmaßstab durchgeführt. Die aus diesen Umsetzungen und nachfolgenden Aufarbeitungsschritten erhaltene Übergangsmetallsulfat-Lösung wurde an HCST versandt, um die Verwendbarkeit des Materials zur Herstellung von neuem Kathodenmaterial zu überprüfen.

Eines (V21) war Aktivmaterial aus formierten Zellen, bei dem zweiten (V5-Z) handelte es sich um zyklisiertes Material. Die gelieferten Pulver und Lösungen wurden von den Partnern elementaranalytisch untersucht.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tabelle C-5: Konzentrationen und pH-Werte der Lösungen von LNCMO V21 vs. LNCMO V5-Z

Prüfmerkmal	LNMCO V21	LNMCO V5-Z	LNMCO V5-Z * 1.345 [1)]
pH-Wert bei 20°C	4,0	2,8	
Li	ca, 0,560 g/l	ca, 4,8 g/l	6,46 g/l
Ni	39 g/l	29 g/l	39 g/l
Co	38 g/l	28 g/l	37,7 g/l
Mn	32 g/l	25 g/l	33,6 g/l
Al	0,238 g/l	1,1 g/l	1,48 g/l
Cu	<10 mg/l	768 mg/l	1.033 mg/l
Fe	<10 mg/l	22 mg/l	29,6 mg/l
Mg	ca. 14 mg/l	ca. 25 mg/l	33,6 mg/l
Si	ca. 14 mg/l	ca. 85 mg/l	114 mg/l
SO4	180 g/l	180 g/l	242 g/l

[1)] Als Faktor wurde empirisch 1,34 gewählt, um die Zusammensetzung des formierten (LNMCO V21) und des zyklisierten (LNMCO V5-Z) Aktivmaterials direkt vergleichen zu können (Annahme: gleiche Ni-Konzentration in der Reaktionslösung).

Bei der Konzentration der für die Synthese der Aktivmaterialien relevanten Übergangsmetallkationen lag die Abweichung jedoch bei beiden Materialien deutlich unter 10 %.

Abschließend ist zu bemerken, dass die Zusammensetzungen der recycelten Lösungen in keiner Weise den in **AS C.1.1** definierten Spezifikationen entsprechen. Um die festgesetzten Spezifikationen zu erreichen, sind eine Implementierung kostenintensiver Aufarbeitungsschritte und eine vollständige Isolierung der Ausgangsmaterialien unabdingbar. Um möglichst kostengünstig und effizient zu operieren, ist jedoch in weiteren systematischen Studien zu überprüfen, inwieweit höhere Konzentrationen an Verunreinigungen hingenommen werden können, ohne dass dabei die Performance der Aktivmaterialien negativ beeinträchtigt wird.

C.1.3 Übergreifende Analyse von chemischen und physikalischen Materialparametern und Bewertung der potentiellen Weiterverwendung

Diese übergeordnete Betrachtung von CM hatte zum Ziel, die Wiederverwendung der Materialien und damit die Qualität, Effizienz und Wirtschaftlichkeit der aufeinander folgenden Recyclingprozesse zu bewerten.

Daher wurden chemische und physikalische Materialeigenschaften verschieden hergestellter Übergangsmetallsalze analysiert. Es wurden hierbei die Schüttdichte, Korngrößenverteilung und Oberflächenbeschaffenheit der Materialien genauer untersucht. Diese Parameter haben einen Einfluss auf die technische Verarbeitung der Materialien. Weiterhin wurde eine

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

physiko-chemische Methode zur hausinternen Charakterisierung von Aktivmaterial/Rohstoffen entwickelt. Hierbei wurden klassische, elektrochemische Messmethoden auf die besonderen Anforderungen und Bedürfnisse angepasst.

C.1.4 Bewertung der Verwendungsmöglichkeiten für unterschiedliche Qualitäten der zurück gewonnenen Rohstoffe

Lithiumsalze werden in vielfältigen, unterschiedlichen Anwendungen eingesetzt. Lithiumcarbonat, das durch Reaktion von Lithiumhydroxid mit CO_2 hergestellt werden kann, findet beispielsweise Eingang in die Glasindustrie. Hier dient es z. B. als Fließmittel bei der Glasproduktion und kann Bor und Fluor in der Glasproduktion ersetzen und damit die Luftverschmutzung reduzieren. In Emaille-Anwendungen werden gläserne Beschichtungen auf Metall bei hohen Temperaturen aufgetragen, so dass die Korrosionsbeständigkeit erhöht wird. Die sehr dünne Schicht erhöht außerdem die Schlagfestigkeit (Emaille ist spröde). Für Glaskeramik (z.B. Kochfelder) wird der thermische Ausdehnungskoeffizient auf nahezu Null verringert, so dass keine thermisch induzierten Spannungsrisse auftreten. Bei großen Teleskopspiegeln ermöglicht die thermische Nicht-Ausdehnung die optische Fehlerfreiheit.

Weitere Anwendungen finden sich in der Aluminium-Elektrolyse. Hier sind die wesentlichen Vorteile eine Reduzierung des Energieverbrauchs und der Hydrogenfluorid-Freisetzung. In der Bauindustrie findet Lithiumcarbonat Anwendung für schnellbindende Al_2O_3-Zemente. Das Li-Kation aus Li_2CO_3 bindet sehr viele Wassermoleküle, dabei fällt ein LiAl-Hydrat aus, welches als Nukleierungs-Substrat funktioniert. Lithiumhydroxid wird vor allem in der Schmierfettindustrie eingesetzt. Vorteile sind ein hoher Tropfpunkt, keine Leckagen, exzellenter Wasserwiderstand (Schmierstoff wird nicht ausgewaschen), breiter Temperaturbereich und eine lange Lebensdauer. Eine sehr interessante Anwendung findet sich in der CO_2-Absorption in U-Booten, Rettungskapseln usw. Darüber hinaus gibt es noch eine Vielzahl von weiteren Lithiumsalzen in unterschiedlichen Anwendungen (z.B. für Katalyse, Schweiß- und Lötschmelzmittel, Feuchtigkeitskontrolle, Lufttrennung durch Adsorption, Vulkanisationsbäder für komplizierte Profile (Autofenstergummis, Scheibenwischer), Wärmeübertragungsmedium u.v.m.).

Um eine Einschätzung der Eignung der recycelten Lithiumsalze für Nicht-Batterieanwendungen vorzunehmen, wurden zunächst die Analysenzertifikate der recycelten Salze bewertet. In jedem Fall wurden die Anforderungen an die Lithiumsalze in den unterschiedlichen Anwendungsfeldern (Spezifikationen) mit den Analyseergebnissen verglichen. Eine große Herausforderung bestand darin, dass sich die einzelnen Spezifikationen der Kunden teilweise erheblich voneinander unterschieden. Sollten hier Abweichungen aufgetreten sein, wurden Möglichkeiten der Optimierung geprüft.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

C.2 Synthese und Charakterisierung von recycelten Aktivmaterialien

Die Zielsetzung war die Synthese und vollständige Charakterisierung (chemisch, strukturell, elektrochemisch) von LNCMO-Materialien aus recycelten Zellen. Dazu wurde jeweils eine Probe aus einem formierten Material (LNCMO V21) und einem zyklisierten Material (V5-Z) synthetisiert und mit einem unter gleichen Bedingungen dargestellten Referenzmaterial aus kommerziellen Vorstufen verglichen. Aufgrund geringer Probenmengen wurden keine Originallösungen eingesetzt, sondern Reaktionslösungen auf der Basis elementaranalytischer Daten nachgestellt.

Die mit verunreinigten LiOH-Rohstoffen im Labor- als auch im Technikumsmaßstab hergestellten $LiFePO_4$-Muster zeigten keine signifikanten Abweichungen in der Elementaranalyse. Insbesondere erhöhte sich der S-Gehalt im Endprodukt nicht, und die spezifische Kapazität der erhaltenen Muster blieb im erwarteten, spezifizierten Bereich.

C.2.1 Synthese von Aktivmaterialien aus recycelten Rohstoffen

In **AS C.2.1** wurde die Synthese von LNCMO Aktivmaterialien aus recycelten Grundstoffen diskutiert. Neben der Darstellung des aus formierten Zellen erhaltenen LNMCO V21 und des aus zyklisierten Zellen erhaltenen LNMCO V5-Z wurde zum direkten Vergleich ein LNCMO-Referenzmaterial zeitnah aus kommerziellen, hochreinen Vorstoffen unter identischen Bedingungen synthetisiert.

Tabelle C-6 führt die eingesetzten Rohstoffe (durchweg Sulfate, Silicium wurde dem Reaktionsgemisch als Natriumsilikat, Na_2SiO_3, zugesetzt) und die aus den Analysen berechneten Stoffmengen auf.

Tabelle C-6: Simulation der Lösungen (Metallsalz in g/l Lösung)

	M_{Metall} [g/mol]	M_{Salz} [g/mol]	LNCMO V21 (Metall) [g/l]	LNCMO V5-Z (Metall) [g/l]	LNCMO V21 (Metallsalz) [mol/l]	LNCMO V5-Z (Metallsalz) [mol/l]
Li_2SO_4	13,88 [1)]	109,94	0,56	4,80	0,04034582	0,34582133
$NiSO_4$	58,70	154,76	39,00	29,00	0,66439523	0,49403748
$CoSO_4$	58,93	154,99	38,00	28,00	0,64483257	0,47514001
$MnSO_4$	54,94	151,00	32,00	25,00	0,58245358	0,45504186
$Al_2(SO_4)_3$	53,96 [2)]	342,14	0,24	1,10	0,00441067	0,02038547
$CuSO_4$	63,55	159,61	0,01	0,77	0,00015736	0,01208497
$FeSO_4$	55,85	151,91	0,01	0,02	0,00017905	0,00039391
$MgSO_4$	24,30	120,37	0,01	0,03	0,00057613	0,00102881
Si	28,08	- -	0,01	0,09		

[1)] Molmasse bezogen auf Li_2; [2)] Molmasse bezogen auf Al_2

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tabelle C-7 führt die bei der Synthese eingesetzten Stoffmengen an. Diese ergeben sich aus Tabelle C-6 unter Berücksichtigung äquimolarer Mengen der Übergangsmetallsulfate (sogenannter Drittelmix). Die Konzentrationen der „Verunreinigungen“ $Al_2(SO_4)_3$, $CuSO_4$, $FeSO_4$, Li_2SO_4, $MgSO_4$ und Na_2SiO_3 blieben von dieser Anpassung unberührt und wurden entsprechend der analysierten Werte eingestellt.

Tabelle C-7: Simulation der Lösungen für den exakten Drittelmix mit Ni:Co:Mn = 1:1:1

	LNCMO V21 (Metallsalz) [mol/l]	**LNCMO V5-Z (Metallsalz) [mol/l]**	**LNCMO V21 (Metallsalz) [g/l]**	**LNCMO V5-Z (Metallsalz) [g/l]**
Li_2SO_4	0,04034582	0,34582133	4,4355389	38,0189049
$NiSO_4$	0,66439523	0,49403748	102,821806	76,467121
$CoSO_4$	0,66439523	0,49403748	102,974617	76,5708688
$MnSO_4$	0,66439523	0,49403748	100,317036	74,5947189
$Al_2(SO_4)_3$	0,00441067	0,02038547	1,5090682	6,97468495
$CuSO_4$	0,00015736	0,01208497	0,02511566	1,92888245
$FeSO_4$	0,00017905	0,00039391	0,02719964	0,05983921
$MgSO_4$	0,00057613	0,00102881	0,06934897	0,12383745

Die Darstellung der Aktivmaterialien erfolgt zweistufig. Zunächst wird auf hydrometallurgischem Weg ein Precursor synthetisiert, der bereits die typische Morphologie und das Ni:Co:Mn - Verhältnis des Kathodenmaterials aufweist. Im Anschluss erfolgt nach der Zugabe der Lithiumkomponente eine Kalzination, die eine Dehydratisierung des Precursors, eine Oxidation der Übergangsmetallionen, eine Entcarbonisierung des Lithiumcarbonats sowie eine Interkalation des Lithiums in das Übergangsmetalloxidgitter zur Folge hat. Abschließend wird desagglomeriert und das Aktivmaterial durch Strahlmahlen konditioniert. Sowohl die Precursor als auch die gemahlenen Aktivmaterialien wurden eingehend strukturell und elektrochemisch charakterisiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen finden sich in **AS C.2.3**.

C.2.2 Herstellung von Leitsalzen aus Laborrecycling Stoffen und Vergleich mit kommerziellen Leitsalzen

Im Rahmen des *LithoRec*-Projektes wurden Analysenmethoden zur Reinheitsbestimmung von LiBOB durchgeführt. Als wichtige Verunreinigungskomponenten wurden Wasser und Borsäuren erkannt und definiert. Die bevorzugte Methode basiert auf 1H-NMR-Messungen mit einem internen Standard (EC). Mehrere Chargen im Labor hergestellter Produkte wurden untersucht. Es wurde eine Verunreinigung mit Ammonium identifiziert, deren Ursache noch in Klärung ist.

Weiterhin wurden Langzeit-NMR-Tests durchgeführt und ausgewertet. Neben NMR-Untersuchungen wurden verschiedene Methoden der Wasseranalytik (Karl Fischer-Methoden) angewendet. Ein Versuchsprogramm zur Herstellung von LiBOB aus LiOH, Borsäure und Oxalsäure wurde durchgeführt. Hierbei wurde der Einfluss verschiedener LiOH-Qualitäten, die aus der Elektrodialyse hergestellt wurden, auf die Leitsalzqualität untersucht.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Bei Langzeitlagerversuchen wurde ein Zusammenhang zwischen Borsäure- und Wassergehalt festgestellt.

LiBOB aus Lithiumhydroxid- und Lithiumcarbonatmischungen zur Optimierung der Qualität wurden im Labor hergestellt. Hierbei wurde hochreines Li2CO3 mit leicht verunreinigtem LiOH aus der Elektrodialyse gemischt und der Einfluss auf die Qualität untersucht.

C.2.3 Charakterisierung der Aktivmaterialien – Produktausgangskontrolle

Bereits bei der Synthese des Precursors zeigte sich, dass sich die beiden Recyclinglösungen aus LNCMO V21 und LNCMO V5-Z im Fällprozess sehr unterschiedlich verhalten.

Darüber hinaus beeinflussten die unterschiedlichen Konzentrationen der Verunreinigungen im Reaktionsgemisch die Morphologie der Partikel signifikant. Aus den in Abbildung C-2 gezeigten REM-Aufnahmen geht hervor, dass es sich bei dem aus dem formierten Material dargestellten Pulver durchweg um vergleichsweise dichte sphärische Partikel handelt. Demgegenüber lassen die REM-Aufnahmen des V5-Z-Precursors Partikel mit einer hohen Oberflächenrauhigkeit erkennen. Die optische Bestimmung der Partikelgrößenverteilung (Mastersizer) bestätigt diese Befunde. Die D50-Werte des LNCMO V21 betragen 8,7 – 9,0 µm, die des LNCMO V5-Z liegen bei 4,6 – 6,8 µm. Obwohl im ersten Fall im Mittel größere Partikel vorliegen und diese in den REM-Aufnahmen dichter erscheinen, ist deren spezifische Oberfläche (Tristar) mit 11,5 – 12,2 m^2 / g deutlich größer als die des LNCMO V5-Z, die 7,2 – 8,1 m^2 / g beträgt. Das Erscheinungsbild des Precursors aus LNCMO V21 entspricht damit weitgehend dem der Referenzmaterialien aus kommerziellen Vorstufen (nicht gezeigt).

Der Einfluss der Verunreinigungen auf die Morphologie der LNCMO-Materialien zeigt sich nach der Kalzination deutlich. In Abbildung C-3 sind dazu die REM-Aufnahmen des Referenzmaterials, des LNCMO V21 und des LNCMO V5-Z gegenübergestellt. Das Referenzmaterial und V21 fallen nach dem Glühen in Form sphärischer Partikel an. Diese liegen in vollständig desagglomerierter Form vor. Demgegenüber lässt das Übersichtsbild des LNCMO V5-Z erkennen, dass in erster Linie reguläre, stark verwachsene Partikel vorliegen. Bei 5.000-facher Vergrößerung ist erkennbar, dass wie beim Referenzmaterial und V21 kubische Primärkristallite mit Kantenlängen von etwa 200 – 300 nm vorliegen. Aus den REM-Aufnahmen ist zweifelsfrei zu erkennen, dass das LNCMO V5-Z wesentlich feiner anfällt als das Referenzmaterial und LNCMO V21. Dies wird durch die optische Partikelgrößenbestimmung im Mastersizer bestätigt. Die mit BET bestimmten Oberflächen korrelieren mit diesen Resultaten. Die unterschiedlichen Morphologien wirken sich unmittelbar auf die experimentell bestimmten Klopfdichten aus. Die sphärischen Pulver der Referenz und des LNCMO V21 weisen Kopfdichten von 2,44 g / cm^3 bzw. 2,41 g / cm^3 auf, wohingegen dieser Wert für das LNCMO V5-Z nur bei 1,64 g / cm^3 liegt. Die chemische Analyse ergab folgende Werte:

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

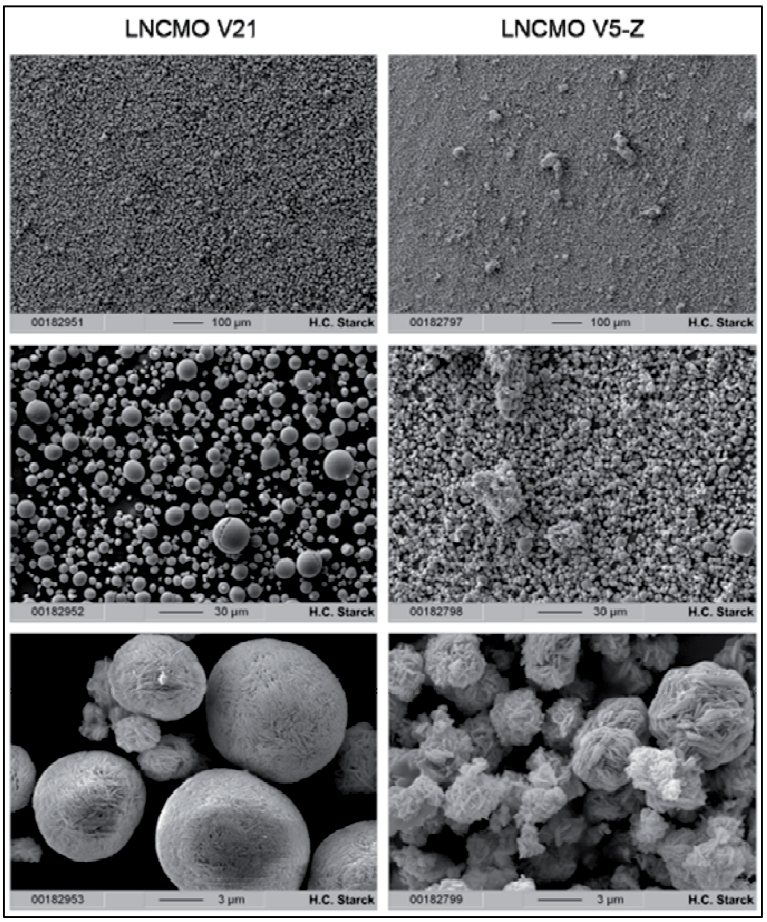


Abbildung C-2: REM-Aufnahmen der Precursor aus recycelten Lösungen bei 200-, 1.000- und 5.000-facher Vergrößerung

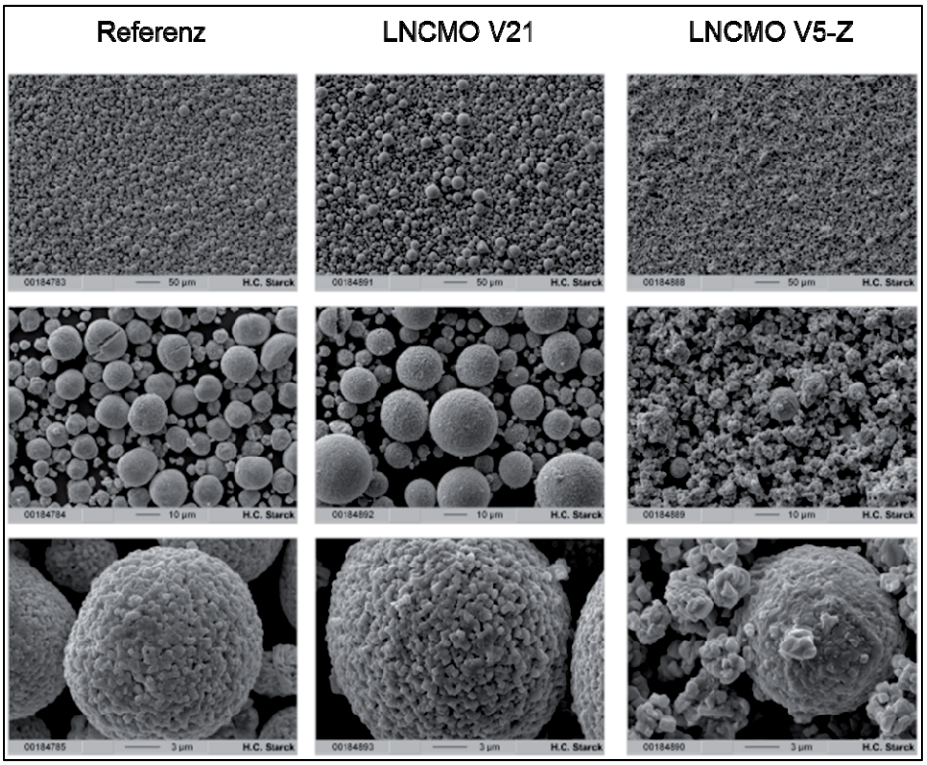


Abbildung C-3:REM-Aufnahmen des Referenzmaterials und der LNCAO-Materialien aus recycelten Lösungen bei 200-, 1.000- und 5.000-facher Vergrößerung

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tabelle C-8: Chemische Zusammensetzung der Aktivmaterialien [Masse-%]

	H_2O nach Fischer [%]	CO_3 [%]	NO_3 [ppm]	Al [%]	Co [%]	Ni [%]	Cr [ppm]	Fe [ppm]	Li [%]	Mn [%]
Ref.	0,020	< 0,10	<20	0,01	20,00	20,00	<10	<10	7,60	18,00
V21	<0,02	< 0,10	<20	0,01	20,00	20,00	<10	<10	7,56	19,00
V5-Z	0,040	0,51	<20	0,57	18,00	18,00	<10	112	7,57	16,00

Demnach besitzt das aus der Recyclinglösung des formierten V21 gewonnene Material eine fast identische Zusammensetzung wie die Referenz. LNCMO V5-Z weist dagegen signifikante Unterschiede auf.

Die Röntgenpulverdiffraktogramme aller drei Materialien lassen die erwarteten Beugungsmuster erkennen und entsprechen weitgehend dem des Lithiumnickelates $LiNiO_2$. Zusätzlich findet sich im Diagramm von LNCMO V5-Z noch eine Reihe wenig intensiver und breiter Reflexe bei 2Θ = 23°, 30° und 32,5°, die bislang keiner bekannten Phase zugeordnet werden konnten. Zur elektrochemischen Charakterisierung wurden jeweils die ersten drei Lade- und Entladezyklen der Materialien anhand von jeweils zwei Zellen untersucht. Die Ergebnisse finden sich in Tabelle C-9.

Tabelle C-9: Lade- und Endladekapazitäten von jeweils zwei Zellen des Referenz-LNCMO und V21 bzw. V5-Z

	1. Ladekapazität	1. Entladekap.	*Effizienz*	2. Ladekapazität	2. Entladekap.	*Effizienz*	3. Ladekapazität	3. Entladekap.	*Effizienz*
	[mAh/g]	[mAh/g]	*[%]*	[mAh/g]	[mAh/g]	*[%]*	[mAh/g]	[mAh/g]	*[%]*
	Zelle 1								
Referenz	175	157	*89,7*	156	157	*100,4*	156	150	*96,1*
V21	178	156	*87,5*	157	155	*98,7*	156	149	*95,7*
V5-Z	158	139	*87,9*	140	139	*99,2*	139	134	*96,2*
	Zelle 2								
Referenz	176	155	*88,1*	154	150	*97,5*	[1)]		
V21	176	156	*88,7*	157	152	*97,1*	[1)]		
V5-Z	160	140	*87,7*	140	140	*99,8*	139	134	*96,3*

[1)] **Bei Zelle 2 der Referenz und des V21 kam es im dritten Ladezyklus zu Messproblemen**

Zusammenfassend ist zu sagen, dass sich aus der Lösung des wenig verunreinigten V21 nach den ersten Erkenntnissen ohne weitere Aufarbeitung konkurrenzfähiges Aktivmaterial darstellen lässt. Sowohl die Morphologie und die Zusammensetzung des Precursors als auch die des geglühten Aktivmaterials entsprechen dem der Referenz. Ebenso ist die elekt-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

rochemische Performance identisch – es werden sowohl beim Laden als auch beim Entladen nur marginale Unterschiede festgestellt.

Im Gegensatz zur Referenz und dem LNCMO V21 zeigen sich sowohl beim Precursor als auch beim Aktivmaterial der stärker verunreinigten Probe deutliche Unterschiede, sowohl in der chemischen Zusammensetzung, der Morphologie, der Klopfdichte als auch der elektrochemischen Performance.

Die fertigen $LiFePO_4$ Proben wurden ausführlich nach den internen üblichen Qualitätssicherungsmethoden der Sued Chemie physikalisch und chemisch untersucht. Bis zu einer Verunreinigung von 20.000 ppm (Li_2SO_4 in LiOH) konnte überraschenderweise kein signifikanter Unterschied in den chemischen Eigenschaften des Kathodenmaterials im Labormaßstab und im Technikumsmaßstab festgestellt werden (siehe Tabelle C-10). Aus diesen Ergebnissen ist es abzuleiten, dass die Schwefelgrenze in der LiOH Rohstoffspezifikation auf 20.000 ppm hochgesetzt werden darf.

Tabelle C-10: Chemische, physikalische und elektrochemische Eigenschaften der LiFePO4 Materialien, welche aus sekundären Li-Rohstoffen hergestellt wurden

Element	Lithium Sulfate content in LiOH (ppm)	Li (wt. %)	Fe (wt. %)	P (wt. %)	C (wt. %)	S (wt. %)	Spez. Kapazität (mAh/g)
Specifications	---	4,55± 0,25	32,9± 0,8	19,1± 0,5	2,25± 0,25	<0,15	150± 5,0
Lab LFP samples							
L1	0	4,6	33,4	19,1	2,1	0,05	147
L2	10	4,4	34,4	19,1	2,2	0,05	146
L3	500	4,3	35,0	19,2	2,1	0,05	152
L4	10.000	4,4	34,9	19,2	2,2	0,05	149
L5	20.000	4,3	34,5	19,1	2,0	0,05	154
Large LFP samples							
T1	0	4,3	34,6	18,9	2,2	0,08	148
T2	1.000	4,2	34,3	18,7	2,1	0,10	149
T3	10.000	4,2	34,6	18,8	2,1	0,10	149

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

C.3 Herstellung und Charakterisierung neuer Elektroden und Testzellen aus recycelten Aktivmaterialen

Zum Projektende wurden HCST noch einmal ca. 10 l einer zyklisierten V-5Z-Lösung („dritter Synthesezyklus“) aus einem Großversuch zur Verfügung gestellt. Die Elementaranalyse zeigte, dass die Probe aus dem Großversuch verglichen mit der ursprünglich gelieferten V5-Z-Lösung deutlich niedrigere Li- und Cu-Konzentrationen aufwies. Der Gehalt an Lithium konnte um drei Viertel, der an Cu um ein Viertel gesenkt werden. Dagegen war der Al-Gehalt mit der ersten Probe identisch.

In der Folge traten bei der hydrometallurgischen Darstellung des Precursors die bereits im **AS C.2.3** aufgeführten Probleme erneut auf. Es kam zur Ausfällung von Aluminiumhydroxid, welches die Fällung der Übergangsmetallhydroxide störte und diese verklebte. Die Synthese des Aktivmaterials durch Zumischen der Li-Komponente und den Kalzinationsschritt wurde aus diesem Grund nicht weiter verfolgt.

C.3.1 Standardisierte Elektroden- und Zellfertigung aus kommerziellen Referenzmaterialien und elektrochemische Charakterisierung

Der zwischen IPC-WWU und iPAT-TUBS abgestimmten Vorgabe folgend, wurden T-Zellen (Swagelok) gefertigt. Dazu wurden die Komponenten trocken gemischt, in NMP dispergiert und anschließend die Elektroden gefertigt. In Abbildung C-4 ist eine Zyklisierkurve von $LiFePO_4$ in einer T-Zelle gezeigt. Man erkennt einen deutlichen Abfall der Effizienz nach ca. 30 Zyklen. Erfahrungsgemäß werden in einer solchen Versuchsanordnung ca. 500 Zyklen erreicht. Diese Schwankungen werden auf Kontamination des verwendeten Elektrolyten und Undichtigkeiten der verwendeten Zellen zurückgeführt. Zur Optimierung und Vermeidung weiterer Kontaminationen wurde der Elektrolyt gegen EC/DMC und $LiBF_4$ ausgetauscht. Die neue Zyklisierung mit $LiBF_4$ als Leitsalz in EC/DMC zeigt höhere Zyklenstabilität von über 500 Zyklen im Vergleich zum vorherigen Material. Daher werden alle Vergleichsmessungen mit diesem Elektrolyten durchgeführt. Abbildung C-5 zeigt den entsprechenden DC-Raten Test.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

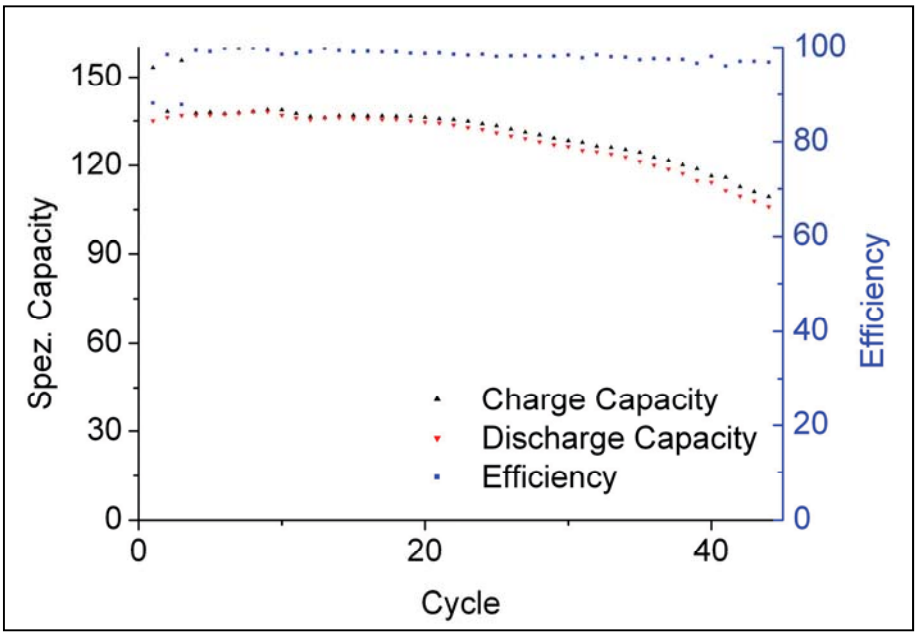


Abbildung C-4: Zyklisierkurve von $LiFePO_4$ bei Raumtemperatur

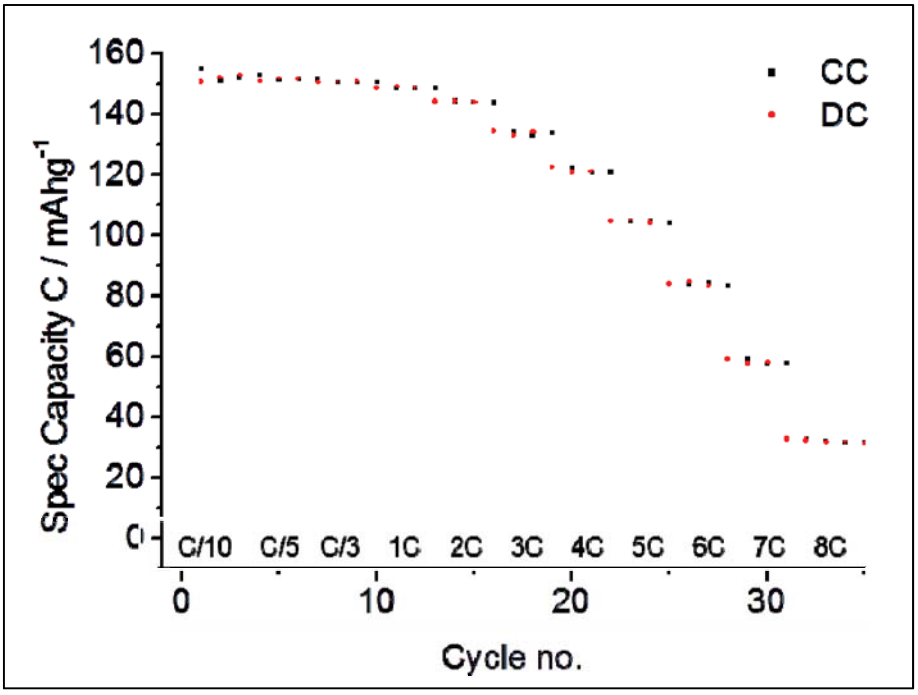


Abbildung C-5: DC-Ratentest von LiBF4 in EC/DMC

Mehrere Referenz-Elektroden und Referenz-Zellen wurden von iPAT-TUBS und LTA gefertigt und in abgesprochenen elektrochemischen Zyklisierroutinen miteinander verglichen. Die für den Einsatz in Automobilen wichtigsten elektrochemischen Charakteristika Strombelastbarkeit und Zyklenstabilität Die von LTA zur Verfügung gestellten Referenzdaten sind in Abbildung C-6 und Abbildung C-7 dargestellt. Die eingesetzte Zyklisierroutine beginnt nach der Formierung mit einem Stromstabilitätstest in den ersten 30 Zyklen (siehe Abbildung C-7). Dabei wir die Zelle zunächst mit einer Laderate von 0,5 C beaufschlagt. Es folgen Lade- und Entladeraten von 1 C, 3 C, 5 C, 10 C, 0,5 C, 1 C und 3 C. In der Folge wird die Zyklenstabilität durch dauerhaftes Be- und Entladen bei 3 C bis zum 500. Zyklus ermittelt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Das Referenzsystem hat eine Stabilität von 95 % seiner Kapazität nach 500 Zyklen. Besonders relevant für den Strombelastbarkeitstest sind die relative Kapazität bei Raten von 3 C und 5 C bezogen auf die Kapazität bei 0,5 C. So hat die Referenzzelle bei Lade-/Entladeraten von 3 C noch 89 % ihrer Kapazität bei 0,5 C und bei 5 C noch 74 % des Wertes bei 0,5 C.

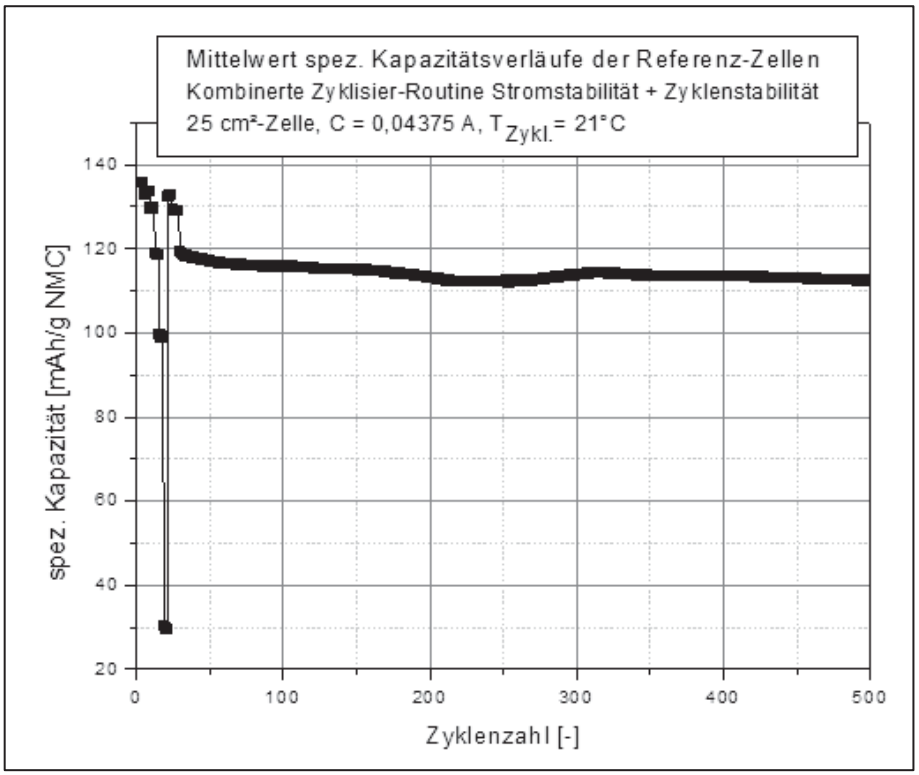


Abbildung C-6: Elektrochemischer Zyklentest einer Referenzelle aus Neumaterialien – Stromstabilitätstest (Zyklen 1-30) und Zyklenstabilität bei 3C (Zyklen 30-500)

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

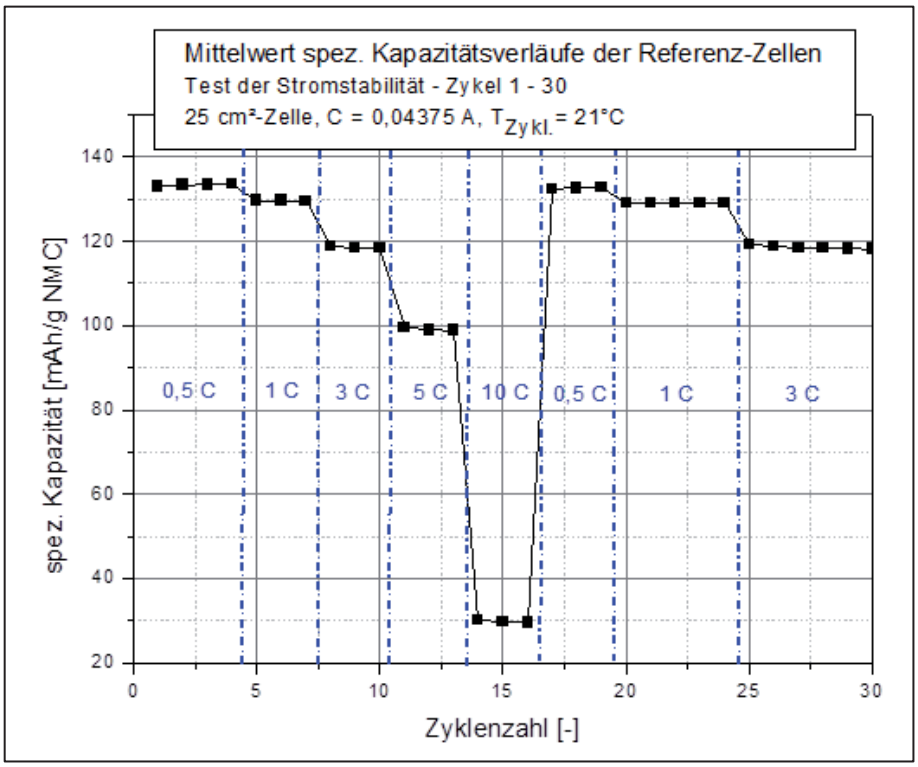


Abbildung C-7: Elektrochemischer Zyklentest einer Referenzelle aus Neumaterialien – Charakterisierung der Stromstabilität bei variierter Laderate

Mit den hier angewendeten Testszenarien werden Elektroden und Zellchemie für den Einsatz in der Automobilindustrie spezifiziert. Die verwendeten Testszenarien sind daher praxisrelevant und charakterisieren das elektrochemische Verhalten von Batteriezellen zudem auf höchstem Niveau.

C.3.2 Standardisierte Elektroden- und Zellfertigung aus rekonditionierten Aktivmaterialien und elektrochemische Charakterisierung

In **AS C.3.2** wurden rekonditionierte Aktivmaterialien, zurückgewonnen aus nicht-zyklisierter Ausschussware der LTA und aus zyklisierten Elektroden, getestet. Dazu wurden Anoden- und Kathodenmaterialien, die aus der Separation und Aufbereitung in **AP B.3** gewonnen wurden im Labormaßstab von iPAT-TUBS zu neuen Elektroden verarbeitet und von der LTA zu Vollzellen (25 cm²) verbaut. Von iPAT-TUBS wurden drei Kathodenpulver aus zwei unterschiedlichen Prozessen an LTA geliefert.. Mit diesen Pulvern wurden nach dem Standard-Laborverfahren von iPAT-TUBS und LTA Elektroden gefertigt. In Abbildung C-8 sind die Verläufe der Kapazitäten der rekonditionierten Materialien aus der mechanischen Separation dargestellt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

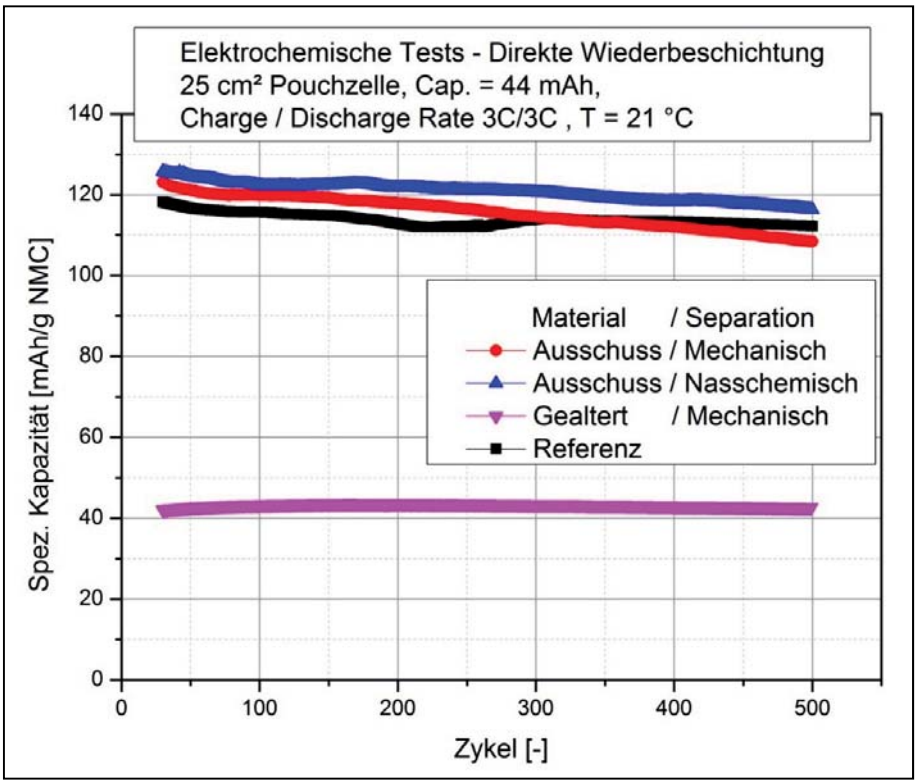


Abbildung C-8: Elektrochemische Kapazitätsverläufe von Referenz und zyklisierten Materialien

Die im iPAT-TUBS durchgeführten elektrochemischen Zyklentests zeigten bei einer Beimischung von 2 Gew.-% Leitfähigkeitsruß zu den rekonditionierten Ausschuss-Materialien eine erhöhte Stromstabilität. Ein höherer Zumischungsanteil von 4 Gew.-% Leitfähigkeitsadditiv wirkte sich hingegen kontraproduktiv auf die spezifische Kapazität der Zelle aus, da eine von drei Zellen während der Zyklisierung unverhältnismäßig stark an Kapazität verlor, während die beiden anderen eine sehr hohe Stromstabilität aufwiesen. Eine niedrigere Zudosierung von 1 Gew.-% hatte nur geringere Effekte erzielt.

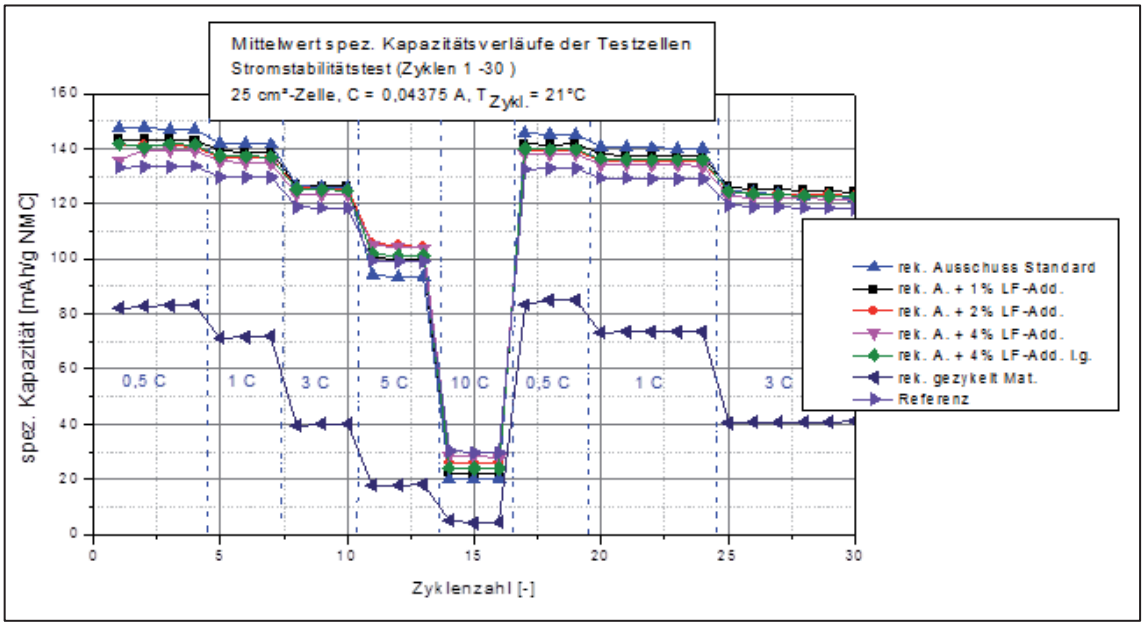


Abbildung C-9: Strombelastbarkeitstest rekonditionierter Materialien

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

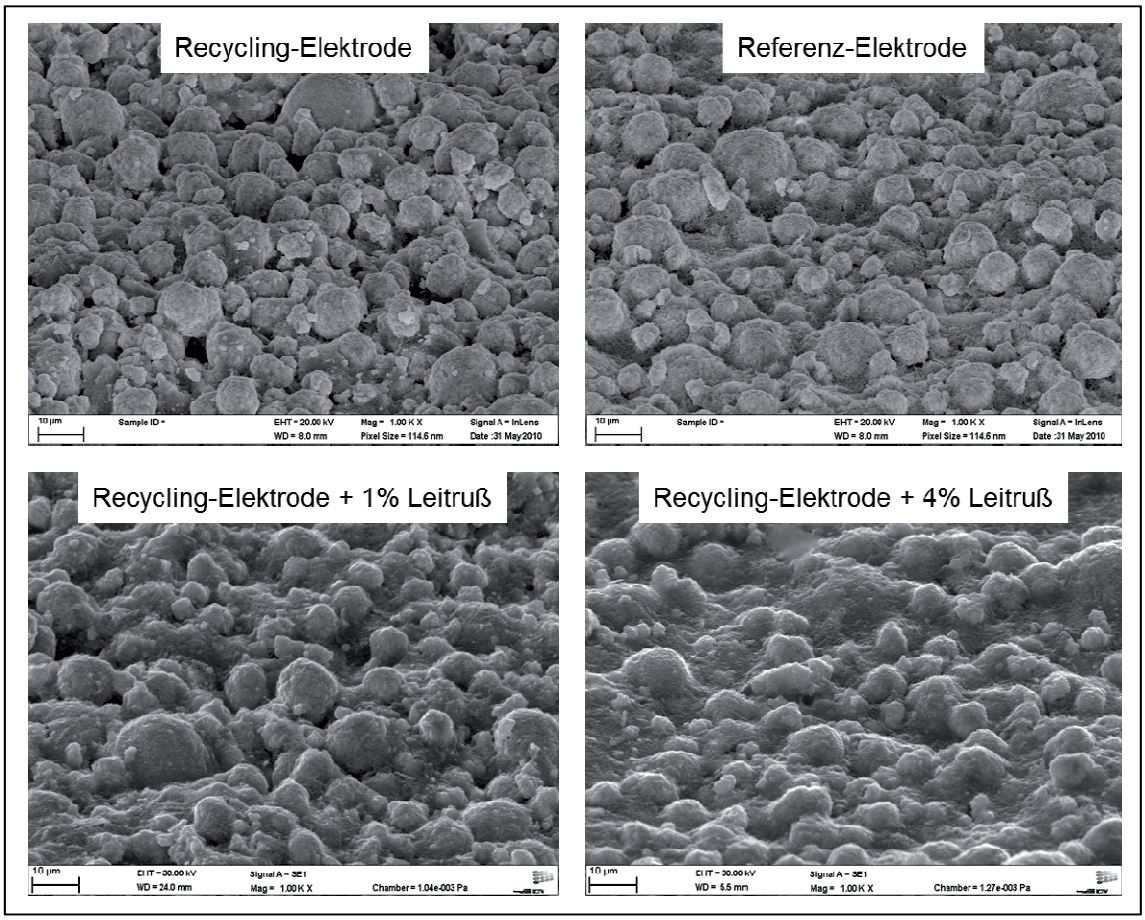


Abbildung C-10: Sekundärelektronenmikroskopische Aufnahmen der Oberfläche von rekonditionierten Elektroden, Winkel 60°(Quelle: IPC-WWU und iPAT-TUBS)

Eine Erklärung für die beobachteten Verbesserungen liefern Aufnahmen der relevanten Elektroden mittels SEM. Die Referenz-Elektrode (oben rechts) zeigt auf ihrer Oberfläche ein deutlich ausgeprägtes Netz bestehend aus Leitfähigkeitsadditiv und Binder, während auf der Oberfläche der Recycling-Kathode deutliche Kluften erkennbar sind. Dieses Netz gewährleistet eine gute elektrische Leitfähigkeit und damit eine bessere Stromstabilität. Durch Zugabe von Leitfähigkeitsruß zu den Rezepturen der Recycling-Elektroden kann dieses Leitnetz wieder besser ausgeprägt werden (Abbildung C-10, untere Aufnahmen).

C.3.3 Standardisierte Elektroden- und Zellfertigung aus recycelten Aktivmaterialien gewonnen aus formierten Zellen und elektrochemische Charakterisierung

Mit Ausnahme der ursprünglich gelieferten Kleinmenge an V21 standen HCST Recycling-Lösungen aus formierten Zellen nicht zur Verfügung.

Die Arbeitsschritte **AS C.3.3** und **AS C.3.4** wurden aus den in **AS C.3.1** genannten Gründen nicht von LTA bearbeitet. Allerdings wurden die Proben bei IPC-WWU in den dortigen Zellsystemen analysiert und getestet.

Das leicht verunreinigte Material wurde zuerst mittels BET gemessen. Es konnten nur geringe Abweichungen zwischen der Referenz und der Probe mit der leichten Verunreinigung festgestellt werden. Weiterhin konnten auch bei XRD Messungen keine nennenswerten Un-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

terschiede zwischen den Materialien festgestellt werden. Bei SEM Untersuchungen (Abbildung C-11) hat sich gezeigt, dass das Compounding bei der leichten Verunreinigung noch sehr stark ausgeprägt ist.

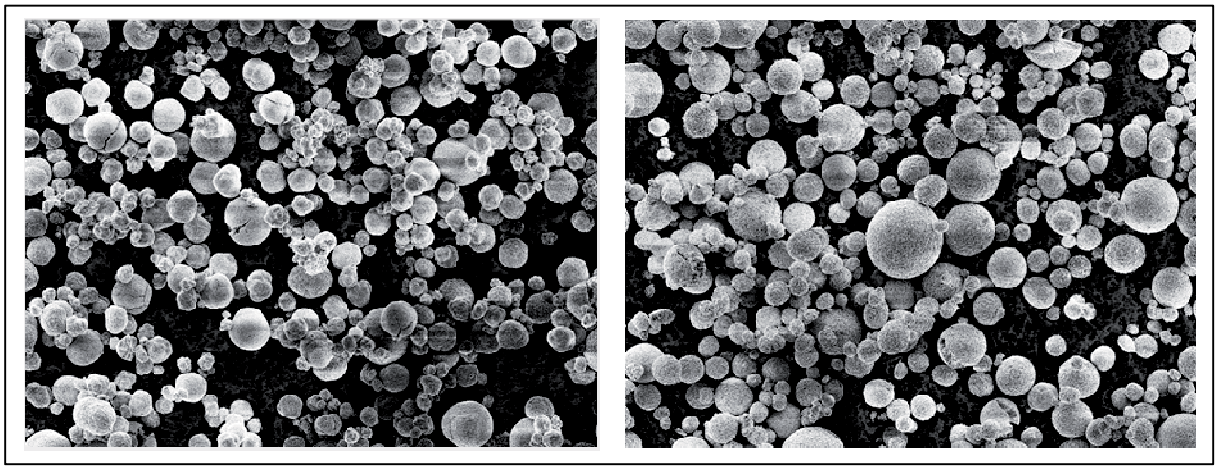


Abbildung C-11:Referenz (links) und leichte Verunreinigung (rechts)

Weiterhin wurden CV-Tests (Abbildung C-12) durchgeführt. Die Oxidationspotentiale liegen wie für NMC üblich bei etwa bei 3,7 V.

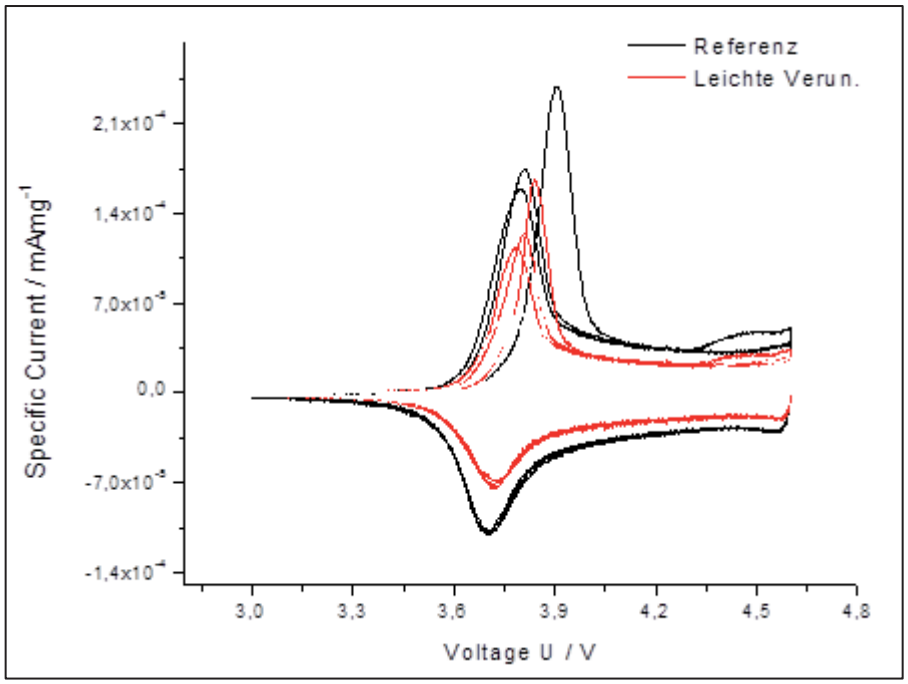


Abbildung C-12: CV Test

Insgesamt zeigt sich, dass das leicht verunreinigte Material nur geringe Abweichungen gegenüber der Referenz aufweist.

In **AS C.3.3** wurde recyceltes Aktivmaterial von formierten Zellen vom iPAT-TUBS zu neuen Elektroden verarbeitet und von der LTA zu Vollzellen (25 cm² Aktivmaterialfläche) verbaut. Es wurden 475 Zyklen mit einem Lade-/Entladestrom von 3 C durchgeführt um die Langzeitstabilität des verunreinigten Materials in Relation zu einem nicht verunreinigten Referenzmaterial zu untersuchen (siehe Abbildung C-14).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

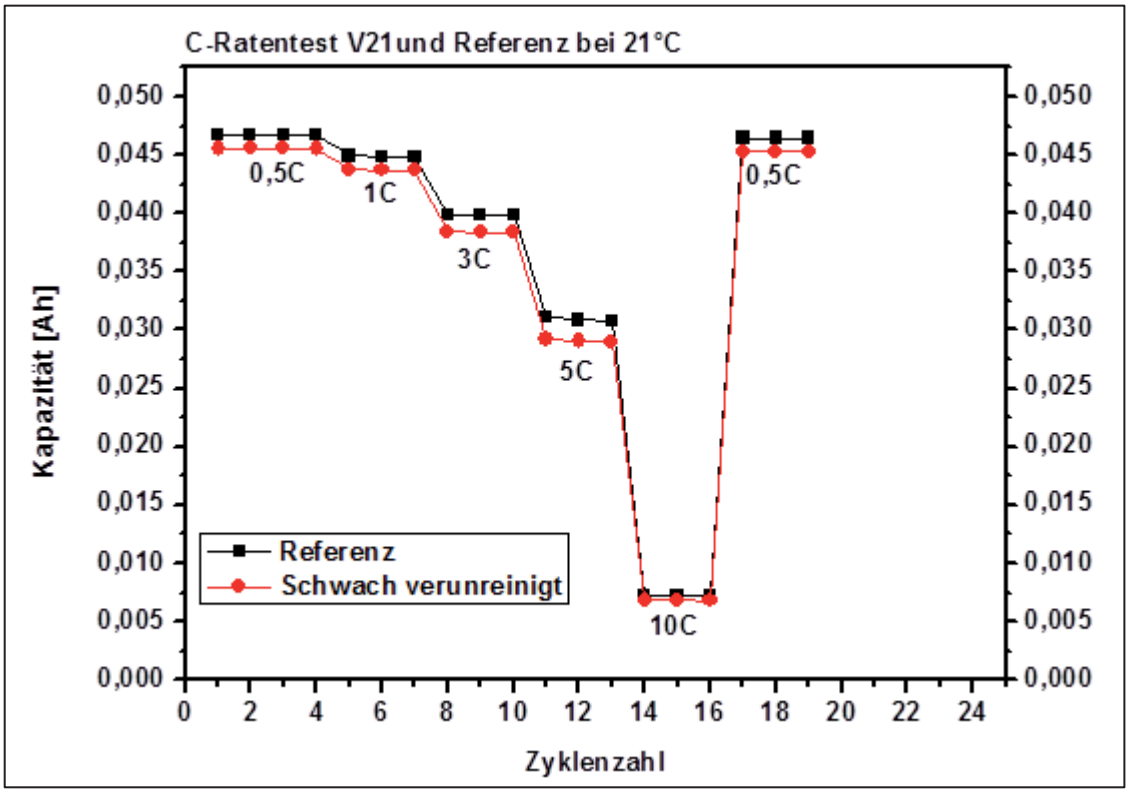


Abbildung C-13: C-Ratentest V21 und Referenz

Die Strombelastbarkeit der beiden hier untersuchten Proben ist sehr ähnlich. Der Performance-Unterschied beträgt nur wenige Prozent und ist bei allen Entladeraten zwischen 0,5 C und 10 C nahezu gleich (siehe Abbildung C-13).

Die Zyklenstabilität des verunreinigten Materials ist besser als die des Referenzmaterials. Dieses startet zwar mit ca. 10 % höherer Kapazität nach dem Strombelastungstest, jedoch sinkt die Kapazität nach ca. 150 Zyklen unter die des verunreinigten Materials. Die Kapazität der Referenz beträgt nach 475 Zyklen noch 70 % des Ursprungswertes. Das verunreinigte Material hat nach dem Ende des Performancetestes noch 79 % der ursprünglichen Kapazität.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

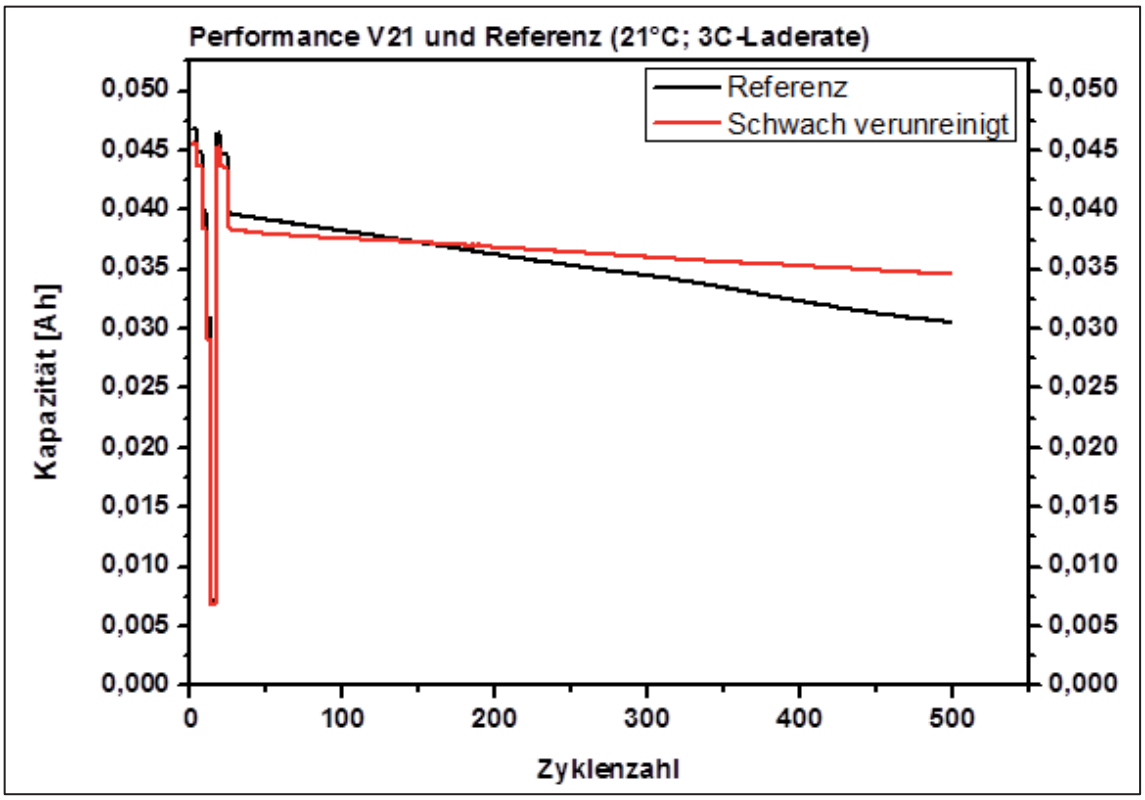


Abbildung C-14: Performance V21 und Referenz

Demnach können geringe Verunreinigungen bei der Neusynthese der Aktivmaterialien toleriert werden.

C.3.4 Standardisierte Elektroden- und Zellfertigung aus recycelten Aktivmaterialien gewonnen aus gealterten Zellen und elektrochemische Charakterisierung

Von HCST wurden ca. 10 l einer V5-Z-Lösung („dritter Synthesezyklus“) aus einem Großversuch zur Verfügung gestellt und ca. 15 kg Probenmaterial (Precursor) nachgestellt, welches zur Herstellung von Elektroden und Testzellen vorgesehen war.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tabelle C-11: Vergleich der Zusammensetzung der Reaktionslösung von V5-Z aus dem ursprünglichen (Klein-) Versuch und dem dritten Synthesezyklus

	LNCMO V5-Z Kleinversuch [g/l]	LNCMO V5-Z Dritter Zyklus [g/l]
Li_2SO_4	38,02	10,85[1)]
$NiSO_4$	76,46	76,46
$CoSO_4$	76,57	76,57
$MnSO_4$	74,60	74,60
$Al_2(SO_4)_3$	6,98	7,34
$CuSO_4$	1,93	1,45
$FeSO_4$	0,060	- -
$MgSO_4$	0,12	- -

[1)] im dritten Zyklus wurde kein Li_2SO_4 sondern die äquivalente Menge LiOH zugegeben

In Tabelle C-11 ist ein direkter Vergleich der Lösung für den dritten Zyklus mit der ursprünglich eingesetzten Lösung für die Synthese von LNCMO V5-Z gegeben. Die teilweise deutlichen Unterschiede sind leicht ersichtlich.

Bei der hydrometallurgischen Darstellung des V5-Z im dritten Zyklus traten jedoch die gleichen Probleme auf wie im Kleinversuch. Neben den erwarteten Übergangsmetallhydroxiden fiel auch fein verteiltes Aluminiumhydroxid aus, welches zum einen die Fällung des Ni/Co/Mn-Mischhydroxids störte und zum anderen die gefällten Partikel verklebte. Die Untersuchungen zur Partikelgrößenverteilung lieferten dieselben Ergebnisse, wie sie ursprünglich im Kleinversuch erhalten wurden. Mit zunehmender Reaktionsdauer nahm der Anteil feiner Partikel sogar noch zu und es resultierte eine bimodale Partikelgrößenverteilung. Dieser Umstand weist ein weiteres Mal darauf hin, dass hinsichtlich eines Recyclings der kathodenseitigen Aktivmaterialien auch in Zukunft Anstrengungen zur Abreicherung des Aluminiums in den Übergangsmetalllösungen im Vordergrund stehen müssen.

Eine weitere Verarbeitung des Precursors, insbesondere das Zumischen des Lithiumcarbonats und die nachfolgende Kalzination sowie die abschließende Aufarbeitung, wurden aus diesem Grund nicht weiter verfolgt. Daher konnten aus diesem Lauf weder standardisierte Elektroden noch Zellen gefertigt werden.

Bei der visuellen Sichtung des Materials konnte schon eine starke Schüttdichtenabnahme beobachtet werden, welche in Abhängigkeit zum Grad der Verunreinigung steht. Mit Hilfe von BET Messungen wurde daher die Oberfläche charakterisiert. Im Vergleich zur Referenz zeigt sich eine deutlich erhöhte Oberfläche für das Material mit der starken Verunreinigung. Ursachen dafür können in einem schlechteren Compounding liegen. Um diesen Punkt zu prüfen, wurden weiterführende SEM Aufnahmen gemacht. Um mögliche Fremdpartikel zu belegen, wurden XRD Messungen durchgeführt. Die Messungen zeigen deutliche Verunreinigungen, die die Performance beinträchtigen können, was sich in späteren Experimenten zeigt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

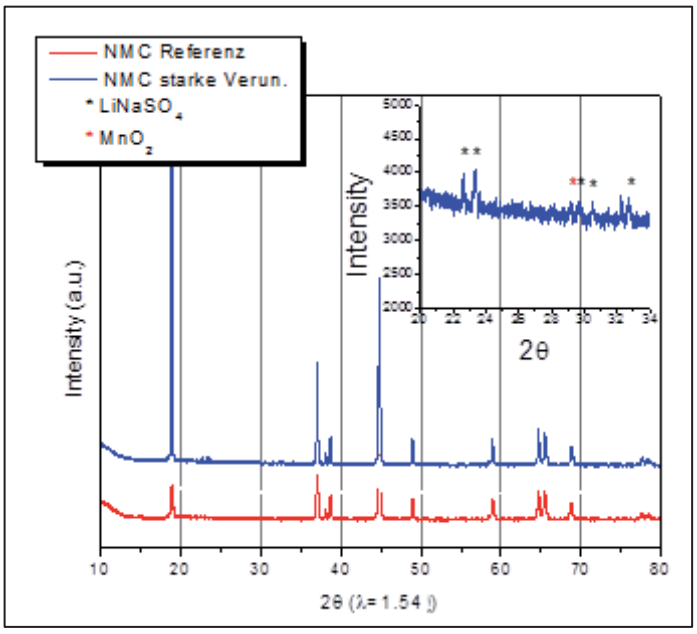


Abbildung C-15: XRD Messungen

Um die vorherigen Erkenntnisse zu vertiefen, wurden SEM Messungen durchgeführt. So lässt sich zeigen, dass bei starker Verunreinigung das Material fast ausschließlich als Primärpartikel vorliegt. Dies verschlechtert den elektrischen Kontakt in der Elektrode, da kleinere Partikel beispielsweise durch den kompletten Einschluss von Bindermaterial isoliert werden können. Dadurch würde sich eine geringere elektrische Kapazität ergeben.

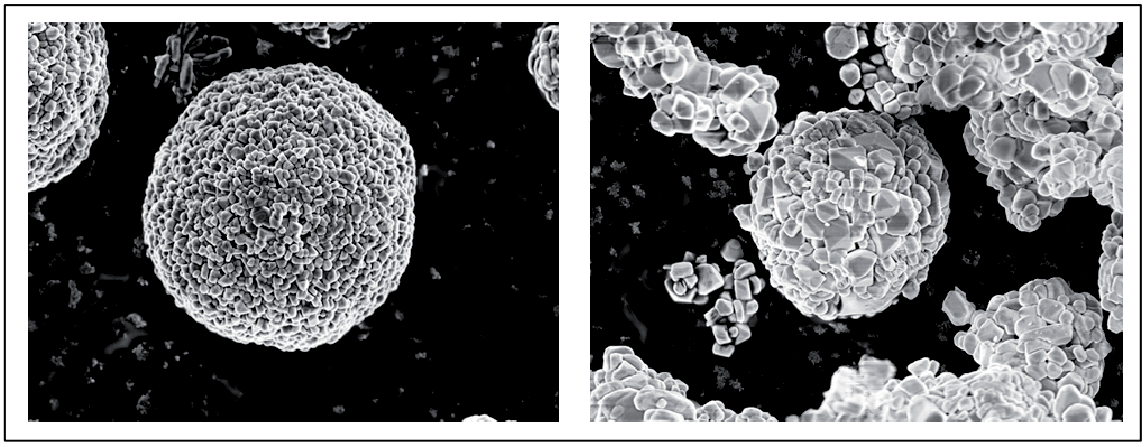


Abbildung C-16: Ansicht der Primärpartikel bei der Referenz (links) und starke Verunreinigung (rechts)

Bei der stark verunreinigten Probe erkennt man nur noch schwach das Compounding der Primärpartikel zu einem Sekundäragglomerat.

Für den CV Test wurden die Zyklovoltammetriedaten auf die Masse des Aktivmaterials in der Elektrode bezogen. Die Oxidationspotentiale liegen wie für NMC üblich bei etwa 3,7 V. Interessant ist, dass bei dem Referenzmaterial die Spannung beim Oxidationspeak auf 3,9 V ansteigt. Bei den verunreinigten Materialien ist das jedoch nicht der Fall. Der Anstieg kann häufiger bei NMC auftreten, ist also nicht unüblich. Was hier jedoch leider auch deutlich wird, ist, dass die Kapazität (Fläche unter den Kurven) mit steigender Verunreinigung abnehmen wird.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

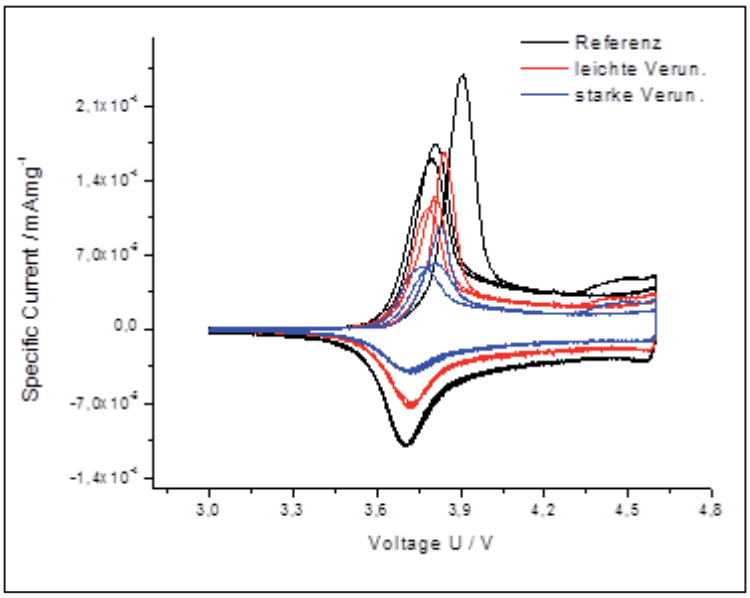


Abbildung C-17: CV Daten aller drei Materialien

Eindeutig wird der zuvor beschriebene Trend durch Untersuchungen der Zyklenstabilität (Abbildung C-17) bestätigt: Mit steigender Verunreinigung sinkt die spezifische Kapazität, jedoch kann selbst das stark verunreinigte Material bei einer respektablen Kapazität von 115 mAh / g mit einem sehr geringen Fading zyklisiert werden. Die Effizienz nach dem ersten Zyklus ist 79 % für die Referenz und 83 bzw. 80 % für die leichte bzw. starke Verunreiniung. Die dazugehörige Abbildung C-18 zeigt die gesamte Zyklenstabilität im Überblick. Im C-Raten Test wird der bisherige Trend bzgl. der steigenden Verunreinigung weiter bestätigt.

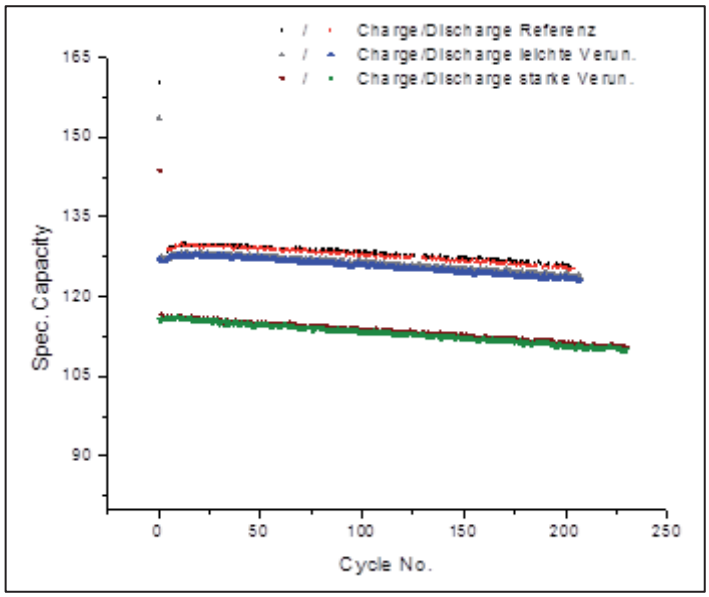


Abbildung C-18: Zyklenstabilität

Die Arbeitsschritte **AS C.3.3** und **AS C.3.4** wurden aus den in **AS C.3.1** genannten Gründen nicht von LTA bearbeitet. Allerdings wurden die Proben bei IPC-WWU in den dortigen Zellsystemen analysiert und getestet. Für die elektrochemische Untersuchung der „recycelten“ $LiFePO_4$-Proben in Vollzellen wurden die entsprechenden Muster ans IPAT-TUBS geschickt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

In **AS C.3.4** wurde stärker verunreinigtes Material verwendet als in **AS C.3.3**. Die Prozessierung in diesem Arbeitsschritt ist mit der in **AS C.3.3** identisch. Die elektrochemische Charakterisierung beinhaltete nach dem Formieren der Zellen einen Strombelastungstest (siehe Abbildung C-19) und anschließend 475 Zyklen mit einem Strom von 3 C zur Bestimmung der Zyklenstabilität (siehe Abbildung C-20). Der Strombelastungstest zeigt einen deutlichen Unterschied in der Leistung der beiden Materialien. Mit Ausnahme des 10 C Ladestromes (hierbei ist die Kapazität beider Zellen nahe null) liegt das stark verunreinigte Material immer 15 – 20 % unterhalb der Kapazität des Referenzmaterials. Die Zyklenstabilität des stark verunreinigten Materials liegt deutlich unter der des Referenzmaterials. Bereits nach 50 Zyklen sinkt die Kapazität auf ca. 55 % ab, stabilisiert sich dann auf diesem Wert und ändert sich bis zum 500. Zyklus nicht mehr signifikant. Wie von HCST analysiert unterscheiden sich die beiden Proben V21 und V5-Z hauptsächlich im Kupfer-, Eisen-, Aluminium und Carbonatanteil. Daraus lässt sich schließen, dass diese Elemente bzw. Verbindungen die Leistung der Zelle deutlich negativ beeinflussen. Die Empfehlung wäre, den Anteil dieser Verbindungen vor dem Herstellen des neuen Aktivmaterials zu eliminieren oder wenigstens deutlich zu reduzieren.

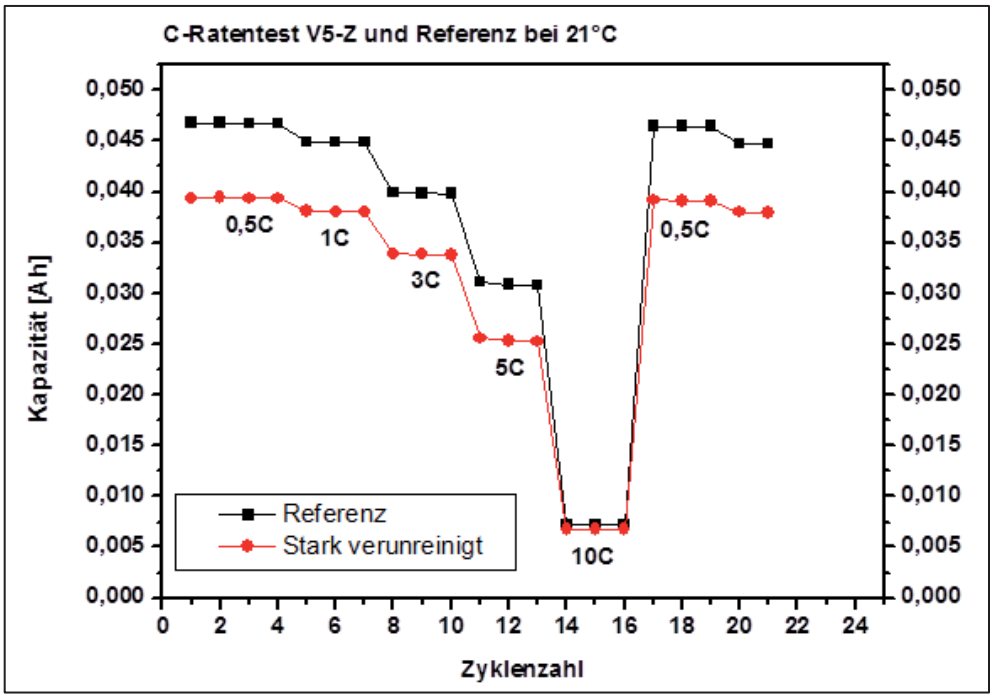


Abbildung C-19: C-Ratentest V5-Z und Referenz

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

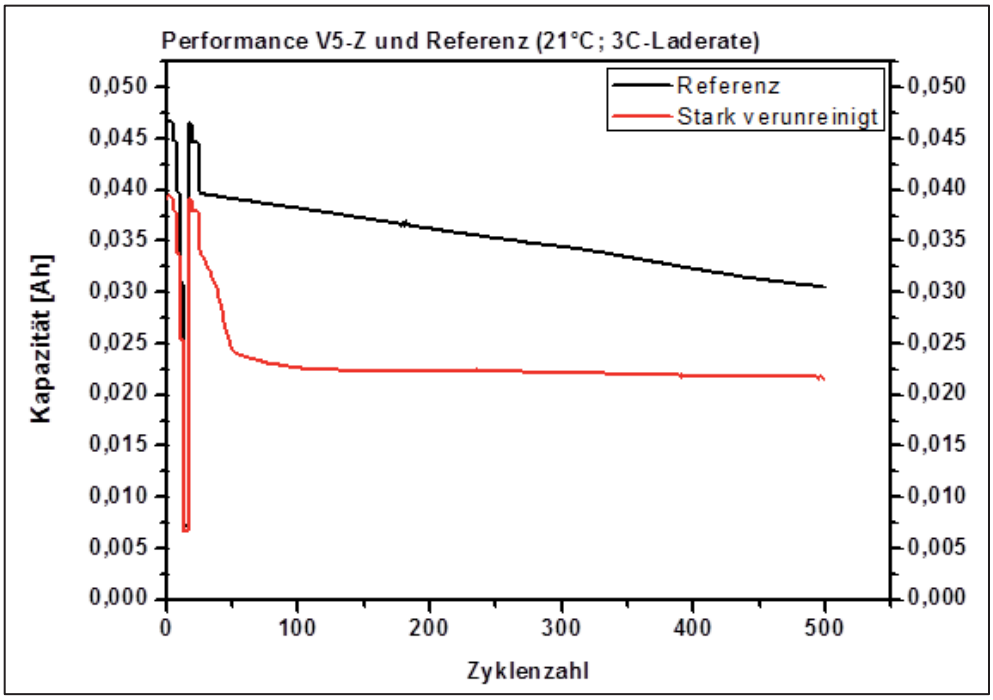


Abbildung C-20: Performance V5-Z und Referenz

Die Beobachtungen in **AS B.3.1** lassen darauf schließen, dass die Verunreinigung mit Aluminium sich nicht direkt auf die Ergebnisse der Elektrochemischen Zyklisierung auswirkt. Es wurde beobachtet, dass die rekonditionierten Materialien eine den Neumaterialien gleichwertige Performance zeigten, obwohl diese auch mit ca. einem Gewichtsprozent Aluminium kontaminiert waren. Allerdings wirkt sich eine Al-Kontamination (siehe HCST **AP C.2**) negativ auf den hydrometallurgischen Prozess zur Fällung der Übergangsmetallhydroxidpartikel aus und beeinflusst deren Partikelgröße und Morphologie wesentlich. Zudem verursachen Aluminiumgehalte > 1 Gew.-% Verluste bei der erneuten Aktivmaterialherstellung aus der Übergangsmetallsalzlösung, da kolloidal verteiltes Aluminiumhydroxid zum Verkleben der Metallhydroxid-Partikel führt und die Vermahlung der Agglomerate in der Strahlmühle damit erheblich erschwert.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

D Analyse des Alterungsverhaltens von Li-Ionen Batterien

In **AS D.1** wurde die Performance von Standard Aktivmaterial für Lithium-Ionen Zellen aufgenommen und diese Zellen anschließend einer post mortem Analyse unterzogen. Dabei wurden die mechanischen Eigenschaften der Elektrode, wie Haftkraft und Elastizität der Schicht gemessen. Eine Zyklisierung verschlechtern die mechanischen Eigenschaften der Elektrode in Abhängigkeit des Ladestromes und der Temperatur, bei der die Zelle geladen wurde. Außerdem wurde ein Standardzellsystem bestehend aus zehn Rundzellen untersucht. Nach einer ersten Charakterisierung der Zellen wurde ermittelt, wie sich diese Zellen bei einem Stromsprung verhalten. Zusätzlich wurde das Verhalten dieser Zellen bei einer Tiefentladung untersucht und in wie weit sich die Zellen nach einer Tiefentladung wieder reaktivieren lassen. Die genauen Ergebnisse zu **AS D.1** finden sich in Abschnitt D.1.

Anschließend in **AS D.2** wurde die Performance von recycelten Materialien aufgenommen, welches in **PB C** zu Elektroden verarbeitet wurde. Auch diese Elektroden wurden anschließend einer post-mortem Analyse unterzogen und die mechanischen Eigenschaften wurden untersucht. Es wurden zwei unterschiedlich stark verunreinigte NMC-Aktivmaterialien untersucht. Das schwach verunreinigte Material zeigt dabei eine ähnlich gute Performance wie das nicht verunreinigte Standardmaterial. Dagegen fiel das stark verunreinigte Material durch eine verringerte Performance auf. Die mechanischen Eigenschaften der gealterten Elektroden unterscheiden sich jedoch nur leicht, daher liegt die Vermutung nahe, dass die verringerte Performance durch die unterschiedliche Partikelgröße und -morphologie zu erklären ist. Dies ließ sich jedoch aufgrund mangelnder Vergleichsmöglichkeiten nicht weiter untersuchen.

Der Arbeitsschritt **AS D.3** vergleicht und analysiert die Ergebnisse von **AS D.1** und **AS D.2**. Die Ergebnisse dazu finden sich in Abschnitt D.3.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

D.1 Aufnahme der Performance und Analyse der Alterung von konventionell erhältlichen Aktivmaterialien anhand einer Standardzelle (LiFePO4 und Schichtoxide)

Ziel in diesem Projektbereich ist es die Performancedaten der Referenzmaterialien bei unterschiedlichen Temperaturen sowie Lade- und Entladeraten aufzunehmen und mit den Daten von Zellen aus recycelten Aktivmaterialien zu vergleichen. In Abbildung D-1 ist beispielhaft eine Zyklisierkurve von kommerziellem $LiFePO_4$ bei einer Temperatur von 40 °C und einer Lade/Entladerate von 1 C gezeigt. Die Zelle zeigt eine gute Zyklenstabilität, es werden weit über 450 Zyklen erreicht.

Abbildung D-2 zeigt die Zyklisierung von NMC Ausschussware. Die Performance der rekonditionierten Ausschussware zeigt im Vergleich zur Referenz eine etwas schlechtere Performance. Die Optimierung wird vom entsprechenden Projektpartner durchgeführt.

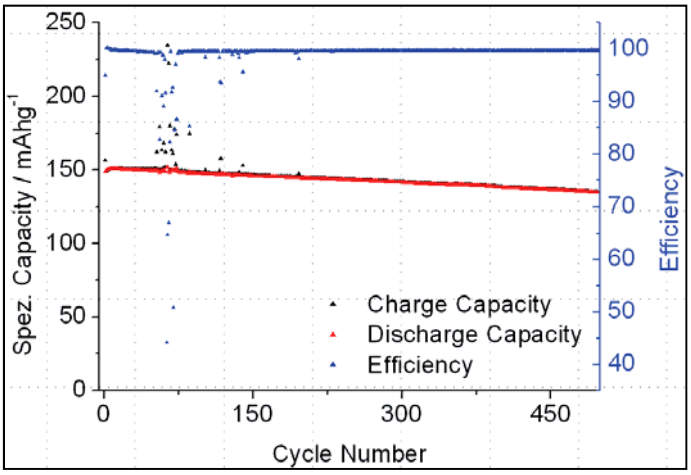


Abbildung D-1: Zyklisierkurve von LiFePO4 bei 40°C

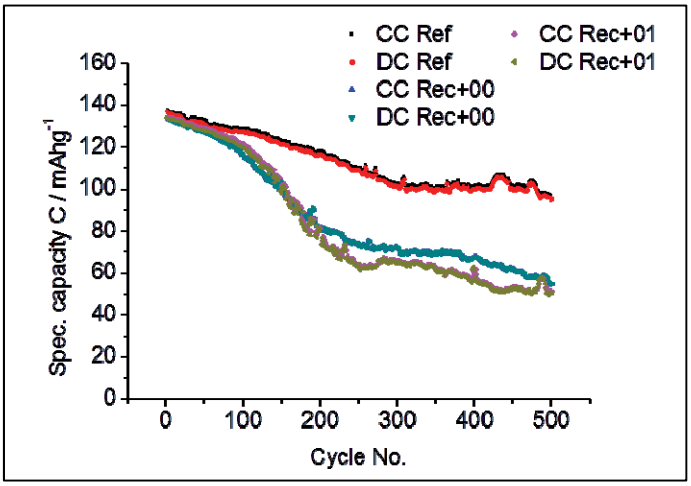


Abbildung D-2: Zyklisierkurve von NMC bei 40°C

Die weiteren Abbildungen zeigen die Untersuchungen zum Alterungsverhalten entsprechend der Tabelle D-1:

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tabelle D-1: Matrix der Alterungsuntersuchungen

	1CCC	3CCC	DST
RT			-
35°C			-
45°C			-

Das Alterungsverhalten des Vergleichsmaterials ist wie erwartet, die Bearbeitung der Matrix ist abgeschlossen.

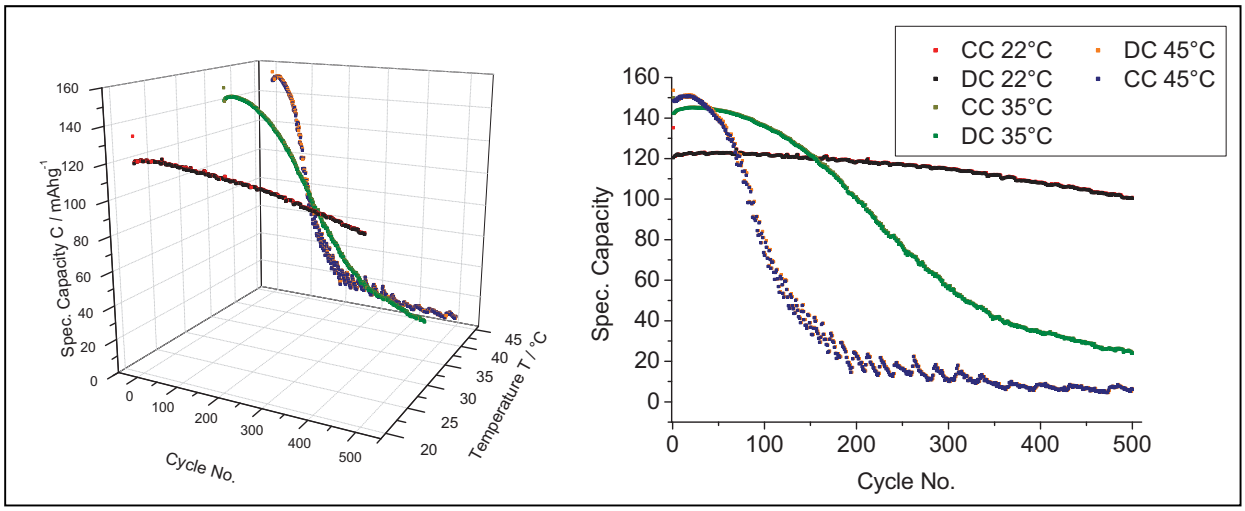


Abbildung D-3: Temperaturmatrix 1CCC mit LiBF4 in EC/DMC

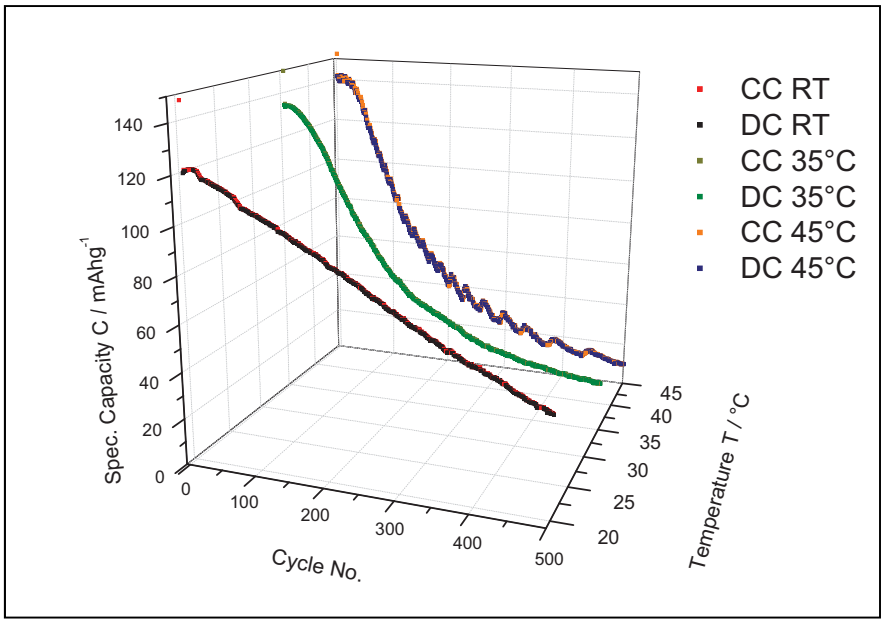


Abbildung D-4: Temperaturmatrix 3CCC mit LiBF4 EC/DMC

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Charakterisierung

Im Rahmen des **AS D.1** wurden Standardzellen durch HTEE-TUBS charakterisiert. Zu diesem Zweck wurde zunächst ein Kapazitätstest durchgeführt. Das Testsystem besteht aus zehn Rundzellen des Typs LFP. Diese sind in Reihe geschaltet und werden von einem Batterie-Management-System überwacht.

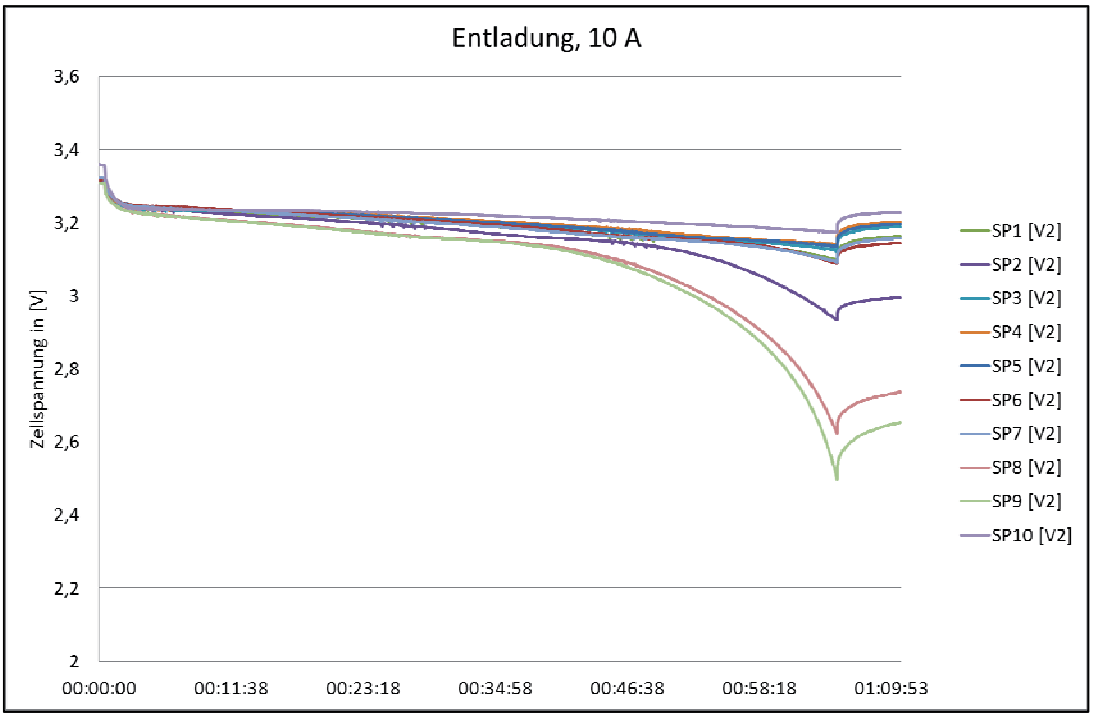


Abbildung D-5: Entladung der zu charakterisierenden Standardzellen

Als Abbruchkriterium für die Entladung dient das Unterschreiten einer Zellspannung von 2,5 V. Bis zum Erreichen dieser Zellspannung werden 10,777 Ah entladen. Anschließend wird ein Ladevorgang gestartet, dessen Zellspannungsverlauf in Abbildung D-6 gezeigt wird. Als Abbruchkriterium gilt das Erreichen einer maximalen Zellspannung von 3,6 V. Dies wird erreicht, nachdem 10,829 Ah geladen wurden. Der Entlade- / Ladewirkungsgrad des Systems beträgt daher $\eta = (10{,}777 / 10{,}829) * 100\ \% = 99{,}5\ \%$. Zu beobachten ist ein inhomogen verteilter Ladezustand zwischen den Einzelzellen. Während im Fall der Entladung die untere Entladeschlussspannung von Zelle 9 (SP 9) erreicht wird, wird die obere Ladeschlussspannung von Zelle 10 (SP 10) zuerst erreicht.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

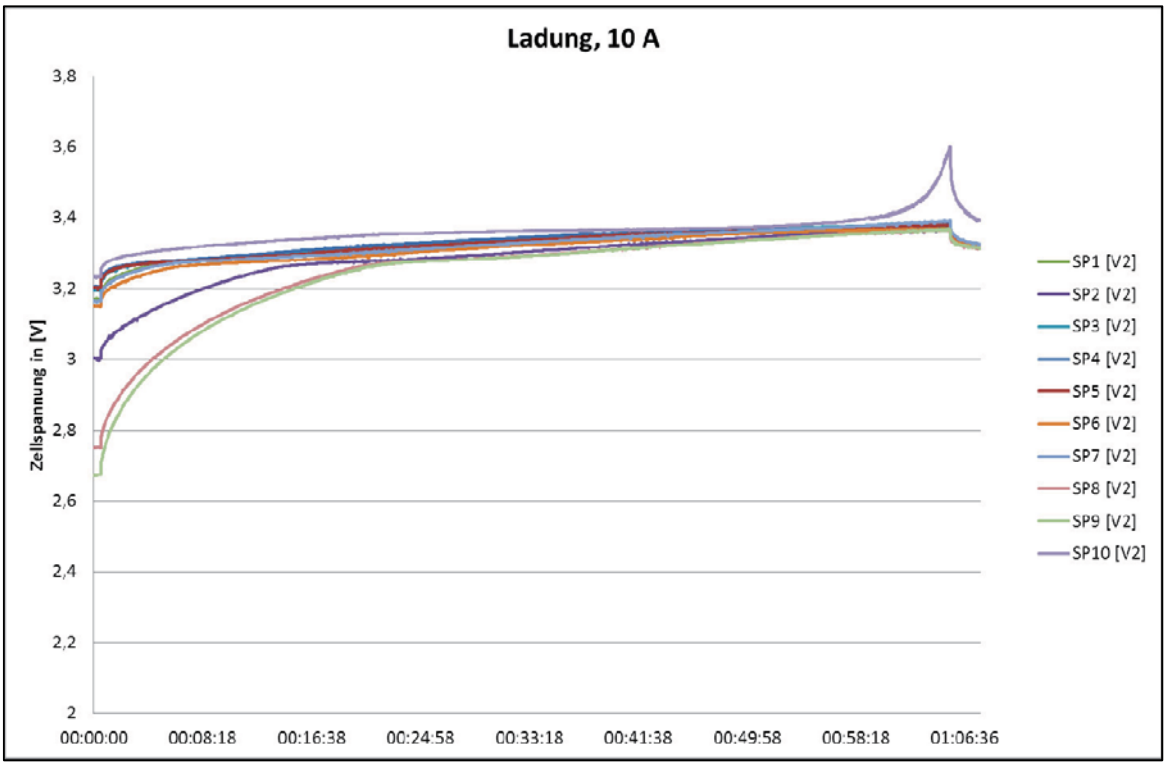


Abbildung D-6: Ladung der zu charakterisierenden Standardzellen

Ermittlung der Sprungantwort zur Charakterisierung

Zusätzlich zur Charakterisierung der Standardzellen über einen Kapazitätstest zur Ermittlung der nutzbaren Kapazität und des Wirkungsgrades wird das System einem Strompuls ausgesetzt und die resultierende Sprungantwort ermittelt. Abbildung D-7 und Abbildung D-8 zeigen die Sprungantwort des Gesamtsystems sowie der Einzelzellen auf einen Strompuls von 85 A.

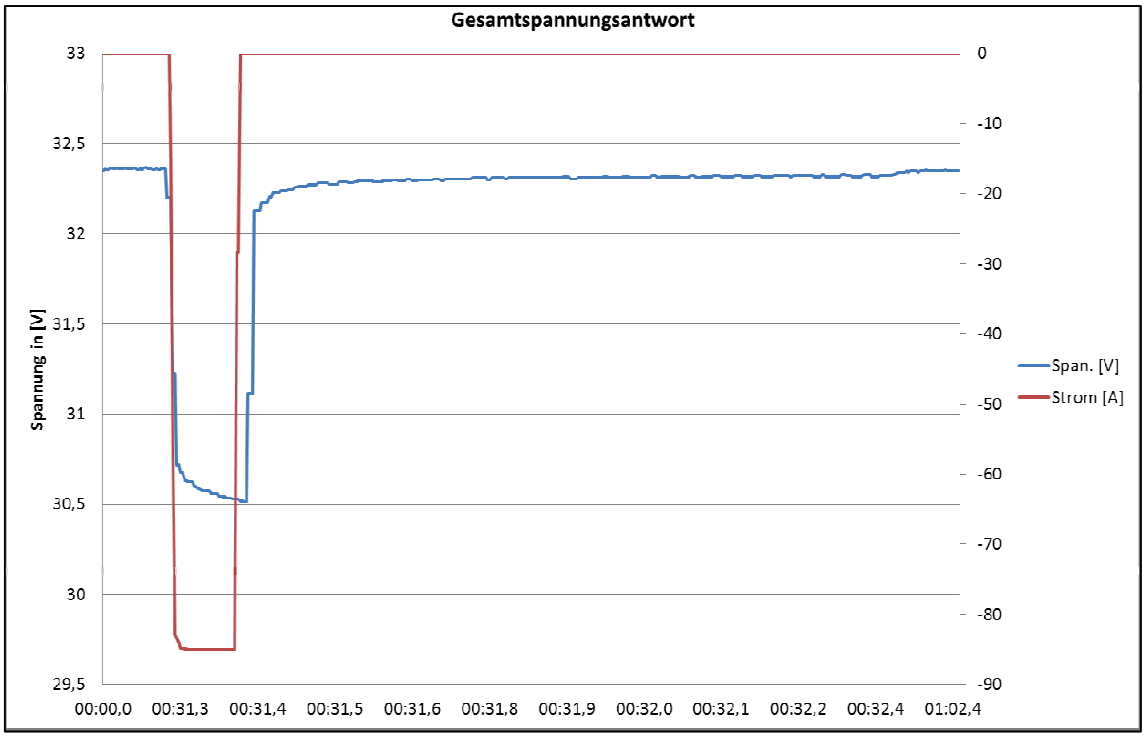


Abbildung D-7: Sprungantwort der Gesamtspannung des Systems

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die Sprungantwort der Gesamtspannung dient zur Bewertung der Eignung des Systems für hochdynamische Anwendungen. Die Analyse der Einzelzellspannungen zeigt die Streuung des Zustands der Zellen im System.

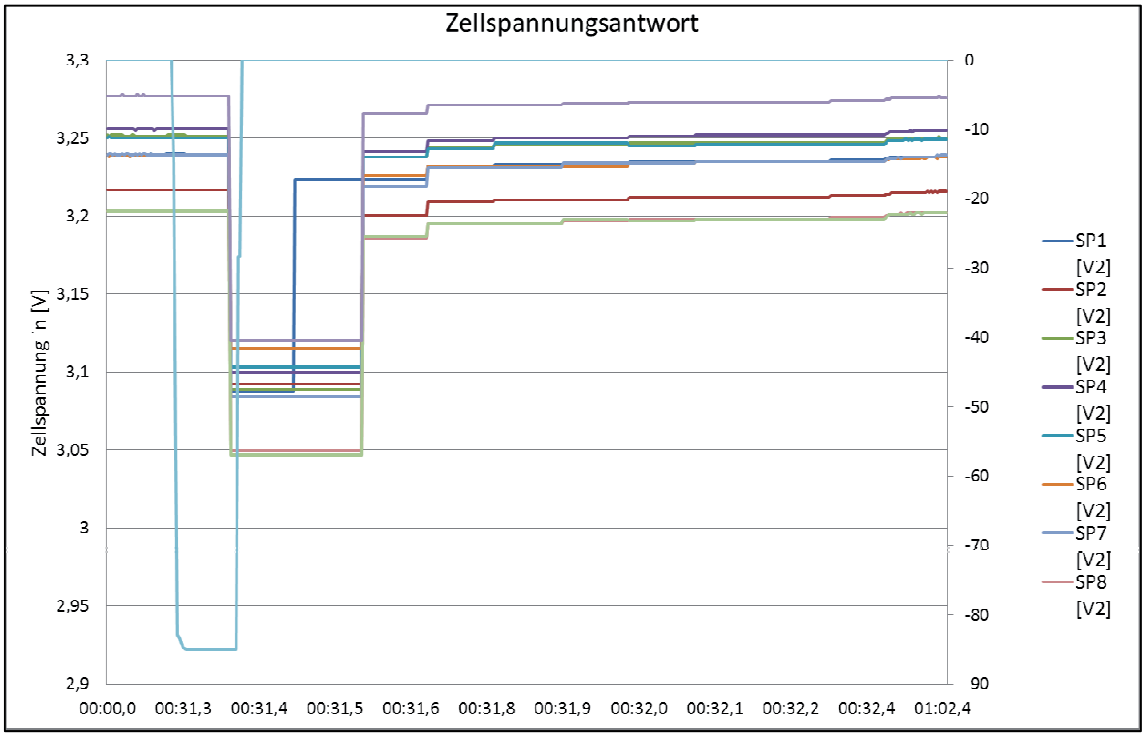


Abbildung D-8: Sprungantwort der Einzelzellspannungen

Diese Charakterisierung wurde an weiteren Standardzellen durchgeführt um die Datenbasis für die Bewertung von recycelten Batteriezellen zu vergrößern.

Reaktion auf Tiefentladungen

Die Tiefentladung stellt einen zu vermeidenden Betriebszustand dar, der die Leistungsfähigkeit eines Batteriesystems negativ beeinflusst. Die Tiefentladung durch einen Verbraucher wird durch eine Überwachung durch das Batteriemanagement-System verhindert. Nichtsdestotrotz kann die Tiefentladung während langer Standzeiten auf Grund der Selbstentladung der Batteriezellen und des Eigenverbrauchs des Batteriesystems nicht ausgeschlossen werden. Dieser Betriebszustand wird daher exemplarisch an einem Batteriesystem nachgestellt und die Auswirkungen auf den Zustand des Batteriesystems werden untersucht. Das Batteriesystem wird dazu sechs Wochen bei eingeschaltetem BMS gelagert. Nach dieser Zeit wurde eine Zellspannung < 0,5 V pro Zelle festgestellt. Zur Wiederinbetriebnahme wurde das System mit einem geringen Strom von 0,1 A für 1 min geladen. Nachdem die Funktionsfähigkeit festgestellt wurde, wurde das System mit einem Strom von 0.5 A weiter geladen. Die Ladung erfolgt zunächst bis auf ein Niveau von 3,0 V

Mittels eines Lade- und Entladepuls wird ein Innenwiderstandstest durchgeführt. Auffällig ist ein hoher Spannungssprung an einer Einzelzelle. Da dieser beim Lade- und Entladepuls gleichermaßen zu beobachten ist, bestätigt dies die Vermutung eines erhöhten Innenwiderstandes der Zelle.

Im Anschluss an diesen Test wird eine Entladung des Systems mit einem konstanten Strom von 10 A durchgeführt. Die Entladene Kapazität liegt bei > 40 Ah, dies liegt über der nominellen Kapazität des Batteriesystems.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Durch die Tiefentladung des Systems wurde eine Zelle der vier Zellen des Systems besonders geschädigt. Die nutzbare Kapazität des Batteriesystems liegt weiterhin über der ursprünglichen nominellen Kapazität des Batteriesystems. Insbesondere drei der vier Zellen können daher weiter verwendet werden. Die Information über das Vorliegen einer Tiefentladung genügt daher nicht zur Entscheidung über den Umgang mit einzelnen Batteriezellen. Weitere Faktoren wie die Dauer des Tiefentladenen Zustands spielen hier eine große Rolle.

Die Erkenntnisse aus **AS D.1** sind in die Entwicklung des Testverfahrens in **AS A.4.4** eingeflossen.

Zyklisierung

Weiterhin wurden im Rahmen von **AS D.1** Standardzellen mit Standardprofilen zyklisiert. Die Standardzellen wurden anschließend entladen und an **PB B** zur Öffnung und Weiterverarbeitung übergeben.

Abbildung D-9 zeigt den Verlauf der Zellspannungen während der Zyklisierung. Diese zeigen eine deutliche Streuung der Ladezustände während der Zyklisierung.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

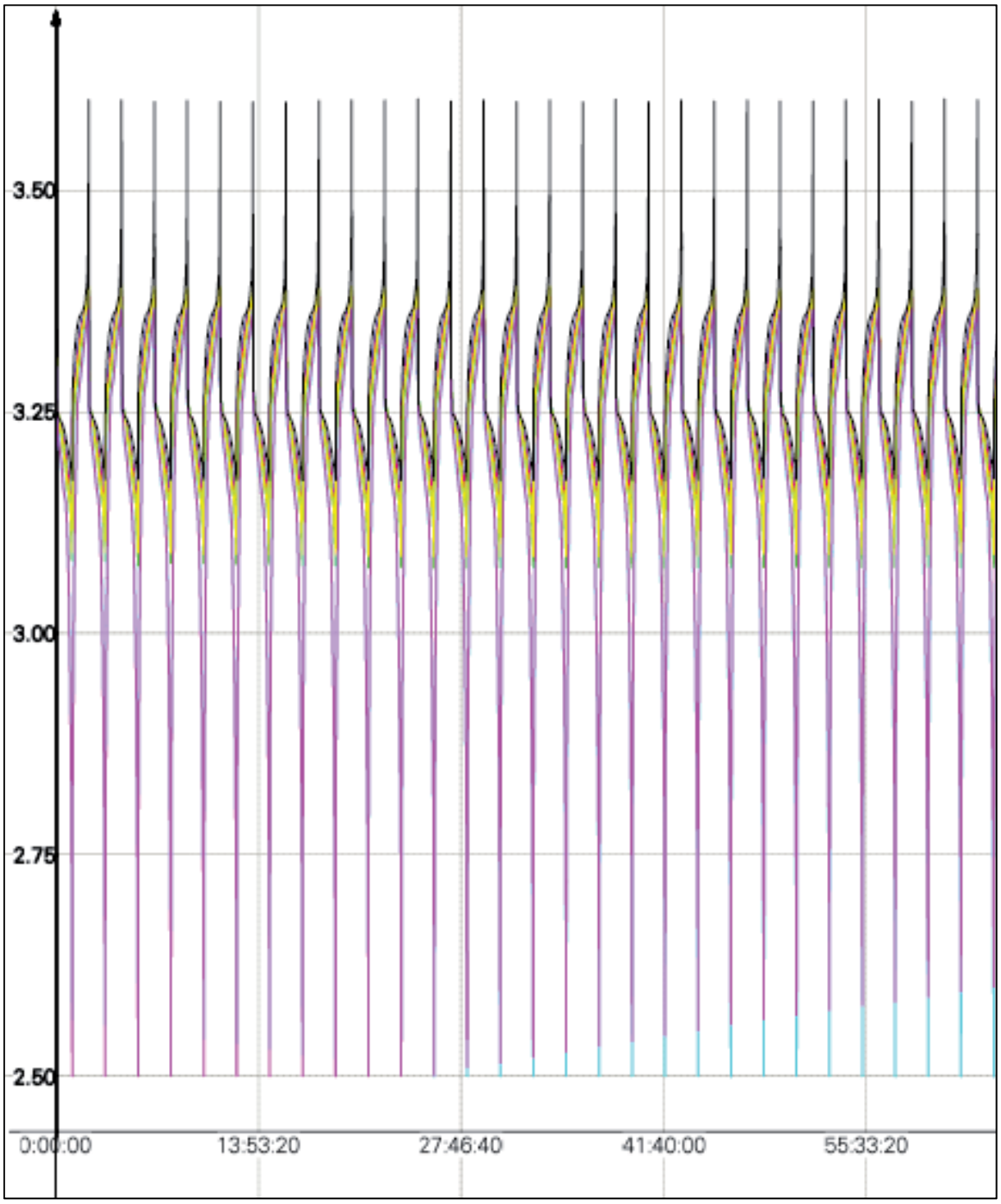


Abbildung D-9: Zellspannungsverlauf während der Zyklisierung

Die Charakterisierung und Zyklisierung der Zellen im **AS D.1** hat gezeigt, dass die Batteriezellen innerhalb eines Systems hinsichtlich der Parameter Innenwiderstand, Kapazität und Ladezustand streuen. Während der Zyklisierung hat dies einen signifikanten Einfluss auf die System-Performance. Diese Ergebnisse werden in **AS A.4.4** berücksichtigt und eine Möglichkeit zur Ermittlung der Zellparameter auf Einzelzellbasis aufgenommen.

Die Aufnahme der Performance von Standardzellenaktivmaterial (NMC Schichtoxid) wurde in so genannten Pouch-Vollzellen durchgeführt. In diesen befindet sich eine Kathode mit einer Aktivmaterialgesamtfläche von 50 x 50 mm. Als Anode wurde jeweils eine Graphitelektrode

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

mit einer Größe von 55 x 55 mm verwendet. Das Flächengewicht der Kathode betrug in jedem Versuch etwa 15 mg / cm². Sollte das Flächengewicht sich bei manchen Elektroden deutlich von diesem Wert unterscheiden, so wird der Wert zu dem entsprechenden Versuch angegeben.

Die Prüfprozedur zur Aufnahme der Performance bestand aus einem Formierzyklus (0,1C Laden / 0,3C Entladen) und einem anschließenden C-Ratentest in dem die C-Rate schrittweise auf bis zu 10C gesteigert wurde. Die genaue Reihenfolge kann Abbildung D-12 entnommen werden. Nach diesem C-Ratentest wurden 475 Zyklen mit 1C bzw. 3C durchgeführt um die Langzeitstabilität der Zellen zu untersuchen. Diese Langzeituntersuchung wurde für drei verschiedene Temperaturen (Raumtemperatur, 35 °C und 45 °C) durchgeführt. Die Ergebnisse sind Abbildung D-10 und Abbildung D-11 zu entnehmen. Dabei wird deutlich, dass bei einer Laderate von 1C eine Temperatur von 35 °C die beste und eine Temperatur von 45 °C die schlechteste Zyklenstabilität bedingt. Beträgt die Laderate 3C, ist die Temperatur von 21 °C für die Langzeitstabilität am besten und 45 °C Umgebungstemperatur zeigen die schlechteste Stabilität. Allgemein gilt, dass 3C als Laderate eine deutlich schlechtere Performance verursacht als 1C.

Der Performancetest zeigt ein sehr unterschiedliches Verhalten der Zellen bei den einzelnen Temperaturen, abhängig davon, wie hoch der Entladestrom ist. Bis zu einem Entladestrom von 3C ist 45 °C Umgebungstemperatur für die Performance am ungünstigsten. Für Entladeströme mit 5C bzw. 10C gilt jedoch, dass 35 °C deutlich schlechter für die Performance sind, als 45 °C. Konstant für alle Entladeraten gilt jedoch, dass 21 °C Umgebungstemperatur

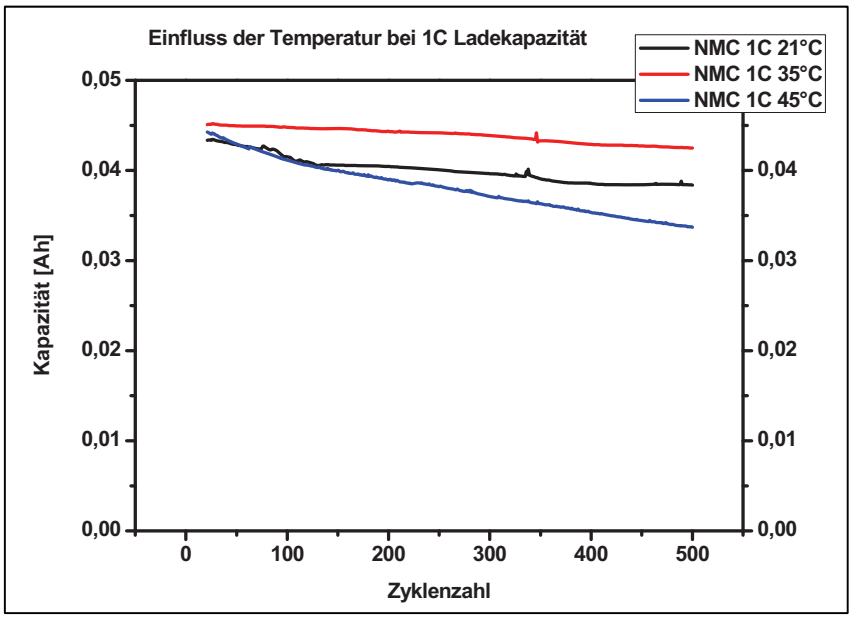


Abbildung D-10: Performance von Standard-Schichtoxid-Zellen bei 1C Laderate

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

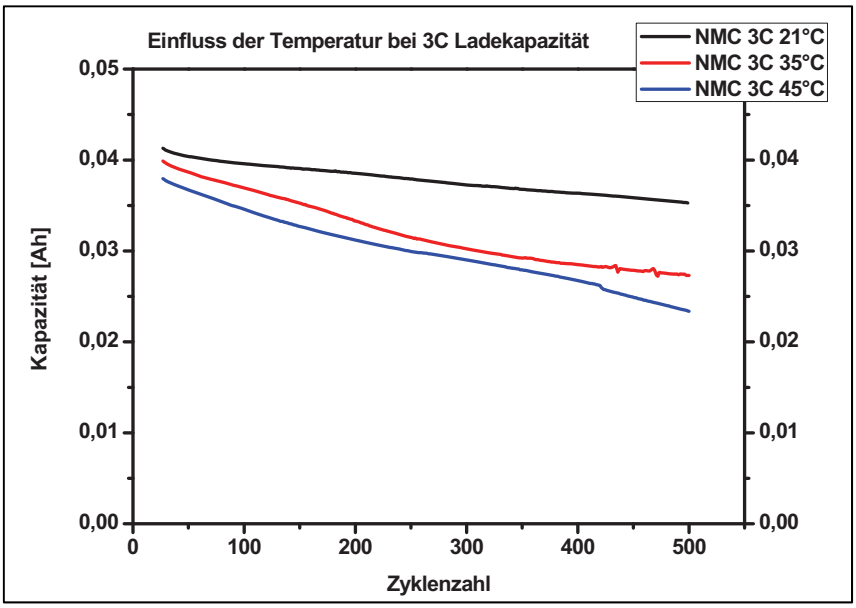


Abbildung D-11: Performance von Standard-Schichtoxid-Zellen bei 3C Laderate

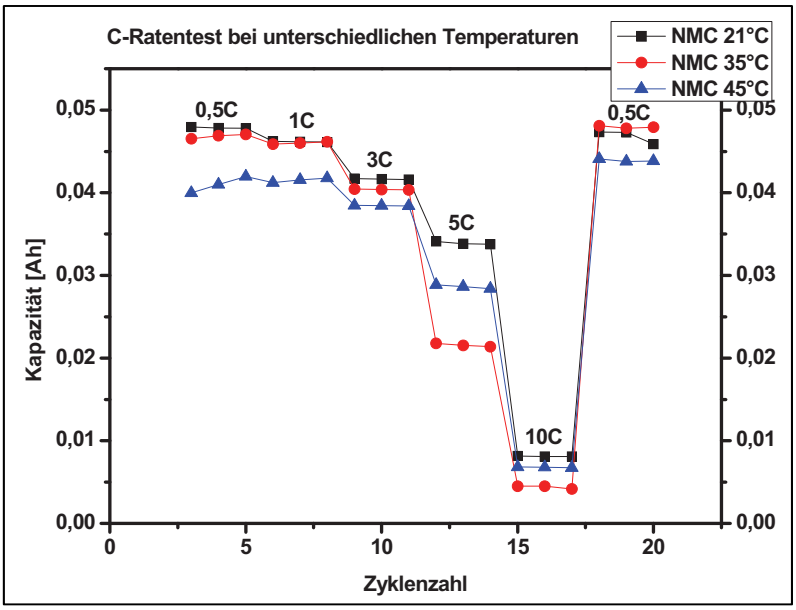


Abbildung D-12: C-Ratentest bei unterschiedlichen Temperaturen

Nach dem Zyklisieren wurden mit den gealterten Kathoden post mortem Analysen durchgeführt. Dazu gehörten Haftkrafttest zur Untersuchung der Bindemechanismen zwischen Beschichtung und Substratfolie. Die Ergebnisse dazu sind in Abbildung D-13 dargestellt. Dargestellt ist die Haftkraft der Elektroden vor dem Zyklisieren (Standard, grün) und die Haftkraft der Zellen nach 1C, bzw. 3C Laderaten, sowie 21 °C, bzw. 45 °C Umgebungstemperatur. Die dargestellten Werte bestehen dabei aus den Mittelwerten von je zehn Messungen. Bei den zyklisierten Elektroden sind jeweils fünf Messungen pro Elektrode gemacht worden und es wurden zwei Elektroden ausgewertet.

Als Ergebnis ist hier zu erkennen, dass die Haftkraft der Kathoden mit einem Ladestrom von 1C nicht von der Haftkraft der ursprünglich gefertigten Kathode zu unterscheiden ist. Die Mittelwerte unterscheiden sich zwar leicht (die gealterten Kathoden weisen eine leicht höhere

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Haftkraft auf), jedoch ist die Standardabweichung so groß, dass eine sinnvolle Aussage hier nicht möglich ist. Die Haftkraft der gezykelten Elektroden unterschied sich ganz massiv, was auf eine unterschiedlich starke Beeinflussung des Binders innerhalb der Elektrode schließen lässt und somit auch auf ein ungleichmäßiges Alterungsverhalten innerhalb der Zelle. Diese Ungleichmäßigkeit der Haftkraft tritt bei Zellen, die in einer Umgebung von 45 °C zyklisiert wurden deutlich stärker auf als bei Zellen mit niedrigerer Zyklisiertemperatur.

Ein Ladestrom von 3C verringert die Haftkraft der Kathodenschicht auf dem Aluminiumsubstrat deutlich auf 68 % (21 °C) bzw. 83 % (45 °C) des ursprünglichen Wertes. Es ist wieder zu beobachten, dass eine höhere Temperatur eine größere Streuung der Werte und damit eine deutlich höhere Standardabweichung bedingt. Das Adhäsionsversagen findet bei all diesen Elektroden innerhalb der Partikelschicht statt. Nur vereinzelnd konnte beobachtet werden, dass ein teilweises Adhäsionsversagen zwischen Partikelschicht und Aluminiumsubstrat auftrat. Dieses Phänomen trat unabhängig von Temperatur und Ladestrom auf.

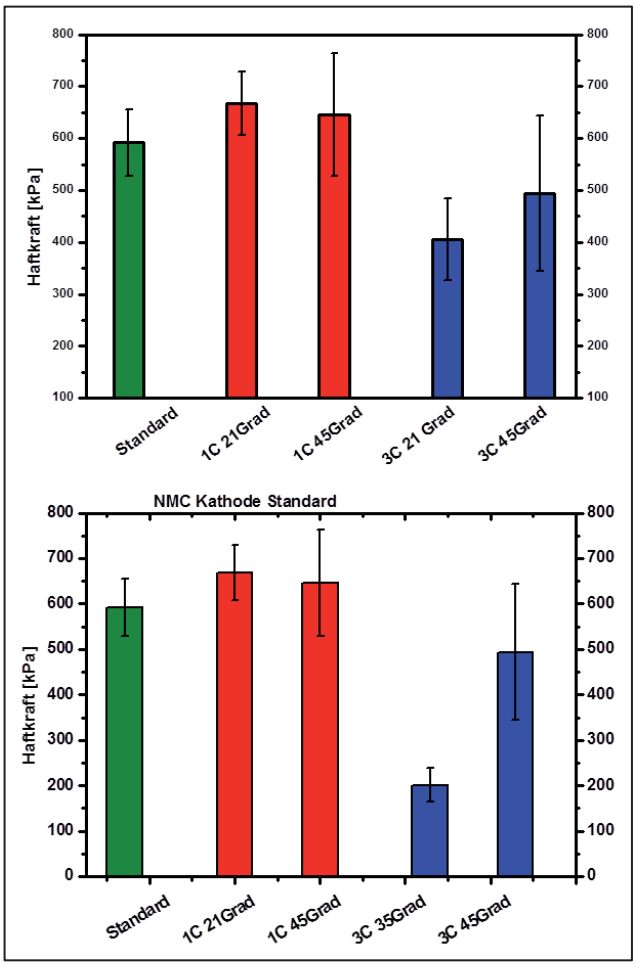


Abbildung D-13: Haftkraftmessung an zyklisierten Zellen (Standard)

Bei der Nanoindentationsmessung wird eine Indentationsspitze in die Oberfläche der Elektrode hineingedrückt, bis eine vorher definierte Kraft erreicht ist. Der dabei zurückgelegte Weg wird aufgenommen. Nach Erreichen der eingestellten maximalen Kraft fährt die Nadel wieder zurück. Dabei wird die Kraft aufgenommen, mit der der elastische Teil der Schicht gegen die Nadel drückt. So lassen sich die plastischen und elastischen Teile der Verformungsarbeit aufnehmen und die mechanischen Eigenschaften der Schicht charakterisieren.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die maximal eingestellte Kraft betrug 8.000 µN. Dieser Wert hat sich in vorherigen Experimenten als sehr sinnvoll erwiesen. Die Spitze der Indentationsnadel ist ein flacher Kreis (flat punch) mit einem Durchmesser von 50 µm. Für die Erfassung der Messwerte wurden an zwei unterschiedlichen Stellen der Elektrode jeweils 30 einzelne Indents gemacht.

In Abbildung D-14 sind jeweils die plastische, elastische und die gesamte Verformungsarbeit beim Eindringen des Indents in die Elektrode dargestellt.

Eine höhere Temperatur (45°C) verringert den Anteil der elastischen Verformungsarbeit an der Gesamtverformungsarbeit signifikant. Dieses Verhalten ist unabhängig von der Laderate und tritt bei einem Strom von 1C ebenso auf wie bei einem Strom von 3C. Eine höhere Laderate verringert die Verformungsarbeit insgesamt. Dabei werden der plastische und der elastische Teil deutlich geringer. Bei einer Temperatur von 45 °C verringert sich die elastische Verformungsarbeit bei einer Steigerung des Ladestromes von 1C auf 3C kaum. Der Einfluss der Temperatur auf die elastische Verformungsarbeit ist deutlich größer, als eine Ladestromsteigerung.

Eine verringerte elastische Verformungsarbeit nach 500 Zyklen deutet auf ein geändertes Verhalten des Binders hin. Dieser verliert durch das lange zyklisieren einen Teil der Fähigkeit die Spannungen innerhalb des Elektrodenverbundes zu kompensieren.

Dieses Verhalten deckt sich mit den Elektronenmikroskop-Aufnahmen die von den Kathoden vor und nach dem Zyklisieren angefertigt wurden (siehe Abbildung D-15). Bei hohen Laderaten (3C) und hohen Temperaturen (45 °C) sind deutlich mehr zerstörte Partikel auf der Elektrode zu finden. Dies ist sehr deutlich in Abbildung D-15 3a) und 3b) zu sehen. Einige der sphärischen Partikel sind mit Rissen überzogen oder gleich komplett gespalten. Spannungen innerhalb der Partikel während der Zyklisierung und nicht auf den Binder übertragene Spannung zwischen den Partikeln ist der Grund für die zerstörten Partikel.

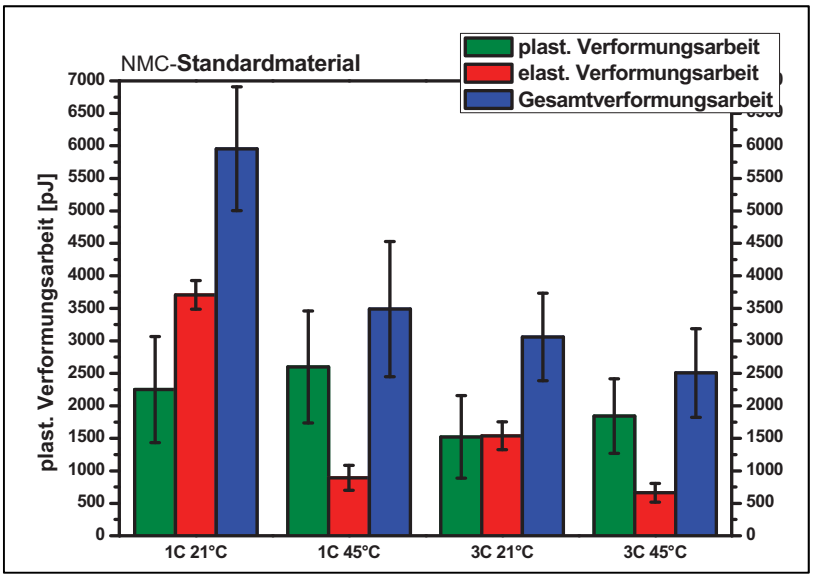


Abbildung D-14: Nanoindentationsmessungen an NMC-Standardmaterial

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

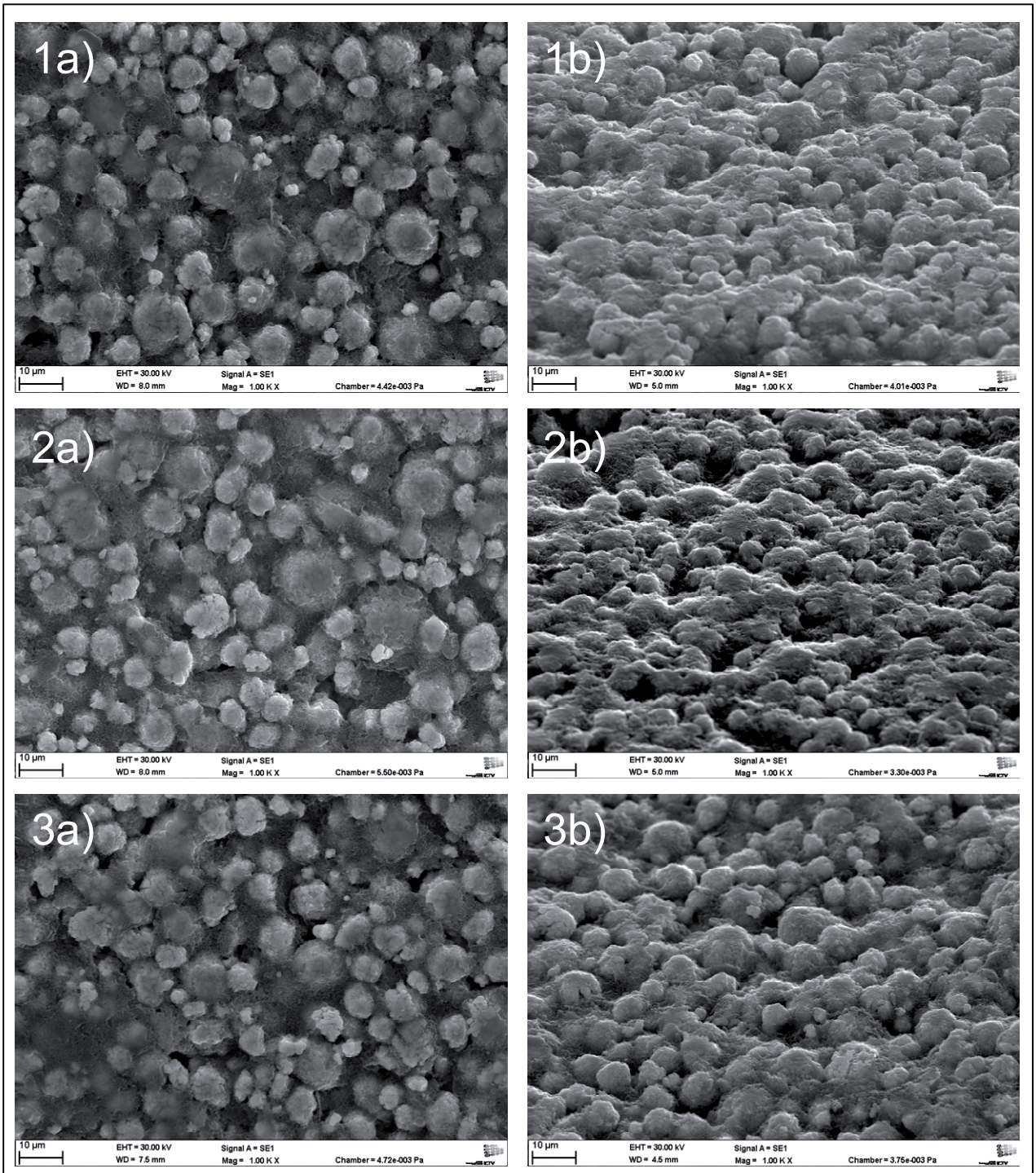


Abbildung D-15: SEM-Aufnahmen von NMC Standardmaterial

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

D.2 Aufnahme der Performance und Analyse der Alterung von recycelten Aktivmaterialien und mehrfach recycelten Aktivmaterialien anhand einer Standardzelle (LiFePO4 und Schichtoxide)

Aufgrund des Ausbleibens der recycelten Aktivmaterialien konnten keine praktischen Versuche durchgeführt werden. Weiterhin können die Proben aufgrund der kanzerogenen Einstufung nicht von der LTR und CM verarbeitet werden. Die restlichen Charakterisierungen werden deswegen nur von IPC-WWU durchgeführt. Die Lieferung erfolgte der Proben erfolgte im August, so dass die Charakterisierung noch andauert.

Die Zellen eines der im Projekt demontierten Batteriesysteme wurden klassifiziert und werden an einem Teststand von HTEE-TUBS zyklisiert. An Stelle von Zellen aus recycelten Aktivmaterialien werden somit gebrauchte Batteriezellen untersucht. Damit soll eine Grundlage für die Bewertung des Einsatzes der rücklaufenden Systeme in den in **AP A.4** aufgezeigten Einsatzfeldern untersucht werden. Zunächst wurden die Zellen analog zu der in **AP A.4** entwickelten Bewertungsmethodik anhand der Leerlaufspannung bewertet.

Anschließend wurden die Module mit der höchsten und der niedrigsten Leerlaufspannung sowie der größten und kleinsten Differenz der Zellspannungen ausgewählt und die Performance am Teststand des HTEE-TUBS getestet.

Die in **AS C.3.3** und **AS C.3.4** hergestellten Elektroden und Zellen wurden in diesem Arbeitsschritt auf ihre Performance bei unterschiedlich starken Lade-/Entladeströmen und das Alterungsverhalten bei verschiedenen Umgebungstemperaturen hin untersucht.

Die bereits in den Arbeitsschritten **AS C.3.3** und **AS C.3.4** erwähnten Strombelastungstests wurden in diesem Paket bei zwei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. (siehe Abbildung D-16 und Abbildung D-17). Dabei stellte sich heraus, dass bei deutlich erhöhter Temperatur (45° C) der Unterschied in der Kapazität zwischen dem Referenzmaterial und dem leicht und stark verunreinigten Materialien signifikant größer werden. Der Unterschied zwischen den Kapazitäten der Zellen bei 21° C und 45° C erklärt sich durch eine unterschiedliche Flächenmasse.

Bei einer Temperatur von 21° C zeigt sich, wie bereits in **AS C.3.3** beschrieben kaum ein Unterschied zwischen der Referenz und dem Material V21. Das Aktivmaterial mit den höheren Verunreinigungen (V5-Z) zeigt eine 15-20% schlechtere Kapazität. Ein Lade-/Entladestrom von 10C verursacht eine Kapazität von etwa 10% des ursprünglichen Wertes. Dieser Abfall ist jedoch für alle drei untersuchten Materialien identisch. Eine anschließende Zyklisierung mit einer Laderate von 0,5C lässt die Kapazität jedoch wieder auf den Startwert ansteigen. Dieser Abfall am Beginn der Alterung hinterlässt keine in der Kapazität sichtbaren irreversiblen Beschädigungen.

Bei einer Umgebungstemperatur von 45°C ist ein deutlicher Unterschied zwischen den drei Materialien zu erkennen. Das Referenzmaterial zeigt bei allen Ladeströmen die beste Performance. Das Material V21 mit den leichten Verunreinigungen hat eine um ca. 10% geringere Kapazität als das Referenzmaterial. Nur bei einer Laderate von 10C ist dieser unterschied nicht mehr festzustellen. Hier ist der Abfall des Materials V21 nicht so stark wie der Abfall der Referenz. Das stark verunreinigte Material V5-Z zeigt im Vergleich zur Referenz oder zum Material V21 die geringste Kapazität. Nach dem Belastungstest mit bis zu 10C wurden die Zellen 3mal mit 0,5C ge- und entladen. Hier zeigte wie bereits bei der Temperatur von 21°C, dass durch die hohen Stromraten kein erkennbarer physischer Schaden entstanden ist.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die Ergebnisse der Zyklenstabilität bei den beiden unterschiedlichen Temperaturen und eine Laderate von 3C sind Abbildung D-18 und Abbildung D-19 zu entnehmen. Bei beiden Temperaturen ist deutlich zu erkennen, dass das stark verunreinigte Material V5-Z die schwächste Performance zeigt.

Bei 21°C sinkt die Kapazität der Zelle innerhalb der ersten 50 Zyklen auf ca. 2/3 der ursprünglichen Kapazität ab, stabilisiert sich dann bei diesem Wert und verliert dann in den letzten 400 Zyklen nur noch sehr wenig an Kapazität. Das leicht verunreinigte Material V21 zeigt in diesem Versuch die beste Langzeitstabilität auch im Vergleich zum Referenzmaterial. Steigt die Temperatur auf 45°C gilt wiederum, dass die Zellen mit dem V5-Z-Aktivmaterial die schlechteste Performance zeigen. Das Verhalten vom Referenzmaterial und vom Material V21 ist nahezu identisch. Obwohl der Abfall der Kapazität der Referenz anfangs deutlich stärker ist, als der des Materials V21 stabilisiert sich dieser Verlust bei Zyklus 200 und ab diesem Zeitpunkt ist die Leistung der beiden Materialien nahezu identisch.

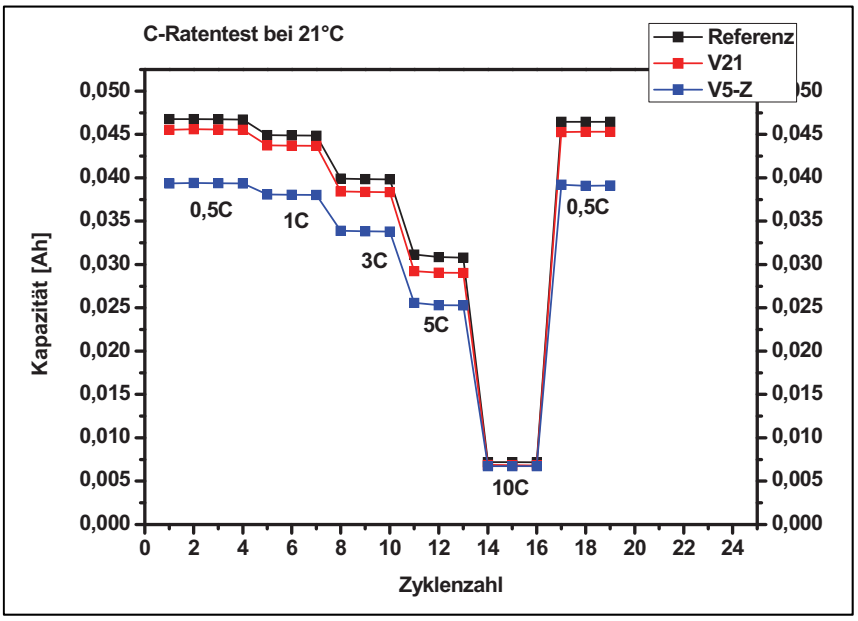


Abbildung D-16: C-Ratentest NMC bei 21°C

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

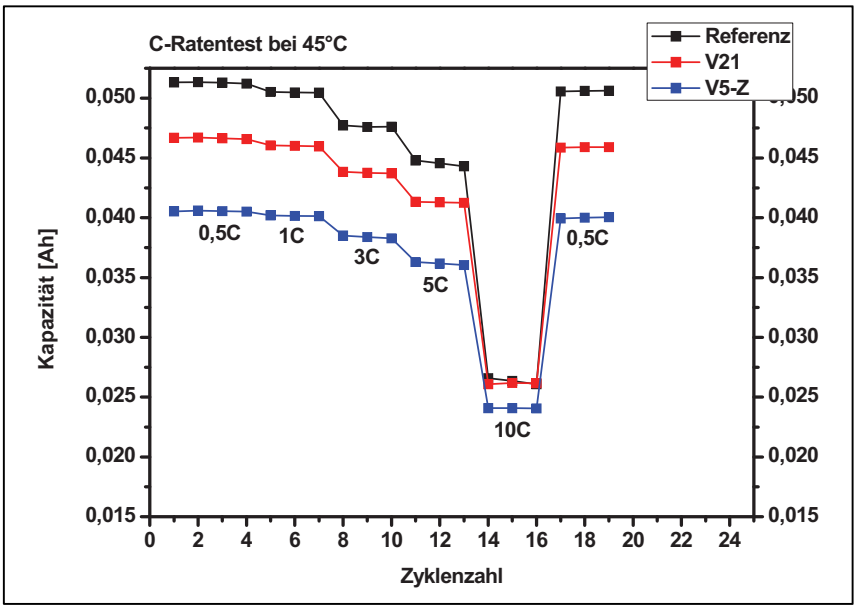


Abbildung D-17: C-Ratentest NMC bei 45°C

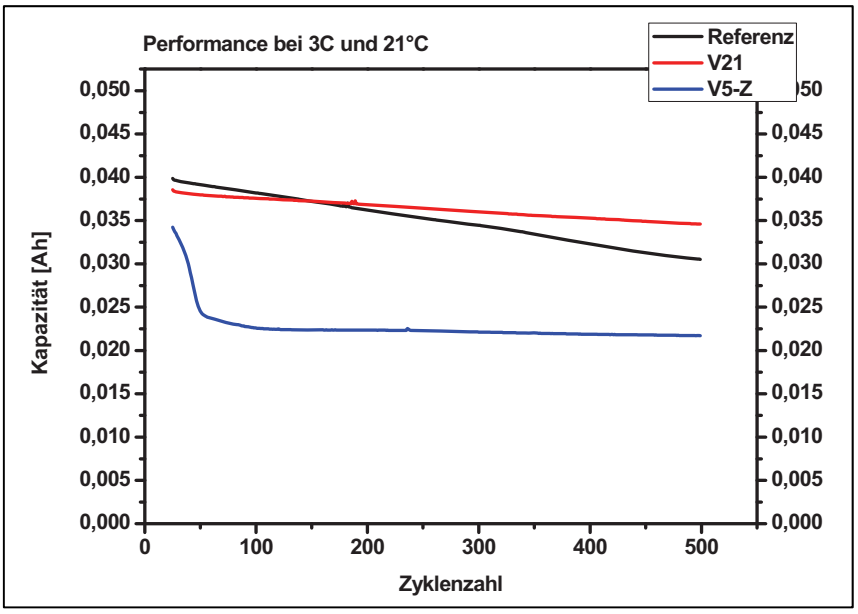


Abbildung D-18: Performance NMC bei 21°C und 3C

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

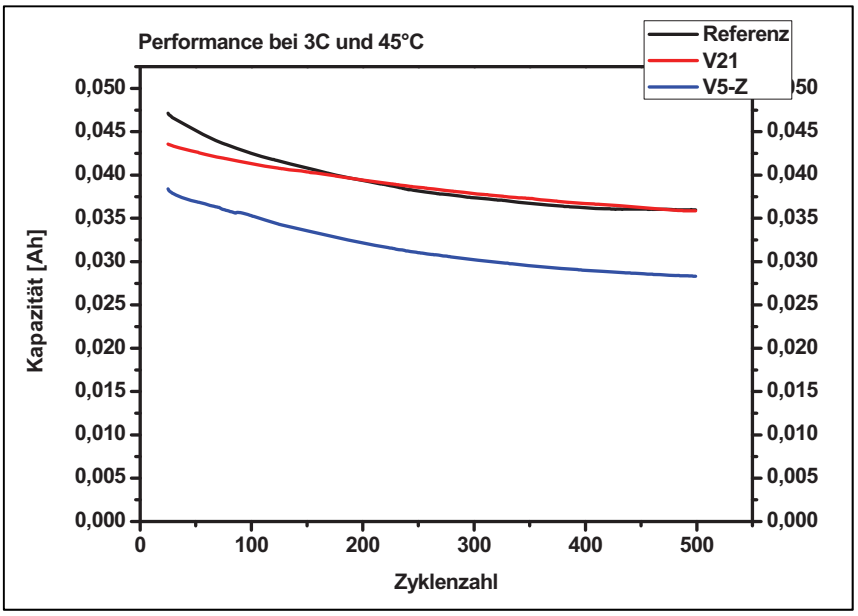


Abbildung D-19: Performancetest NMC bei 45°C und 3C

Bei diesen Zellen wurde, analog zu **AS D.1** eine post-mortem Analyse vorgenommen. Die Ergebnisse der Haftkraftuntersuchung sind in Abbildung D-20 dargestellt. Die Zyklisierung verringert die Haftkraft der Beschichtung deutlich. Aber auch die Temperatur hat einen negativen Einfluss auf die Haftkraft. Außerdem ändert sich die Art des Adhäsionsversagens. Während die unzyklisierten Elektroden ein Versagen der Haftkraft innerhalb des Partikelverbundes zeigen und beim Abziehtest die Schicht der Partikel auseinander gerissen wird, so reißt die gesamte Partikelschicht bei den zyklisierten Elektroden komplett von der Aluminiumfolie ab. Dieses Verhalten ist umso stärker, je stärker die Aktivmaterialien verunreinigt sind. Das Material V5-Z zeigt die geringste Haftkraft zwischen Partikelschicht und Aluminiumsubstrat. Dabei ist zu beobachten, dass die Aluminiumfolie deutlich matter geworden ist, was auf eine Reaktion der Aluminiumfolie mit dem Elektrolyten hindeutet während des Zyklisieren.

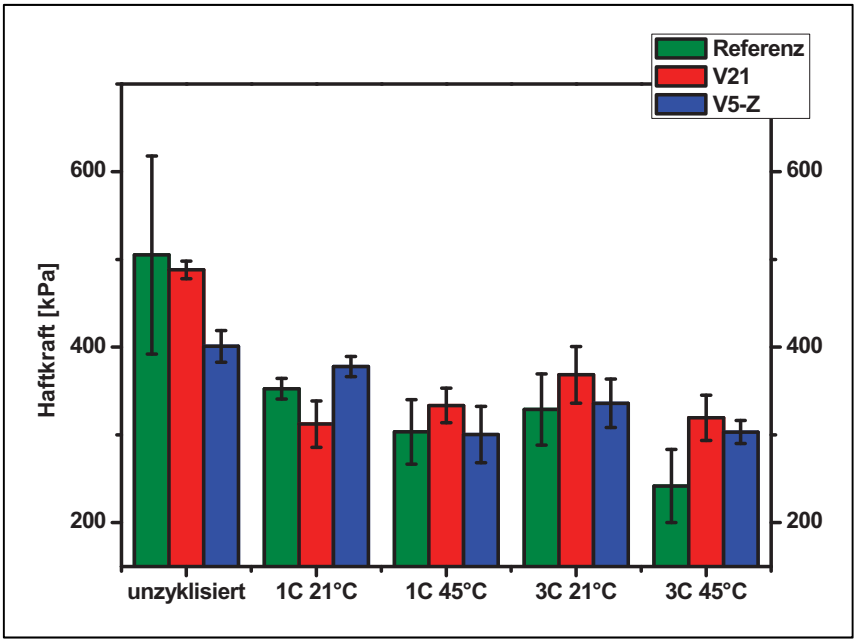


Abbildung D-20: Haftkraftuntersuchung von NMC-Material bei unterschiedlichen Laderaten und Temperaturen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die Verunreinigungen, die in den recycelten Aktivmaterialien auftreten haben keinen Einfluss auf die Haftkraft der Partikel untereinander oder auf die Haftkraft zwischen Partikel und Substratfolie. Die unterschiedliche Morphologie der Partikel der Materialien V21 und V5-Z beeinträchtigt die Haftkraft nicht messbar. Nur die Art des Haftkraftversagens ändert sich, wie bereits oben beschrieben.

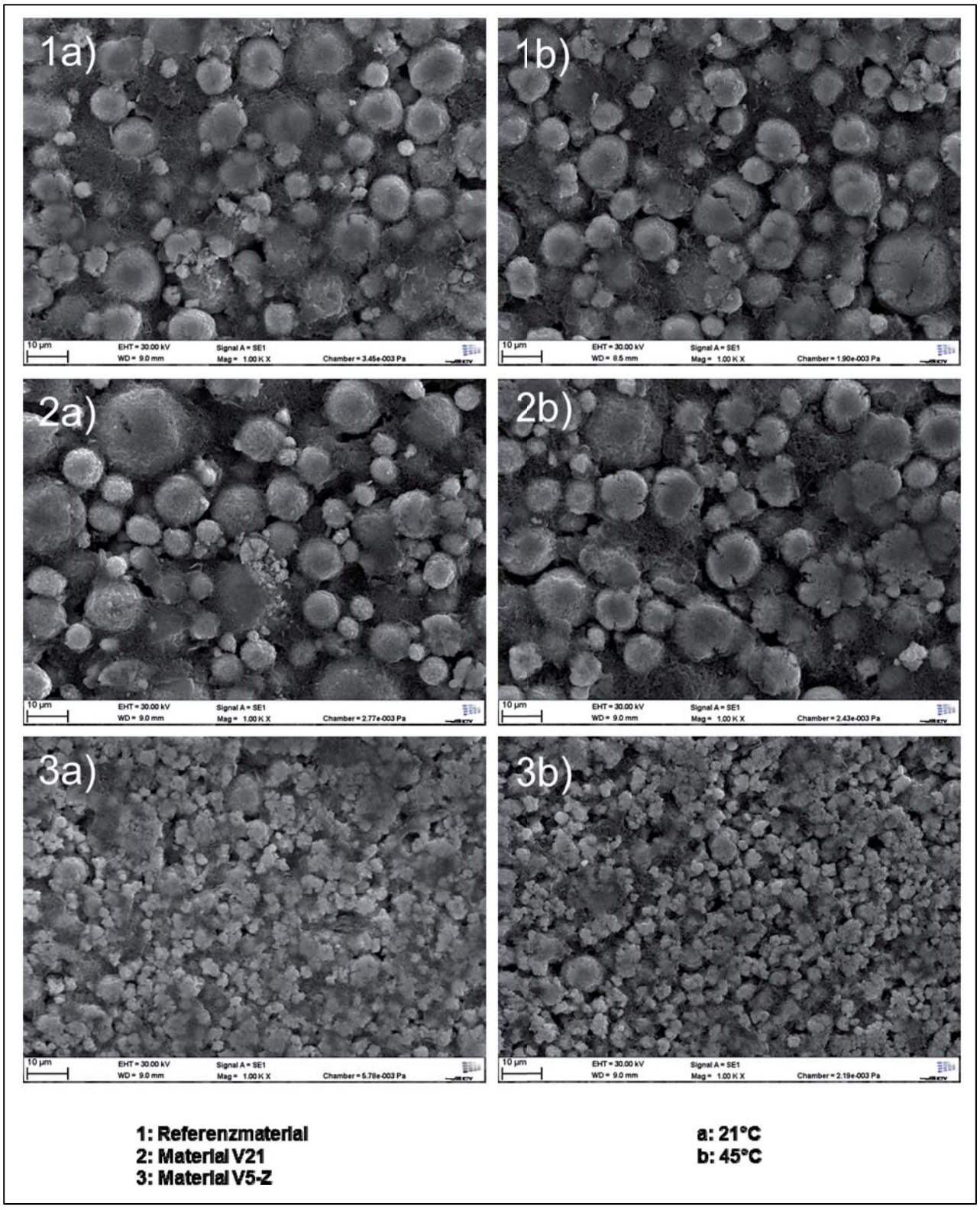


Abbildung D-21: SEM-Aufnahmen von NMC Recyclingmaterial bei 1C-Laderate

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die Aufnahmen aus dem Elektronenmikroskop (SEM) (Abbildung D-21) zeigen, dass ein Teil der Partikel während der Zyklisierung zerbricht. Dieses Verhalten wurde schon in **AS D.1** beim Standardmaterial beobachtet. Das Referenzmaterial in **AS D.2** zeigt ein ähnliches Verhalten. Auch hier steigt die Anzahl der defekten Partikel mit höherer Laderate und höherer Temperatur.

Das Material V21 zeigt ein ähnliches Verhalten wie das Referenzmaterial, jedoch ist die Anzahl der zerstörten Partikel deutlich größer. (siehe Abbildung D-21 2b)). Ob auch Defekte in den Partikeln von Material V5-Z entstehen ließ sich leider nicht feststellen. Diese Elektroden bestehen aus großen Agglomeratstrukturen und Risse sind nicht von den Grenzen der Primärpartikel zu unterscheiden.

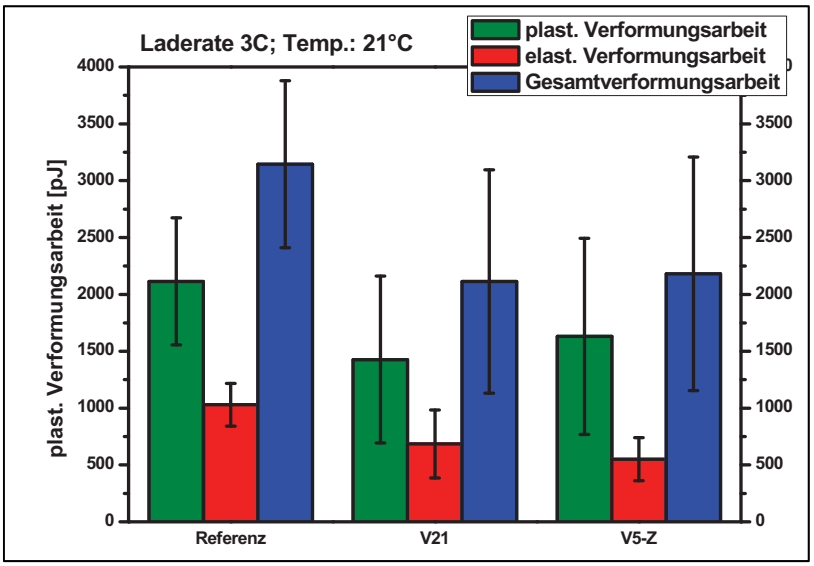


Abbildung D-22: Nanoindentation von Recyclingmaterial. Laderate 3C, Temperatur 21°C

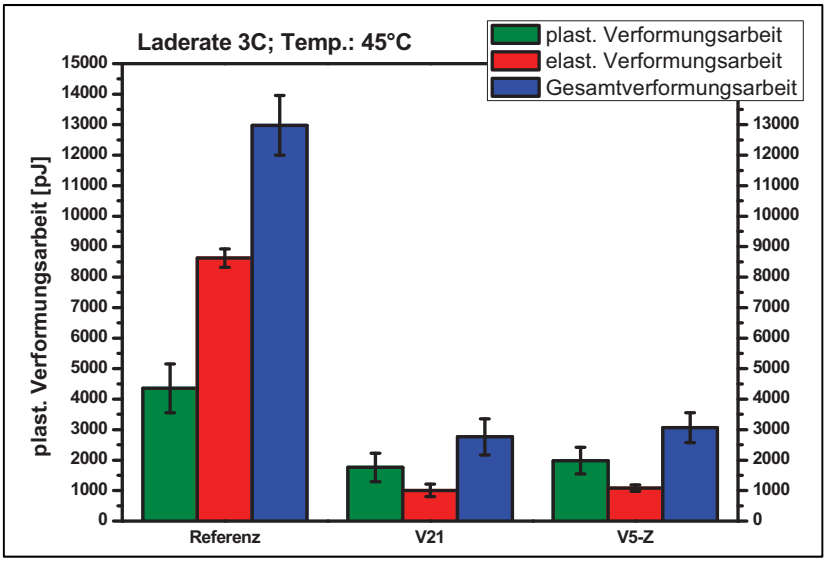


Abbildung D-23: Nanoindentation von Recyclingmaterial. Laderate 3C, Temperatur 45°C

Die Nanoindentationsversuche an dem recycelten Materialien V21 und V5-Z, sowie dem Referenzmaterial sind in Abbildung D-22 und Abbildung D-23 aufgetragen. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die Verunreinigungen in den Materialien V21 und V5-Z den Anteil der elastischen Arbeit deutlich reduziert. Dieses deutet auf eine starke Beeinflussung des Binders

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

durch diese Verunreinigungen hin. Diese These wird auch durch die Aufnahmen des Elektronenmikroskops gestützt. Die Aufnahmen der Materialien V21 und V5-Z zeigen eine veränderte Binderstruktur nach dem Zyklisieren. Während bei unzyklisiertem Material und dem Referenzmaterial nach dem Zyklisieren der Binder als homogene Struktur um die Partikel herum gebunden ist, sieht man auf den Bildern der zyklisierten verunreinigten Materialien eine veränderte Struktur des Binders. Dieser wirkt auf den Fotos, als wären Teile des Bindermaterials gelöst worden. Die Struktur ähnelt geätztem Metall. Diese Veränderung des Binders tritt umso stärker auf, je höher die Temperatur ist und je höher die Laderaten sind.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

D.3 Analyse der Mechanismen von Alterung im Vergleich konventioneller und recycelter Aktivmaterialien

Aufgrund des Ausbleibens der recycelten Aktivmaterialien konnten keine praktischen Versuche durchgeführt werden. Weiterhin können die Proben aufgrund der kanzerogenen Einstufung nicht von LTA und CM verarbeitet werden. Die restlichen Charakterisierungen werden deswegen nur durch IPC- WWU durchgeführt. Die Lieferung erfolgte der Proben erfolgte im August, so dass die Charakterisierung noch andauert.

Die Einflüsse der Alterungsmechanismen auf die mechanischen Eigenschaften der Zellen nach dem Zyklisieren führen zu den gleichen Veränderungen. Bei konventionellem Material wird ebenso wie bei recyceltem Material die Haftkraft der Partikel untereinander, bzw. zwischen Partikel und Substratfolie deutlich reduziert. Hierbei ist jedoch zu unterscheiden, dass das Recyclingmaterial aus bereits zyklisierten Zellen (V5-Z) eine deutlich verringerte Haftkraft zur Substratfolie aufweist während die Zellen aus Referenzmaterial und Recyclingmaterial aus Ausschussware (V21) ein Versagen der Adhäsion innerhalb des Partikelverbundes aufweisen. Dieses Verhalten deutet auf eine Reaktion der Materialien mit der Aluminiumsubstratfolie hin, die beim Recyceln in dem Aktivmaterial verbleiben. Diese Reaktion verändert den Binder und lässt dessen Hafteigenschaften deutlich zurückgehen.

Eine Reaktion des Binders mit den Stoffen aus dem Recyclingprozess lässt sich auch aus den Nanoindentationsuntersuchungen ableiten. Beide recycelten Materialien (V21 & V5-Z) zeigen ein deutlich weniger elastisches Verhalten als das Referenzmaterial. Der Binder hat also nach dem Zyklisieren seine elastischen Eigenschaften deutlich verringert. Eine hohe Temperatur (45°C) während des Zyklisierens verstärkt diesen Effekt deutlich, wohingegen eine deutlich gesteigerte Laderate (3C im Vergleich zu 1C) kaum einen Einfluss hat.

Des Weiteren ist ein verstärkt auftretendes Brechen der Partikel zu beobachten. Dieses Verhalten wird beim konventionellen Material in **AS D.1** kaum beobachtet, während das Material V21 in **AS D.2** eine hohe Zahl defekter Partikel aufweist. Die Anzahl der gebrochenen Partikel ist stark von der Laderate und Temperatur abhängig. Hierbei gilt: Je höher die Laderate und Temperatur, desto häufiger treten gebrochene Partikel auf.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

E Ökonomische und ökologische Bewertung von Recycling-Konzepten für Li-Ionen Batterien

Ziel des **PB E** ist die ökonomische und ökologische Bewertung der in *LithoRec* konzeptionierten und entwickelten Recyclingprozesse sowie die Beurteilung des Beitrags des Recyclings auf die Verfügbarkeit wichtiger Batterierohstoffe.

E.1 Erhebung und Prozesssimulation des Energiebedarfs

In **AS E.1** wird von HTEE-TUBS quantifiziert, wie sich die Verfahrenswahl in **AP A.4** auf den Energiebedarf des gesamten Prozesses auswirkt. Es wird davon ausgegangen, dass folgende typische Batteriekapazitäten verwendet werden.

Tabelle E-1: Typische Kapazitäten von Automotive-Batteriesystemen

	BEV-Batterie	PHEV-Batterie	HEV-Batterie
Batteriekapazität pro Batterie in [kWh]	23,1	9	1

Die DIN EN 61982-3 beschreibt generelle Anforderungen und die Prüfung der Lebensdauer von Sekundärbatterien für den Antrieb von Straßenfahrzeugen. Es wird angenommen, dass am Ende der Lebensdauer einer Sekundärbatterie die Batteriekapazität 80 % beträgt, und dass die Batteriesysteme mit einem Ladezustand von 50 % ihrer aktuellen Kapazität angeliefert werden. Anhand der angenommenen Angaben ergeben sich folgende Energieinhalte pro Batterie:

- für Batterien aus BEV: $23\ \frac{kWh}{Batterie} \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}5 \approx 9{,}2\ \frac{kWh}{Batterie}$, (5.1)
- für Batterien aus PHEV: $12{,}1\ \frac{kWh}{Batterie} \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}5 \approx 4{,}84\ \frac{kWh}{Batterie}$ und (5.2)
- für Batterien HEV: $1{,}3 \frac{kWh}{Batterie} \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}5 \approx 0{,}52 \frac{kWh}{Batterie}$. (5.3)

Aus den in **PB A** ermittelten erwarteten Rücklaufzahlen der Batteriesysteme kann so der erwartete Energieinhalt bestimmt werden. Abbildung E-1 zeigt den erwarteten Energieinhalt der Batteriesysteme BEV über dem Zeitverlauf. Ein nennenswerter Anteil ist erst mit einem deutlichen Anstieg der rücklaufenden Batteriesysteme zu erwarten.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

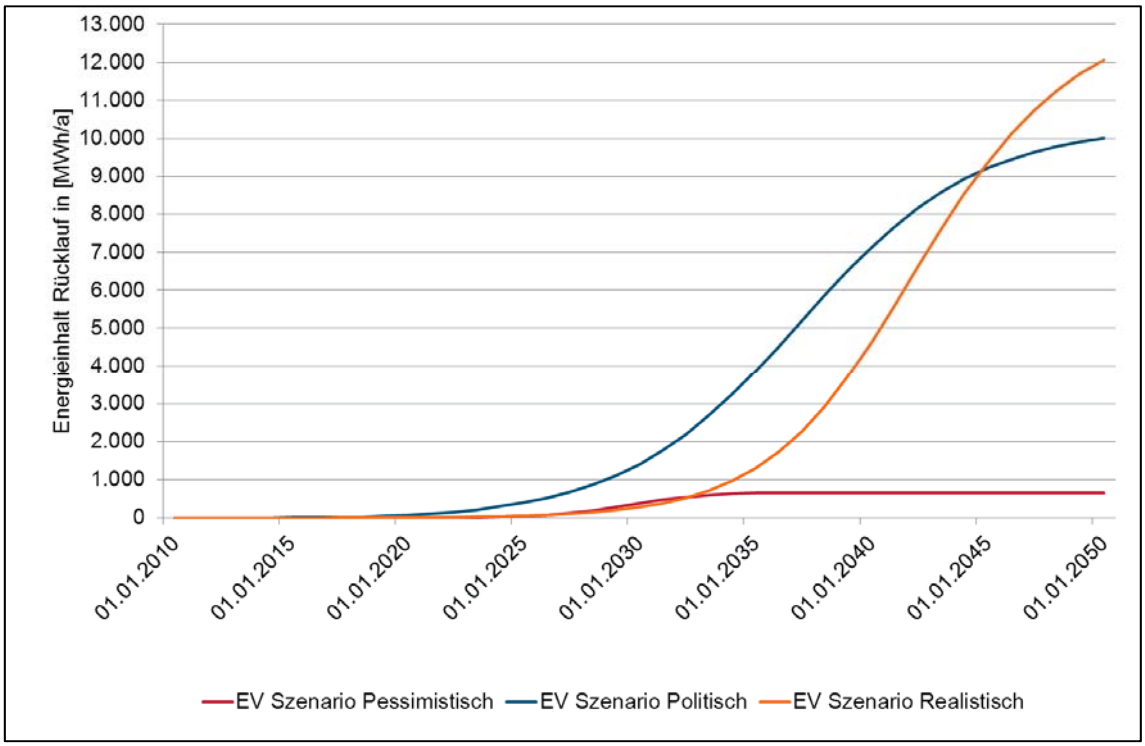


Abbildung E-1: Energieinhalt der rücklaufenden Batteriesysteme

Diese Ergebnisse wurden an **AP A.4** übergeben und dort verwendet, um über die Art der Entladung der Batteriesysteme zu entscheiden. Für eine Nutzung der Restenergie der Rückläufer ist ebenfalls wichtig, ob die Energie lokal verwendet werden oder in das elektrische Versorgungsnetz zurück gespeist werden muss. Bei einer Rückspeisung in das öffentliche müssen insbesondere die Netzanschlussbedingungen eingehalten und vertragliche Bestimmungen zur Vergütung der rückgespeisten Energie ausgehandelt werden. Bei einem lokalen Verbrauch der elektrischen Energie ist die Rückspeisung vereinfacht und ein Erlös wird durch Reduktion der bezogenen Strommenge erzielt.

Für die Prozesskette des Recyclings wurden daher die elektrischen Energieverbräuche, die am Ort der möglichen Entladung entstehen berücksichtigt und entsprechend Tabelle E-2 ermittelt.

Tabelle E-2: Ermittelte Energieverbräuche

Elektrische Energieverbräuche	
Transport	20 —
Systemdemontage	0,3 —
Moduldemontage	0,15 —
Elektrodenseparation	50 —

Die weitere Verarbeitung der separierten Elektroden wurde zur Gegenüberstellung mit der elektrischen Energiemenge der Rückläufer nicht verwendet, da die weitere Verarbeitung nach derzeitigem Stand an einem eigenen Standort erfolgt und die separierten Elektroden dorthin transportiert werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Der elektrische Energieverbrauch der Elektrodenseparation dominiert diesen Teil des Aufbereitungsprozesses. Die Nutzung der elektrischen Restenergie in den Rücklaufenden Batteriesystemen kann den elektrischen Energieverbrauch um ca. 20 % reduzieren.

E.2 Ökobilanzierung der gesamten Recyclingprozesskette

In **AS E.2** wurde das Öko-Institut Darmstadt bei der Definition von Ziel- und Untersuchungsrahmen sowie bei der Datenaufnahme für die Ökobilanzierung des Recyclingverfahrens unterstützt und in der Erstellung der Studie durch die Diskussion produkt-, prozessbezogener und methodischer Fragestellungen (z. B. bzgl. Allokationen, Gutschriften, Bewertungsmethoden) begleitet. Die Ergebnisse der Ökobilanz sind in einem umfassenden separaten Bericht vom Öko-Institut bzw. der Umbrella-Gruppe LCA veröffentlicht worden.[15]

E.3 Entwicklung eines Stoffstrommodells für Kobalt und Lithium, Verfügbarkeitsstudie

Die Ergebnisse der Umbrella-Gruppe „Ressourcenverfügbarkeit“ sind in einem umfassenden separaten Bericht veröffentlicht worden.[16]

[15] Vgl. Buchert et al. (2011).

[16] Vgl. Konietzko und Gernuks (2011).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

E.4 – E.6 Ökonomische Bewertung des LithoRec-Verfahrens

Im Verlauf des Projekts wurden verschiedene Alternativen zum Recycling von Traktionsbatterien entwickelt. Die Arbeitsschritte **AS E.4** bis **AS E.6** verfolgten dabei das Ziel, vorteilhafte Alternativen unter Berücksichtigung von potentiellen Restriktionen zu identifizieren und werden hier integriert betrachtet.

Begleitend zu und in enger Zusammenarbeit mit den Untersuchungen in **PB E** hat das AIP-TUBS verschiedene Prozesspfade aus produktionswirtschaftlicher Perspektive untersucht. Einige der untersuchten technischen Verfahrenswege konnten dabei aus technischen Gründen, andere aus ökonomischen Gründen für eine genauere wirtschaftliche Untersuchung ausgeschlossen werden. Abbildung E-2 stellt die im Laufe des Projekts angedachten Prozesspfade dar. Grundsätzlich kann der Prozess vom Ausbau der Batterie aus dem Fahrzeug bis zur Synthese neuen Aktivmaterials für die Herstellung neuer Zellen in sieben Schritte eingeteilt werden: Batterieausbau (1), Batteriesystemdemontage bis auf Batteriemodulebene (2), Batteriemoduldemontage bis auf Zellebene (3), Zellzerlegung (4), Elektrodenseparation (5), Hydrometallurgische Aufbereitung des Aktivmaterials (6) und Aktivmaterialsynthese (7). Die Schritte 1 und 7 konnten dabei von der Betrachtung ausgeschlossen werden und liegen deshalb außerhalb der Systemgrenzen. Die Schritte 2 und 3 wurden in der Abbildung aus praktischen Gründen zusammengefasst. Schritte, die grundsätzlich mit alternativen Verfahren durchgeführt werden könnten, sind jeweils alphabetisch gekennzeichnet. Technische Alternativen bestehen dabei im Wesentlichen in der Zerlegung der Zellen und in der Separation der Kathoden.

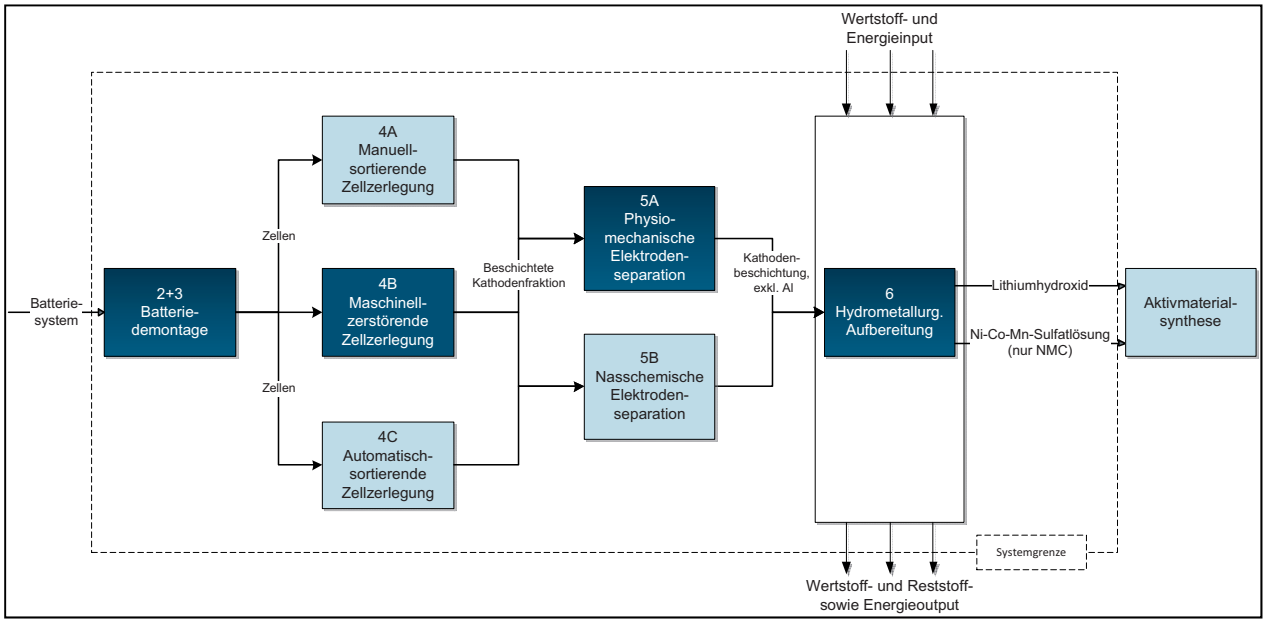


Abbildung E-2: LithoRec-Prozesskette mit alternativen Prozesspfaden

Bezüglich der Zerlegung der Zellen konnten die manuell-sortierende (4A) sowie die automatisch-sortierende Zellzerlegung (4C) von der ökonomischen Bewertung bzw. von der Verfahrensgestaltung ausgeschlossen werden. Die manuell-sortierenden Separation wurde aufgrund des hohen Aufwands und der durch den unmittelbaren Zellkontakt erheblichen Gefahren für die Mitarbeiter (z. B. durch Schnittverletzungen, Kurzschlüsse, Verpuffung, Verät-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

zung, etc.) ausgeschlossen.[17] Die automatisch-sortierende Zellzerlegung wurde ausgeschlossen, da sie innerhalb des Projekts nicht weiter technisch untersucht werden konnte.

Bezüglich der Elektrodenseparation wurde die nasschemische Separation (5B) ausgeschlossen, da sie aus technischer, ökonomischer und ökologischer Sicht der physio-mechanischen Elektrodenseparation unterlegen scheint: Zum einen wird eine deutlich niedrigere Recyclingeffizienz erreicht. Zum anderen müssen hohe Mengen von ökologisch bedenklichen Lösungsmitteln eingesetzt werden, für die während der Projektlaufzeit keine Möglichkeit der Kreislaufführung untersucht werden konnte.

Nach Ausschluss der Alternativen bleibt ein möglicher Prozesspfad, der die maschinellzerstörende Zellzerlegung mit Hilfe eines Shredderprozesses und die physio-mechanische Elektrodenseparation einschließt. Dieser wurde im Projektverlauf anfänglich technisch und ökologisch untersucht und wird im Folgenden ökonomisch bewertet. Zu dieser Bewertung ist folgendes Vorgehen in enger Zusammenarbeit und Abstimmung mit Partnern aus den Projektbereichen **PB A** und **PB B** eingeschlagen worden:

1) **Modularisierung** der logistischen und produktionstechnischen *LithoRec*-Prozesse und Bildung von **Referenzanlagen** (Abschnitt E.4.1)
    - **Investitionsschätzung** für die **Referenzanlagen** unterschiedlicher Kapazitäten und Schätzung von **anlagenbezogenen Fixkosten** (Abschnitt E.4.2), dazu Schätzung investitionsabhängiger Kosten und auslastungsunabhängiger Betriebskosten.
2) Schätzung von batterietyp- und anlagenabhängigen **Deckungsbeiträgen** für NMC- und LFP-Batterien (Abschnitt E.4.3), dazu Schätzung von Stoffstromerlösen und -kosten aus den einzelnen Prozessen auf Grundlage der Stoff- und Energiebilanz aus E.1 und E.2 und Schätzung von Prozesskosten für die Behandlung der Batterien, Zellen und des Aktivmaterials
3) **Gewinnschwellenanalyse** auf Basis der errechneten Fixkosten und Deckungsbeiträge für jede der betrachteten Anlagen exklusive des Umschlaglagers (E.4.4)

E.4.1 Modularisierung und Bildung von Referenzanlagen

Zur Schätzung von Anlageninvestitionen wurden zunächst einzelne Prozessschritte der LithoRec-Prozesskette unter produktionstechnischen und logistischen Gesichtspunkten hinsichtlich ihrer Modularisierbarkeit analysiert. Dies erfolgte unter folgenden Maßgaben:

- Die Bewertung unabhängig durchführbarer Prozessschritte, z. B. der Demontage von Batterien, sollte unabhängig von nicht zwingend erforderlichen nachfolgenden Prozessschritten, z. B. der hydrometallurgischen Aufbereitung des Aktivmaterials, erfolgen.

[17] Um pro Stunde ein BEV-System verarbeiten zu können, müssen gleichzeitig 45 Mitarbeiter an jeweils einem Handschuhkasten arbeiten. Bei einem geschätzten Stückpreis von 3.500 EUR würden somit 157.500 EUR für Handschuhkasten anfallen. Darüber hinaus betragen die variablen Kosten mindestens 675 EUR für die Separation der Zellen eines Systems.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- Die Zusammenfassung von Prozessschritten sollte im Einklang mit den technischen Untersuchungen im Projektbereich **PB B** und **PB G** stehen und die dort entwickelten Konzepte abbilden.
- Die räumliche Entkopplungsmöglichkeit von Prozessschritten sollte beachtet werden, um die Ergebnisse der Bewertung möglichst direkt in die Bewertung logistischer Netzwerke im Arbeitspaket **AP A.3** einfließen lassen zu können.

Dementsprechend wurden die Prozesse folgendermaßen modularisiert:

Logistische Sammlungsprozesse: (Umschlag-) Lager für gebrauchte Lithium-Ionen-Traktionsbatterien

In den Umschlaglagern werden Altbatterien nach ihrer Sammlung und bis zu ihrem Weitertransport (z. B. an Demontagewerke) gelagert. Die Investitions- und Kostenschätzung für Umschlaglager dient ausschließlich der Bewertung unterschiedlicher logistischer Strukturen in AP A.3. Um Größendegressionseffekte bewerten zu können, wurden die Investitionen und Kosten für zwei unterschiedlich dimensionierte Lager geschätzt. **Kleine Umschlaglager** bieten Platz zur Lagerung von 50 BEV-Äquivalenten.[18] Bei einer angenommenen maximalen Umschlaghäufigkeit von 200 Umschlägen/Jahr entspricht dies einer maximalen Umschlagleistung von 10.000 BEV-Äquivalenten. **Große Umschlaglager** bieten Platz zur Lagerung der zehnfachen Menge (500 BEV-Äquivalente) und eine maximale Umschlagleistung von 100.000 BEV-Äquivalenten. Unabhängig von der konkreten institutionellen Organisation (herstellerübergreifend oder herstellerspezifisch, unabhängig oder vernetzt) sollen die Lager in der Lage sein, jeweils autonom die Altbatteriesammlung in einem Teilbereich des Gebiets der Bundesrepublik Deutschland zu übernehmen.

Prozessschritte 2+3: Demontagewerk für gebrauchte Lithium-Ionen-Traktionsbatterien

In Demontagewerken werden die Altbatteriesysteme nach gegebenenfalls kurzfristiger Lagerung weitestgehend entladen und bis auf Zellebene demontiert. Die Zellen werden anschließend nochmals auf eine Spannung von 0 V entladen. Bis auf die Zellen finden die einzelnen Fraktionen (z. B. Stahl- und Plastikgehäuse, Kupferkabel, BMS) entweder Eingang in die vorhandenen Recyclingstrukturen oder müssen beseitigt werden. Die Zellen werden anschließend zur weiteren Verwertung transportiert. Die Investitionen und Kosten wurden für zwei unterschiedlich dimensionierte Demontagewerke geschätzt. Das **kleine Demontagewerk** ist so ausgelegt, dass mindestens 5.000 BEV-Äquivalente oder 1.600 t Systeme pro Jahr verarbeitet werden können (Dreischichtsystem, 250 Betriebstage, 20 Stück pro Tag). Durch Verlängerung der Betriebsdauer auf 300 Betriebstage könnte der jährliche Durchsatz auf 6.000 BEV-Äquivalente erhöht werden.[19] Das **große Demontagewerk** ist zur Verarbeitung der zehnfachen Menge von mindestens 50.000 BEV-Äquivalenten oder 16.000 t Systeme pro Jahr ausgelegt (200 Stück pro Tag, 60.000 BEV-Äquivalente bei 300 Betriebstagen pro Jahr).

[18] Zur Erklärung der BEV-Äquivalenten siehe Bericht zu AP A.3. Eine HEV-Batterie entspricht annahmegemäß 1/10 BEV-Äquivalente, eine PHEV-Batterie ½ BEV-Äquivalente.

[19] Die tatsächliche Kapazität ist abhängig von der konkreten betrieblichen Ausgestaltung und kann entsprechend niedriger oder höher liegen. Die angegebenen Werte sind als Richtwerte zu verstehen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Prozessschritte 4B+5A: Mechanische Aufbereitung von Aktivmaterialen aus Lithium-Ionen-Zellen

In Mechanischen Aufbereitungswerken werden Zellen, sortiert nach LFP- und NMC-Aktivmaterial, zunächst maschinell zerstört („geshreddert"). Die Fraktionen werden anschließend grob sortiert und teilweise weiterbehandelt. Die Separation der Kathodenmischfraktion erfolgt physio-mechanisch, die zurückgewonnene Kathodenbeschichtung kann anschließend zur hydrometallurgischen Aufbereitung transportiert werden. Weitere Wert- und Reststoffe werden in vorhandenen Abfall- und Recyclingstrukturen entsorgt. Die Investitionen und Kosten wurden für zwei unterschiedlich dimensionierte Aufbereitungswerke geschätzt. **Kleine Mechanische Aufbereitungswerke** sind ausgelegt für einen Jahresdurchsatz von 1.000 bis 1.500 Jahrestonnen Zellen (ca. 5.000 bis 7.500 BEV-Äquivalente/Jahr bzw. 1.600 t bis 2.500 t Systeme). Dies entspricht in etwa einem stündlichen Zelldurchsatz von 170 kg. **Große Mechanische Aufbereitungswerke** verarbeiten die zehnfache Menge von 10.000 bis 15.000 t Zellen pro Jahr (ca. 50.000 bis 75.000 BEV-Äquivalente/Jahr bzw. 16.000 t bis 25.000 t Systeme). Der stündliche Zelldurchsatz beträgt ca. 1.700 kg.

Prozessschritt 6: Hydrometallurgische Aufbereitung von Aktivmaterialien

In Hydrometallurgischen Aufbereitungswerken wird die Kathodenbeschichtung, die zuvor in Mechanischen Aufbereitungswerken zurückgewonnen wurde, hydrometallurgisch aufbereitet. Dies erfolgt mit dem Ziel der Rückgewinnung von Lithium in der Form von hochreinem Lithiumhydroxid-Monohydrat ($LiOH \cdot H_2O$) oder Lithiumcarbonat (Li_2CO_3) und gegebenenfalls der cobalt- und nickelhaltigen Lösung. Das betrachtete Werk entspricht der Chemetall-Pilotanlage, deren Investitionssumme bekannt ist. Die jährliche Verarbeitungskapazität der bereits fertiggestellten Anlage hängt von der konkreten betrieblichen Ausgestaltung ab. Sie wird von Chemetall auf den Gegenwert von 30.000 bis 50.000 BEV-Äquivalenten (10.000 bis 16.500 t Systeme) oder etwa 700 bis 1.150 t Lithiumhydroxid-Monohydrat geschätzt.

E.4.2 Schätzung von Investitionen und Fixkosten

Da abgesehen vom hydrometallurgischen Aufbereitungswerk keine konkreten Bauvorhaben und somit auch keine Baupläne für die Referenzanlagen vorliegen, an denen die Einzelpositionen ermittelt werden könnten, müssen die mit ihnen verbundenen Investitionen und Fixkosten grob geschätzt werden. Dazu werden im Folgenden Schätzmethoden angewandt, die in ihrer Genauigkeit aufgrund der vorherrschenden Unsicherheiten begrenzt sind. Diese Methoden sind den Summarischen Verfahren und den Faktormethoden zuzuordnen, welche nach Peters, Timmerhaus et. al (2002) eine Fehlerbreite von 10 bis über 30 Prozent aufweisen. Das bedeutet, dass der tatsächliche Kapitalbedarf von Anlagen gegebener Spezifikation mit großer Wahrscheinlichkeit in einem Intervall von 10 bis 30 Prozent über oder unter den geschätzten Werten liegen. Die im Folgenden geschätzten Investitionen und Kosten sind entsprechend unter diesen Prämissen zu verstehen.

E.4.2.1 Umschlaglager

Zur **Grobschätzung der Investition** für die Errichtung von Umschlaglagern wurde folgendes Vorgehen eingeschlagen:

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- Berechnung des stück- und flächenbezogenen Lagerbedarfs für eine vorgegebene Umschlagleistung bei 200 Umschlägen pro Jahr und einem Flächenbedarf von 4 Europaletten je BEV-Äquivalent.
- Ermittlung der benötigten Anzahl standardisierter Lagerregale, dabei Unterscheidung zwischen zwei verschiedenen Regaltypen mit identischen Grundmaßen 5.700 x 2.200 mm (Breite mal Tiefe):
  - Typ 1: Lagerung auf drei Ebenen, Höhe 4.500 mm. Kapazität: 12 BEV-Äquivalente.
  - Typ 2: Lagerung auf vier Ebenen, Höhe 6.000 mm. Kapazität: 16 BEV-Äquivalente.
- Schätzung der Hallenbodenfläche und der spezifischen Gebäudeinvestition unter den Anforderungen und Annahmen:
  - Lagergangbreite 4400 mm, Aufschlag und Rundung für Rangierverkehr und Technikräume.
  - Versiegelter Boden und Gebäude in brandhemmender Bauweise.
  - Flächenbezogene Investition 800 EUR/qm (nutzbare Höhe 5 m), 900 EUR/qm (nutzbare Höhe 6,5 m).
- Schätzung der Grundstückfläche und der spezifischen Grundstückinvestition unter den Anforderungen und Annahmen:
  - Erschließungsflächen, d. h. Verkehrs-, Anlieferungs- und Parkplatzflächen: 10 m Breite auf Länge einer Gebäudeseite bei Unterstellung eines quadratischen Baus.
  - Flächenbodenbezogene Investition (Grundstückerwerb inkl. Gebühren und Steuern) 30 EUR/qm.
- Vorgabe des Bedarfs an batteriebetriebenen Flurförderfahrzeugen (Lagertechnikstapler) mit Mindestnutzlast 1,5 t und Hubhöhe mind. 6 m (stückbezogene Investition 30.000 EUR) sowie an F90-Sicherheitscontainern für defekte Batterien (stückbezogene Investition 35.000 EUR).

Die Schätzung der einzelnen Posten und der Gesamtinvestition für ein kleines und ein großes Umschlaglager ist Anhang 10 zu entnehmen. Die **Gesamtinvestition für ein kleines Umschlaglager** wird demnach auf rund 330.000 EUR, für ein **großes Umschlaglager** auf ca. 1,5 Millionen EUR geschätzt.[20] Aufgrund strengerer Anforderungen an die Lagerregale oder an die Flurförderfahrzeuge oder durch höhere Grundstückpreise könnte die Summe um bis zu 20 Prozent (kleines Umschlaglager) bzw. 15 Prozent (großes Umschlaglager) höher ausfallen. Die flächenbezogene Gebäudeinvestition ist bereits großzügig angesetzt und entspricht einem hohen Gebäudestandard.

Jährliche investitionsabhängige Kosten können in Zins-, Abschreibungs-, Reparatur-/Instandhaltungs-, Verwaltungs- und Versicherungskosten eingeteilt werden (Formel 1). Mittels vorgegebener spezifischer technischer Nutzungsdauern und Restwerte[21] wurden auf Grundlage der jeweiligen Investitionen der einzelnen Posten die jährlichen kalkulatorischen

[20] Aufgrund des unsicheren Charakters der Grobschätzung werden Investitionen und Kosten hier und auch in den folgenden Ausführungen jeweils grob gerundet. Die exakten Werte sind in den jeweiligen Tabellen aufgeführt.

[21] Verkaufs- bzw. Schrottwert am Ende der technischen Nutzungsdauer.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Zins- und Abschreibungskosten geschätzt (Formel 2 respektive 3). Dabei wird davon ausgegangen, dass die technischen Installationen 20 Jahre, Gebäude dagegen 40 Jahre genutzt werden können. Jährliche Kosten für Reparatur und Instandhaltung wurden mithilfe spezifischer Instandhaltungssätze ermittelt, die einen empirischen Anteil der spezifischen Investition darstellen (Formel 4). Als weitere investitionsabhängige Kosten wurden Kosten für die investitionsbezogene Verwaltung und Versicherung einbezogen (Formeln 5 und 6). Kalkulatorische Wagniskosten wurden vernachlässigt. Im Ergebnis liegen die **jährlichen investitionsabhängigen Kosten** für kleine Umschlaglager bei 34.000 EUR/a, für große Umschlaglager bei 147.000 EUR/a (vgl. Anhang 11). Den größten Einfluss auf die Kosten übt die spezifische Gebäudeinvestition aus (56 resp. 67 Prozent).

$$K_{Invest} = K_{Zins} + K_{Abschreibung} + K_{Instandhaltung} + K_{Verwaltung} + K_{Versicherung} \quad (1)$$

mit

$$K_{Zinz} = \sum_i \left(\frac{SpezifischeInvestition_i}{2} + Restwert_i \right) * Zinssatz \quad (2)$$

$$K_{Abschreibung} = \sum_i \frac{SpezifischeInvestition_i - Restwert_i}{Nutzungsdauer_i} \quad (3)$$

$$K_{Instandhaltung} = \sum_i SpezifischeInvestition_i * Instandhaltungssatz_i \quad (4)$$

$$K_{Verwaltung} = Verwaltungssatz * Gesamtinvestition \quad (5)$$

$$K_{Versicherung} = Versicherungssatz * Gesamtinvestition \quad (6)$$

Neben den investitionsabhängigen Kosten wurden folgende **Betriebskosten** zu den auslastungsunabhängigen jährlichen Kosten gezählt:

- Kosten für Führungspersonal: Aufschlag von 15 Prozent auf die Betriebspersonalkosten.
- Betriebsnebenkosten (Energie- und Reinigungskosten, Wasser-, Abwasser- und Müllgebühren, Grundsteuer) i. H. v. 12 EUR/(qm*a) bezogen auf die Gebäudefläche.
- Sonstige Gemeinkosten (im Wesentlichen Personalverwaltung): Aufschlag von 15 Prozent auf die Betriebspersonalkosten.

Betriebspersonalkosten wurden aufgrund der strategischen Betrachtung als variabel angenommen und gehen somit erst in die Deckungsbeitragsrechnung ein. Zur Berechnung der Kosten, die als Aufschläge auf die Betriebspersonalkosten erhoben werden, mussten sie jedoch trotzdem geschätzt werden. Dazu wurde die Anzahl der benötigten Lagerfachkräfte

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

zur Erreichung des maximalen Zielumschlags berechnet und mit dem geschätzten Arbeitgeberbruttogehalt von 35.000 EUR/a multipliziert:

- Beschäftigte im kleinen Umschlaglager im Dreischichtsystem: 3, Betriebspersonalkosten: 105.000 EUR/a.
- Beschäftigte im großen Umschlaglager im Dreischichtsystem: 12, Betriebspersonalkosten: 420.000 EUR/a.

Die jährlichen **Fixkosten** summieren sich auf rund 70.000 EUR (kleines Umschlaglager) respektive 290.000 EUR (großes Umschlaglager). Die Fixkosten können in kalkulatorische und pagatorische Kosten unterschieden werden (siehe Anhang 12). Die pagatorischen Kosten können sodann zu dynamischen Bewertungen, insbesondere in der Netzwerkplanung in **AP A.3**, herangezogen werden. Zu den pagatorischen Kosten zählen die Reparatur- und Instandhaltungskosten, die investitionsbezogenen Kosten für Verwaltung und Versicherung sowie die auslastungsunabhängigen Betriebskosten.

Um auftretende Skaleneffekte bezüglich Anlagen größerer Kapazität zu quantifizieren, kann der Größendegressionsexponent (GDE) herangezogen werden. Bei vorhandener Größendegression steigen die Fixkosten unterproportional mit der Erhöhung der Kapazität (der GDE ist kleiner als 1). Die Berechnung erfolgt nach Formel 7.

$$GDE = \frac{\ln\left(\frac{Investition_{groß}}{Investition_{klein}}\right)}{(\ln\left(\frac{Kapazität_{groß}}{Kapazität_{klein}}\right)} \qquad 7$$

Bei der Bewertung der Größendegression wird hier folgende Klassifikation vorgenommen:

GDE < 0,50:	extreme Größendegression
GDE 0,50–0,64:	starke Größendegression
GDE 0,65–0,84:	moderate Größendegression
GDE 0,85–0,94:	schwache Größendegression
GDE 0,95–1,00:	unbedeutende oder keine Größendegression

Der GDE der jährlichen Fixkosten des großen Lagers im Vergleich zum kleinen Lager entspricht 0,62. Damit liegt eine starke Größendegression vor.

E.4.2.2 Demontagewerk

Zur **Grobschätzung der Investition** für die Errichtung von Demontagewerken wurde folgendes Vorgehen eingeschlagen:

- Analyse der Prozesse von der Anlieferung von Systemen über deren Demontage bis zur Einlagerung der demontierten Bauteile. Modularisierung der Demontage- und Entladeprozesse in Arbeitsstationen. (In Zusammenarbeit mit den Projektbereichen **PB A** und **PB B**)
- Schätzung der benötigten Anzahl Arbeitsstationen und des Personals auf Grundlage der geschätzten Prozesszeiten in Abhängigkeit von der Anzahl zu verarbeitender Systeme.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- Schätzung der spezifischen Investitionen der Arbeitsstationen in Kooperation mit IWF-TUBS und HTEE-TUBS sowie Schätzung der benötigten Gebäudegrundfläche und der entsprechenden Gebäude- und Grundstückinvestitionen.
- Schätzung der Gesamtinvestition und Fixkosten für die definierten Kapazitätsklassen.

In den folgenden Ausführungen wird davon ausgegangen, dass die Demontage dem Verrichtungsprinzip folgt (Werkstattlayout) und der Materialfluss zwischen den Arbeitsstationen bis auf wenige Ausnahmen jeweils durch Flurförderfahrzeuge (Hubwagen und Gabelstapler) vorgenommen wird. Die Lagerung und die Demontage der Batterien werden dabei in separaten Gebäuden durchgeführt. In der Prozessanalyse wurde folgender Ablauf erkannt (in Klammern jeweils die Anzahl der benötigten Mitarbeiter sowie die geschätzte Mitarbeiter- und/oder Maschinenzeit pro System).

(1) Nach der Anlieferung in Einzel- oder Sammeltransporten wird jedes System auf äußere Beschädigungen überprüft. Das unbeschädigte System wird eingelagert (1 MA, bis zu 10 Minuten). Defekte Systeme werden einer Sonderbehandlung im F90-Sicherheitscontainer unterzogen und hier nicht weiter betrachtet.

(2) Nach kurzer Lagerzeit wird das System vom Lager in das benachbarte Demontagegebäude transportiert (1 MA, bis zu 10 Minuten).

(3) Das System wird von einem Fachmann mit Hilfe eines Diagnosegeräts auf eventuelle Gefährdungen überprüft. Der Fachmann schließt das System an eine Entladevorrichtung an, soweit es eine Restladung aufweist und das BMS dies zulässt (1 MA, gesamt: 10 Minuten).

(4) Das System wird an der Entladevorrichtung auf 0 % SoC entladen, soweit das BMS dies zulässt (kein MA, 4 Stunden).

(5) Nach erfolgter Entladung wird das System an einem Demontagearbeitsplatz demontiert (2 MA, 1 Stunde). Die Teile werden währenddessen grob sortiert und in verschiedene Behältnisse gegeben.

(6) Die Zellbehälter werden zu Zellentladevorrichtungen transportiert (1 MA, max. 2 Minuten).

(7) Die Zellen werden an Zellentladevorrichtungen angeschlossen (1 MA, pro Zelle durchschnittlich 5 Sekunden, pro BEV-Äquivalent à 180 Zellen ca. 15 Minuten).

(8) Die Zellen werden so entladen, dass sie eine Spannung nahe 0 Volt aufweisen (kein MA, 4 Stunden).

(9) Die Zellen werden von den Zellentladevorrichtungen getrennt (1 MA, pro Zelle durchschnittlich 2,5 Sekunden, pro BEV-Äquivalent à 180 Zellen ca. 6 Minuten).

(10) Die Zellen werden in Gitterboxen bis zu ihrer Weiterverarbeitung gelagert.

Die beschriebenen nicht-logistischen Prozesse sind zu folgenden Arbeitsstationen zusammengefasst worden:

Systemprüfstation und **Systementladestation** (3) und (4). Die Prüfstation verfügt über verschiedene Diagnosegeräte sowie eine Werkzeugsammlung. Sie ist auf einem Rollwagen installiert, so dass sie direkt an das auf der Entladestation positionierte System bewegt werden kann. Die Entladestation erlaubt die Rückspeisung der elektrischen Restladung (optional) und ist so ausgelegt, dass das zu entladende System positioniert und geprüft werden kann, während ein anderes System noch entladen wird. Auf diese Weise werden die

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Entladestation effizient genutzt und Leerfahrten des Flurförderfahrzeugs vermieden. Die Belegungszeit der Prüfstation beträgt etwa 10 Minuten, die Belegungszeit der Entladestation etwa 4 Stunden je System. Die spezifischen Investitionen wurden auf 5.000 EUR je Prüfstation und 14.000 EUR je Entladestation geschätzt.

Demontagestation (5). Die Demontagestationen sind so auszulegen, dass die großen und schweren Bauteile der Systeme unter möglichst wenig körperlicher Beanspruchung von zwei Mitarbeitern handhabbar sind. Die demontierten Teile werden in entsprechende Behältnisse in unmittelbarer Umgebung der Mitarbeiter sortiert. Die Behältnisse für die Zellen weisen genug Volumen auf, um mindestens die Zellen aus einem großen BEV-System aufzunehmen, gewährleisten einen schnellen Anschluss an die Zellentladevorrichtungen und sind so konzipiert, dass Kurzschlüsse der Zellen vermieden werden. Die spezifische Investition für eine Demontagestation wurde auf ca. 3.000 EUR geschätzt.

Zellentladestation (6) bis (9). Die Zellentladestationen erlauben den direkten Anschluss von Zellen (180 Stück) und sind in der Lage, diese mit Hilfe von Widerständen innerhalb von 4 Stunden auf Spannungen nahe 0 Volt zu entladen. Die spezifische Investition für eine Zellentladestation wurde auf 21.000 EUR geschätzt.

Die Gebäudegrundfläche für das kleine Demontagewerk wurde auf 200 qm, die für das große auf 800 qm festgesetzt. Die benötigte Grundfläche der separaten Lager wurde auf 150 qm respektive 1.000 qm geschätzt. Darin wird die Zwischenlagerung der demontierten Bauteile (in Gitterboxpaletten) mit einem Platzbedarf von 70 qm bzw. 300 qm berücksichtigt.

Auf Grundlage der geschilderten Rahmenbedingungen und spezifischen Investitionen wurde die **Gesamtinvestition für kleine Demontagewerke** auf ca. 560.000 EUR und für **große Demontagewerke** auf 3.080.000 EUR geschätzt (vgl. Anhang 13). In beiden Anlagengrößenklassen stellen die System- und die Zellentladestationen jeweils die Engpässe dar (95-prozentige Auslastung bei 20 Stück/Tag), während die Demontagestationen ungefähr zu 36 Prozent im kleinen Demontagewerk respektive 65 Prozent im großen Demontagewerk ausgelastet sind. Dies bedeutet, dass zur Erhöhung der maschinellen Kapazität der Werke die Installation zusätzlicher System- und Entladestationen ausreicht. Desweiteren kann gezeigt werden, dass die Ausrüstung des kleinen Demontagewerks robust gegenüber einer Erhöhung der durchschnittlichen Demontagezeit auf 115 Minuten (+ 90 Prozent) ist. Im großen Demontagewerk würde die Erhöhung jedoch zur Notwendigkeit 8 weiterer Demontagestationen führen.

Zur Schätzung der Fixkosten wurde analog zu den Umschlaglagern verfahren. Im Ergebnis liegen die jährlichen **investitionsabhängigen Kosten** für kleine Demontagewerke bei 61.000 EUR/a, für große Demontagewerke bei 336.000 EUR/a (vgl. Anhang 14). Im kleinen Demontagewerk entfällt der größte Teil der Kosten auf die spezifische Gebäudeinvestition (36 Prozent), gefolgt von der Fördertechnik (11 Prozent), den Zellentladestationen (11 Prozent) und den Systemprüf- und Entladestationen (8 Prozent). Im großen Demontagewerk trägt die spezifische Gebäudeinvestition ebenfalls zu einem Großteil der investitionsabhängigen Kosten bei (34 Prozent), ebenfalls große Teile entfallen auf die Zellentladestationen (20 Prozent) und auf die Systemprüf- und Entladestationen (13 Prozent). Der Anteil der Fördertechnik beträgt nur noch 5 Prozent.

Neben den investitionsabhängigen Kosten wurden folgende **Betriebskosten** zu den auslastungsunabhängigen jährlichen Kosten gezählt:

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- Kosten für Führungspersonal: Aufschlag von 15 Prozent auf die Betriebspersonalkosten.
- Betriebsnebenkosten (Energie- und Reinigungskosten, Wasser-, Abwasser- und Müllgebühren, Grundsteuer) i. H. v. 12 EUR/(qm*a) bezogen auf die Gebäudefläche.
- Sonstige Gemeinkosten (im Wesentlichen Personalverwaltung): Aufschlag von 15 Prozent auf die Betriebspersonalkosten.

Betriebspersonalkosten wurden aufgrund der strategischen Betrachtung als variabel angenommen und gehen somit erst in die Deckungsbeitragsrechnung ein. Zur Berechnung der Führungspersonalkosten und Sonstigen Gemeinkosten, die als Aufschläge auf die Betriebspersonalkosten erhoben werden, wurden sie jedoch trotzdem geschätzt. Dazu wurde die Anzahl der benötigten Fachkräfte zur Erreichung des maximalen Zielumschlags berechnet. Differenziert wurden Fachkräfte für einfache Tätigkeiten (Logistik, Demontage, Zellentladung) mit einem geschätzten Arbeitgeberbruttogehalt von 35.000 EUR/a und Fachkräfte für anspruchsvollere Tätigkeiten (Prüfung und Systementladung) mit einem geschätzten Arbeitgeberbruttogehalt von 45.000 EUR/a:

- Kleines Demontagewerk: Dreischichtsystem; einfache Tätigkeiten: 16 Mitarbeiter, anspruchsvolle Tätigkeiten: 3 Mitarbeiter; Betriebspersonalkosten: 695.000 EUR/a
- Großes Demontagewerk: Dreischichtsystem; einfache Tätigkeiten: 80 Mitarbeiter; anspruchsvolle Tätigkeiten: 6 Mitarbeiter; Betriebspersonalkosten: 3.070.000 EUR/a

Die **jährlichen Fixkosten** summieren sich auf 275.000 EUR im Fall des kleinen Demontagewerks respektive 1.280.000 EUR für das große Demontagewerk (siehe Anhang 15). Die vorliegende Größendegression ist als moderat zu bezeichnen (GDE: 0,67).

E.4.2.3 Mechanisches Aufbereitungswerk

Zur Grobschätzung der Investition für Mechanische Aufbereitungswerke wurde die Methode der differenzierten Zuschlagsätze in Anlehnung an Peters, Timmerhaus et al. gewählt.[22] Grundlage für die Grobschätzung ist dabei eine Auflistung der benötigten Maschine und Apparaturen sowie deren spezifische Investitionen. Letztere umfassen neben dem Anschaffungspreis für die gelieferten Anlagenkomponenten die anfallenden Ausgaben für die Installation sowie für die Ausrüstung der Anlage mit entsprechender Mess-, Steuer- und Regelungstechnik. Die Summe der spezifischen Investitionen (im Folgenden: Basisinvestition) wird mit differenzierten Zuschlagsätzen für weitere direkt oder indirekt mit der Errichtung eines Werks verbundenen Ausgaben auf die Investition der Gesamtanlage skaliert. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Anlage auf einem bereits vorhandenen Betriebsgelände in direkter Nähe zu einem Hydrometallurgischen Aufbereitungswerk errichtet wird und weitere Lager entfallen.

Die Maschinen- und Apparateliste besteht zum einen aus den von EC angegebenen Komponenten, die für den Prozessschritt 4B (mechanische Zerstörung von Zellen) benötigt werden, und zum anderen aus den von IPAT-TUBS angegebenen Komponenten, die für den Prozessschritt 5A (physio-mechanische Elektrodenseparation) erforderlich sind. Die **Basisinvestition** wird demnach für ein kleines Mechanisches Aufbereitungswerk mit 860.000 EUR, für ein großes Werk mit 2.150.000 EUR veranschlagt. Die **unbekannten direkten Anlageinvestitionen** für Rohrleitungen, Elektrik, Bauwerke, Geländeerschließung

[22] Vgl. Peters, Max S.; Timmerhaus, Klaus D.; West, Ronald E. (2004): Plant Design and Economics for Chemical Engineers. 5th Ed., International Ed. Boston [u.a.]: McGraw-Hill.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

sowie Betriebseinrichtung und Nebenanlagen werden mit Hilfe der Basisinvestition und der spezifischen Zuschlagsätze geschätzt. Für diese Investitionen ergibt sich ein Zuschlag von 65 Prozent auf die Basisinvestition. Damit beträgt die **Summe der direkten Anlageinvestitionen** (inklusive der Basisinvestition) für ein kleines Mechanisches Aufbereitungswerk ca. 1.420.000 EUR, die für ein großes Mechanisches Aufbereitungswerk beträgt ca. 3.548.000 EUR. Desweiteren fallen **indirekte Anlageninvestitionen** für technische Anlagenplanung und Bauaufsicht, Bauleitung, Genehmigungsverfahren und Gebühren für Auftragnehmer an. Diese werden mit einem Zuschlag von insgesamt 57 Prozent auf die Basisinvestition bewertet. Unvorhergesehene indirekte Investitionen werden mit 21 Prozent veranschlagt. Die Summe der indirekten Investitionen beträgt somit 675.000 respektive 1.688.000 EUR. Die Addition der direkten und indirekten Investitionen liefert die geschätzte **Anlageninvestition** für die Errichtung der kleinen und großen Anlagen in Höhe von 2.100.000 EUR bzw. 5.240.000 EUR (vgl. Anhang 16). Umlaufkapital, das beispielsweise in bevorrateten Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen gebunden ist, wird an dieser Stelle vernachlässigt.

Zur Schätzung der investitionsabhängigen Kosten wird analog zu den Umschlaglagern und Demontagewerken verfahren. Die indirekten Anlageninvestitionen werden über 20 Jahre abgeschrieben. Die **jährlichen investitionsabhängigen** Kosten summieren sich somit auf 255.000 EUR für das kleine und 640.000 EUR für das große Mechanische Aufbereitungswerk (siehe Anhang 17). Neben den investitionsabhängigen Kosten wurden folgende **Betriebskosten** zu den auslastungsunabhängigen jährlichen Kosten gezählt:

- Kosten für Führungspersonal: Aufschlag von 15 Prozent auf die Betriebspersonalkosten.
- Betriebsnebenkosten (Energie- und Reinigungskosten, Wasser-, Abwasser- und Müllgebühren, Grundsteuer) i. H. v. 12 EUR/(qm*a) bezogen auf die Gebäudefläche.
- Sonstige Gemeinkosten (im Wesentlichen Personalverwaltung): Aufschlag von 15 Prozent auf die Betriebspersonalkosten.

Unter der Annahme, dass während des normalen Betriebs der Anlagen einfache logistische und kontrollierende Tätigkeiten durchzuführen sind, wird die Personaldecke mit 6 Personen (max. 2 je Schicht) in der kleinen Anlage und mit 10 Personen (3 je Schicht und 1 Springer/Krankheitsvertreter) in der großen Anlage angesetzt. Bei einem Arbeitgeberbruttogehalt von 35.000 EUR pro Mitarbeiter und Jahr betragen die jährlichen Betriebspersonalkosten somit 210.000 EUR respektive 350.000 EUR.

Die **jährlichen Fixkosten** summieren sich auf 320.000 EUR (kleines Mechanisches Aufbereitungswerk) und 760.000 EUR (großes Mechanisches Aufbereitungswerk, siehe Anhang 18). Der GDE der jährlichen Kosten der großen Anlage im Vergleich zur kleinen Anlage entspricht 0,38. Damit liegt eine extreme Größendegression in Bezug auf die Fixkosten vor.

E.4.2.4 Hydrometallurgisches Aufbereitungswerk

Die Investitionssumme für ein hydrometallurgisches Aufbereitungswerk ist bekannt und wird von CM auf rund 10 Millionen EUR exklusive einmaliger Kosten für Forschung und Entwicklung beziffert. Auf dieser Basis werden im Folgenden die jährlichen Kosten berechnet.

Zur Ermittlung der kalkulatorischen Kosten wird die technische Nutzungsdauer der Anlage auf 20 Jahre festgelegt. Bei einer linearen Abschreibung und einem angenommenen Rest-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

wert von 5 Prozent der Investitionssumme (500.000 EUR) beträgt die jährliche kalkulatorische Abschreibung 475.000 EUR. Die kalkulatorischen Zinsen für die durchschnittliche Kapitalbindung der Anlage betragen bei einem angenommenen Kalkulationszinssatz von 10 Prozent 525.000 EUR. Die **jährlichen kalkulatorischen Fixkosten** summieren sich somit auf 1 Mio. EUR.

Auslastungsunabhängige pagatorische Kosten ergeben sich für Reparatur und Instandhaltung, investitionsbezogene Versicherung und Verwaltung. Die **Kosten für Reparatur und Instandhaltung** in Form von Löhnen und Material können nach Peters, Timmermann et al. (2002) als prozentualer Anteil am Anlagekapital geschätzt werden. Die Höhe des empirisch ermittelten Prozentsatzes ist dabei abhängig von der Komplexität des Prozesses und der Ausrüstung sowie von den herrschenden Betriebsbedingungen und reicht von 2 bis 11 Prozent. In dem Fall der Chemetall-Anlage wird er auf 10 Prozent festgesetzt, da es sich um einen komplizierten Prozess mit innovativem Charakter und um entsprechend komplizierte Ausrüstung handelt. Zuzüglich zu den direkt mit der Instandhaltung verbundenen Kosten fallen Kosten für Betriebsstoffe (Testchemikalien, Schmierstoffe, etc.) an, die als Aufschlag von 15 Prozent auf die Kosten für Reparaturen und Instandhaltung gerechnet werden. Insgesamt ergeben sich somit Kosten für Reparatur und Instandhaltung in Höhe von 1.150.000 EUR. Die Kosten für **investitionsbezogene Versicherung und Verwaltung** (z. B. Technologiemanagement) werden jeweils auf 1 Prozent festgesetzt und betragen somit insgesamt 200.000 EUR. Weitere fixe Kosten (z. B. Personalfixkosten) werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt, sondern gehen als Materialeinzelkostenaufschlag in die Prozessdeckungsbeitragsrechnung ein. Die **jährlichen pagatorischen Fixkosten** summieren sich auf 1.350.000 EUR, die **gesamten Fixkosten** entsprechend auf 2.350.000 EUR.

E.4.3 Schätzung von Prozessdeckungsbeiträgen

E.4.3.1 Definitionen und Vorgehensweise

Unter **Prozessdeckungsbeiträgen** sind die Deckungsbeiträge zu verstehen, die durch die Verarbeitung der Batterien in einem Prozessschritt erzielt werden können. Deckungsbeiträge sind dabei per Definition die Überschüsse der variablen Erlöse über die variablen Kosten. Sofern nicht anders genannt, werden in den folgenden Ausführungen die Erlöse und Kosten, die durch *Stoff- und Energiefluss* verursacht werden, *Lohnkosten* sowie überschlägige *Transportkosten* in die Berechnung der Prozessdeckungsbeiträge einbezogen. Aufgrund mangelnder technischer Erprobung konnten apparate- und maschinenbezogene Abnutzung nicht gemessen und die damit verbundenen kalkulatorischen Kosten nicht unmittelbar den Batteriesystemen zugeordnet werden. Sie wurden als zeitlineare Abschreibung in die Fixkosten einbezogen. Der Ausschluss von kalkulatorischen Kosten erlaubt auch die durch die Kapitalwertbetrachtung im **AS E.4.3** vorausgesetzte und den folgenden Ausführungen zugrundegelegte Annahme, dass die Deckungsbeiträge über ein Jahr betrachtet mit den dafür ursächlichen jährlichen Zahlungen identisch sind.

Die Schätzung von Prozessdeckungsbeiträgen dient der Wirtschaftlichkeitsanalyse und basiert teilweise auf den Stoff- und Energiestrombilanzen, die vom Öko-Institut in Kooperation mit den Instituten der Technischen Universität Braunschweig erhoben wurden. Sie ist insofern konsistent mit der durchgeführten Ökobilanzierung. Die Stoff- und Energieströme für die maschinell-zerstörende Zellzerlegung und die physio-mechanische Elektrodenseparation mussten ergänzend geschätzt werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die **funktionellen Einheiten** der Ökobilanz sind differenziert nach den Aktivmaterialien „NMC“ und „LFP“ und stellen jeweils die Materialzusammensetzungen einer auf eine metrische Tonne normierten Mischung von verschiedenen Batteriegrößen (HEV, PHEV und BEV) dar. Die Stoff- und Energieströme der Prozessschritte wurden entsprechend auf die funktionellen Einheiten normiert. In den folgenden Ausführungen werden diese Einheiten [t Systeme] ebenfalls verwendet. Zur Vereinfachung werden die Massenanteile bezüglich der Systemkomponenten, der Zellen und der Beschichtung bei beiden Batterietypen als identisch angenommen, so dass erst ab dem Schritt der hydrometallurgischen Aktivmaterialaufbereitung nach LFP- und NMC-Aktivmaterial differenziert werden muss. Da LFP eine niedrigere Energiedichte als NMC aufweist, bedeutet dies, dass die Batteriegemische von NMC und LFP sich hinsichtlich ihrer durchschnittlichen elektrischen Speicherkapazität unterscheiden: Eine Tonne NMC-Batteriegemisch weist eine höhere Kapazität als eine Tonne LFP-Batteriegemisch auf.

Die zugrundegelegte **Massenzusammensetzung** der funktionellen Einheit wird in Abbildung E-3 ersichtlich. Im linken Kreisdiagramm sind solche Komponenten dargestellt, die im Schritt der Demontage manuell demontiert werden. Bis auf die Batteriezellen, die in der mechanischen Aufbereitung weiter behandelt werden, werden sie systemextern recycelt, energetisch verwertet („zur energetischen Verwertung“, „z. e. V.“) oder thermisch verwertet („zur thermischen Verwertung“, „z. t. V.“) und verlassen somit den LithoRec-Prozess. Im rechten Kreisdiagramm sind die Bestandteile der Batteriezellen mit ihren systembezogenen Massenanteilen dargestellt, die im Schritt der mechanischen Aufbereitung separiert werden. Während die Kathodenbeschichtung in der hydrometallurgischen Aufbereitung weiterverarbeitet wird, werden die restlichen Bestandteile – Aluminiumspäne von Kathode, Graphit und Kupfer von Anode, Aluminiumfolie von Zellgehäuse sowie Reststoffe wie Elektrolyt – wiederum systemextern entsorgt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

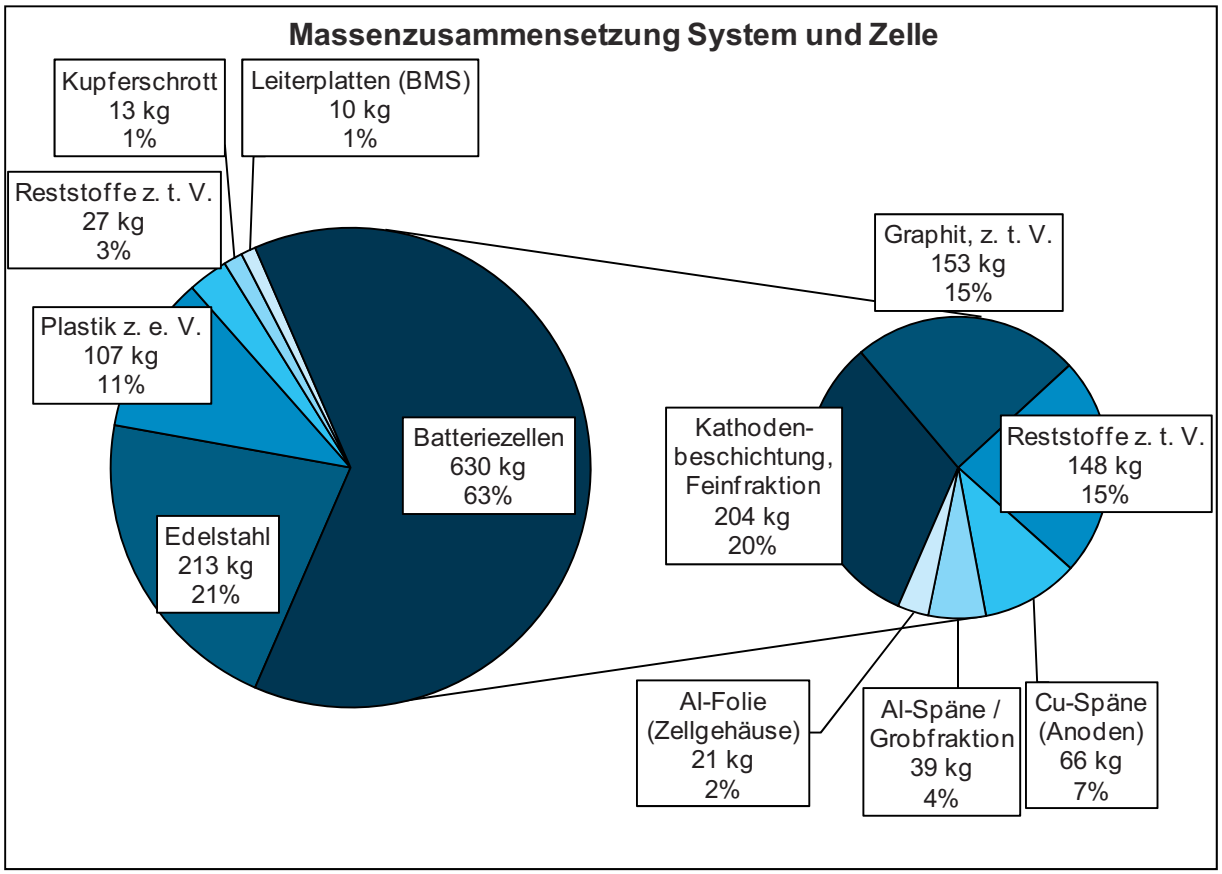


Abbildung E-3: Massenzusammensetzung des zugrundegelegten Batteriegemischs [t System]

Erlöse und Kosten aus Stoff- und Energiefluss

Bezüglich der bilanzierten Stoffe und Energieformen wurden in Zusammenarbeit mit IPAT-TUBS, HCST, EC und CM Erlös- und Kostensätze ermittelt. Sie bilden die Grundlage zur ökonomischen Bewertung der Mengengerüste. Bewertet werden hierbei die ein- und ausgehenden Stoff- und Energiemengen, die die Systemgrenzen des Gesamtprozesses überschreiten. Materialien, die innerhalb der Systemgrenzen weiterverarbeitet werden (z. B. Zellen, die aus der Demontage kommen und in die Mechanische Aufbereitung eingehen), werden nicht einbezogen. Erlös- und Kostensätze sind grundsätzlich ohne Mehrwertsteuer angesetzt. Insbesondere bezüglich der Erlössätze, beispielsweise für die aufbereiteten Lithium- und Cobaltverbindungen und Kupfer, bestehen hohe Unsicherheiten; sie sind überdies mit einer hohen Fluktuation verbunden. Ähnliches ist auch in Bezug auf die Energiekostensätze gültig. Vor diesem Hintergrund werden anschließend an die Ermittlung der Prozessdeckungsbeiträge für jeden Prozess Sensitivitätsanalysen auf die Veränderung bestimmter Erlös- und Kostensätze durchgeführt.

Lohnkosten

Lohnkosten, die insbesondere im innerbetrieblichen Transport und in der manuellen Demontage der Batterien eine bedeutende Größe darstellen, werden auf Basis der in der Aktivitätsanalyse ermittelten Bearbeitungszeiten ermittelt oder anhand des für den Betrieb von Anlagen notwendigen Personals geschätzt. Anforderungsspezifisch werden dafür zwei Lohnkos-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

tensätze unterschieden, die jeweils den Arbeitgeberbruttolohn inklusive Nebenkosten darstellen. Sie betragen im Fall von einfachen Tätigkeiten 20 EUR/h (35.000 EUR/Jahr) und im Fall von gehobenen Anforderungen 25 EUR/h (45.000 EUR/Jahr). Beschäftigungsspezifische Kosten, beispielsweise für Personalführung und -verwaltung, wurden bereits in der Schätzung der Fixkosten berücksichtigt.

Transportkosten

Kosten für den Transport von und zu Stellen außerhalb der Systemgrenzen, beispielsweise der Transport zu entsorgender Materialien, wurden für jeden Prozessschritt für die Gesamtmasse der darin zu bewegenden Eingangs- und Ausgangsstoffe überschlägig erhoben. Dabei wurde von einer durchschnittlichen Transportstrecke von 200 km und von einem durchschnittlichen Transportkostensatz von 5,60 je Tonne und 100 Kilometer ausgegangen. Für die systemintern weiterverarbeiteten Stoffe wurden keine weiteren Transportkosten angesetzt, da diese bereits implizit in der Lohnkostenberechnung erfasst wurden. Etwaige zusätzliche außerbetriebliche Transporte zwischen räumlich entkoppelten Werken sind gestaltungsabhängig und werden ausschließlich im **AP A.3** berücksichtigt.

E.4.3.2 Deckungsbeitrag in der Demontage

Für eine Tonne Batteriegemisch ergibt sich ein **stoff- und energieflussbezogener Deckungsbeitrag** von 439 EUR. Den größten positiven Beitrag liefert dabei das Edelstahlgehäuse, das massen- und wertbezogen einen großen Anteil derzeitiger Batterien darstellt (384 [EUR / t System], Erlössatz 1.800 EUR/t). Wird das Edelstahlgehäuse zukünftig durch günstigeres und leichteres Aluminium ersetzt, sinkt der Beitrag auf etwa 240 EUR.[23] Dies führt gegebenenfalls zu einem negativen Prozessdeckungsbeitrag. Weiteren wesentlichen Beitrag liefern Kupferschrott (58 [EUR /t System], Erlössatz 4.500 EUR/t) sowie die Leiterplatten, z. B. aus dem Batteriemanagementsystem (15 [EUR /t System], Erlössatz 1.500 [EUR/t]). Im Prozess wird darüber hinaus elektrische Energie für den Betrieb von elektrischen Flurförderfahrzeugen und von Werkzeugen benötigt. In der Entladung gegebenenfalls zurückgewonnene elektrische Energie wird zunächst zur eigenen Bedarfsdeckung und darüber hinaus zur Einspeisung in das Netz genutzt. Der entsprechende Deckungsbeitrag ist jedoch sehr gering und wird deshalb vernachlässigt. Die Zusammensetzung des Deckungsbeitrags wird in Abbildung E-4 dargestellt.

Die Masse der systemextern beschafften oder entsorgten Stoffe beträgt ca. 370 [kg/t Systeme]. Dies entspricht **transportbezogenen Kosten** von aufgerundet 5 [EUR/t Systeme].

[23] Gerechnet auf BEV-Äquivalente mit 35 kg Al-Gehäuse (statt 70 kg Edelstahlgehäuse), Wert 50 EUR (statt 126 EUR), wiederum normiert auf eine Tonne Gemisch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

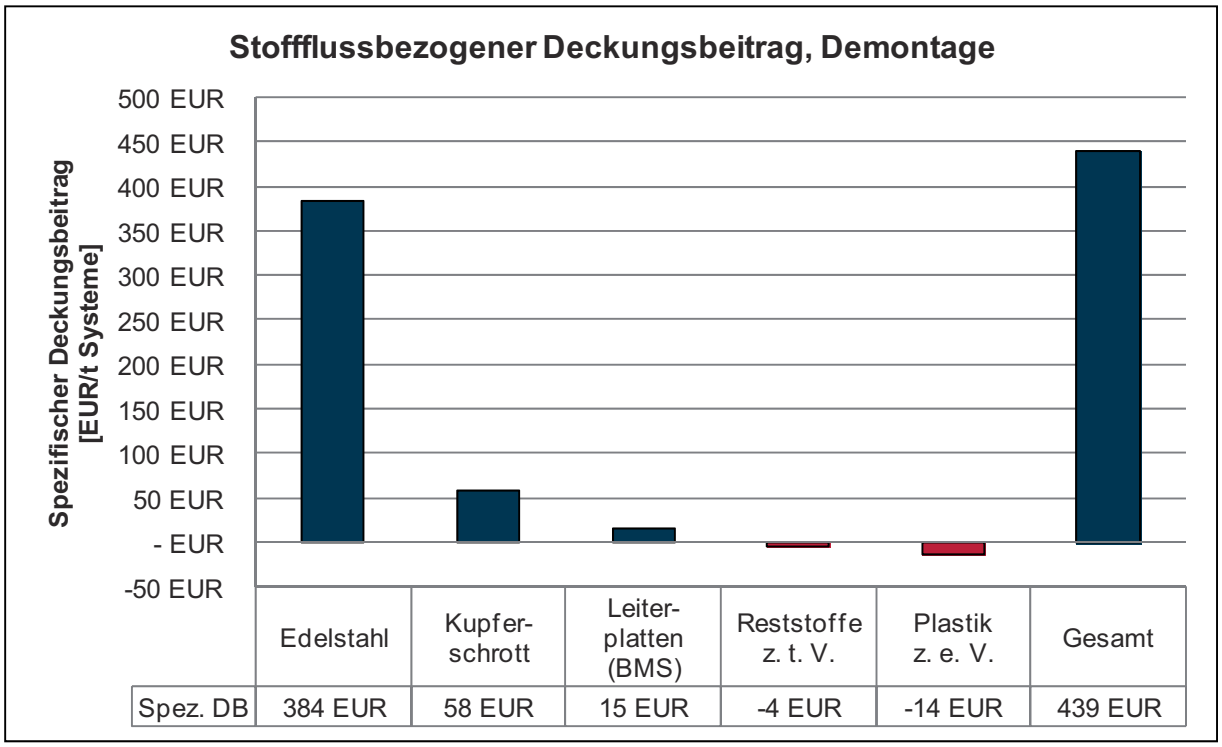


Abbildung E-4: Stoffflussbezogener Deckungsbeitrag in der Demontage

Tabelle E-3: Funktionelle Einheiten [t Systeme] und [BEV-Äq.] sowie Umrechnung in PHEV- u. HEV-Systeme

	t Systeme	BEV-Äq.	PHEV	HEV
Normierungsfaktor [BEV-Äq.]	~ 3,0	1,0	0,5	0,1
Systemmasse [kg]	1.000	330	165	33
darunter				
Gehäusemasse [kg]	213	70	35	7
Zellmasse [kg]	630	200	100	20
darunter				
Kathodenbeschichtung [kg]	183	58	29	6
Anzahl der Zellen		180	90	18

Die im Demontagewerk durchgeführten Aktivitäten (Transport, Prüfung, Systementladung, Demontage und Zellentladung) sind mit **Lohnkosten** verbunden. Die Ermittlung der Mitarbeiterzeiten auf Basis der funktionellen Einheit [t Systeme] erscheint in diesem Zusammenhang nicht zweckgemäß. Stattdessen werden unterschiedliche Batterievarianten differenziert (HEV, PHEV und BEV bzw. BEV-Äquivalente) und die Kosten zunächst stückbezogen ermittelt. Die Umrechnung zwischen den funktionellen Einheiten erfolgt anschließend auf Basis der in Tabelle E-3 dargestellten Annahmen. Vereinfachend wird dabei unterstellt, dass eine

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tonne Batteriemix ungefähr 3 BEV-Äquivalenten entspricht. Die Lohnkosten betragen unabhängig von der Größe des Demontagewerks 243 [EUR/t System]. Die Berechnung für unterschiedliche Batterietypen kann der Tabelle E-4 entnommen werden. Es wird deutlich, dass die Kosten der Verarbeitung eines Gemischs von Batterien ganz erheblich von dessen Zusammensetzung abhängen. Die angesetzten Lohnkosten sind als Mittelwert unterschiedlicher Batterietypen zu verstehen und beziehen sich in etwa auf ein spezifisches Verhältnis von 60 % BEV-, 25 % PHEV- und 15 % HEV-Batterien.

Der **Prozessdeckungsbeitrag** in der Demontage summiert sich für beide Kapazitätsklassen identisch auf 191 [EUR/t Systeme]. Aufgrund der vorwiegend manuellen Prozesse ergeben sich keine Unterschiede zwischen den Kapazitätsklassen. Die Zusammensetzung des Prozessdeckungsbeitrags wird in Abbildung E-5 abschließend dargestellt.

Tabelle E-4: Berechnung der Lohnkosten

Bezug	Posten	Einheit	Batterietyp		
			BEV	HEV	PHEV
Löhne	Mitarbeiterzeit für innerbetrieblichen Transport, Kostensatz 1	[hh:mm]	00:25	00:25	00:25
	Mitarbeiterzeit Prüfung und Systementladung, Kostensatz 2	[hh:mm]	00:10	00:10	00:10
	Mitarbeiterzeit Demontage System (2 MA à 1 h), Kostensatz 1	[hh:mm]	02:00	01:00	00:12
	Mitarbeiterzeit Zellentladung Kostensatz 1	[hh:mm]	00:24	00:12	00:02
	Lohnkosten Kostensatz 1 (20 EUR/h)	EUR/Stück	56,33	32,33	13,13
	Lohnkosten Kostensatz 2 (25 EUR/h)	EUR/Stück	4,17	4,17	4,17
Lohnkosten	Lohnkosten (LK) (gerundet)	EUR/Stück	60,-	36,-	17,-
	pro Tonne Systeme	EUR/t	181,-	219,-	524,-
Lohnkosten, normiert	LK bei BEV-Äq.-Normierung	EUR/Stück	60,-	30,-	6,-
	LK mit FfU* 33 % (angesetzt)	**EUR/Stück**	**80,-**	**40,-**	**8,-**
	pro Tonne Systeme (aufgerundet)	**EUR/t**	**243,-**	**243,-**	**243,-**

*) *FfU: Faktor für Ungewisses.*

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

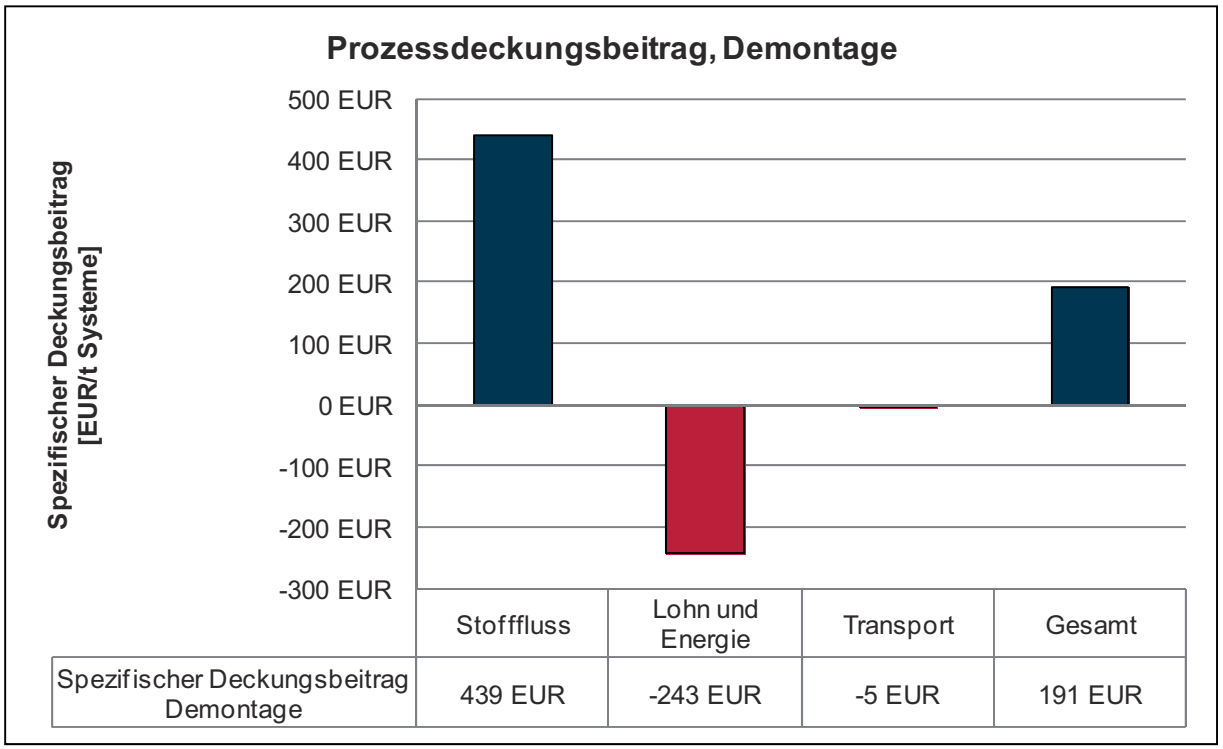


Abbildung E-5: Prozessdeckungsbeitrag in der Demontage

E.4.3.3 Deckungsbeitrag in der Mechanischen Aufbereitung

Der **stoff- und energieflussbezogene Deckungsbeitrag** beträgt 340 [EUR/t Systeme]. Den größten Beitrag liefern die Kupferspäne der Anode. Die hochreine Separation der Späne sowie deren Brikettierbarkeit vorausgesetzt, beträgt er 414 [EUR/t Systeme] bei einem Erlössatz von 6.300 [EUR/t]. Wesentliche Einsatzstoffe sind Natriumhydroxid (NaOH), das zur Flusssäurewäsche benötigt wird (9 [EUR/t Systeme] bei einem Kostensatz von 250 [EUR/t]).[24] Die erforderlichen Mengen von NaOH sowie die durch die chemische Reaktion entstehenden Stoffe Natriumfluorid (NaF, 22,65 [kg/t System]) und Natriumcarbonat (Na_2CO_3, 17,95 [kg/t System]) wurden vom Öko-Institut stöchiometrisch geschätzt. Die Sondermüllentsorgung (SME) des NaF-Na_2CO_3-Gemischs führt zu Kosten von 16 [EUR/t Systeme], alternativ könnten die Stoffe möglicherweise separiert und in jeweils hochreiner Form verkauft werden. Weitere erhebliche Kosten können durch den Einsatz von Stickstoff zur Schaffung einer Inertatmosphäre oder zum Deaktivieren der chemischen Aktivität entstehen; diese sind jedoch aufgrund bislang fehlender Untersuchung bezüglich der Einsatznotwendigkeit und der Kreislaufführungsmöglichkeit nicht einbezogen worden. Der spezifische Elektrizitätsbedarf in der Mechanischen Aufbereitung wurde anhand der Anschlusswerte der Apparate und Maschinen und des Zelldurchsatzes großzügig auf 261 kWh/[t Systeme] geschätzt. Die Zusammensetzung des stoff- und energieflussbezogenen Deckungsbeitrags wird in Abbildung E-6 ersichtlich.

Die Masse der systemextern beschafften oder entsorgten Stoffe beträgt ca. 500 [kg/t Systeme]. Dies führt zu **transportbezogenen Kosten** von aufgerundet

[24] Die Flusssäurewäsche ist erforderlich, da in den thermischen Prozessen gegebenenfalls fluorhaltige Verbindungen aus dem Binder der Kathodenbeschichtung (Polyvenylidenfluorid, PVdF) sowie aus dem Leitsalz im Elektrolyten (Lithiumhexafluorophosphat, LiPF6) freigesetzt werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

6 [EUR/t Systeme]. Die **Lohnkosten** betragen im kleinen Mechanischen Aufbereitungswerk 150 [EUR/t Systeme], im großen Werk 20 [EUR/t Systeme] (siehe Tabelle E-5). Die Schätzung der Lohnkosten basiert auf den Ausführungen in E.4.2.3 und setzt die stündlichen Lohnkosten in Beziehung zum Nenndurchsatz der Anlage. Bei niedrigerem Durchsatz sind die Lohnkosten entsprechend höher zu gewichten.

Der **Prozessdeckungsbeitrag** in der Mechanischen Aufbereitung wird im kleinen Werk auf 184 [EUR/t Systeme] und im großen Werk auf 314 [EUR/t Systeme] geschätzt (siehe Abbildung E-7). Auf die Zellmasse bezogen entspricht dies 292 [EUR/t Zellen] respektive 498 [EUR/t Zellen].

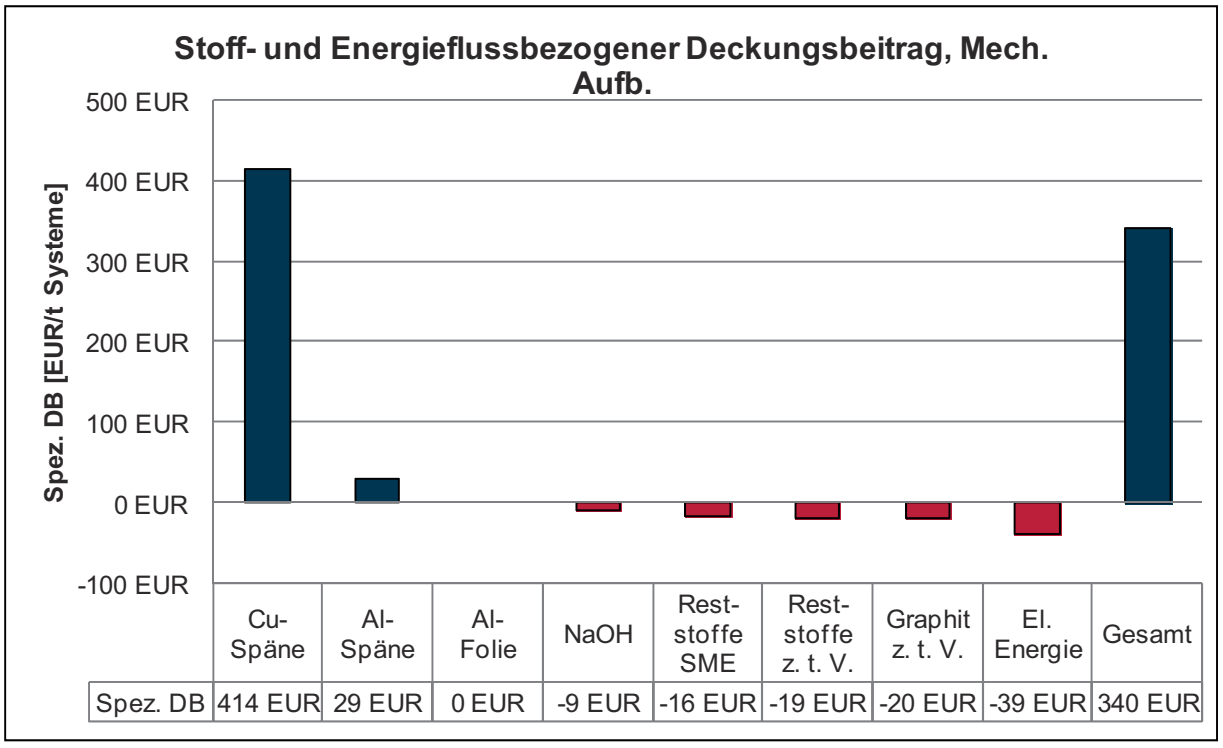
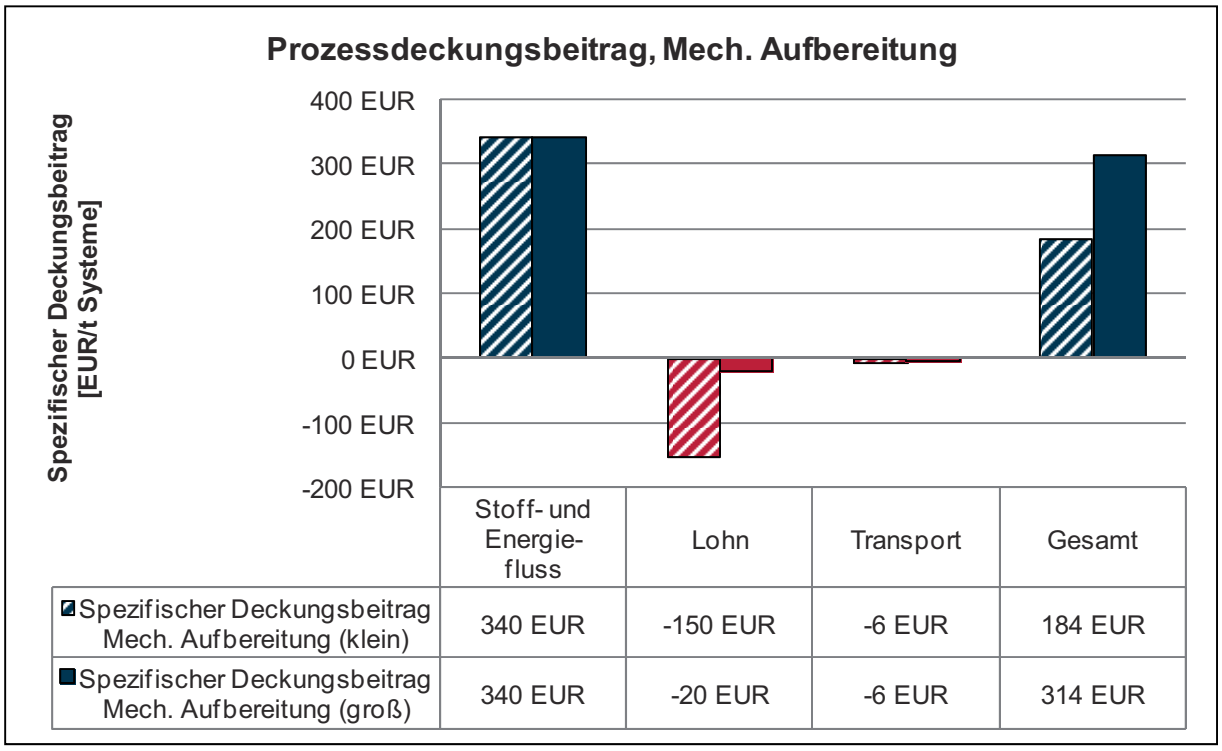


Abbildung E-6: Stoff- und energieflussbezogener Deckungsbeitrag in der Mechanischen Aufbereitung

Tabelle E-5: Lohnkosten in der Mechanischen Aufbereitung

Bezug	Einheit	Kleines Werk	Großes Werk
Zell-Nenndurchsatz	kg Zellen/h	170	1.700
Lohnkosten für Betriebspersonal	EUR/h	40,-	50,-
Spez. Lohnkosten	EUR/t Zellen	235,29	29,41
Spez. Lohnkosten	EUR/t Systeme	148,23	18,53
Spez. Lohnkosten (angesetzt)	**EUR/t Systeme**	**150,-**	**20,-**

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.



	Stoff- und Energie-fluss	Lohn	Transport	Gesamt
Spezifischer Deckungsbeitrag Mech. Aufbereitung (klein)	340 EUR	-150 EUR	-6 EUR	184 EUR
Spezifischer Deckungsbeitrag Mech. Aufbereitung (groß)	340 EUR	-20 EUR	-6 EUR	314 EUR

Abbildung E-7: Prozessdeckungsbeitrag in der Mechanischen Aufbereitung

E.4.3.4 Deckungsbeitrag in der Hydrometallurgischen Aufbereitung

Eingang in die Hydrometallurgische Aufbereitung findet das Hauptprodukt der Mechanischen Aufbereitung, die Feinfraktion der Kathodenbeschichtung (Aktivmaterial). Der pulverförmige Feststoff wird in diversen Fällungsprozessen unter Einsatz von Wasserstoffperoxid, Schwefelsäure und elektrischer Energie in eine Lithiumsalzlösung und in eine weitere Lösung getrennt. Die Menge der eingehenden Energie und Stoffe sowie Typ und Wert der gewonnenen Lösungen sind abhängig vom Typ und vom Zustand des verarbeiteten Aktivmaterials. Die Lithiumsalzlösung wird anschließend unter Einsatz von elektrischer Energie und Wasserdampf in verschiedenen chemischen Prozessen aufbereitet, um Lithiumhydroxid-Monohydrat oder Lithiumcarbonat zu gewinnen. Die im Folgenden nach den Aktivmaterialtypen Lithium-Nickelmangancobalt (NMC) und Lithium-Eisenphosphat (LFP) differenzierten Darstellungen beruhen auf vorläufigen Ergebnissen verschiedener Tests von CM, HCS und IPAT-TUBS. Da die Daten teilweise vertraulich sind, werden neben den aggregierten Deckungsbeiträgen entweder nur die im Referenzszenario angesetzten Marktpreise der Stoffe oder nur deren Mengenangaben genannt.

Bei der Verarbeitung einer Tonne **NMC-Systeme** werden 73 kg Lithiumhydroxid-Monohydrat sowie 184 kg Übergangsmetallsalzlösung gewonnen. Letztere enthält Cobalt-, Nickel- und Mangansulfate in variierenden Anteilen und ist zur Herstellung neuen Aktivmaterials geeignet. Die Anteile der Übergangsmetallsalze sind direkt abhängig von der Zusammensetzung der Aktivmaterialien. Die der Berechnung zugrundeliegenden Anteile wurden von HCS für eine aus dem CM-Prozess stammende Charge ermittelt und sind Tabelle E-6 zu entnehmen. Der Wert dieser Lösung ist stark von den volatilen Preisen der börsennotierten Übergangsmetalle Cobalt und Nickel abhängig und wird auf 1.300 EUR/t bis 2.100 EUR/t geschätzt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Potentielle Verunreinigungen könnten eine weitere Aufbereitung erfordern, die den Wert stark mindern würde. Im Referenzszenario wird ein Erlössatz von 1.300 EUR/t angesetzt. Für Lithiumhydroxid-Monohydrat wird der ungefähre Marktpreis von 8.000 EUR/t angesetzt. In der Verarbeitung von NMC-Systemen werden 203 [EUR/t Systeme] für Einsatzstoffe und Energie aufgewandt. Dem stehen 826 [EUR/t Systeme] aus dem Verkauf der gewonnenen Wertstoffe gegenüber. Der **stoffflussbezogene Deckungsbeitrag** beträgt demnach im Referenzszenario 623 [EUR/t Systeme] bezogen auf NMC-Systeme.

Tabelle E-6: Zusammensetzung der Übergangsmetallsalzlösung

Übergangsmetallsalz	**Konzentration in Lösung [g/l]**
Cobalt(II)-sulfat-Heptahydrat $Co_2SO_4 \cdot H_2O$	55,1
Nickel(II)-sulfat-Heptahydrat $Ni_2SO_4 \cdot H_2O$	53,1
Mangan(II)-sulfat-Monohydrat $Mn_2SO_4 \cdot H_2O$	48,2

Bei der Verarbeitung einer Tonne **LFP-Systeme** werden 46 kg Lithiumhydroxid-Monohydrat sowie 184 kg Reststoffe produziert. Im Gegensatz zu NMC beinhaltet das LFP-Aktivmaterial keine wertvollen Übergangsmetalle. Für die verbleibenden Eisenphosphatverbindungen sind derzeit keine wirtschaftlich sinnvollen Verwertungsmöglichkeiten bekannt. Diese Reststoffe müssen der Sondermüllentsorgung (Kostensatz: 400 [EUR/t]) zugeführt werden, die Kosten hierfür betragen 73 [EUR/t Systeme]. Die benötigten Einsatzstoffe und Energie führen zu Kosten in Höhe von 85 [EUR/t Systeme]. Den Kosten von insgesamt 158 [EUR/t Systeme] stehen Erlöse aus dem Verkauf des Lithiumhydroxid-Monohydrats in Höhe von 367 [EUR/t Systeme] entgegen, der **stoffflussbezogene Deckungsbeitrag** für LFP-Systeme entspricht im Referenzszenario 209 [EUR/t Systeme].

Die Gesamtmasse der zu transportierenden Stoffe beträgt im Fall von NMC 643 [kg/t Systeme] und im Fall von LFP 523 [kg/t Systeme]. Entsprechend werden 8 respektive 6 [EUR/t Systeme] für die **transportbezogenen Kosten** angesetzt. CM schätzt die **Lohnkosten sowie sonstige allgemeine Betriebskosten** über einen pauschalen Aufschlag von 30 Prozent bezogen auf die Kosten für Einsatzstoffe und Energie. Dies führt zu Kosten in Höhe von etwa 60 [EUR/t Systeme] bezogen auf die Stoffffluss- und Energiekosten bei NMC-Systemen, die vereinfachend auch für LFP-Systeme angesetzt werden.

Der **Prozessdeckungsbeitrag** beträgt im Referenzszenario für NMC-Systeme 555 [EUR/t Systeme]. Für LFP-Systeme beträgt er 143 [EUR/t Systeme] (siehe Abbildung E-8).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

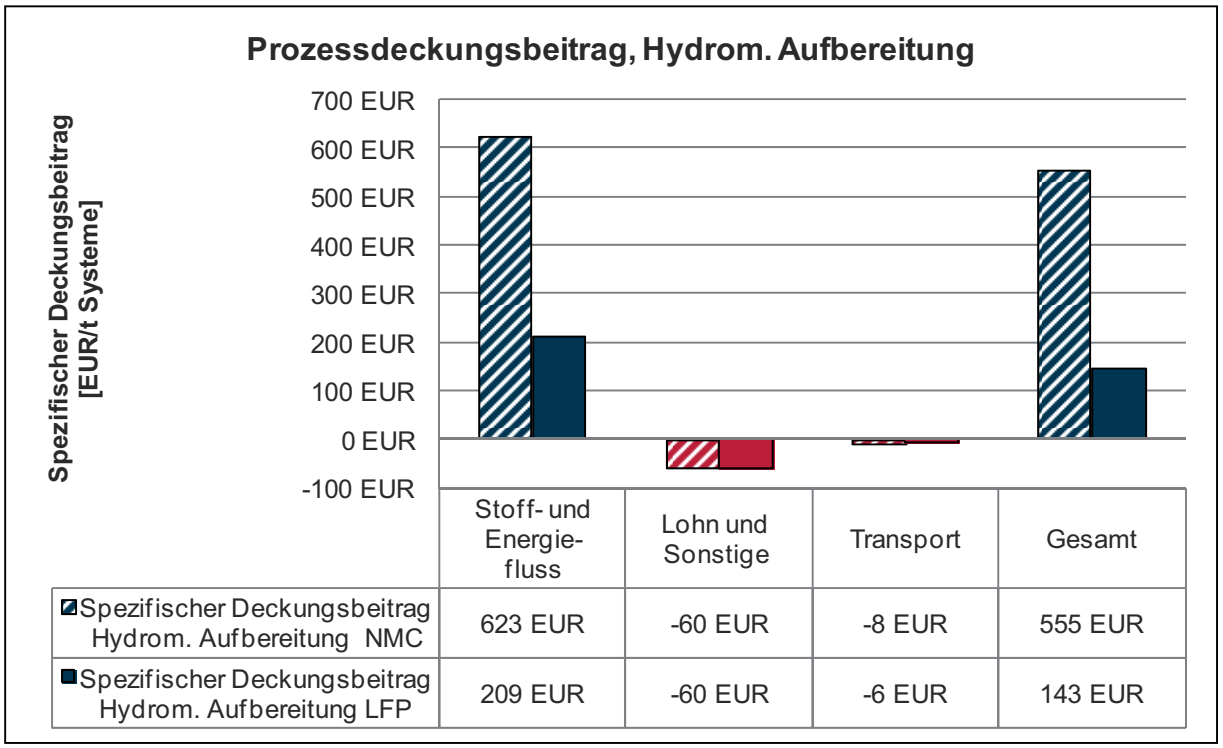


Abbildung E-8: Deckungsbeitrag in der Hydrometallurgischen Aufbereitung für NMC- und LFP-Systeme

E.4.3.5 Gesamtprozessdeckungsbeitrag und Sensitivitäts-analyse

Der Gesamtprozessdeckungsbeitrag (GDB) ist die Summe der Prozessdeckungsbeiträge im Demontagewerk, im Mechanischen Aufbereitungswerk sowie im Hydrometallurgischen Aufbereitungswerk. Da die Prozessdeckungsbeiträge im Mechanischen Aufbereitungswerk je nach Kapazitätsklasse und im Hydrometallurgischen Aufbereitungswerk je nach Batterietyp unterschiedlich ausfallen, kann der GDB entsprechend nach der Größenklasse des Aufbereitungswerks (klein und groß) sowie nach den verarbeiteten Batterietypen (NMC und LFP) differenziert werden (s. Tabelle E-7).

Tabelle E-7: Fallunterscheidungen und Gesamtprozessdeckungsbeiträge

Kapazität Mechanisches Aufbereitungswerk	**Klein 1.000 bis 2.000 [t/a]**		**Groß 10.000 bis 20.000 [t/a]**	
Aktivmaterial	NMC	LFP	NMC	LFP
Fallbezeichnung	K-NMC	K-LFP	G-NMC	G-LFP
GDB (Referenz) [EUR/t Systeme]	930,-	518,-	1.060,-	648,-

Ausgehend von der geschilderten Fluktuation und hoher Unschärfe bezüglich der Preise für Energieträger und Stoffe werden zusätzlich zum oben dargelegten Referenzfall vier Szenarien zur Preisentwicklung betrachtet:

Szenarien Wertstofferlös −20 % und Wertstofferlös +20 %: Diese Szenarien bilden die hohe Unsicherheit bezüglich der vermarktbaren Wertstoffe ab. Die Erlöse aus dem Verkauf

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

von Wertstoffen liegen um 20 Prozent niedriger respektive höher als im Referenzszenario. Dies kann sowohl in sinkenden respektive steigenden Marktpreisen als auch in einer niedrigeren respektive höheren Recyclingeffizienz begründet sein.

Szenario Energiekosten +50 %: Dieses Szenario bildet zukünftig steigende Preise und/oder höhere Einsatzmengen der Energieträger ab. Die energieträgerbezogenen Kosten steigen um 50 Prozent.

Szenario Einsatzstoffkosten +20 %: Die Beschaffungskosten für die verwendeten Einsatzstoffe Schwefelsäure, Wasserstoffperoxid und Natriumhydroxid steigen um 20 Prozent.

Szenario Beseitigungskosten +20 %: Die Kosten für die Beseitigung von Stoffen, z. B. für die energetische und thermische Beseitigung, liegen um 20 Prozent höher.

In allen genannten Fällen haben **abweichende Wertstofferlöse** den größten Einfluss auf den Gesamtprozessdeckungsbeitrag. Dabei ist der größte negative Einfluss im Fall der Verarbeitung von LFP-Batterien zu sehen. Bei K-LFP sinkt der GDB um gut −50 Prozent. Dies ist vor allem auf eine ungefähre Halbierung der Prozessdeckungsbeiträge in allen drei Prozessen zurückzuführen. Bei G-LFP wird der Effekt durch niedrigere variable (Lohn-) Kosten in dem Mechanischen Aufbereitungswerk etwas gedämpft, die Abweichung beträgt −40 Prozent. In der Verarbeitung von NMC ist der absolute Effekt der Wertstoffpreisreduktion betrachtet zwar deutlich höher (−346 ggü. −254 [EUR/t Systeme]), relativ betrachtet fällt er jedoch mit −37 Prozent (K-NMC) bzw. −33 Prozent (G-NMC) etwas geringer aus. Den umgekehrten positiven Effekt hat jeweils die Erhöhung des Wertstofferlöses um +20 Prozent.

Steigende Energiekosten führen ebenfalls zu einer starken Reduktion des GDB, der Effekt ist jedoch auf deutlich niedrigerem Niveau. Die Abweichung ist aufgrund des höheren Energiebedarfs in der Hydrometallurgischen Aufbereitung bei NMC stärker und beträgt zwischen −9,2 Prozent (K-NMC) und −5,6 Prozent (G-LFP). Die absolute Abweichung beträgt −86 [EUR/t Systeme] (NMC) bzw. −36 [EUR/t Systeme] (LFP).

Steigende Einsatzstoffkosten haben nur einen geringen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Prozesses.[25] Die relativen Abweichungen bei einer Variation um +20 Prozent liegen zwischen −2,3 Prozent (K-LFP) und −1,4 Prozent (G-NMC). Aufgrund des geringfügig höheren Ressourcenbedarfs ist die absolute Abweichung in der Verarbeitung von NMC gegenüber LFP etwas höher (−15 respektive −12 [EUR/t Systeme]).

Steigende Beseitigungskosten haben in der Verarbeitung von LFP mit −29 [EUR/t Systeme] einen deutlich höheren Einfluss als in der Verarbeitung von NMC (−14 [EUR/t Systeme]), da bei der hydrometallurgischen Aufbereitung von LFP-Kathodenmaterial eine große Menge an Reststoffen anfällt. Die Abweichung vom GDB beträgt zwischen −5,6 Prozent (K-LFP) und −1,3 Prozent (G-NMC).

Die Unterschiede in den Szenarien veranschaulichen Abbildung E-9 (K-NMC), Abbildung E-10 (G-NMC), Abbildung E-11 (K-LFP) und Abbildung E-12 (G-LFP) (jeweils rel. Abweichung) sowie Abbildung E-13 (abs. Abweichung).

[25] Durch die mögliche Notwendigkeit von weiteren Einsatzstoffen, z. B. Stickstoff, kann sich dieser Umstand jedoch deutlich ändern.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

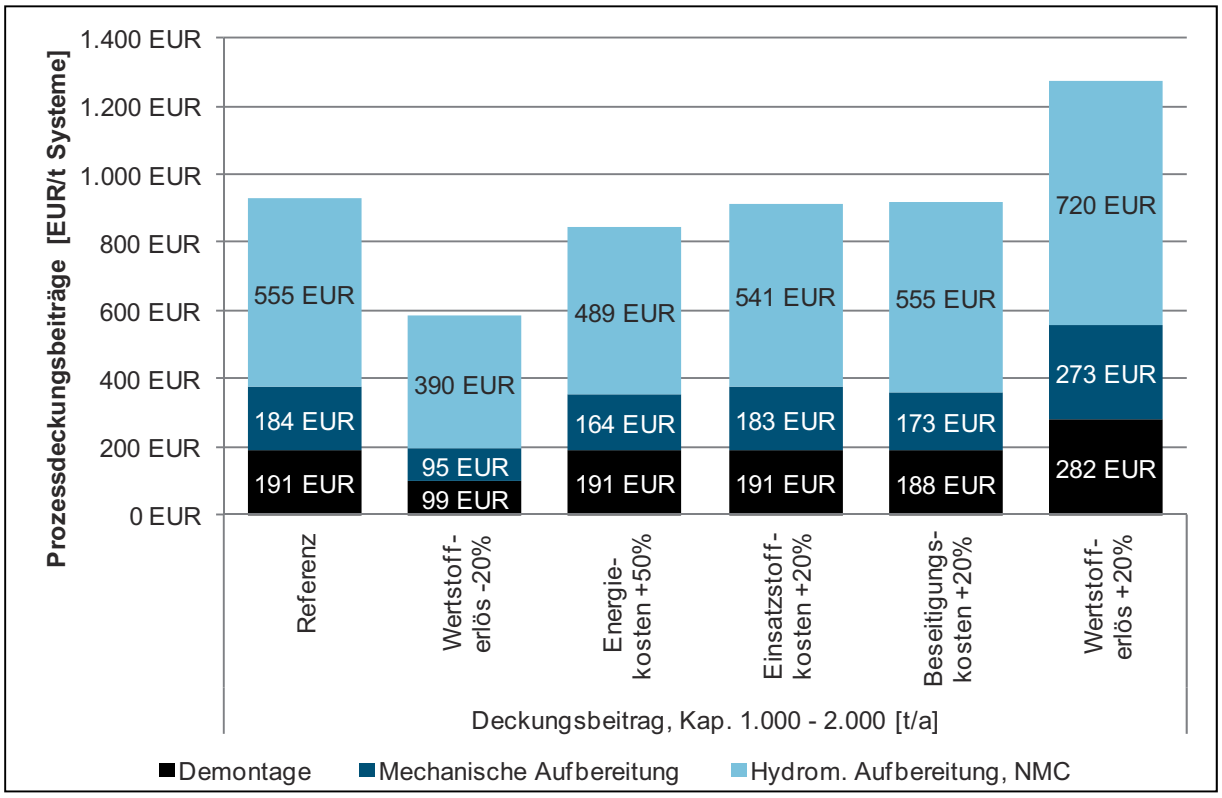


Abbildung E-9: Sensitivitätsanalyse bezüglich der Prozessdeckungsbeiträge (K-NMC)

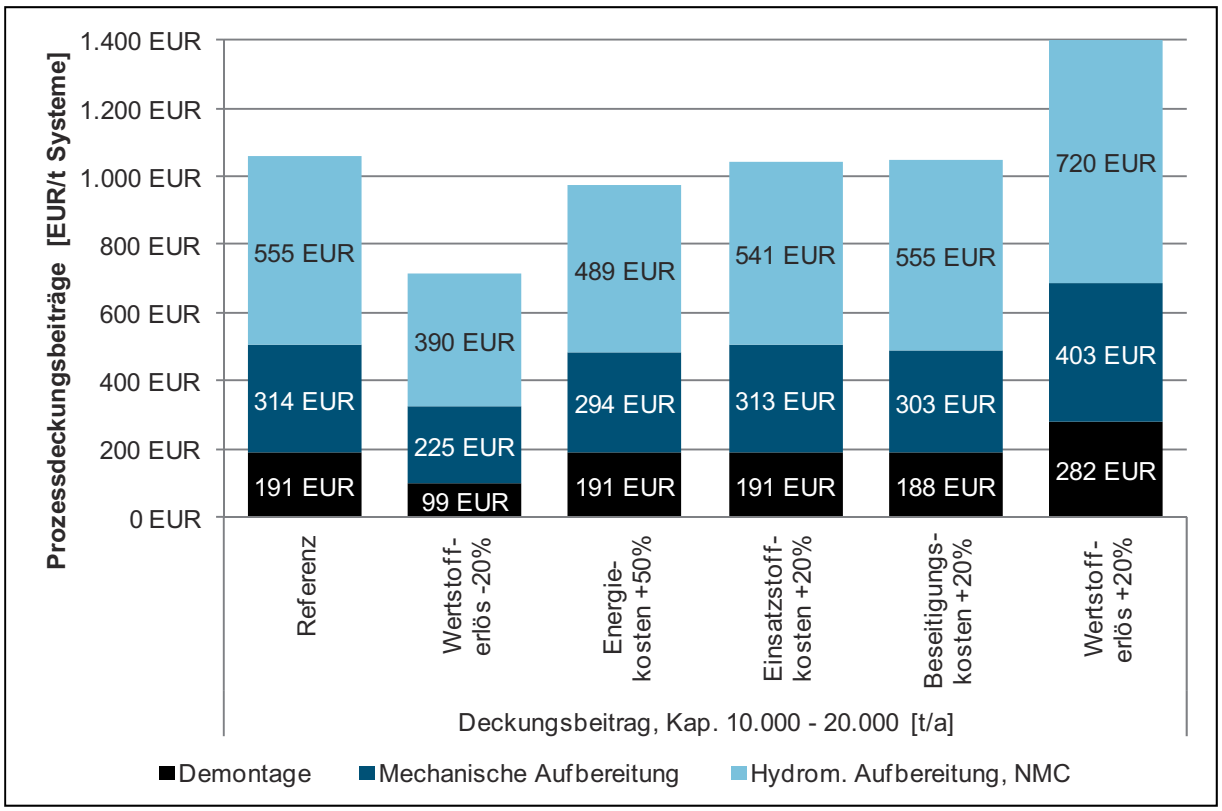


Abbildung E-10: Sensitivitätsanalyse bezüglich der Prozessdeckungsbeiträge (G-NMC)

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

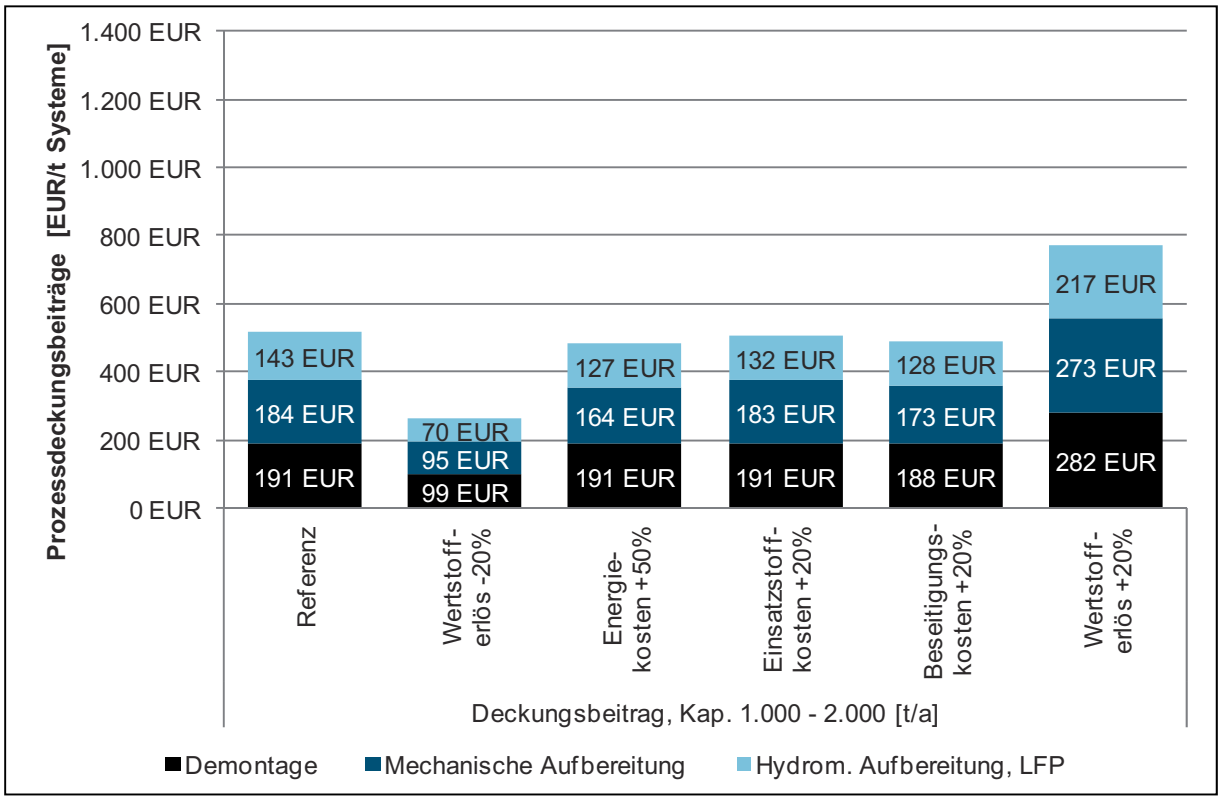


Abbildung E-11: Sensitivitätsanalyse bezüglich der Prozessdeckungsbeiträge (K-LFP)

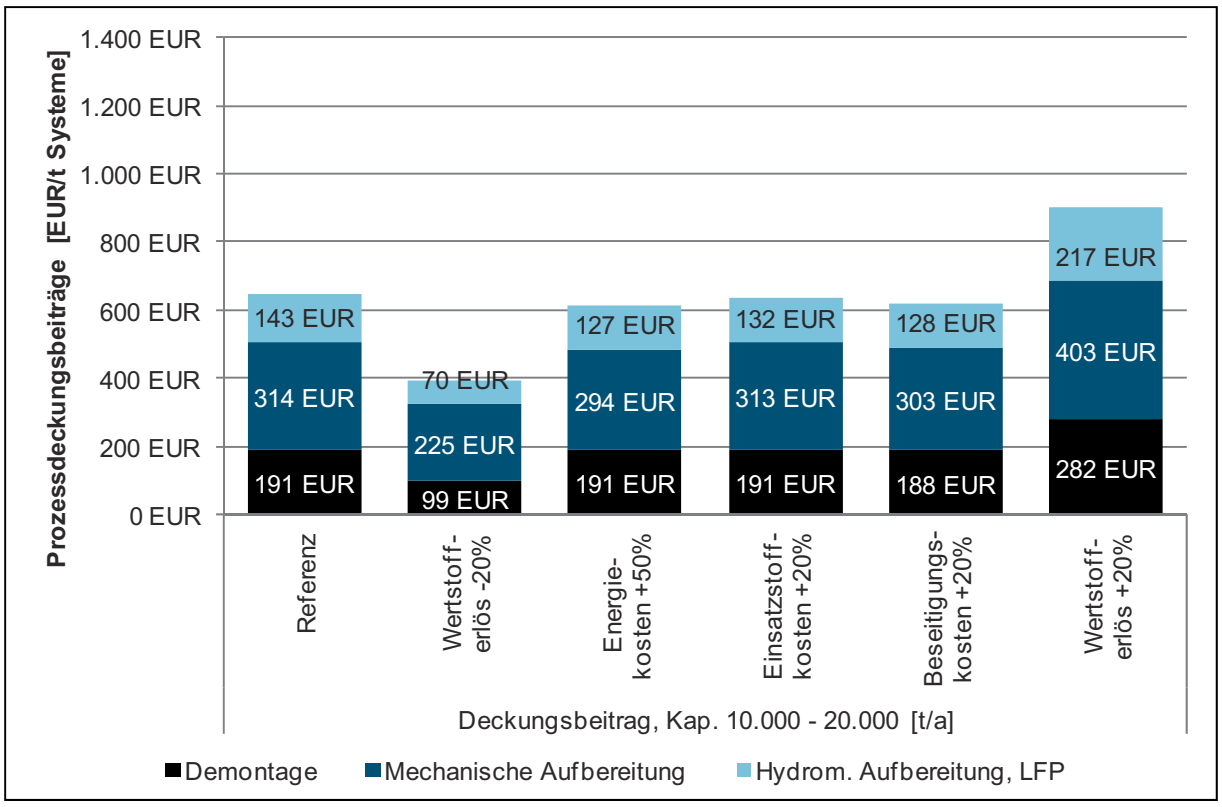


Abbildung E-12: Sensitivitätsanalyse bezüglich der Prozessdeckungsbeiträge (G-LFP)

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

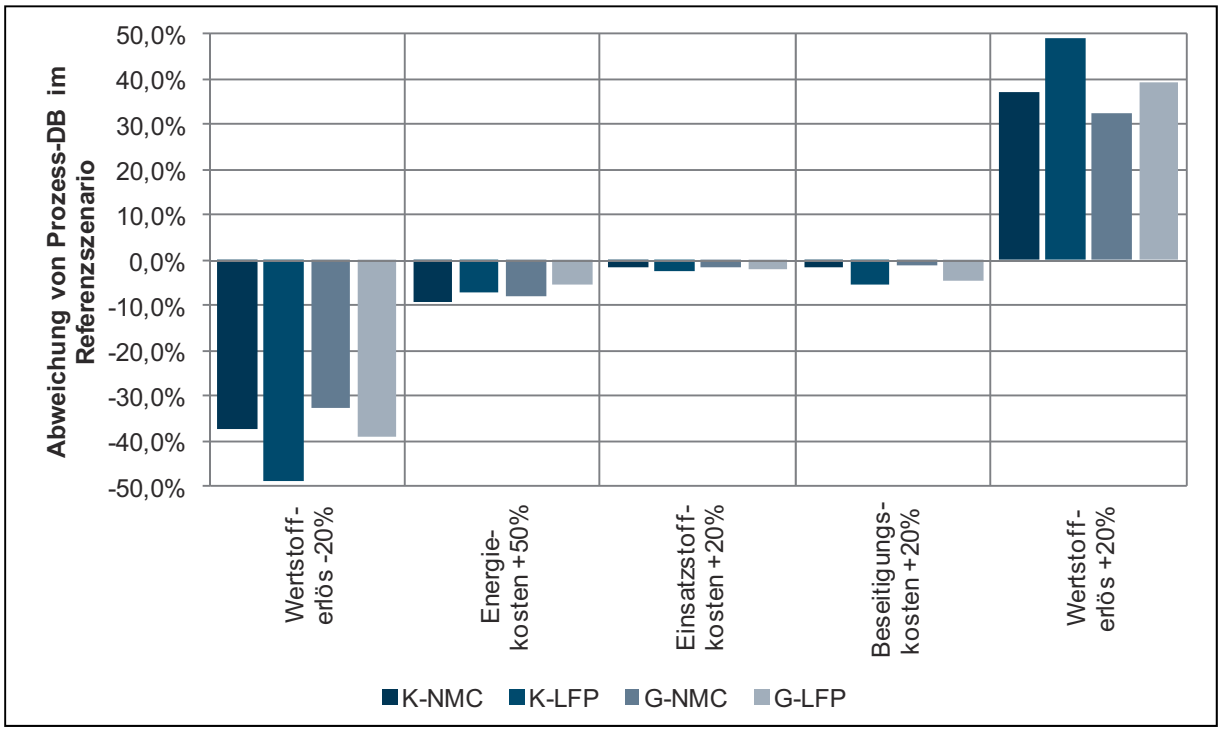


Abbildung E-13: Relative Abweichungen der Szenarien vom Referenz-GDB

E.4.4 Gewinnschwellen

Auf Grundlage der berechneten jährlichen Fixkosten und der Prozessdeckungsbeiträge kann die potentielle Wirtschaftlichkeit der betrachteten einzelnen Prozesse sowie des Gesamtprozesses bewertet werden. Dies erfolgt in Form einer Gewinnschwellenanalyse (Break-Even-Analyse). In der Gewinnschwellenanalyse wird im konkreten Fall diejenige kritische Menge jährlich zu behandelnder Batterien ermittelt, bei der die Fixkosten eines Prozesses bzw. des Gesamtprozesses gerade gedeckt sind. Ein Durchsatz unter der Gewinnschwelle führt zu Verlust (negatives Ergebnis), ein Durchsatz darüber führt zu einem Gewinn (positives Ergebnis). Der Durchsatz und die Gewinnschwelle beziehen sich auf die funktionelle Einheit [t Systeme]. Die berechneten Gewinnschwellen erlauben in Kombination mit Prognosen zum Altbatterieaufkommen, Aussagen über den Zeitpunkt zu treffen, ab dem ein Werk grundsätzlich wirtschaftlich betrieben werden kann. Dies wird jedoch durch einige Unsicherheiten und Ungenauigkeiten eingeschränkt:

- Die geschätzten **Fixkosten** der Prozesse beziehen sich auf Anlagen, für die entweder noch keine Baupläne vorhanden sind, oder die sich derzeit noch nicht in bestimmungsgemäßen Betrieb befinden. Die im Rahmen der frühzeitigen Grobschätzung angewandten Methoden basieren auf einer Reihe von Annahmen und Prämissen, die Genauigkeit der Ergebnisse befindet sich naturgemäß im Intervall von bis zu ± 30 Prozent.
- Die **funktionelle Einheit** des Batteriegemischs [t Systeme] stellt eine Vereinfachung dar; die stoffliche Zusammensetzung des Gemischs ist sehr spezifisch und kann im Einzelfall, insbesondere bei Betrachtung eines konkreten Batteriesystems, stark abweichen.
- Die geschätzten **Prozessdeckungsbeiträge** basieren größtenteils auf labortechnisch oder stöchiometrisch ermittelten Stoff- und Energieflüssen für wenige ausgewählte Batterietypen. Die hinterlegten Erlös- und Kostensätze stellen eine Momentaufnahme des Markts da, können in der Praxis stark streuen und unterliegen einer hohen Dynamik. Die

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

tatsächlichen Prozessdeckungsbeiträge können, wie bereits in der Sensitivitätsanalyse gezeigt, stark abweichen; innerhalb der untersuchten Szenarien bis zu ± 50 Prozent.

- Die **Statik und Linearität der Erlös- und Kostenstrukturen** in Bezug auf den Durchsatz ist eine vereinfachende Prämisse der Gewinnschwellenanalyse. In der Praxis ist beispielsweise mit sprungfixen Kosten, Größendegressionseffekten und Lernkurveneffekten bei steigendem Durchsatz zu rechnen. Im konkreten Fall ist die höchste Zuverlässigkeit der berechneten Gewinnschwellen bei einem Durchsatz im Bereich der genannten Kapazitätsintervalle der Werke zu sehen. Aus diesem Grund können die kleinen Demontage- und Mechanischen Aufbereitungswerke nicht direkt mit den Hydrometallurgischen Aufbereitungswerken verglichen werden.
- Das **Altbatterieaufkommen ist höchst unsicher** (vgl. **AP A.1**), so dass etwaige Zeitpunktbestimmungen nur unter Voraussetzung eines bestimmten Szenarios gelten.

Um diesen Unsicherheiten zu begegnen, wird die Gewinnschwellenanalyse zweistufig und szenariobasiert durchgeführt: **Im ersten Schritt** werden zur Ermittlung von durchsatzbezogenen Gewinnschwellen Szenarien bezüglich der Prozesse und der Zusammensetzung des Altbatterieaufkommens gebildet. Die Ergebnisse werden mittels in sich schlüssiger, aussagekräftiger und leicht verständlicher Gewinnschwellendiagramme dargestellt. **Im zweiten Schritt** werden die durchsatzbezogenen Gewinnschwellen zur Ermittlung von zeitpunktbezogenen Gewinnschwellen in Bezug zu den in **AP A.1** entwickelten Szenarien des Altbatterieaufkommens gesetzt.

E.4.4.1 Durchsatzbezogene Gewinnschwellen

Szenarien bezüglich der Prozesse

Einerseits leiten sich die Szenarien bezüglich der Prozesse aus den mit den Investitionsschätzungen verbunden Unsicherheiten ab. Sie repräsentieren ein (mittleres) Genauigkeitsintervall von 20 Prozent um die geschätzten Fixkosten der einzelnen Prozesse. Andererseits ergeben sie sich aus den unsicheren Prozessdeckungsbeiträgen. Hierzu wurde in der Sensitivitätsanalyse gezeigt, dass der Wertstofferlös wesentlichster Einflussfaktor der Prozessdeckungsbeiträge ist. Die Szenarien bilden entsprechend das Intervall der Prozessdeckungsbeiträge bei einer Variation des Wertstofferlöses um plus oder minus 20 Prozent ab.

Im **Referenzszenario** entsprechen sowohl Fixkosten als auch Prozessdeckungsbeiträge den oben dargelegten Referenzwerten. Im **negativen Extremszenario** („Worst-Case-Szenario“) sind die Fixkosten um 20 Prozent höher als im Referenzfall, die Prozessdeckungsbeiträge entsprechen dem Fall eines um 20 Prozent niedrigeren Wertstofferlöses. Im **positiven Extremszenario** („Best-Case-Szenario“) liegen die Fixkosten um 20 Prozent niedriger als im Referenzfall, die Prozessdeckungsbeiträge beziehen sich auf den Fall eines um 20 Prozent höheren Wertstofferlöses.

Szenarien bezüglich der Zusammensetzung des Altbatterieaufkommens

Die Szenarien bezüglich der Zusammensetzung des Altbatterieaufkommens sind in der unsicheren Markt- und Technologieentwicklung bezüglich der sich durchsetzenden Batterietypen begründet. Da die einzelnen Batterietypen zu unterschiedlichen Deckungsbeiträgen in der hydrometallurgischen Aufbereitung führen, ist die Zusammensetzung des Altbatterieaufkommens wesentlicher Einflussfaktor auf die Rentabilität des Recyclings. Betrachtet werden weiterhin ausschließlich NMC- und LFP-Batterietypen, jedoch in unterschiedlichem Verhält-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

nis. Neben den beiden Extremfällen (**ausschließlich NMC**- bzw. **ausschließlich LFP**-Systeme) wird zusätzlich das Szenario „**NMC80:LFP20**“ betrachtet, in welchem das Altbatterieaufkommen zu spezifisch 80 Prozent aus NMC-Systemen und 20 Prozent aus LFP-Systemen besteht.

Wirtschaftlichkeit einzelner Prozesse

Der Vergleich der Wirtschaftlichkeit einzelner Prozesse zeigt einen deutlichen Unterschied bezüglich der jeweiligen Gewinnschwelle. Im Referenzfall wird diese im **großen Demontagewerk** erst bei mehr als 6.700 [t Systeme/a] erreicht, während das **große Mechanische Aufbereitungswerk** bereits bei ca. 2.400 [t Systeme/a] rentabel wird. Die Rentabilität des **Hydrometallurgischen Aufbereitungswerks** hängt maßgeblich von der Zusammensetzung der verarbeiteten Altbatteriemasse ab. Bei der ausschließlichen Verarbeitung **von NMC-Systemen** wird die Gewinnschwelle bei 4.200 [t Systeme/a] erreicht. Ein **gemischtes Aufkommen** (NMC80:LFP20) führt zu einer Gewinnschwelle von 5.000 [t Systeme/a]. Werden jedoch nur **LFP-Systeme** verarbeitet, so liegt sie an der oberen Kapazitätsgrenze des Werks bei 16.400 [t Systeme/a].

Die Gewinnschwellen sämtlicher Einzelprozesse und des Gesamtprozesses in Abhängigkeit der Szenarien werden in Tabelle E-8 dargelegt. Es wird deutlich, dass einige Werke bzw. Prozesse unter ungünstigen Bedingungen (hohe Fixkosten, niedrige Deckungsbeiträge) nicht wirtschaftlich betrieben werden können, wenn die jeweilige theoretische Gewinnschwelle die Kapazität eines Werks übersteigt. Dies ist der Fall im kleinen Demontagewerk (3.300 [t Systeme/a]), im kleinen Mechanischen Aufbereitungswerk (4.000 [t Systeme/a]) und im Hydrometallurgischen Aufbereitungswerk bei überwiegender oder ausschließlicher Verarbeitung von LFP-Systemen (40.300 [t Systeme/a]). Abbildung E-14 verdeutlicht den starken Einfluss der Zusammensetzung des Altbatterieaufkommens auf die Wirtschaftlichkeit des Hydrometallurgischen Prozesses.

Tabelle E-8: Durchsatzbezogene Gewinnschwellen aller Einzelprozesse und des Gesamtprozesses

Prozess	**Gewinnschwelle [t Systeme/a]**		
	Referenz-szenario	Negatives Extrem-szenario	Positives Extrem-szenario
Demontagewerk, groß	6.700	15.500	3.600
Mechanisches Aufbereitungswerk, groß	2.400	4.100	1.500
Hydrom. Aufbereitungswerk, NMC	4.200	7.200	2.600
Hydrom. Aufbereitungswerk, LFP	16.400	40.300	8.700
Hydrom. Aufbereitungswerk, NMC80:LFP20	5.000	8.700	3.000
Gesamtprozess (groß), NMC	4.100	7.400	2.500
Gesamtprozess (groß), LFP	6.800	13.400	3.900
Gesamtprozess (groß), NMC80:LFP20	4.500	8.100	2.700
Demontagewerk, klein	1.400	3.300	800
Mechanisches Aufbereitungswerk, klein	1.700	4.000	900

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

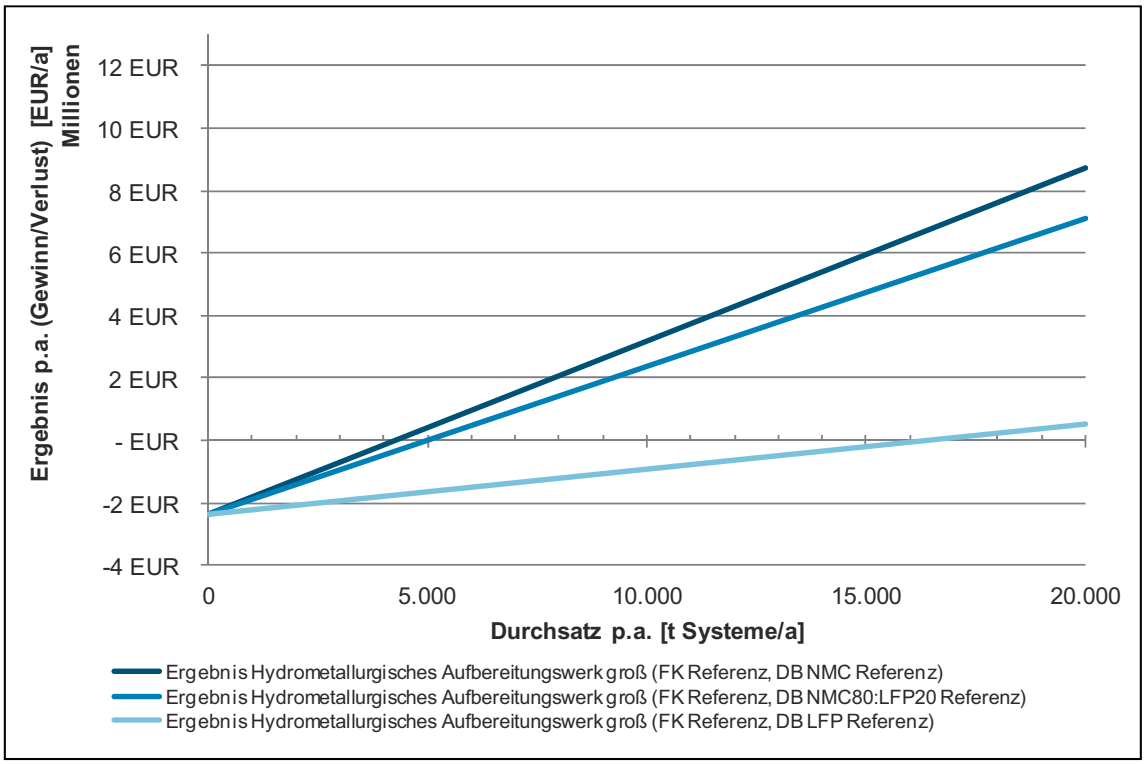


Abbildung E-14: Gewinnschwellendiagramm für Hydrometallurgische Aufbereitung bei unterschiedlicher Zusammensetzung des Altbatterieaufkommens

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Gesamtprozess-Wirtschaftlichkeit für NMC-Systeme: Referenzszenario im Vergleich zum positiven und negativen Extremszenario

Abbildung E-15 zeigt die absoluten Ergebnisverläufe (Gesamtergebnis) sowie die durchschnittlichen Ergebnisverläufe (Ergebnis pro Tonne Batteriesysteme) in Abhängigkeit vom jährlichen Durchsatz bei ausschließlicher Verarbeitung von NMC-Systemen.

Im **Referenzszenario** wird die Gewinnschwelle bei ca. 4.100 [t Systeme/a] erreicht. Der theoretische Gewinn bei 15.000 [t Systemen/a] beträgt 11,5 Mio. EUR (767 [EUR/t Systeme]).

Im **negativen Extremszenario** (hohe Fixkosten, niedrige Deckungsbeiträge) wird die Gewinnschwelle wird erst bei 7.400 [t Systeme/a] erreicht. Der theoretische Gewinn bei 15.000 [t Systeme/a] beträgt 5,4 Mio. EUR (363 [EUR/t Systeme]).

Im **positiven Extremfall** (niedrige Fixkosten, hohe Deckungsbeiträge) wird die Gewinnschwelle bereits bei 2.500 [t Systeme/a] erreicht. Der theoretische Gewinn bei 15.000 [t Systeme/a] beträgt 17,6 Mio. EUR (1.171 [EUR/t Systeme]).

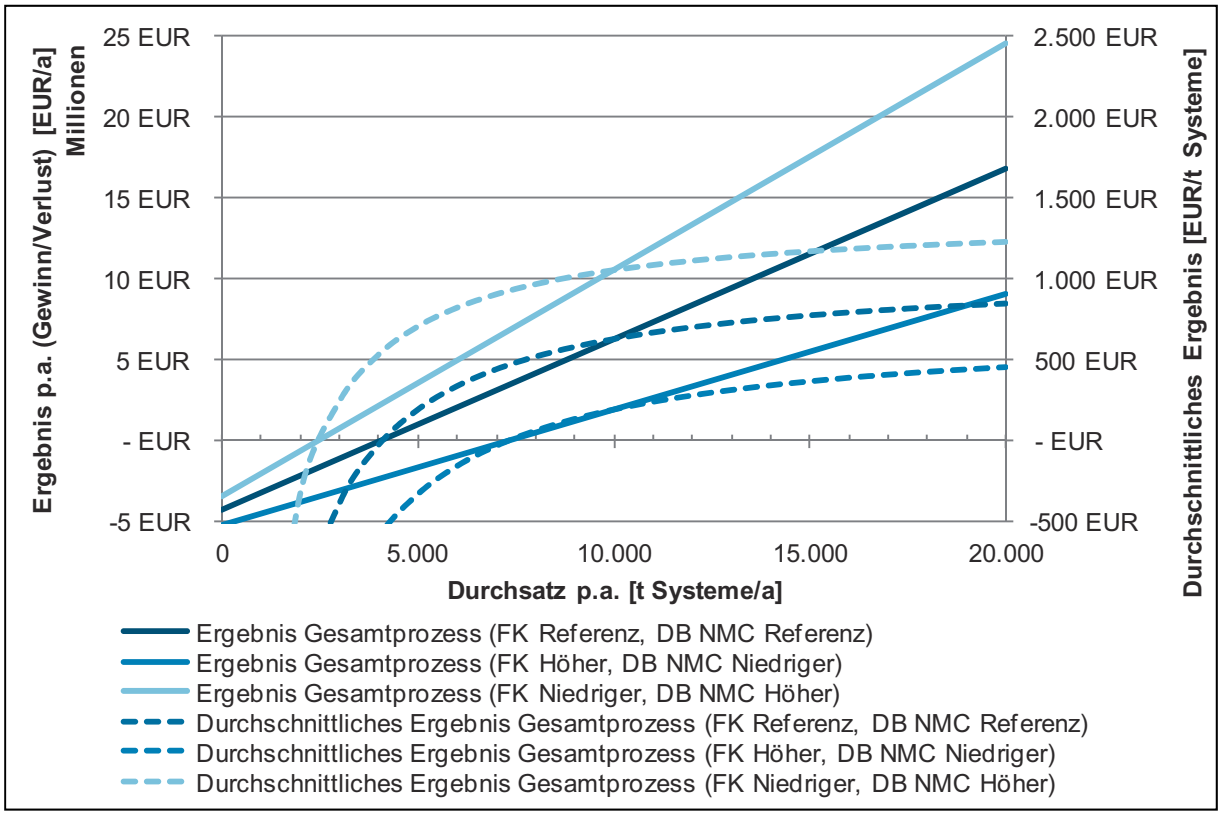


Abbildung E-15: Gewinnschwellendiagramm des Gesamtprozesses für NMC-Systeme

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Gesamtprozess-Wirtschaftlichkeit für LFP-Systeme: Referenzszenario im Vergleich zum positiven und negativen Extremszenario

Abbildung E-16 zeigt die Ergebnisverläufe in Abhängigkeit vom jährlichen Durchsatz bei ausschließlicher Verarbeitung von LFP-Systemen.

Im **Referenzszenario** wird die Gewinnschwelle bei ca. 6.800 [t Systeme/a] erreicht. Der theoretische Gewinn bei 15.000 [t Systemen/a] beträgt 5,3 Mio. EUR (355 [EUR/t Systeme]).

Im **negativen Extremszenario** (hohe Fixkosten, niedrige Deckungsbeiträge) wird die Gewinnschwelle erst bei 13.800 [t Systeme/a] erreicht. Der theoretische Gewinn bei 15.000 [t Systeme/a] beträgt lediglich 0,6 Mio. EUR (43 [EUR/t Systeme]).

Im **positiven Extremszenario** (niedrige Fixkosten, hohe Deckungsbeiträge) wird die Gewinnschwelle bei 3.900 [t Systeme/a] erreicht. Der theoretische Gewinn bei 15.000 [t Systeme/a] beträgt 10,0 Mio. EUR (668 [EUR/t Systeme]).

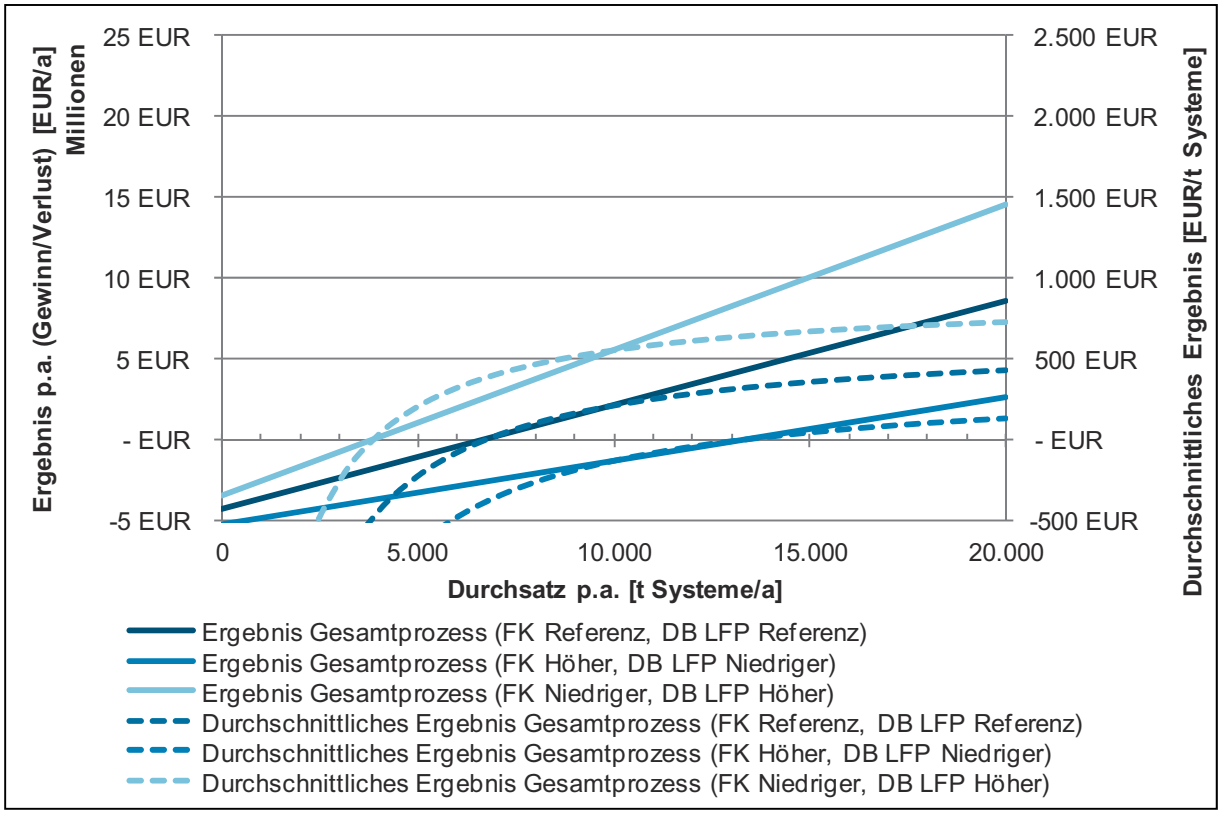


Abbildung E-16: Gewinnschwellendiagramm des Gesamtprozesses für LFP-Systeme

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Gesamtprozess-Wirtschaftlichkeit für gemischtes Aufkommen: Referenzszenario im Vergleich zum positiven und negativen Extremszenario

Abbildung E-17 zeigt die Ergebnisverläufe in Abhängigkeit vom jährlichen Durchsatz bei Verarbeitung eines Aufkommens, das zu 80 Prozent (spezifisch) aus NMC-Systemen und zu 20 Prozent aus LFP-Systemen besteht (NMC80:LFP20).

Im **Referenzszenario** wird die Gewinnschwelle bei ca. 4.500 [t Systeme/a] erreicht. Der theoretische Gewinn bei 15.000 [t Systemen/a] beträgt 10,3 Mio. EUR (685 [EUR/t Systeme]).

Im **negativen Extremszenario** (hohe Fixkosten, niedrige Deckungsbeiträge) wird die Gewinnschwelle bei 8.100 [t Systeme/a] erreicht. Der theoretische Gewinn bei 15.000 [t Systeme/a] beträgt 4,5 Mio. EUR (300 [EUR/t Systeme]).

Im **positiven Extremszenario** (niedrige Fixkosten, hohe Deckungsbeiträge) wird die Gewinnschwelle bei 2.700 [t Systeme/a] erreicht. Der theoretische Gewinn bei 15.000 [t Systeme/a] beträgt 16,1 Mio. EUR (1.070 [EUR/t Systeme]).

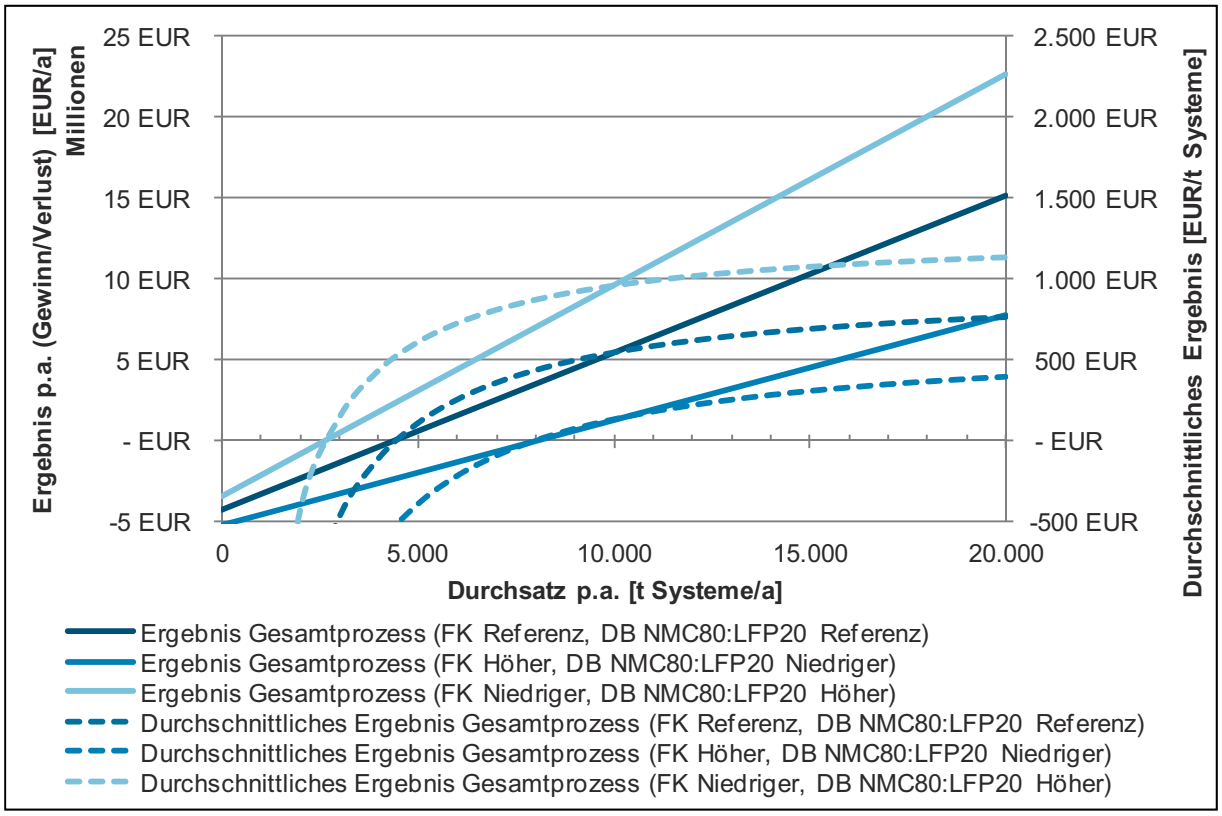


Abbildung E-17: Gewinnschwellendiagramm des Gesamtprozesses für gemischtes Aufkommen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Gesamtprozess-Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit von der Zusammensetzung

Das jährliche Ergebnis in Abhängigkeit von Durchsatz und Zusammensetzung des Altbatterieaufkommens stellt Abbildung E-18 für das Referenzszenario bezüglich Fixkosten und Deckungsbeiträge dar. Auf der Ordinatenachse ist der spezifische Anteil von LFP-Systemen, auf der Abszisse ist der jährliche Durchsatz in [t Systeme/a] abgetragen. Das jährliche Ergebnis (Gewinn/Verlust) des Gesamtprozesses ist in fünf unterschiedlich schattierte Intervalle eingeteilt.

Mithilfe des Diagramms lässt sich die durchsatz- und zusammensetzungsbezogene Gewinnschwelle ablesen (Übergang der hellgrau-schattierten zur blaugrau-schattierten Fläche). Bei einer Zusammensetzung von 80 Prozent LFP-Systemen (20 Prozent NMC) ergibt sich beispielsweise die Gewinnschwelle von 6.000 [t Systeme/a]. Umgekehrt lässt sich ablesen, wie hoch der Anteil LFP-Systeme sein darf, um bei gegebenem Durchsatz noch ein positives Ergebnis zu erzielen. Um das Recycling beispielsweise bei einem angenommenen Durchsatz von jährlich 5.000 Systemen noch rentabel betreiben zu können, darf der Anteil von LFP-Systemen höchstens ~42 Prozent betragen.

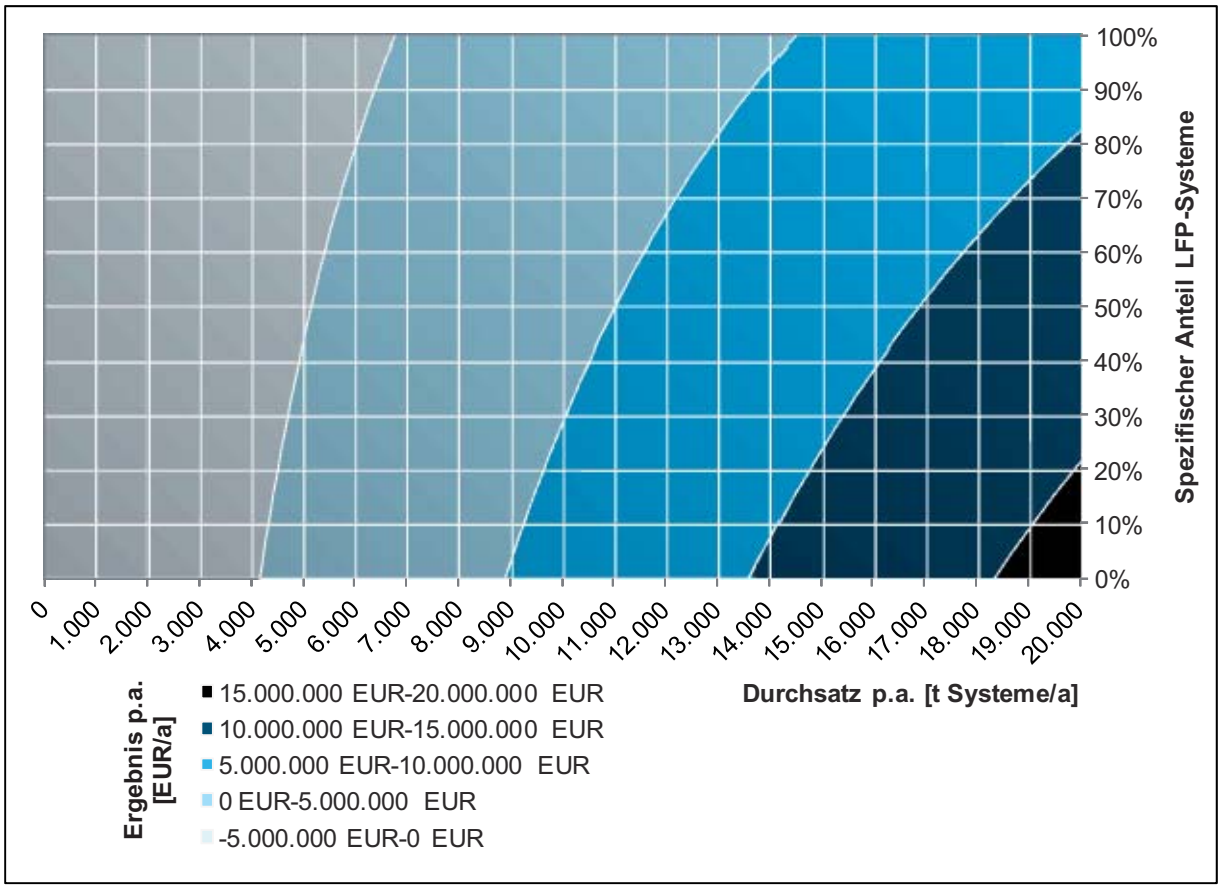


Abbildung E-18: Jährliches Ergebnis in Abhängigkeit von Durchsatz und Zusammensetzung des Altbatterieaufkommens

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Vergleich der Szenarien

Der Vergleich der Szenarien zeigt erhebliche Unterschiede bezüglich der Gewinnschwellen. So werden im negativen Extremszenario zwischen 3-mal (nur NMC) und 3,5-mal (nur LFP) so viele Batterien wie im positiven Referenzszenario zur Kostendeckung benötigt (siehe Abbildung E-19). Dieser Effekt ist umso stärker, je höher der spezifische Anteil der LFP-Systeme ist.

Analog zu der Einzelprozessbetrachtung wird deutlich, dass die Gewinnschwellen des Gesamtprozesses stark von der Zusammensetzung des Altbatterieaufkommens abhängen. Die Gewinnschwelle steigt dabei überproportional mit der Steigerung des Anteils an LFP-Systemen. Bei ausschließlicher Verarbeitung von LFP-Systemen beträgt die Gewinnschwelle im Referenzfall 6.800 [t Systeme/a], im Fall von NMC-Systemen beträgt sie 4.100 [t Systeme/a]. Zur Erreichung der Gewinnschwellen werden also gut zwei Drittel mehr LFP-Systeme benötigt als im Fall von NMC-Systemen.

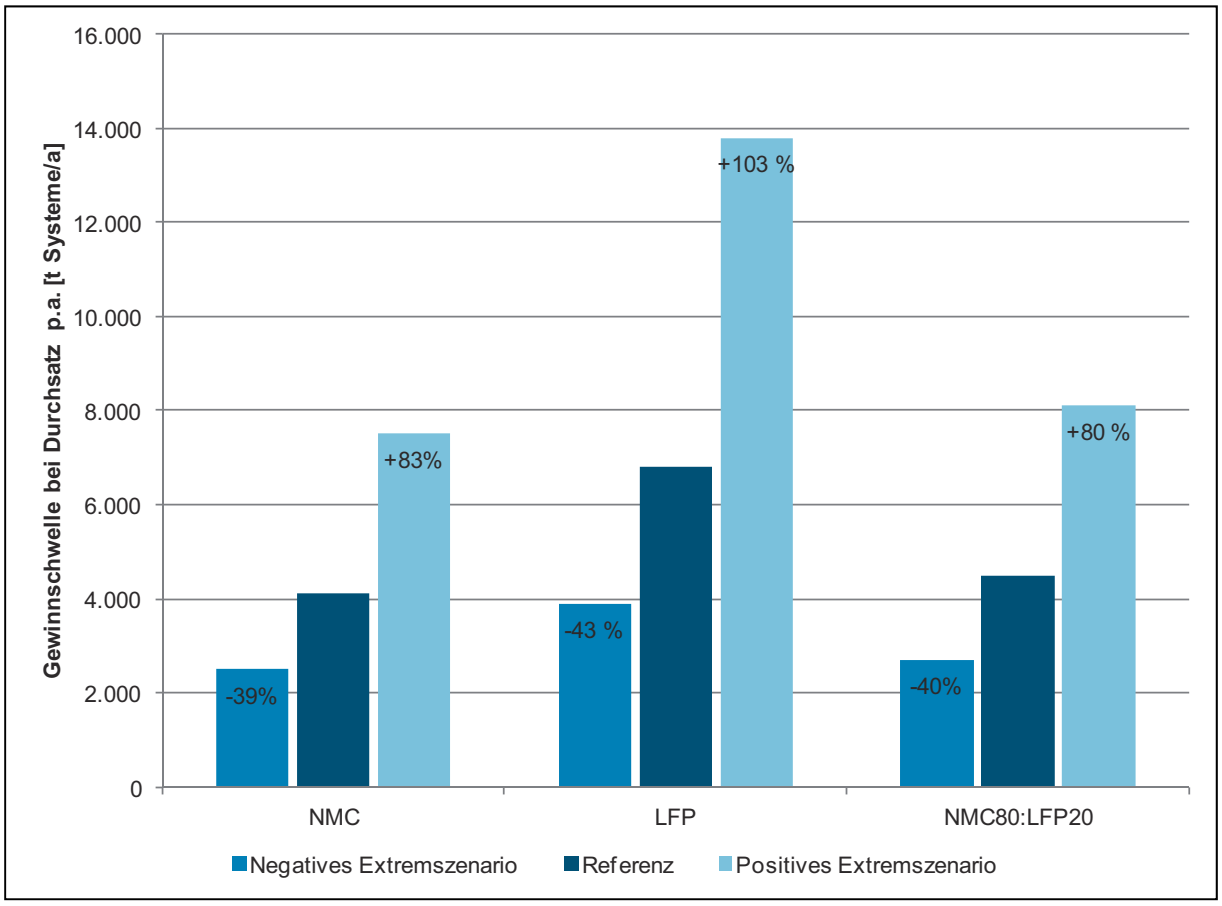


Abbildung E-19: Gewinnschwellen in Abhängigkeit der Szenarien und prozentuale Abweichung der Extremszenarien vom Referenzszenario

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

E.4.4.2 Zeitbezogene Gewinnschwellen

In Abbildung E-20 sowie Abbildung E-21 sind die Gewinnschwellen der Einzelprozesse respektive der Gesamtprozesse in Abhängigkeit der Szenarien zum Altbatterieaufkommen mittels Blockdiagrammen dargestellt. Sie stellen grafisch dar, **zu welchem Zeitpunkt ein Prozess** im besten Fall (schraffierter Balken), im Referenzfall (grauer Balken) und im schlechtesten Fall (schwarzer Balken) jeweils **frühestens rentabel wird**. Trifft dies für einen Prozess in zwei Fällen zum gleichen Zeitpunkt zu (z. B. Demontagewerk klein im Politischen Szenario: positiver Extremfall und Referenzfall 2017), so entfällt die Darstellung des optimistischeren Falls. Die Breite eines zusammengesetzten Balkens verdeutlicht die mit dem Prozess verbundene **Unsicherheit** der zeitbezogenen Gewinnschwelle. Breite Balken bedeuten eine große zeitliche Abweichung der Erreichung von Gewinnschwellen zwischen positivem und negativem Extremfall. Die szenariobezogenen Unterschiede in Position und Breite der Balken eines Prozesses sind ein Indikator für die Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit des Prozesses von dem Aufkommen.

Es wird deutlich, dass bei Eintritt des Szenarios „**Politisch**“ die Gewinnschwelle jedes Prozesses zum frühesten Zeitpunkt und mit größter Sicherheit eintritt. Im Szenario „**Realistisch**“ werden die Gewinnschwellen dagegen zum spätesten Zeitpunkt erreicht, jedoch mit geringerer Unsicherheit als im Szenario „**Pessimistisch**“. Im letzteren Szenario ist die Unsicherheit bezüglich des Zeitpunkts am größten. Beispielsweise beträgt die Zeitspanne der Erreichung der Gewinnschwelle zwischen günstigstem und ungünstigstem Fall im Szenario „Politisch“ im **großen Demontagewerk** 3 Jahre, frühestens ist die Gewinnschwelle 2018 erreicht. Im Szenario „Pessimistisch“ ist sie aufgrund der geringeren Dynamik und des niedrigeren Niveaus des Altbatterieaufkommens frühestens 2020 und spätestens 2028 erreicht, die Spanne beträgt also 8 Jahre. Die Gewinnschwellen der **kleinen Demontagewerke** werden dagegen deutlich früher und in allen Szenarien mit geringerer Unsicherheit eintreten. Anders verhält es sich im Fall der kleinen und großen **Aufbereitungswerke**, hier sind nur geringfügige Unterschiede zu erkennen. Für den **Hydrometallurgischen Aufbereitungsprozess** wird deutlich, dass die Gewinnschwelle bei ausschließlicher Verarbeitung von LFP während des betrachteten Zeitraums nur im positiven Extremszenario und im Referenzszenario, nicht jedoch im negativen Extremszenario erreicht wird.

Die Wirtschaftlichkeit des **Gesamtprozesses** wird in allen Szenarien erreicht. Sowohl bei ausschließlicher Verarbeitung von NMC als auch bei gemischter Verarbeitung von NMC und LFP ist dies bei Eintritt des Szenarios „**Politisch**“ bereits 2018, spätestens 2019 der Fall. Im Szenario „**Pessimistisch**“ streut der Zeitpunkt stark zwischen 2019 und 2023 mit geringfügig höherer Unsicherheit im Fall von NMC80:LFP20. Im Szenario „**Realistisch**“ wird der Gesamtprozess frühestens 2023 und spätestens 2026 rentabel. Wird nur LFP verarbeitet, wird die Gewinnschwelle im Referenzfall jeweils um ein bis 2 Jahre später erreicht, im negativen Extremszenario zwischen 2 (Szenario „Politisch“ und Realistisch“) und 4 Jahren später (Szenario „Pessimistisch“).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

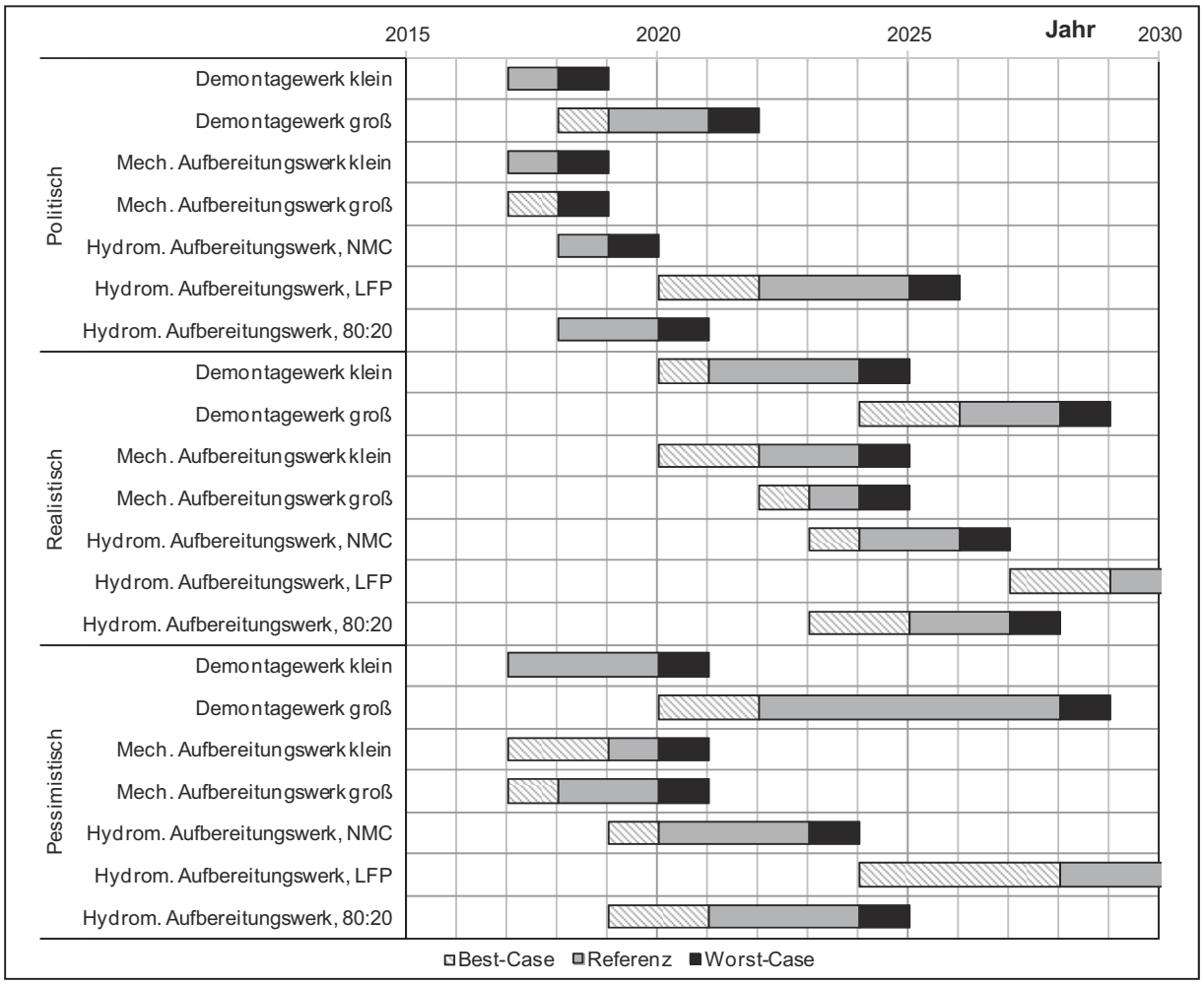


Abbildung E-20: Zeitbezogene Gewinnschwellen der Einzelprozesse in Abhängigkeit der Szenarien zum Altbatterieaufkommen

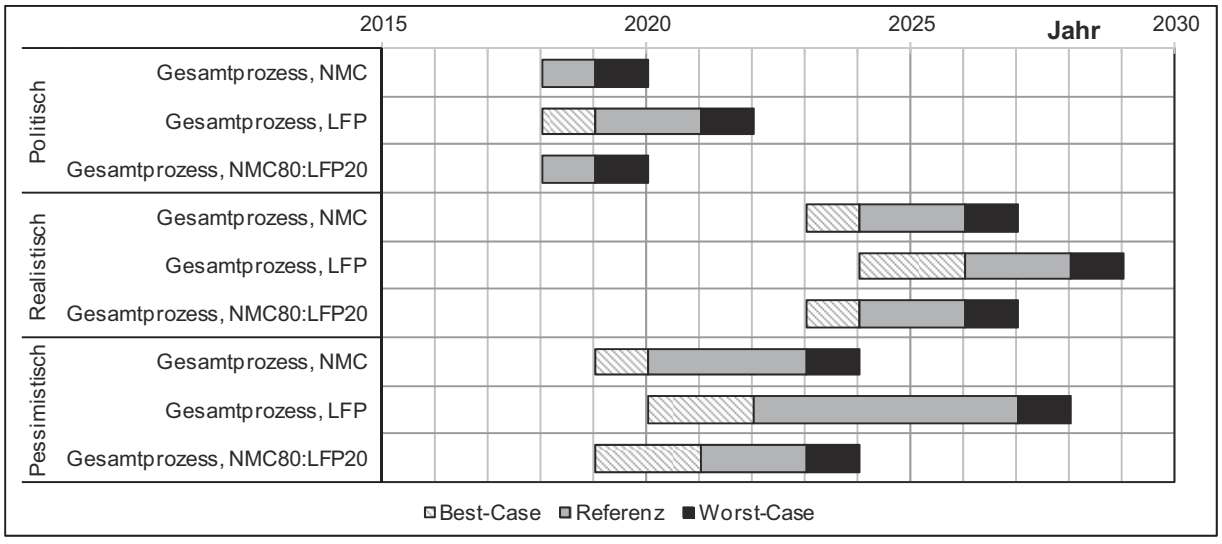


Abbildung E-21: Zeitbezogene Gewinnschwellen der Gesamtprozesse in Abhängigkeit der Szenarien zum Altbatterieaufkommen

E.4.5 Zusammenfassung

Die ökonomische Bewertung zeigt, dass der LithoRec-Recyclingprozess für Lithium-Ionen-Traktionsbatterien ab einem jährlichen Aufkommen von ca. 4.500 t Systemen bzw.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

15.000 BEV-Systemen unter den dargelegten Prämissen und Annahmen wirtschaftlich betrieben werden könnte.[26] Ein solches Aufkommen wäre bei starker Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen und Erreichung der Ziele des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität zwischen 2018 und 2020 erreicht.

Die ökonomische Bewertung setzt voraus, dass sämtliche Prozesse innerhalb eines einzelnen Unternehmens oder innerhalb einer perfekt kooperierenden Supply-Chain mehrerer Unternehmen betrieben werden, bei der Risiko, Gewinne und Verluste untereinander verteilt werden. Werden die einzelnen Prozesse von konkurrierend agierenden Akteuren betrieben, würden beispielsweise in der Demontage erwirkte Überschüsse kaum zur Deckung von Fixkosten in der Mechanischen Aufbereitung verwendet. Desweiteren würden die einzelnen Akteure versuchen, in vorausgehenden oder nachfolgenden Prozessen entstehende Gewinne über ihre Preispolitik abzuschöpfen. 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). Desweiteren ist neben der Menge des Altbatterieaufkommens dessen Zusammensetzung wesentlicher Treiber eines sich finanziell selbst tragenden Recyclingprozesses. Werden zukünftig vorwiegend Lithiumeisenphosphatbatterien in Elektrofahrzeugen verwendet, wird die Gewinnschwelle des Gesamtprozesses erst bei ca. 6.800 t Systeme bzw. 21.000 BEV-Systeme erreicht. Der Hydrometallurgische Prozess würde unter Umständen generell unrentabel.[27]

Auch die kleinen Demontagewerke und kleinen Mechanischen Aufbereitungswerke können unter ungünstigen Bedingungen nicht wirtschaftlich betrieben werden. Es zeigt sich jedoch, dass die Investition in kleine Demontagewerke mit geringerem Risiko verbunden ist. Aufgrund nur moderater Skaleneffekte bezüglich der Fixkosten erscheint die zeitgestaffelte Errichtung mehrerer kleiner Demontagewerke gegenüber der frühzeitigen Errichtung eines großen Demontagewerks finanziell vorteilhaft. Dies wurde auch in **AP A.3** nachgewiesen. Offen bleibt jedoch, ob dies auch für die mechanischen Aufbereitungswerke gilt, die aufgrund des höheren Automatisierungsgrads extreme Skaleneffekte aufweisen.

Bereits in einem frühen Stadium des Projekts wurde erkannt, dass die manuell-sortierende Separation von Zellen unter den gegebenen Bedingungen nicht nur kostspielig, sondern auch tendenziell mit hohen Gefahren für das Personal verbunden ist. Eine automatisch-sortierende Separation scheint dagegen aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Zellkonstruktionsformen – insbesondere wegen fehlender Standards – technisch nicht machbar. Entsprechend wurde der Fokus in der ökonomischen Bewertung auf die mechanisch-zerstörende Separation gelegt, für die bereits ein Grobkonzept erarbeitet wurde. Vor dem Hintergrund fehlender Tests der Mechanischen Aufbereitung hinsichtlich der tatsächlich erzielbaren Recyclingeffizienz, der Reinheit einiger gewonnener Wertstoffe und möglicherweise weiterer rückgewinnbarer Wertstoffe sind die errechneten Prozessdeckungsbeiträge bislang unzureichend fundiert, um allgemeingültige Aussagen ableiten zu können. Eine weitere technische und ökonomische Untersuchung wird dringend empfohlen, da von der Effektivität und Effizienz der Mechanischen Aufbereitung die Durchführbarkeit des gesamten LithoRec-Prozesses abhängt.

[26] Im Referenzfall bei gemischtem Aufkommen NMC80:LFP20.

[27] Im negativen Extremfall mit hohen Fixkosten und niedrigem Prozessdeckungsbeitrag.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die statische Bewertung der Einzelprozesse und der Gesamtprozesse lässt vor dem Hintergrund des unsicheren und gegebenenfalls dynamischen Altbatterieaufkommens keine unmittelbaren Empfehlungen zu, zu welchen Zeitpunkten in die einzelnen Prozesse investiert werden sollte. Vertiefend ist dies mit Hilfe dynamischer Bewertungsmethoden (z. B. Kapitalwertmethode) zu untersuchen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

F Entwicklung von demontagefreundlichen Batteriesystemen und lebenszyklusorientierten Sicherheitskonzepten

Im **PB F** liegt der Schwerpunkt der Untersuchung auf dem konstruktiven Aufbau einer Batterie, sowie den Hilfsmitteln die die Beschreibung dieses Aufbaus unterstützen.

Als Grundlage dienen Batterien, die durch die Projektpartner während der Projektlaufzeit bereitgestellt wurden. Anhand der Untersuchungen dieser Batterien in **AS F.1** werden beispielhafte Demontagesequenzen aufgenommen und mit Hilfe eines Softwaretools strukturiert. Die hieraus entstehenden Ergebnisse sind Teil von **PB B** und dort genauer erläutert.

Basierend auf den Demontageuntersuchungen ist im nächsten Schritt **AS F.2** der Versuch unternommen worden, Charakteristika zu identifizieren, die Vergleiche ermöglichen, bzw. die Bildung von Kenngrößen erlauben.

In **AS F.3** werden Gestaltungsrichtlinien aufgestellt, die eine demontagefreundliche Entwicklung von Batterien begünstigen sollen. Ausgehend von den Anforderungen der Interaktion zwischen dem Menschen und der Batterie sowie allgemeinen konstruktiven Betrachtungen zur Demontage werden Regeln (z.B. Demontage, Sicherheitsaspekte) abgeleitet. Abschließend werden mit Hilfe dieser Regeln exemplarisch Batteriemodule aufgebaut, die jeweils eine Auswahl der aufgestellten Regeln abdecken.

Als weitere Einflussgröße werden in **AS F.4** die Fahrzeugbauräume für die Integration der Batterie genauer betrachtet. Diese bilden mit den Regeln zum allgemeinen Aufbau einer Batterie die Grundlage für die Umsetzung in CAD. Dafür werden Anforderungen definiert, die durch das CAD-Tool mit der Interaktion von Konstruktionstabellen zu erreichen sind. Die tatsächliche Umsetzung ist im Rahmen des Projektes nur prototypenhaft erfolgt. Desweiteren wurden in **AS F.4** für die schnelle Bereitstellung von Wissen Kataloge (z. B.: Verbindungstechniken, Formen der Wärmeübertragung) aufgestellt.

Neben dem Aufbau von Batterien spielt bei der Handhabung und der Demontage die Sicherheit eine wichtige Rolle. In **AS F.5** werden Konzepte genauer betrachtet, wie die Sicherheit erhöht werden kann.

Der **AS F.6** beinhaltet Vorschläge der Umsetzung, wie Informationen der Batterie in Form eines Recyclingpasses sowie im Informationssystem IDIS hinterlegt werden können.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

F.1 Entwicklung eines Werkzeuges für integrierte Recycling- und Umweltbewertung von Batteriesystemen

Ziel des **AS F.1** ist die Konzeption und prototypische Umsetzung eines Hilfsmittels zur integrierten Produktbewertung hinsichtlich der Demontagefreundlichkeit, Recyclingeffizienz und Umweltwirkung in der Entsorgung von Batteriesystemen. Grundlage ist das Software-Tool ProdTect, das nachfolgend kurz vorgestellt wird.

ProdTect – eine gemeinschaftliche Entwicklung des IWF-TUBS und des KERP Kompetenzzentrums Elektronik und Umwelt - ist eine Produktanalyse- und -bewertungssoftware, die es erlaubt, auf Basis eines Produktmodells durch Verknüpfung mit einer Datenbank mit Fraktions- und Prozessdaten Demontagesequenzen und -zeiten, erzielbare Recyclingeffizienzen sowie entstehende Fraktionen auf Materialebene unter verschiedenen Rahmenszenarien zu berechnen [HERRMANN 2005]. Die bisher vorrangig zur Bewertung von Elektro(nik)geräten eingesetzte Software wurde in den vergangenen Jahren u.a. durch IWF-TUBS für die Anwendung im Automobilbereich erweitert [RABITSCH 2005], [RABITSCH 2006], [RABITSCH 2007], [FRAD 2009]. Durch die Integration der Software in das Projekt LithoRec sollen die grundlegenden Modellierungs- und Bewertungsmethoden hinsichtlich der expliziten Anforderungen aus dem Batterierecycling erweitert werden.

Auf Basis der von IWF-TUBS durchgeführten Produktanalyse des Batteriesystems von I+ME wurde ein erstes ProdTect-Produktmodell eines Lithium-Ionen-Batteriesystems erstellt. Dabei handelt es sich um ein parametrisches Modell, das aus allen benötigten Daten für die Demontage- und Recyclingbewertung besteht. Hierzu zählen Angaben über die eingesetzten Bauteile, die Verbindungstechniken und die Produktstruktur (Vorrangbeziehungen). Diese Daten wurden in der Testdemontage ermittelt. Abbildung F-1 zeigt den schematischen Aufbau der Modelleingabe in ProdTect anhand des Beispiels des von I+ME zur Verfügung gestellten Batteriesystems.

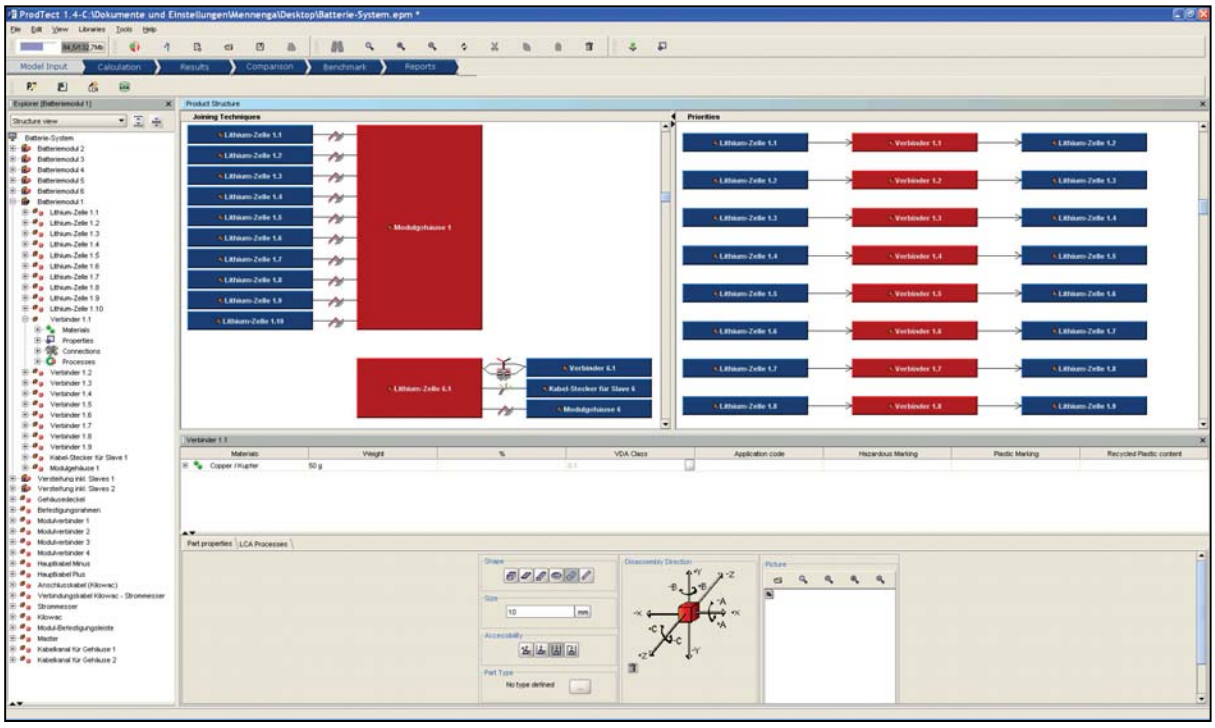


Abbildung F-1: Modelleingabe bei ProdTect am Beispiel Li-Ionen Batterie

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die Modelleingabe gliedert sich in drei Teilbereiche:

- Bauteilinformationen (linke Leiste und rechtes unteres Fenster) beinhalten die Material- und Geometriedaten des Batteriesystems, d.h. die Materialzusammensetzung von Bauteilen sowie die grobe Form, Abmessungen und die relative Positionierung und Zugänglichkeit eines Bauteils.
- Verbindungstechniken (oberes zentrales Fenster) umfassen Konstruktionselemente oder Maßnahmen, die die verschiedenen Bauteile / Baugruppen des Batteriesystems miteinander verbinden. Die Konstruktionselemente umfassen physikalische Verbindungstechniken wie Schrauben, Nieten oder Schweißpunkte.
- Vorrangbeziehungen (oberes rechtes Fenster) beschreiben die Hierarchie der zusammenhängenden Bauteile des Batteriesystems. Diese sind bei der Demontage zu beachten, um einzelne Bauteile zu separieren.

Im Projektzeitraum wurde die Software ProdTect an die spezifischen Gegebenheiten des Batterierecyclings angepasst. Hierzu wurden in den existierenden Datenbanken u.a. neue Bauteile und Recyclingprozesse angelegt. Abbildung F-2 zeigt die Erweiterung der Recyclingprozessdatenbank in ProdTect um den in LithoRec zu entwickelnden Recyclingprozess für Lithium-Zellen. Hierbei wurden allgemeine Informationen zum Recyclingprozess integriert sowie erreichbare Recyclingquoten und ggf. erforderliche Inputrestriktionen hinterlegt.

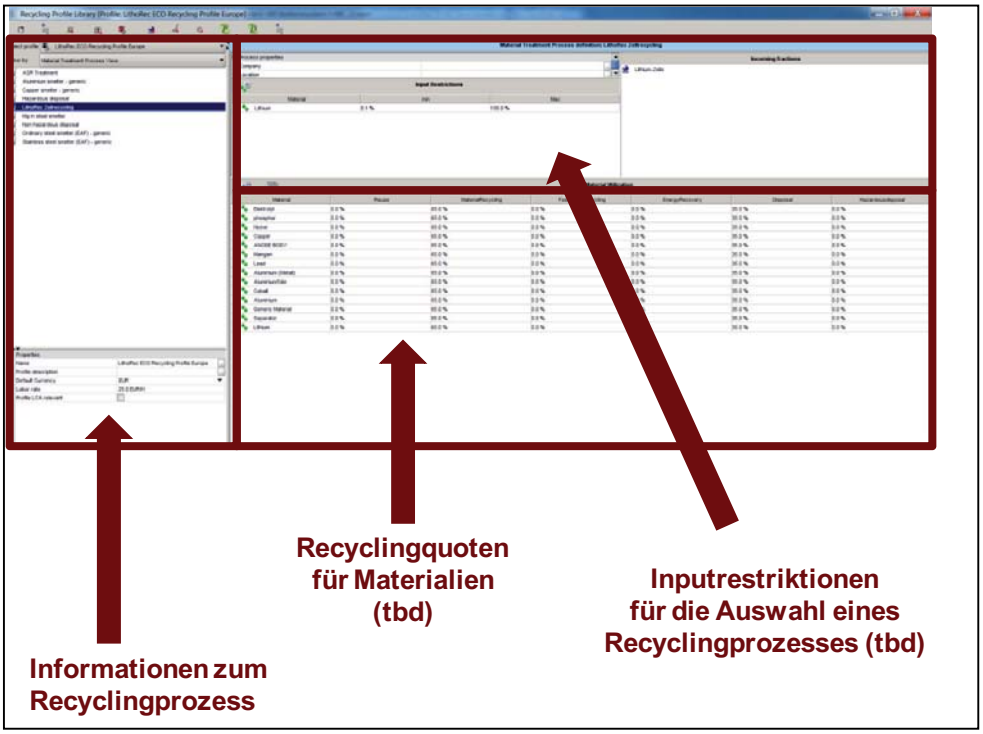


Abbildung F-2: Erweiterung der Recyclingdatenbank in ProdTect

Weiterhin besteht die Möglichkeit, neue Werkzeuge zur Reduzierung von Demontagezeiten in die Datenbanken zu integrieren. Da dies in Abhängigkeit der konkreten Batteriesysteme geschehen muss, die im Projektzeitraum nicht vorlagen, wurden hier keine weiteren Modifikationen vorgenommen. Dies muss in Abhängigkeit von PKW Serienbatterien geschehen.

Auf Basis der von IWF-TUBS durchgeführten Produktanalyse wurde je ein ProdTect-Produktmodell der bereitgestellten Lithium-Ionen-Batteriesysteme erstellt. Dabei handelt es sich um parametrische Modelle, die aus benötigten Daten für die Demontage- und Recyc-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

lingbewertung bestehen. Hierzu zählen Angaben über die eingesetzten Bauteile, die Verbindungstechniken und die Produktstruktur (Vorrangbeziehungen). Die erforderlichen Eingangsdaten wurden in den Testdemontagen ermittelt und durch Materialdaten ergänzt.

Spezielle Anforderungen zum Recycling von Elektronikkomponenten sind gesetzlich gefordert (Batterieverordnung) oder ergänzend in unterschiedlichen Normen vorgegeben (VW 91100, 91102 und 91103, SN36350-1, VDA 260 u. ä.). Die Sicherstellung von mindestens einem Kommunikationszugang zur Batterie und die Verwendung von Standard-Batteriemanagementsystemen sind I+ME interne Grundsätze zur Bereitstellung von Batterieinformationen.

Für Serienbatterien wird die Bewertung nach ISO 22628 empfohlen, um Lifecycle-, Umwelt- und Recyclingfähigkeit entsprechend zu analysieren und zu einzuordnen. Abbildung F-3 veranschaulicht die Ergebnisdarstellung.

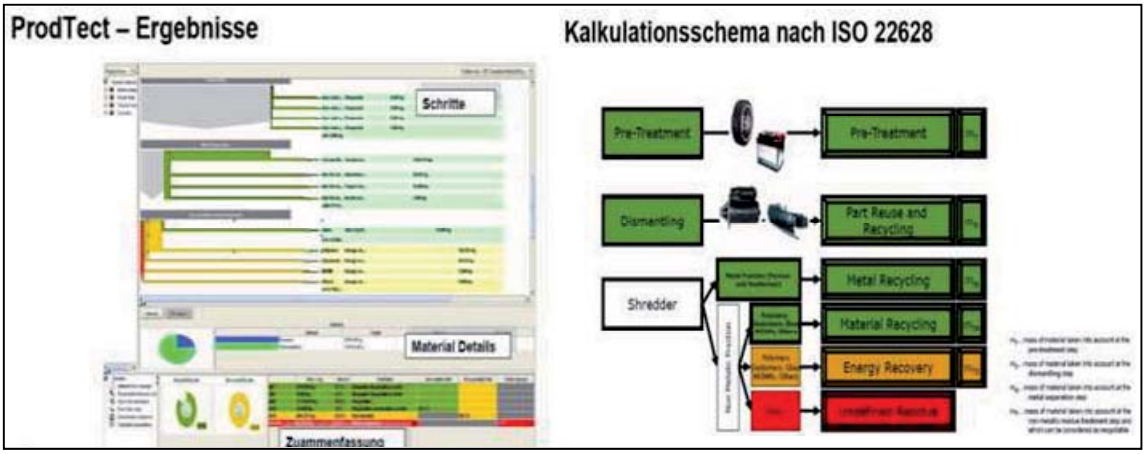


Abbildung F-3: ProdTect Ergebnis-Visualisierung

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

F.2 Charakteristische Demontage, Recyclingkenngrößen und demontagefreundliches Elektrodendesign

F.2.1 Ermittlung einer charakteristischen Demontage und Bestimmung von Recyclingkenngrößen für repräsentative Batteriebaukonzepte

Ziel des **AS F.2** ist die Ermittlung charakteristischer Kenngrößen für unterschiedliche Batteriekonzepte hinsichtlich Demontage und Recycling. Als Basis dient die sinnvolle Aufteilung unterschiedlicher im Umlauf befindlicher Batteriekonzepte. Von IK-TUBS wurden dazu notwendige Recherchen bezüglich des Aufbaus vorhandener Batteriesysteme und der eingesetzten Verbindungstechniken durchgeführt. Die ermittelten Daten wurden in Form von Konstruktions- bzw. Lösungskatalogen systematisch aufbereitet und zusammengestellt. Diese Kataloge sind angelehnt an [DIN 8593]. Auf die Kataloge wird in **AS F.4** genauer eingegangen.

Derzeit existieren keine repräsentativen, standardisierten Batteriebaukonzepte sondern lediglich konzeptionelle Einzellösungen. Insbesondere mangelt es an notwendigen Standardisierungen hinsichtlich Zellform und -größe, Zellanschlüsse sowie Zellverbindungstechnologien. Demontagezeiten und optimale Demontagetiefen wurden daher exemplarisch für die zur Verfügung gestellten Batteriesysteme bestimmt. Dies erfolgte unter der Bedingung, dass Lithium-Zellen demontiert werden und den in *LithoRec* zu entwickelnden Recyclingprozess durchlaufen. Die sich hieraus ergebenden Demontagezeiten für die Demontage aller Lithium-Zellen bei unterschiedlichen Batteriesystemen kann den Ergebnissen aus **AS B.1.1** entnommen werden. Die Demontagesequenzen wurden in Form von Demontagevorranggraphen beschrieben. Hieraus wurden die in **AS B.1.6** vorgestellten Anforderungen an die demontagefreundliche Gestaltung von Batteriesystemen abgeleitet. Diese bilden die Grundlage zur Erarbeitung konzeptioneller Vorschläge für ein Neudesign von Lithium-Ionen Batteriesystemen durch IK-TUBS.

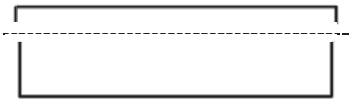
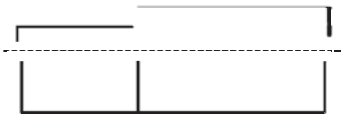
Mit Hilfe der in **AP B.1** durchgeführten Produktanalyse der Batteriesysteme der Projektpartner I+ME und Audi, lassen sich allgemeine Demontageschritte ableiten. Diese Schritte bilden einen grundlegenden Rahmen, der über anbieterspezifische Komponenten erweitert und so alle Batterien abdecken kann. Anhand dieser Beispieldemontage können im späteren Verlauf die notwendigen Hilfsmittel für die konstruktive Unterstützung erarbeitet werden.

Ziel der Demontage ist es, die Zellen aus der Batterie entnehmen zu können. Im Folgenden wird kurz auf die Demontageschritte eingegangen.

Die ausgebaute Batterie kann mit einem Kühlsystem ausgestattet sein, was zur Folge hat das im ersten Schritt überprüft werden muss, ob der Austritt von Kühlmedium verhindert wird. Normalerweise sollte die Sicherheit aber nach dem Ausbau hergestellt worden sein. Der erste richtige Demontageschritt ist demnach das Öffnen des Batteriegehäuses. Im einfachsten Fall besteht das Batteriegehäuse nur aus einem Trog, der über einen Deckel verschlossen wird. Eine Batterie kann aber auch über mehrere Gehäuseteilungen und dementsprechend Deckel (vgl. Tabelle F-1) verfügen, die die einzelnen Komponenten trennen. Dadurch kann es auftreten, dass der Schritt des Gehäuseöffnens häufiger durchgeführt werden muss.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tabelle F-1: unterschiedliche Möglichkeiten der Gehäuseteilung

Anzahl der Gehäuseteilungen		
	Einfache Gehäuseteilung	Zweigeteilte Gehäuseabdeckung

Als nächster Schritt in der Demontage steht die Trennung der elektrischen Kontakte. Darunter fallen die Verbindungen zwischen den Modulen, der Anschluss an das Hochspannungsrelais und die Kontaktestellen des BMS, sofern letzteres im Batteriegehäuse integriert ist und nicht von extern an die Batterie angebunden ist.

Wenn alle relevanten elektrischen Kontakte getrennt sind, können die Module entnommen und separat demontiert werden. Soll das Modul weiter zerlegt werden, müssen die folgenden Schritte erneut durchlaufen werden:

- Öffnen des Gehäuses
- Trennen der elektrischen Kontakte
- Entnahme des Energiespeichers

Als Zusatzelement kann das Modul einen Slave enthalten, der die Zellen über zusätzliche Anschlüsse überwacht. Diese zusätzlichen Kabel müssen mit den Verbindungen der Zellen untereinander zusammen entfernt werden, um anschließend die Zellen entnehmen zu können.

Je mehr Arbeitsschritte von Nöten sind, desto umfangreicher wird der gesamte Demontageprozess. Sollten sich die einzelnen Arbeitsschritte untereinander stark voneinander unterscheiden, so steigt auch die Komplexität des Demontageprozesses. Dies kann z. B. Durch unterschiedliche Fügeprozesse entstehen. Dadurch werden zusätzliche Demontagewerkzeuge oder aber Demontagerichtungen für die Werkzeuge notwendig.

Grundlegende Betrachtungen zum Recyceln der Lithium-Ionen- Batterie

Der Begriff Recyceln kann für die Lithium-Ionen-Batterie in die Bereiche Produktrecycling und Werkstoffrecycling aufgeteilt werden. Beide Bereiche erfordern unterschiedliche Lösungen. Es gibt sowohl das Produktrecycling als auch das Werkstoffrecycling.

Entsprechend den Namen zielt das Produktrecycling darauf ab, Bauteile nach dem Recycling weiter zu verwenden. Dagegen ist beim Werkstoffrecycling der Bauteilzustand irrelevant, solange die interessierenden Werkstoffe in weiteren Bearbeitungsschritten zurückgewonnen werden können.

Wenn das Ziel nur darin besteht, an die Zellen zu gelangen, um aus diesen wieder Materialien zu gewinnen, so bietet sich das reine Werkstoffrecyceln an. Erst wenn andere Komponenten der Batterie für die spätere Verwendung im intakten Zustand der Batterie entnommen werden sollen, muss ein genauerer Blick auf die Verbindungsarten geworfen werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Für die Bewertung der Recyclingfähigkeit eines Produktes spielt die Demontage eine wichtige Rolle, es gibt aber auch noch eine andere wie z. B. die Wahl der Werkstoffe.

Für jede Baugruppe der Batterie muss eine Werkstoffwahl getroffen werden. Dabei kann für eine Baugruppe auch ein Materialverbund entstehen. Die konstruktiv verwendbaren verschiedenen Metalle und Kunststoffe benötigen jedoch unterschiedliche Recyclingverfahren, so dass eine Materialreinheit für eine Baugruppe anzustreben ist. Wenn dies nicht möglich ist, sollten die Verbindungsarten so gewählt werden, dass der Verbund problemlos getrennt werden kann. Ansonsten müssen aufwändigere Recyclingprozesse angewendet werden. Desweiteren sollten für den Menschen gefährliche Flüssigkeiten/Gase vermieden werden. Ist die Verwendung nicht zu umgehen, so ist die leichte Entleerung von gefährlichen Stoffen konstruktiv zu gewährleisten.

Die Wahl des Werkstoffes kann nicht direkt bewertet werden. Erst im Zusammenspiel mit der Baugruppe und der zu erfüllenden Aufgabe kann im Verhältnis zu den konstruktiven Alternativen eine objektive Bewertung abgegeben werden.

Aus diesem Grund wird sich im Weiteren auf die Demontage selbst konzentriert. Die Demontage wird maßgeblich über die notwendigen Arbeitsschritte definiert. In einem Arbeitsschritt selbst sind die Werkzeuge, die erforderlichen Tätigkeiten und die Arbeitszeit hinterlegt.

Für die Bewertung einer Batterie müssen die einzelnen Arbeitsschritte der Demontage genauer betrachtet werden und auf Potentiale hinsichtlich anderer Verfahren untersucht werden. Liegen sehr viele Arbeitsschritte bzw. sehr zeitintensive vor, ist im nächsten Schritt auf die genaue Tätigkeit während dieses Schrittes einzugehen. Konstruktive Maßnahmen für die Verbesserung der demontagefreundlichen Gestaltung werden in **AS F.4** behandelt.

Wenn alle Arbeitsschritte durchgearbeitet werden, hat sich somit für das untersuchte Batteriekonzept eine Optimierung ergeben. Die Summe der Arbeitsschritte (Anzahl und Zeit) ermöglicht einen ersten abschätzbaren Vergleich zwischen unterschiedlichen Batteriesystemen.

F.2.2 Ermittlung eines demontagefreundlichen Designs für Elektroden

Neben der Diskussion demontagefreundlich gestalteter Batteriesysteme sind auch Zellen und ihre Bestandteile in diese Betrachtung zu integrieren. In **AS F.2.b** sollte untersucht werden, ob und wie sich ein demontagefreundliches Design von Elektroden realisieren lässt. Das Ziel dieses Arbeitsschrittes war es daher, die Recyclingfähigkeit der auf dem Stromsammler gebundenen Aktivmaterialien über Rezepturänderungen zu begünstigen, ohne jedoch die Leistungsfähigkeit der ursprünglichen Elektroden zu beeinträchtigen. Dieser Arbeitsschritt ist weitgehend als separat zu betrachten, da der Schwerpunkt nicht konstruktiv sondern auf die Elektrodenherstellung und -rezeptur bezogen ist.

Aus **AS B.3.3** und **AS B.3.4** konnten keine konkreten Anforderungen an die Elektroden aus Sicht des Recyclings bzw. auftretende Schwierigkeiten bei der Demontage der heutigen Elektroden formuliert werden, bis auf die Tatsache, dass eine gute Haftung der Beschichtung auf dem Stromsammler die Aufarbeitung erschwert. Auf der anderen Seite können Binder-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

reste zu veränderten Partikeloberflächen vs. geänderten Stoffeigenschaften führen, was eine Auswirkung auf die Endqualität und Wiederverwendbarkeit der recycelten Wertstoffe hat.

Diese aus Sicht des Recyclings anzustrebende verminderte Haftfestigkeit steht jedoch im Widerspruch zu einer anzustrebenden hohen Haftfestigkeit für die hohen mechanischen und elektrochemischen Anforderungen an die Zellperformance während des Zelllebens, insbesondere für die extrem anspruchsvollen und langlebig auszulegenden Zellen für Automobilanwendungen.

Im Laufe des 2. Halbjahres 2010 wurde bei LTA parallel und unabhängig zu diesem Projekt die eindeutige Erkenntnis gewonnen, dass eine verminderte Haftfestigkeit der Elektrodenbeschichtung unter keinen Umständen in Zellen für langlebige Anwendungen akzeptabel ist.

Damit ist dem ursprünglich geplanten Arbeitsschritt die Grundlage für eine Bearbeitung entzogen worden. Konsequenterweise wurde daher von uns entschieden, diesen AS nicht weiter zu bearbeiten. Vielmehr muss es so sein, dass Recyclingverfahren so ausgearbeitet werden müssen, dass exzellent haftende Elektroden verarbeitet werden können.

Da dieser AS inhaltlich weitgehend als separat von allen anderen Arbeitsschritten im **PB F** betrachtet werden kann, ist keines der Projektziele dadurch beeinträchtigt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

F.3 Entwicklung von Gestaltungs- und Konstruktionsrichtlinien für die demontagefreundliche Entwicklung/Fertigung von Batterien

Für Batteriebauaufträge gibt es als Ergebnis der Analysen von I+ME verschiedene Abläufe – abhängig davon, ob eine Prototyp- oder Redesign- vs. Serienproduktfertigung gefordert ist. Der Umfang von Konstruktionsanforderung und der zu berücksichtigenden Normen wird meist in Lastenheften der Auftraggeber beschrieben, die nicht selten einen Umfang von mehr als 200 Seiten haben. Häufig genannte Normen sind folgend aufgeführt:

Umwelt und Betriebsbedingungen

Norm	Titel
EN 50125-1: 1999-09	Bahnanwendungen - Umweltbedingungen für Betriebsmittel - Teil 1: Betriebsmittel auf Bahnfahrzeugen
EN 60721-3-1: 1997-03	Klassifizierung von Umweltbedingungen - Klassen von Umwelteinflussgrößen und deren Grenzwerte – Langzeitlagerung
EN 60721-3-2: 1997-03	Klassifizierung von Umweltbedingungen - Klassen von Umwelteinflussgrößen und deren Grenzwerte – Transport
EN 60721-3-5: 1997-04	Klassifizierung von Umweltbedingungen - Klassen von Umwelteinflussgrößen und deren Grenzwerte - Einsatz an und in Landfahrzeugen

Umweltanforderungen

SN 36350-1:2006-10	Umweltverträgliche Produkte: Teil 1: Leitlinien zur Produktgestaltung
SN 36350-2:2006-10	Umweltverträgliche Produkte: Teil 2: Gefährliche Stoffe, Verbotsliste, Vermeidungsliste
SN 36350-5:2006-05	Umweltverträgliche Produkte; Teil 5: Ökologische Anforderungen an Verpackungen
SN 36350-6:2006-08	Umweltverträgliche Produkte; Teil 6: Erfassung von Stoffen in Produkten
SN 36350-7:2003-03	Umweltverträgliche Produkte; Teil 7: Produktumwelterklärung
SN 36351:2001-04	Regelungen zum Inverkehrbringen von gefährlichen Stoffen in Produkten

Batteriebauanforderungen

Batteriebauprodukte sind mit Rücksicht auf eine möglichst geringe Umweltbelastung bei Herstellung und Betrieb zu entwerfen. Eine recyclinggerechte Konstruktion ist anzustreben. Die eingesetzten Werkstoffe sollen soweit möglich und sinnvoll gekennzeichnet werden. Die Konstruktion des Produktes muss für deren Betrieb, Instandhaltung und Entsorgung (Verwertung, Beseitigung) die rechtlichen Vorschriften im Bereich des Umweltschutzes erfüllen. Die verwendeten Materialien, deren Bestandteile und Verbindungen sind wie folgt auszuwählen:

- möglichst geringer Schadstoffanteil
- langlebige Produkte/Materialien
- wieder verwendbare bzw. aufbereitbare Materialien
- möglichst geringe Sortenzahl

In diesem Zusammenhang wird insbesondere auf die SN 36350-1 verwiesen, in der zentrale Aspekte ausführlich diskutiert werden. Grundsätzlich besitzen alle Batterien einen ähnlichen Grundaufbau, der vereinfacht in der folgenden Abbildung F-4 dargestellt wird.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

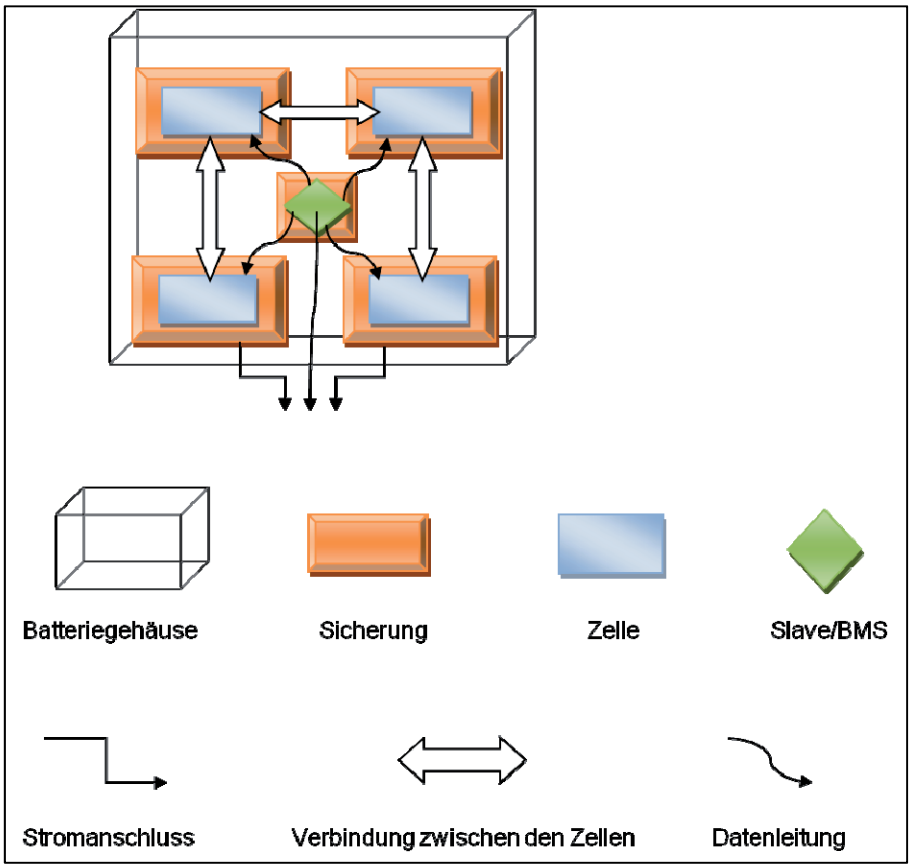


Abbildung F-4: Gesamtsystem Batterie mit allen notwendigen Komponenten

Unter anderem wurden folgende Analysen zur demontagefreundlichen Konstruktion von Batteriesystemen durchgeführt:

- Untersuchungen der Vor- und Nachteile verschiedener Möglichkeiten zum sicheren Verschließen eines Batteriesystems (Schweißen, Kleben, Nieten, Verschrauben) bezüglich Produktion, Betrieb, Wartung und Demontage des Systems.
- Gestaltung des Batteriegehäuses, sowie die Anordnung der enthaltenen Komponenten
- Konzepte der demontagefreundlichen Batteriemodulgestaltung

Die Ergebnisse wurden in Tabellen für den schnellen Zugriff hinterlegt. Bei Volkswagen wurden verschiedenste Ansätze zur demontagefreundlichen Konstruktion von Batteriesystemen diskutiert und analysiert. Es stellte sich allerdings heraus, dass im aktuellen Status der Entwicklung von Li-Ionen-Batteriesystemen verbindliche Konstruktionsrichtlinien nicht zielführend sein müssen: Die Technologie automobiler Li-Ionen-Batterien ist noch sehr neu und entsprechend vielfältig sind auch die Möglichkeiten, die Systeme zu konstruieren. Aktuell stehen dabei die anspruchsvollen Herausforderungen Sicherheit, Zuverlässigkeit und Kostenreduzierung (durch effiziente Montage) im Vordergrund. Im Projekt wurde klar, dass diese Aspekte durchaus im Zielkonflikt mit der Demontagefreundlichkeit stehen können. So könnten beispielsweise Steckverbindungen von Modulen oder Zellen zwar die Demontage erleichtern, im Hinblick auf eine geringe Störanfälligkeit und damit Zuverlässigkeit und Langlebigkeit erscheinen aktuell jedoch feste (Schraub-) Verbindungen als beste Variante.

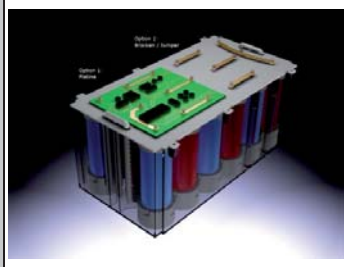
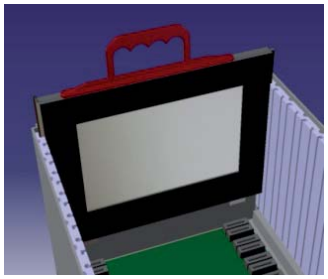
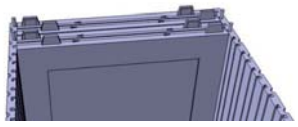
Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die Aspekte Sicherheit, Zuverlässigkeit und Kosten sind kurzfristig mit höchster Priorität zu bearbeiten, um Elektromobilität in Serie - zu akzeptablen Preisen für den Kunden - umsetzen zu können. Die Fokussierung auf Demontagefreundlichkeit zu einem späteren Zeitpunkt mit einem höheren Reifegrad der Technologie ist auch deshalb vertretbar, weil die zu erwartenden Absatzzahlen von Elektrofahrzeugen kurz- bis mittelfristig nur einen geringen Marktanteil ausmachen werden, und ein höherer Demontageaufwand bei nur wenigen Fahrzeugen eher vertretbar ist.

Nichtsdestotrotz ist vorgesehen, die erarbeiteten Konzepte bei der Entwicklung zukünftiger Batteriesysteme zu erwägen und gegebenenfalls umzusetzen. Diese Ziele werden grundsätzlich von den Bestrebungen unterstützt, einen geringen Serviceaufwand bei etwaigen Reparaturen zu gewährleisten. Es erscheint aber wie oben beschrieben nicht sinnvoll, heute schon die Handlungsfreiheiten in der Konstruktion auf Suche nach der besten Lösung durch feste Demontage-Richtlinien einzuschränken.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tabelle F-2: Konzepte der demontagefreundlichen Batteriemodulgestaltung

Variante	Rundzellen	Pouchzellen	Pouchzellen
Betrachtete Aspekte	- Die Batterie setzt sich aus Standardmodulen zusammen die in beliebiger Anzahl kombiniert werden können - Es gibt für den Zusammenbau der Module eine einheitliche Montagerichtung. Die Richtung ist in diesem Beispiel senkrecht von oben. - Die Zellen werden über lösbare Verbindung elektrisch miteinander verbunden.	- Schutz der „weichen“ Zellen während der Montage/Demontage über eine Rahmenstruktur. - Vereinfachung der Elektronik durch die Umsetzung in Form einer Platine - Einfache Montage/Demontage mit Hilfsmitteln - Es gibt für den Zusammenbau der Module eine einheitliche Montagerichtung. Die Richtung ist in diesem Beispiel senkrecht von oben.	- Trennung von Zellen und Elektronik - Reduzierung der Kabel - Leicht lösbare Zellverbindung - Spezielle Griffflächen für die Handhabung der Module
CAD-Modell		 	 

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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

Das Ziel dieses Arbeitsschrittes ist die Bereitstellung von Hilfsmitteln, die während des Entwicklungsprozesses zielgerichtet unterstützen. Das Augenmerk liegt dabei zuerst auf der Wissenssammlung in Form von Katalogen. Als Wissensspeicher sind in ihnen die Daten kompakt angeordnet und erlauben einen schnellen Zugriff auf die hinterlegten Informationen. In einem weiteren Schritt wird anschließend untersucht, in wie weit sich die Inhalte in Gestalt von CAD-Modellen/ Anwendungen umsetzen lassen.

Kataloge

Der Aufbau von Katalogen kann verschiedene Ausprägungen besitzen, die allgemeine Struktur hingegen ist in allen Katalogen gegeben. Wie in Abbildung F-5 veranschaulicht, kann sich der Katalog vereinfacht dargestellt in die Gliederungs- und Zugriffmerkmale sowie in den Informationsteil gliedern.

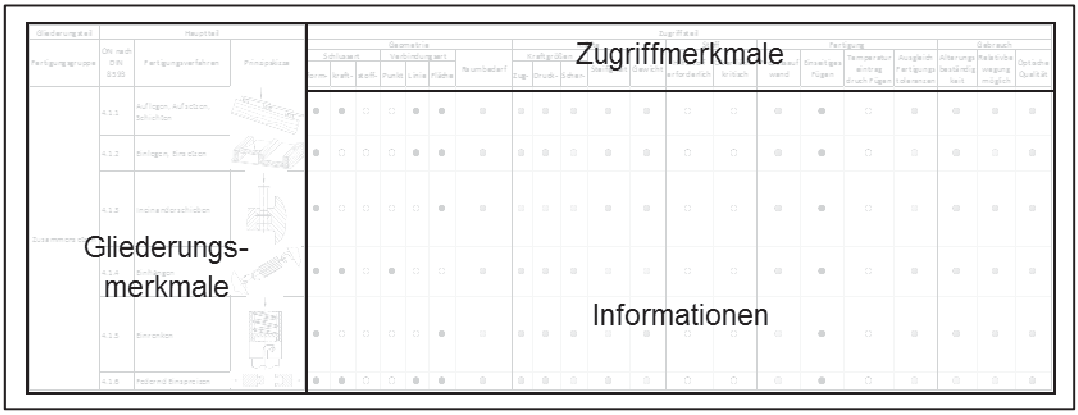


Abbildung F-5: Aufbau eines Konstruktionskataloges

In den Betrachtungen für die Demontage einer Batterie haben sich zwei Hauptaspekte heraus kristallisiert. Dies sind auf der einen Seite die Fügeverfahren, sowohl für die Zellen als auch für die Zellkontaktierung, und auf der anderen Seite handelt es sich um die Art der Kühlung, die in einer Batterie zur Anwendung kommt.

Übersicht der aufgestellten Kataloge

- Verbindungstechniken basierend auf der DIN 8593
- Fügen von Körpern
- Formen der Wärmeübertragung basierend auf dem VDI Wärmeatlas

Innerhalb der jeweiligen Kataloge gibt es verschiedene Grade des Informationsgehaltes. Diese hängen immer von der Art der Zugriffsmerkmale ab. So besitzen die meisten Informationsfelder eine Bewertung des entsprechenden Gliederungsmerkmales im Vergleich zu den anderen Merkmalen.

Anhand der Bewertung lassen sich gute Lösungen herausarbeiten, die auf die Konstruktion von Batterien angewendet werden können. Eine Umsetzung finden diese Lösung in **AS F.3**.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Umsetzung eines CAD-Tools

Kataloge können als Datenspeicher eine große Hilfe für die Konstruktion von Batterie ergeben, da sie das notwendige Wissen gebündelt enthalten. Nachteilig ist, das die Auskonstruktion weiterhin händisch von statten gehen muss.

Für die Erstellung einer parametrischen CAD-Modells bedarf es einer genauen Analyse der erforderlichen Anforderungen. Die Verwendung zu Beginn des Entwicklungsprozesses zwingt dazu, sich nur auf die wichtigsten Größen zu beschränken. Hier ist es noch nicht entscheidend, wie die spätere Konstruktion ausgestaltet ist, wodurch viele Komponenten durch Platzhalter vereinfacht werden können.

Die saubere CAD-Umsetzung von den Abhängigkeiten zwischen Fahrzeug und Batterie sind so umfangreich, das die Umsetzung den zeitlichen Rahmen des Projektes weit übertreffen. Deswegen wurde der Schritt weiterverfolgt, Ansätze für die Modellierung aufzuzeigen, die mit einem größeren Forschungsaufwand sinnvoll umgesetzt werden können.

Im Folgenden wird eine Auswahl von Eingangsgrößen vorgestellt, die sich bei der Erarbeitung als notwendig erwiesen haben:

Der Bauraum im Fahrzeug	Prinzipiell liegen 63 mögliche Bauraumvariationen vor. Durch die in **Arbeitspaket A3** angesprochenen Batterie-Entnahme-Verfahren können sie jedoch gezielt eingeschränkt werden
Die Verschaltungsstrategien	Reihenschaltung/ Parallelschaltung/ Kombination aus R- und P-Schaltung
Die Form und die Abmessungen der Zellen	Durch die DIN SPEC 91252 gibt es eine Vereinfachung für die Abmessungen. Sobald aber auf Zellherstellereigene Abmessungen zurückgegriffen wird steigt die Vielfallt enorm an
Die Ausprägung des Batteriegehäuses/ der Module	
Die geforderten Leistungsdaten	
Die Art der Kühlung mit den Anschlussbedingungen im Fahrzeug	

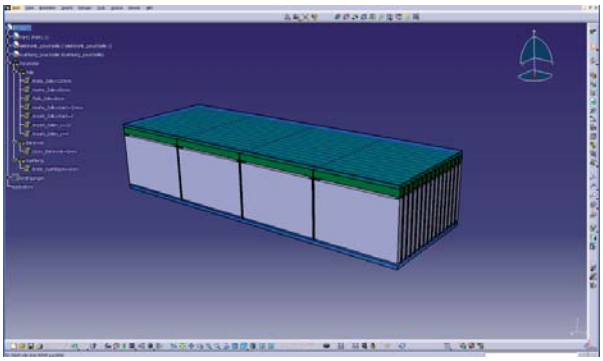
Ansätze für die Lösung

- Betrachtung der Variation der Zellabmessungen und der Zellorientierung im Raum
    - Es gibt eine Abhängigkeit zwischen der Ausrichtung der Zellen im Raum und der Größe (Höhe) des Bauraumes. Als weiterer Faktor spielt die Verschaltungsstrategie eine Rolle.
- Die Art der Kühlsysteme müssen als Aufschlag sowohl in das Modulvolumen als auch als extra Baugruppe in das Gesamtvolumen der Batterie integriert werden.
- Der Bauraum im Fahrzeug entspricht keinem einfachen Körper, der automatisch mit Zellen gefüllt werden kann. Dafür muss der identifizierte Bauraum in praktische Grundkörper umgewandelt werden. Die Anzahl und die Größe der neu erschaffenen Körper haben einen maßgeblichen Einfluss auf das spätere Ergebnis. Um diesen Ein-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

fluss zu reduzieren sollte eine Bauraumüberschreitung in alle 3 Raum-Koordinatenrichtungen ermöglicht werden.
- Aufschläge für die Elektronik und das Gehäuse
- Steuerung der Geometrie über angeschlossene Konstruktionstabellen.

Tabelle F-3: Darstellung für die Umsetzung in CAD

	Über Templates wird die Grund-Geometrie der Zellen im CAD-Programm hinterlegt. Die Orientierung der Zellen im Modul/ in der Gesamtbatterie werden über Musterfunktionen vordefiniert. Die Elektronik erhält einen, über Parameter gesteuerten, Bauraum. Verändert sich die Position der Kontakte passen sich die Anzahl und die Position der Geometrie an. Ähnlich dem Aufschlag für die Elektronik, verändert sich auch der Aufschlag für die Kühlung in Abhängig von den Zellkontakten

Die anschließende Tabelle F-4 zeigt wie mit zwei unterschiedlichen Grund-Modulen (18 V und 36 V) die verschiedenen Grade der Elektrifizierung abgedeckt werden können.

Tabelle F-4: Minimaile Modulzahl

Elektrifizierungsgrad		Mild-Hybrid	Full-Hybrid	Plug-In Hybrid	Elektrofahrzeug
Spannung		40 -150 V	200 – 400 V	200 – 400 V	300 – 400 V
Minimale Anzahl an Modulen	5 x 3,6V (18 V)	2 – 3	11 – 12	11 – 12	16 – 17
	10 x 3,6V (36 V)	1 – 2	6	6	8 – 9

Wenn es ähnlich der Zellen mehrere standardisierte Modulabmessungen bzw. definierte Packageabmessungen für die Fahrzeuge vorliegen würden, könnten im CAD-Modell Templates hinterlegt werden, die alle zu erzeugenden Fahrzeugvarianten abdecken können.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

F.5 Ableitung lebenszyklusorientierter Sicherheitskonzepte, speziell für Rückbau, Demontage und Recycling von Lithium-Ionen-Batterien

In Zusammenarbeit mit dem LithoRec-Kooperationspartner AUDI wurde in Anlehnung an die Bearbeitung von **AS A.2.1** – insbesondere an die im Bericht zitierten bestehenden Sicherheitsvorschriften und –regelungen – ein (vorerst Volkswagen-internes) Konzept zum sicheren Umgang beim Arbeiten mit den Hochvoltkomponenten erarbeitet.

Durch praktische Erfahrungen bei der Demontage von Traktionsbatterien verschiedener E-Fahrzeugkonzepte (EV, HEV …) konnten zusammen mit den jeweiligen Batterie-Entwicklern wichtige Hinweise für das Arbeiten an geöffneten Batteriesystemen erarbeitet werden. Diese betreffen z.B.

- notwendige Ausbildung für den jeweiligen Arbeitsgang
- Hinweis auf besonderes Gefahrpotential
- zu verwendendes Werkzeug (z.B. Isolationsvorschriften für das Werkzeug)
- unbedingt einzuhaltende Reihenfolge der Arbeitsschritte
- Lagervorschrift für die demontierten Module/ Zellen

Diese Hinweise werden nach betriebsinternen Absprachen und jeweils batteriespezifisch überarbeitet.

Sollen nun Sicherheitskonzepte erstellt werden müssen sie verschiedene Voraussetzungen erfüllen.

- Sie sollten möglichst einfach gehalten sein, so dass sie überall auch durch weniger qualifiziertes Personal verwendet werden können. (Schutz vor Missbrauch)
- Sie sollten genügend Informationen liefern um die richtige Handhabung zu gewährleisten.

Die beiden Forderungen stehen im Gegensatz zueinander. Auf der einen Seite sollen viele Informationen enthalten sein, auf der anderen Seite sollen auch Arbeiter, die kaum Kenntnisse über die Batterie besitzen, diese dennoch richtig handhaben können. Das bedeutet, es muss verschiedene Stufen an Sicherheitskonzepten geben die je nach Ort der Demontage (kleine Werkstatt, Recyclingzentrum, Batteriehersteller, ...) zur Anwendung kommen.

Im eingebauten Zustand übernimmt das BMS die Überwachung der Batterie und informiert den Fahrzeugnutzer über mögliche Störungen. Erst ab der Werkstatt kann der Mensch regulär wieder in Kontakt mit der Batterie gelangen. Eine Ausnahme stellt der Crash zwischen Fahrzeugen dar, bei dem die beteiligten Batterien beschädigt werden und für Rettungskräfte offen zugänglich sein können.

Damit müssen die Sicherheitskonzepte beide Alternativen (unbeschädigte Batterie und beschädigten Batterie) sicher beherrschen. Wichtig für die weiteren Ansätze ist, dass der Transport ein geringeres Gefährdungspotential besitzt, als die aktive manuelle Arbeit an der Batterie. Die Ansätze für die lebenszyklusorientierten Sicherheitskonzepte orientieren sich an diesem Verlauf und gliedern sich in die Bereiche.

- Transport
- Demontage

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Unter dem Begriff „Transport“ wird die ganze Handhabung einer Gesamtbatterie verstanden Dies umfasst neben dem eigentlichen Transport auch die Handhabungen bis zum eigentlichen Einbau, sowie nach dem Ausbau.

Die „Demontage“ umfasst alle Schritte, die mit der Zerlegung der Batterie zusammenhängen.

Transport

Eine vollständig aufgebaute Batterie besitzt nach außen nur wenige Kontaktflächen, neben dem Gehäuse sind dies die elektrischen Anschlüsse für die Daten und die Energie, sowie der Anschluss für ein mögliches Kühlsystem. Für den Transport selbst muss deshalb nur darauf geachtet werden, dass der Arbeiter nicht mit den Anschlüssen in Kontakt gerät und dass er geschützt ist, falls das Gehäuse unter Strom gesetzt ist (beschädigte Batterie). Der Inhalt der Batterie wird für den Fall einer unbeschädigten Batterie nicht weiter betrachtet. Liegt eine beschädigte Batterie vor, greifen die Sicherheitskonzepte für die Demontage.

- Abdeckungen für die Anschlüsse
- Isolierung des Gehäuses zur spannungsführenden Elektronik
- Isolierte Griffflächen
- Sicherheitsschalter

Demontage

Bevor die Demontage der Batterie beginnt, hat der Arbeiter Informationen über die Batterie einzuholen. Erst danach kann er sich gefahrlos an eine Zerlegung begeben. Es gibt mehrere Lösungen, wie dem Arbeiter diese Informationen zugänglich gemacht werden können. Die in Tabelle F-5 dargestellten Lösungen haben unterschiedlichste Komplexitätsgrade und werden nicht durch jeden beliebigen Arbeiter genutzt werden können.

Tabelle F-5: Unterschiedliche Hinweismöglichkeiten

Visuelle Hinweise	Farbcodierung (Warn)Symbole Integrierte Anzeigen (Schauglas/Druckanzeige)	  
	Spannungsmessung	
Auslesen von Information mit Hilfsmitteln	Ausleseschnittstelle für die Daten des BMS Codierung von Informationen	

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

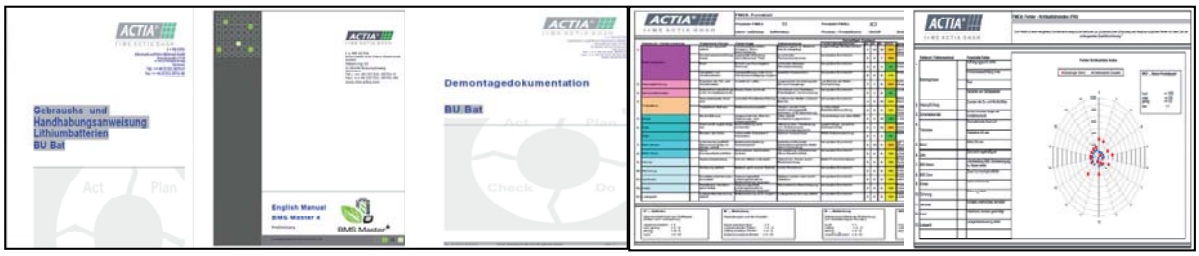
F.6 Entwicklung von Dokumentations- (mindest-) Standards für die fachgerechte Behandlung, Rückbau, Demontage und das Recycling

Im Umgang mit Batteriesystemen liegen schon mehrere Vorschriften vor, die anzuwenden sind. Auf der einen Seite gibt es Vorschriften für Batterien, u. a. die DIN V VDE V0510-11 Vornorm Sicherheitsanforderungen an Lithium Sekundärbatterien für Hybridfahrzeuge und mobile Anwendungen, DIN VDE 0510 Teil 3 für Batterien in Elektrofahrzeugen. Darüber hinaus sind beim VDE und beim ZVEI weitere Normen, Richtlinien und Empfehlungen in Arbeit. Desweiteren sollten nach EN 50153 u. a. mindestens folgende Sicherheitssymbole angebracht werden:

- Hochspannungspfeil
- Gefährliche Restspannung nach Abschalten,
- Explosive Gase
- Ätzende Flüssigkeiten (falls zutreffend).

Die Sicherheitsschilder und Warnhinweise sind abrieb- und möglichst witterungsfest zu montieren.

Ein weiterer Punkt sind die Gebrauchs- und Handhabungsanweisungen. Diese müssen entsprechende Details über Demontage, Service und Rückbau der Batteriesysteme enthalten.



Um die Sicherheit der Serienbatterien zu erhöhen, sollten für diese stets Risikobewertungen (FMEA) und ISO 22628-Bewertungen angefertigt werden,

Mögliche Werkzeuge zur Dokumentation von Demontage- und Recyclinginformationen stellen der Recyclingpass und das International Dismantling Information System (IDIS) dar. Diese bieten die Möglichkeit, verschiedene demontage- und recyclingrelevante Informationen über ein Produkt darzustellen.

Der Recyclingpass wurde in Form einer Publicly Available Specification (PAS) als PAS 1049 „Übermittlung recyclingrelevanter Produktinformationen zwischen Herstellern und Recyclingunternehmen – Der Recyclingpass“ im Jahr 2004 veröffentlicht. Die Verfasser sind neben AIP-TUBS und IWF-TUBS die Unternehmen EC, Agfa-Gevaert AG und LCE Consulting GmbH.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.



Abbildung F-6: Beispiel für die Bewertungsmöglichkeit

Im Einzelnen gliedert sich der Recyclingpass wie folgt:

- Angaben zum Produkthersteller
- Produktidentifikation
- Produktbezogene Recyclingeigenschaften
- Berücksichtigte Richtlinien, Gesetze und Normen
- Angaben zu den Stoffen und Komponenten, die entnommen und separat behandelt werden müssen
- Besonders zu beachtende Stoffe und Komponenten
- Recyclingdaten
- Änderungshistorie
- Varianten (optional)

Das **IDIS** (International Dismantling Information System) stellt die derzeit wichtigste internationale Plattform dar, über die (in erster Linie) Informationen für Altfahrzeugverwertungsbetriebe bereitgestellt werden. Darüber hinaus erfüllen die Automobilhersteller ihre gesetzlichen Informationspflichten zur Bereitstellung von Verwerterinformationen. Die Informationen dazu werden von Automobilherstellern aus Europa, den USA, Japan, Korea und Malaysia bereitgestellt, im IDIS-Konsortium abgestimmt, im Datenbanksystem eingepflegt und regelmäßig aktualisiert.

Vorschläge zur Dokumentation von Demontage- und Recyclinginformationen zur Darstellung herstellerbezogener Informationen zu HV-Batterien in IDIS

Das IDIS hat sich seit Einführung der europäischen Altfahrzeuggesetzgebung als sinnvolles und effizientes Medium zur Dokumentation von sicherheits- und umweltrelevanten Komponenten in Fahrzeugen weltweit etabliert und bewährt. Die zusätzliche Verwendung des Recyclingpasses für einzelne Fahrzeugkomponenten wird seitens der Automobilhersteller als unnötigen Zusatzaufwand gesehen, da die im Recyclingpass enthaltenen Informationen bereits im IDIS vorhanden sind und regelmäßig gepflegt werden. U.a. sind hier Informationen zum Hersteller und dem Produkt sowie Angaben zu den enthaltenen Komponenten und Materialien mit Hinweisen zur gesonderten Behandlung bestimmter Materialien abrufbar. Neben der Angabe welche Wert- und Stör-, bzw. Schadstoffe enthalten sind, werden auch Angaben

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

darüber gemacht, wo sich diese Materialien und Komponenten im Fahrzeug befinden. Dazu werden Abbildungen wie Explosionszeichnungen zur Visualisierung verwendet.

Die Informationen werden dabei bereits mit einem hohen Standardisierungsgrad als allgemeine oder herstellerspezifische Informationen in 30 unterschiedlichen Sprachen bereitgestellt. Somit können zukünftig auch alle produktbezogenen Daten über HV-Traktionsbatterien den Recyclingprozess betreffend seitens der Automobilhersteller über IDIS bereitgestellt werden.

Dem Altfahrzeugverwerter nachgeschaltete Beteiligte im Recyclingprozess können, wie bereits in **AS A.2.5** dargestellt, zusätzlich wichtige Angaben über Zellchemie über entsprechende Markierungen auf den Batteriesystemen ohne großen Abstimmungsaufwand einfach und kostengünstig bereitgestellt werden. Objektbezogene Informationen (z.B. Ladungszustand) können zudem bei Bedarf durch entsprechendes Prüfequipment bei den Prozessbeteiligten ermittelt werden.

Im Rahmen des Projektes wurden mehrere Varianten zur Dokumentation von HV-Traktionsbatterien durchgespielt und geprüft. Abschließend hat die Untersuchung zur Umsetzung in IDIS folgende Punkte ergeben:

1. Die hersteller- und fahrzeugspezifischen Informationen sind sowohl als PDF-Zusatzdokument als auch in interaktiver, selbsterklärender Bildabfolge unter Nutzung der bisherigen IDIS-Funktionalität gut abbildbar.
2. Empfohlen wird die Möglichkeit der interaktiven Darstellung zu schaffen bzw. zu nutzen, da diese eine zielgenaue und übersichtliche Darstellung auch für zukünftige (bspw. Vollelektrofahrzeuge) Fahrzeuge bietet.
3. Objektbezogene Informationen, wie Batteriezustand und -historie können zwar im IDIS nicht sinnvoll eingebunden werden, sollten aber wegen der Zweckmäßigkeit auch als Entscheidungskriterium des weiteren Umgangs mit der ausgebauten HV-Batterie (Reuse / Repair / Recycling) bereits an dieser Stelle des Prozessablaufes erfasst und gespeichert werden.
4. Die Informationen zu Transport und Lagerung der HV-Traktionsbatterien sind dem Verwerter in geeigneter Form (entweder in den allgemeinen Sicherheitsdokumenten im IDIS o.a. als Beipack in der Bordliteratur) zur Verfügung zu stellen.



Abbildung F-7: Beispiele für die Umsetzbarkeit in IDIS

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

G Konzeptionierung einer Recycling-Pilotanlage

Im **PB G** wurde eine mögliche Recycling-Pilotanlage konzeptioniert, die aus den Einzelschritten der vorangegangenen Projektbereiche zusammengestellt wurde. Bei der Gesamtanlage handelt es sich um eine Neuplanung, d. h. es wird keine bestehende Anlage umgebaut, bzw. erweitert, sondern eine komplett neue Anlage auf der „grünen Wiese“ erstellt.

Um die Gesamtanlage auslegen zu können, mussten folgende Rahmenbedingungen für die Gestaltung der Anlage festgelegt:

- Verarbeitungskapazität von 700 kg Zellmasse je Stunde
- einschichtiger Betrieb
- zu verarbeitende Batterietypen sind Li-Ion Akkumulatoren in der Form von Traktionsbatterien, Hybridbatterien und Plug-In-Batterien
- es ist keine thermische Behandlung der Akkumulatorzellen vorgesehen

Die Entladung wird in einem zweistufigen Verfahren durchgeführt. Im ersten Schritt werden im Lagerbereich innerhalb der Regallagers die Batteriesysteme soweit entladen, wie es das Batteriemanagement zulässt, damit es zu keiner Schädigung der Zellen kommt. Nach der Entnahme der Batteriezellen aus den Modulen erfolgt der zweite Schritt der Entladung. Dieser findet am Demontageplatz statt und führt dazu, dass die Batteriezellen tiefenentladen sind. Die Demontage des Batteriesystems folgt dem primären Ziel, der Zellenfreilegung zur weiteren Verarbeitung. Auch die weiteren Wertstoffe, wie Kupferkabel und Leiterplatten werden als separate Fraktionen gesammelt, um sie einer weitergehenden Verwertung zuzuführen. Anschließend folgt die mechanische Zerkleinerung und Separierung der Zelle und die Aufbereitung des Aktivmaterials.

Die Anlage ist räumlich in drei Abschnitte gegliedert. Im ersten Abschnitt, dem Lager, werden die ankommenden Batterien zwischengelagert und es findet eine erste Entladung statt. Der zweite Abschnitt umfasst den Demontagebereich, in dem manuell die Batteriesysteme demontiert werden. Darüber hinaus werden die entnommenen Batteriezellen in diesem Bereich tiefenentladen. Der dritte Abschnitt ist die mechanische Zellaufbereitung. In verschiedenen mechanischen Schritten werden hier die Zellen zerkleinert und die Aktivmaterialien separiert.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

G.1 Entladung der Batterien und Demontage der Systemkomponenten

Demontage und Aufbereitung der Batterien und Zellen sind in den vorhergegangene **AP A.4** und **AP B.1** beschrieben und bilanziert.

Die Aufbereitungsversuche bei Electrocycling dienen als Grundlage für die Auslegung der Pilotanlage.

Grundentladung der Batterien

Die Entladung der Lithium-Ionen-Traktionsbatterien erfolgt in einem zweistufigen Prozess. Im Lager erfolgt der Anschluss der Batterien an eine zentrale elektrische Entladeanlage zur Grundentladung der Batterien. Die Entladung von Batterien ist nur eingeschränkt und nicht bis zur vollständigen Entladung möglich. Aus diesem Grund sind bei den weiteren Prozessschritten immer Restladungen zu berücksichtigen und die Arbeiten unter Einhaltung der Sicherheitsvorschriften durchzuführen. Dies gilt für die Demontage des Betriebssystems wie auch für die Aufbereitung/Zerlegung der Zellen.

Demontage und elektrische Tiefenentladung

Die Demontage der entladenen Batterien erfolgt an separaten Demontageplätzen. Neben den eigentlichen Demontageplätzen werden Flächen für die Logistik, die Bedienung, die Zufuhr der Batterien sowie Lagerplätze für die Zusammenfassung der demontierten Materialien und deren Abfuhr benötigt.

Wegen der Vielzahl der anfallenden Produkte (Stahl, NE-Metalle, Kunststoffe, Elektronikschrott, Restmüll) wird einem Palettensystem der Vorzug gegenüber dem Bandtransport eingeräumt. Lediglich die demontierten Zellen werden auf einem Rollenrost in geeigneten Behältern zur Tiefenentladung befördert.

Für die Demontage und die Entladung der Batterien wird ein zeitlicher Aufwand von je zwei Stunden inklusive zugehöriger Rüstzeiten zu Grunde gelegt. Der Aufwand orientiert sich an einem ausschließlichen Aufkommen großer Traktionsbatterien, da er sich für kleinere Batterien zwar verringern wird, dann jedoch auch nur geringere Zellmassen gewonnen werden können, spezifisch also steigt. Auf einem Demontageplatz können dann eine große oder zwei kleine Traktions- bzw. Hybridbatterien demontiert werden.

Die Stationsgröße richtet sich dann nach den großen Traktionsbatterien. Es wird eine Grundfläche von 4,0 m x 5,0 m angenommen (Entlade- plus Demontagebereich).

Ausgehend von der notwendigen Demontage- und Entladezeit werden 16 Stationen vorgesehen. Die Verteilung der Demontagestationen auf die Batterietypen kann der Tabelle G-1 entnommen werden. Hier sind zur Reserve zwei zusätzliche Station vorgesehen. Die Demontageplätze werden gleichartig mit Werkzeugen zum Öffnen der Gehäuse, der Entfernung der Kühl- und Reglereinheit sowie der Zellentnahme ausgerüstet. Zur Manipulation der Batterien und der Zerlegeteile werden alle Demontageplätze mit Kleinhebezeugen ausgestattet.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tabelle G-1: Bedarfsrechnung Zerlege- und Entladungsstationen

Batterietyp	**Traktion, groß**	**Traktion, klein**	**Hybrid**	**Gesamt**
Entladedauer / min	110	110	110	
Demontagedauer	1,5 Std.	1 Std.	1 Std.	
Arbeitskräfte für Demontage	2	1	1	
Rüstzeiten	0,5 Std.	0,5 Std	0,5 Std	
Zykluszeit	2,1 Std.	1,6 Std	1,6 Std	
Batterien/Tag je Station	4	5	5	
Zellmasse/Tag je Station	500 kg	300	200	
Anzahl Stationen	8	4	2	
Zellmasse/Tag	4.000 kg	1.200 kg	400 kg	**5.600 kg**

Sämtliche bei der Demontage anfallenden Teile wie Gehäuse, Regel- und Steuereinheiten, Kühlaggregate und Dichtungsmaterial werden in Gitterboxpaletten gesammelt. Eine Aufbereitung dieser Materialien ist nicht Gegenstand dieser Studie. Diese Materialien werden einer externen Verwertung zugeführt. Notwendige Einrichtungen zum Versand sind im Lagerbereich vorgesehen.

Die demontierten Zellen werden in Paketen bis maximal 15 kg Stückmasse in Transportbehältern gelagert (Füllmasse 700 kg). Der Transport der Behälter erfolgt mittels Gabelstapler in ein Zwischenlager, aus dem die demontierten und vollständig entladenen Batterien der mechanischen Aufbereitung zugeführt werden.

Das Gebäude mit 16 Demontage- und Entladeplätzen hat eine Grundfläche von 882 m^2 und einen umbauten Raum von 6.200 m^3. Es wird als Stahlbaukonstruktion mit gedämmten Wandbauelementen fensterlos errichtet. Es erhält eine ausreichende Allgemein- und eine angepasste Arbeitsplatzbeleuchtung. Die Beheizung ist auf eine Raumtemperatur von 18 °C auszulegen.

Wegen ausschließlich mechanischer Arbeitsabläufe ist nicht mit einer Freisetzung von Elektrolyten zu rechnen, weshalb auf eine Bewetterung verzichtet werden kann.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

G.2 Separation der Aktivmaterialien

Charakterisierung des zu verarbeitenden Materials

Es wird davon ausgegangen, dass überwiegend Rundzellen mit metallischem Gehäuse zur Verarbeitung gelangen. Flachzellen ohne Metallgehäuse lassen sich leichter verarbeiten und müssen daher nicht gesondert betrachtet werden.

Nach eigenen Recherchen kann man die mittlere Zusammensetzung gegenwärtig hergestellter Rundzellen wie folgt annehmen:

Tabelle G-2: Durchschnittliche Zusammensetzung von Lithium-Ionen-Akkumulatorzellen

Bestandteil	Masseanteil
Kathodenmaterial	25%
Anodenmaterial	17%
Elektrolyt	10%
Cu-Elektrode	14%
Al-Elektrode	5%
Separator	4%
Gehäuse	23%
Kollektor/ Isolierungen/ Kleber	1%

Daraus lassen sich die wesentlichen Masseströme für die Aufbereitung abschätzen:

Tabelle G-3: Verteilung wesentlicher Masseströme für die Aufbereitung von 700 kg Zellmasse je Stunde

Materialstrom	Masseanteil	Massestrom in kg/h
Aktive Masse (Pulver)	42 %	296
Elektrolyt	11 %	74
Gehäuse	23 %	164
Folien und Sonstiges	24 %	166
Summe	**100 %**	**700**

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Mechanische Aufbereitung der Zellen

- Materialaufgabe

Der Materialtransport von der Entladestation in die Vorzerkleinerung erfolgt über einen getakteten Gurtförderer (3.01). Die demontierten und tiefentladenen Zellen werden in den vorgesehenen 15 kg Chargen manuell auf den Gurtförderer chargiert. Um die für die Aufgabe auf die Vorzerkleinerung erforderliche Höhe zu überwinden, sollte der Gurt als langer Taschengurt ausgebildet sein, wobei jeweils eine Tasche die Chargenmenge für einen Beschickungstakt fassen muss. Somit könnte die Bandbewegung taschenweise erfolgen.

Vorgaben für die Aufbereitung:

- Pakete aus mehreren Rund- oder Flachzellen bis maximal 15 kg Stückmasse
- Rund- und Flachzellen werden getrennt verarbeitet (mit/ ohne Stahlgehäuse)
- Solldurchsatz 700 kg/h
- getakteter Abzug zur Vorzerkleinerung (jeweils 1 Zellpaket; 1 bis 2 Zellpakete je Minute)

- Maschinenauswahl Vorzerkleinerung

Die gegenwärtig in Verkehr gebrachten Li-Ion-Akkumulatoren verwenden als Elektrolyten diverse Mischungen aus Lösungsmitteln, die bereits bei Raumtemperatur entflammbar sind und explosible Dampfgemische bilden. Unter bestimmten Umständen kann durch eine mechanische Beanspruchung und/oder auftretende Kurzschlüsse in den Zellen eine exotherme Reaktion der aktiven Masse, welche unter Freisetzung von Sauerstoff abläuft, ausgelöst werden. Da der Aufbereitung keine thermische Vorbehandlung (Pyrolyse) vorangestellt ist, muss die Aufschlusszerkleinerung unter Inertbedingungen erfolgen.

Grundsätzlich kommen für die Vorzerkleinerung verschiedene Typen von Zerkleinerungsmaschinen, die sich im Bereich der Zerkleinerung metallischer Sekundärrohstoffe eingeführt haben, in Frage. Als geeignet erscheinen langsam oder schnell laufende Rotorreißer (z.B. Hammerreißer) oder auch die sogenannten Querstromzerspaner - QZ.

Die Vorzerkleinerung soll das Aufbrechen der Zellengehäuse (Stahlblech, Aluminiumblech oder Folie) bewirken und idealerweise bereits zu einer weitgehenden Ablösung der aktiven Masse von den Ableiterfolien führen.

Bei herkömmlichen Rotorreißern ist der Aufschlussgrad nur durch die Auswahl eines geeigneten, die Austragsstückgröße begrenzenden Rostes, beeinflussbar. Die Rostspaltweite wird aber nach unten durch die Dimensionen der größten nicht zerkleinerbaren Bestandteile im Akkumulator limitiert. Arbeiten die herkömmlichen Rotorreißer nur kontinuierlich im Durchlauf, werden die Querstromzerspaner satzweise betrieben werden. Dieser Batchbetrieb erlaubt die optimale Anpassung der Beanspruchungsdauer und Intensität (Rotordrehzahl) an den angestrebten Aufschlussgrad. Während langsam laufende Rotorreißer eher grobe, wenig aufgeschlossene Zerkleinerungsprodukte erzeugen werden, ist davon auszugehen, dass schnell laufende Maschinen gut aufgeschlossene Produkte liefern.

Die Wahl eines geeigneten Vorzerkleinerungsaggregates fiel unter Berücksichtigung der vorstehen Kriterien auf einen Querstromzerspaner QZ1200 Fabrikat MEWA. Ein weiterer Vorzug des QZ ist der durch seinen völlig geschlossenen Prozessraum sehr einfach zu reali-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

sierende Betrieb unter Inertbedingungen. Querstromzerspaner der Firma MEWA sind bereits in diversen Recyclinganwendungen, auch mit geschlossenem Stickstoffkreislauf im Einsatz.

Ob der QZ in der Lage sein wird, alle zukünftig vorkommenden Arten von Akkuzellen (z.B. Edelstahlblechgehäuse von > 1 mm Blechdicke – GAIA Zellen) aufzuschließen, muss durch eingehende Tests geprüft werden. Für die Planung auf der Basis des gegenwertigen Wissensstandes erscheint es ohnehin unerheblich, welche Maschine der Planung zugrunde gelegt wird.

- Maschinenauswahl Trocknung

Für die nachfolgenden trocken arbeitenden Aufbereitungsprozesse, die vorrangig auf die Gewinnung der aktiven Masse ausgerichtet sind, ist es erforderlich, die Elektrolyte zu verdampfen. Dieser Schritt beseitigt einerseits das Gefährdungspotential durch brennbare Lösungsmittel und überführt andererseits die aktive Masse in die für die trockene Aufbereitung erforderliche trockene Pulverform.

Für die Trocknung kommen Konvektionstrockner in Frage, da sie bei dem sehr inhomogen zusammengesetzten Material zum besten Trocknungsergebnis führen. Weiterhin steht die Frage, ob die Trocknung ebenfalls im Batch oder aber kontinuierlich ablaufen soll. Da es sich bei den zu verdampfenden Flüssigkeiten um zum Teil leicht entzündliche Lösungsmittel handelt, ist die Trocknungstemperatur wahrscheinlich stark einzuschränken. Das wiederum spricht für eine Trocknung unter Vakuum, da hierbei die Trocknungstemperatur niedrig gehalten werden könnte.

Da derzeit keine gesicherten Daten zu den zu den Inhaltsstoffen der Akkuzellenvorliegen, die es erlauben würden, eine Trocknung sicher auszulegen, kann an dieser Stelle nur eine grobe Abschätzung der Trocknung vorgenommen werden. Die Hersteller von Trocknungsanlagen waren unter den gegebenen Umständen nicht zu einer Abgabe eines Angebotes zu bewegen. Es wird davon ausgegangen, dass die notwendigen Prozessschritte (Inertisieren, Füllen, Trocknen, Leeren) eines diskontinuierlich arbeitenden Trockners in Summe einen längeren Arbeitstakt als der Vorzerkleinerer benötigen. Aus diesem Grund wird von einer batchweisen Trocknung abgesehen.

Die zu verdampfende Flüssigkeit ist hauptsächlich an die zu separierende aktive Masse gebunden, die ihrerseits wiederum mehr oder minder stark an den Ableiterfolien (Kupfer- bzw. Aluminiumfolien) haftet. Daher wäre es von Vorteil, wenn die Trocknung mit einer mechanischen Beanspruchung des Trockengutes einhergeht. Für eine intensive Trocknung sind Fließbetttrockner sehr gut geeignet. Da es sich bei dem zu trocknendem Gut aber um ein sehr inhomogenes Material mit sehr breitem Stückgrößenspektrum (grobe Metallteile bis hin zu feinem Pulver) handelt, kommen nur Trockner in Frage, die über eine Erregung des Anströmungsbodens einen Materialtransport gewährleisten können. Die Wahl des Trockners sollte demnach auf einen Vibrationsfließbetttrockner fallen. Neben der effektiven Trocknung wird die Vibration zusätzlich zu einem weiteren Abreiben der aktiven Masse von den Folien beitragen.

Die Trocknung muss wie zuvor die Zerkleinerung unter Schutzgasatmosphäre (Stickstoff) stattfinden. Die Trocknergase werden im geschlossenen Kreislauf geführt und mittels Filter und Kondensator gereinigt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

- Verfahrensbeschreibung Vorzerkleinerung und Trocknung

Das getaktete Transportband wirft direkt in die eintragsseitig geöffnete Eintragsschleuse (3.03) (Schacht mit zwei Schiebern bzw. Klappen), die den Querstromzerspaner gasdicht nach außen abschließt, ab. Nach dem Schließen wird die Schleuse mit Stickstoff inertisiert. Durch austragsseitiges Öffnen der Schleuse fallen die Zellenpakete in den inertisierten Querstromzerspaner - QZ – (3.04) und werden dort während einer vorgegebenen Beanspruchungsdauer, mit einer an den jeweiligen Zellentyp optimal angepassten Beanspruchungsintensität, grob aufgeschlossen.

Nach Ablauf der Beanspruchungsdauer wird der QZ über eine Klappe in einen Pufferbehälter (3.05) entleert, aus dem das zerkleinerte Material durch eine Zellenradschleuse (3.06) über eine Rohrförderschnecke (3.07) auf den Trockner (3.08) dosiert wird. Anschließend wird der QZ mit Stickstoff gespült und inertisiert.

Der für die Inertisierung der Anlage erforderliche Stickstoff, wird in flüssiger Form in extern zur Verfügung gestellten Speichern (3.02) (Miete) gelagert und nach Bedarf über einen Verdampfer (3.02) (Miete) für die Anlage aufbereitet. Es ist vorgesehen, das Trocknungsgas des Trockners und das Spülgas des Vorzerkleinerers in einem gemeinsamen Gaskreislauf, Stickstoffkreislauf, zusammenzufassen, da für beide Aggregate vergleichbar aufgebaute Gaskreisläufe notwendig sind. Der Inertgaskreislauf arbeitet wie folgt.

Während der Stickstoff beim Vorzerkleinerer mit seinen Nebenaggregaten im Ausgangszustand verwendet wird, ist dieser für den Trockner über einen Gaserhitzer auf die vorgegebene maximal zulässige Trockengastemperatur zu erhitzen. Sowohl der Stickstoff aus der Vorzerkleinerung als auch der aus dem Trockner sind mit Feststoffpartikeln und Lösungsmitteldämpfen beladen. Der im Kreislauf zu führende Stickstoff wird über einen Jetfilter vom Feststoff entfrachtet und anschließend über einen Kondensator geführt, in welchem die enthaltenen Lösungsmittel abgeschieden werden. Die Kühlung des Kondensators kann entweder mittels Stickstoff oder aber Kaltwasser (1 - 5°C) erfolgen. Da es in den Anlagenteilen aufgrund von nicht auszuschließenden Leckagen zu einem Sauerstoffeintrag kommt, erfolgt vor der Wiedereinspeisung des Gasstroms in den Gaskreislauf eine kontinuierliche Sauerstoffgehaltsmessung, über die die Einspeisung frischen Stickstoffs in die Anlage geregelt wird. Um den Unterdruck im Gaskreislauf stets zu gewährleisten, ist eine Gasteilmenge aus der Anlage in die Umgebung auszuschleusen. Wegen der enthaltenen Lösungsmittelreste ist das abgegebene Gas über einen Aktivkohlefilter (3.09) zu reinigen, bevor es in die Atmosphäre abgegeben werden kann.

Die im Kondensator gewonnenen Elektrolytgemische werden mittels Fassabfüllstation (3.10) in Fässer abgefüllt, verwogen und palettiert. Die im Filter abgeschiedenen Stäube (Wertprodukt) werden pneumatisch zum Filter der Hauptentstaubung (3.27) gefördert, um sie von dort aus wieder in die Prozessklette einzuspeisen.

Sortierung

- Magnetscheidung

Die vorzerkleinerten und getrockneten Batteriezellen, Stückgrößen ca. <60mm, werden aus dem Trockner direkt auf ein Transportband, 500mm Breite, aufgegeben. Das Transportband (3.12) durchläuft einen Überbandmagnetscheider (3.13), um in einem ersten Schritt magnetisierbare Metallbestandteile abzutrennen. Das entstehende Fe – Produkt wird in geeignete Paletten ausgeworfen. Als Scheider wurde ein Überbandmagnetscheider, Fabrikat Steinert,

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

mit einer Arbeitsbreite von 650 mm ausgewählt. Vom Transportband wird das magnetgeschiedene Material direkt in einen Querstromsichter (3.14) aufgegeben.

- Schwerteileabtrennung

Dieser zweite Sortierschritt soll der groben Abtrennung von Schwerteilen (Gehäuseteile, Brücken, Muttern, Bolzen und dgl.) dienen. Als Leichtfraktion fallen weitgehend Folien (Kupfer, Aluminium, Kunststoff) und die zu gewinnende aktive Masse als Pulver an. Als einfaches Aggregat für einen solchen Trennprozess bieten sich sogenannte Querstromsichter an. Das zu sortierende Material wird in einen nahezu horizontalen Luftstrom eingestreut und in diesem in Abhängigkeit der Masse der einzelnen Materialbestandteile unterschiedlich stark ausgelenkt. Während schwerere Teile in einer ersten Kammer aufgefangen werden, transportiert der Luftstrom leichtere in eine zweite Kammer. Stäube werden mit dem Luftstrom aus dem Sichter ausgetragen und gesondert in Zyklon- bzw. Filterabscheidern aufgefangen. Die am Markt angebotenen Ausrüstungen erscheinen für die zu behandelnden Materialmengen überdimensioniert. Daher wird der Bau einer Maschine geeigneter Größe und Form als Sonderanfertigung empfohlen.

- Aufschlusszerkleinerung

Die Leichtfraktion aus dem Querstromsichter kann neben erheblichen Anteilen nicht vollständig aufgeschlossener Verbunde von Ableiterfolien und aktiver Masse auch größere Aggregate aktiver Masse enthalten. Um das angestrebte hohe Ausbringen der aktiven Masse zu erreichen, muss das erzeugte Sichterleichtgut einer nochmaligen Aufschlusszerkleinerung unterzogen werden. Für diese Aufschlusszerkleinerung wurde ein Granulator MEWA UG600 (3.16) ausgewählt. Der Aufschlussgrad kann bei dieser Maschine über die Wahl eines geeigneten Siebrostes angepasst werden. Die Aufschlusszerkleinerung soll die aktive Masse möglichst komplett von den Metallfolien lösen, ohne diese Folien zu fein zu zerkleinern.

- Siebklassierung

Für die Abtrennung der aktiven Masse aus dem Zerkleinerungsprodukt des Granulators eignet sich wegen der großen Unterschiede der Partikelgrößen der zu trennenden Komponenten eine Siebung bei z.B. 1mm Siebmaschenweite. Erfahrungen haben gezeigt, dass bei dieser Siebmaschenweite die pulverisierte aktive Masse sehr sicher von den Folien abgetrennt werden kann. Zur Absiebung wird das Granulatorprodukt zusammen mit dem in den Entstaubungsanlagen abgeschiedenen Stäuben auf die Siebmaschine aufgegeben. Für diese Sortieraufgabe wurde eine Mehrdeck Horizontalsiebmaschine MHR 7/20/III von Siebtechnik (3.18) ausgewählt.

Der Siebunterlauf, aktive Masse in Pulverform, wird mittels geeigneter Förderschnecke (3.19)einer Fassabfüllung mit Palettiervorrichtung (3.20) zugeführt und verpackt. Der Siebüberlauf, ein mit Kunststoff verunreinigtes Gemisch von Kupfer- und Aluminiumfolienabschnitten wird, ebenfalls mittels Förderschnecke (3.21), auf einen Luftherd (3.22), auch Trenntisch genannt, aufgegeben.

Weitere Aufbereitung der Folienfraktion

Um die Metallfolien mit höherem Gewinn vermarkten zu können, ist deren weitgehend stoffliche Trennung erforderlich. Hierfür bieten sich wegen der stark unterschiedlichen spezifischen Gewichte der enthaltenen Metalle Dichtesortierprozesse zur Trennung an. In der trockenen Aufbereitung sind sogenannte Luftherde als effektive Sortierer eingeführt. Für die

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

vorliegende Sortieraufgabe wurde ein Trenntisch TTS 300/1000/1 von TRENNSO Trenntechnik ausgewählt.

Der Luftherd, besteht aus einer geneigten, horizontal schwingenden, luftdurchströmten porösen Platte. Unter entsprechenden Voraussetzungen gestatten die meisten der eingeführten Trenntische die Trennung von Gemischen unterschiedlich schwerer Partikel in zwei Produkte. Dabei bewegen sich spezifisch schwerere Teilchen zum oberen Ende des Anströmbodens wohingegen die leichteren zum unteren Austragsende schwimmen. Dabei wird sich bei diesen Herdbauarten mit Zweiproduktentrennung immer nur ein Produkt mit einer höheren Reinheit erzielen lassen. Dies geht mit Verlusten und einer Qualitätsverschlechterung des jeweils anderen Produkts einher.

Die Metallfolien (Foliendicke ca. 20 µm) weisen im Anfallzustand Schüttgewichte zwischen 150 kg/t und 300 kg/t auf und wären damit weder effektiv zu transportieren noch in Schmelzbetrieben einsetzbar. Dazu müssen diese zu Briketts entsprechender Dichte verpresst werden. Hierfür stehen am Markt entsprechende Brikettierpressen zur Verfügung.

Als Brikettierpresse wurde eine RUF 5,5/1700/80 (3.26) ausgewählt. Die Durchsatzleistung der Brikettierpressen ist vorwiegend vom Schüttgewicht des Pressenaufgabegutes abhängig. Da die Eigenschaften der zukünftig erzeugten Folienfraktionen derzeit nicht bekannt sind, orientiert sich die Auswahl der Pressengröße nur an der nominalen Durchsatzleistung laut Hersteller.

Um die Folienfraktionen getrennt auf einer Presse verarbeiten zu können, sind zwischen Trenntisch und Brikettierpresse zwei Pufferbehälter (3.24) zu errichten, die mindestens eine Tagesproduktion, ca. 2,5 m^3, der entsprechenden Folienfraktion aufnehmen können. Damit werden die Produktwechsel an der Brikettierpresse auf ein Minimum beschränkt, was zur Reduzierung der Menge an Gemischtbriketts beiträgt.

Absaug- und Entstaubungsanlage

Für die Abschätzung der für eine Entstaubung der Anlage notwendigen Luftmengen wird von der folgenden Anzahl und Art von Absaugstellen ausgegangen:

Tabelle G-4: Abschätzung der erforderlichen Entstaubungsluftmengen

Absaugstelle	Anzahl	erforderliche Luftmenge [m^3/min]	erforderliche Gesamtluftmenge [m^3/h]
Produktübergabestellen	8	30	14.400
Behälter	2	20	2.400
Granulator	1	60	3.600
Überbandmagnetscheider	1	30	2.160
Luftherd	1	0,5	30
Querstromsichter	1	40	2.400
pneumatischer Transport	1	0,5	30
Summe			**25.020**

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die abgeschätzte erforderliche Gesamtluftmenge liegt bei etwa 25.000 m^3/h. Geht man davon aus, dass 15 % der in der durchgesetzten Aufgabemenge enthaltenen aktiven Masse, ca. 300 kg, während der Verarbeitung in Form von Stäuben freigesetzt wird und gefasst werden muss, kann eine Beladung der Entstaubungsluft mit 1,8 gFS/m^3 abgeschätzt werden.

Wird davon ausgegangen, dass alle flüchtigen leicht entzündlichen Lösungsmittel bei der Trocknung entfernt wurden, ist für die Entstaubung der Sortieranlage ab Trockneraustrag kein Explosionsschutz zu beachten. In die Hauptentstaubungsanlage werden gleichzeitig die aus der Vorzerkleinerung/Trocknung stammenden Stäube eingespeist (pneumatische Förderung). Somit fallen alle Stäube zentral an und werden der Fassabfüllung zugeführt.

Das Verfahrensfließbild für die gesamte mechanische Aufbereitung der Batteriezellen, das in Abbildung G-1 dargestellt ist, gibt noch einmal einen Überblick über die einzelnen Komponenten der Anlage, sowie über die Materialströme innerhalb der Anlage.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

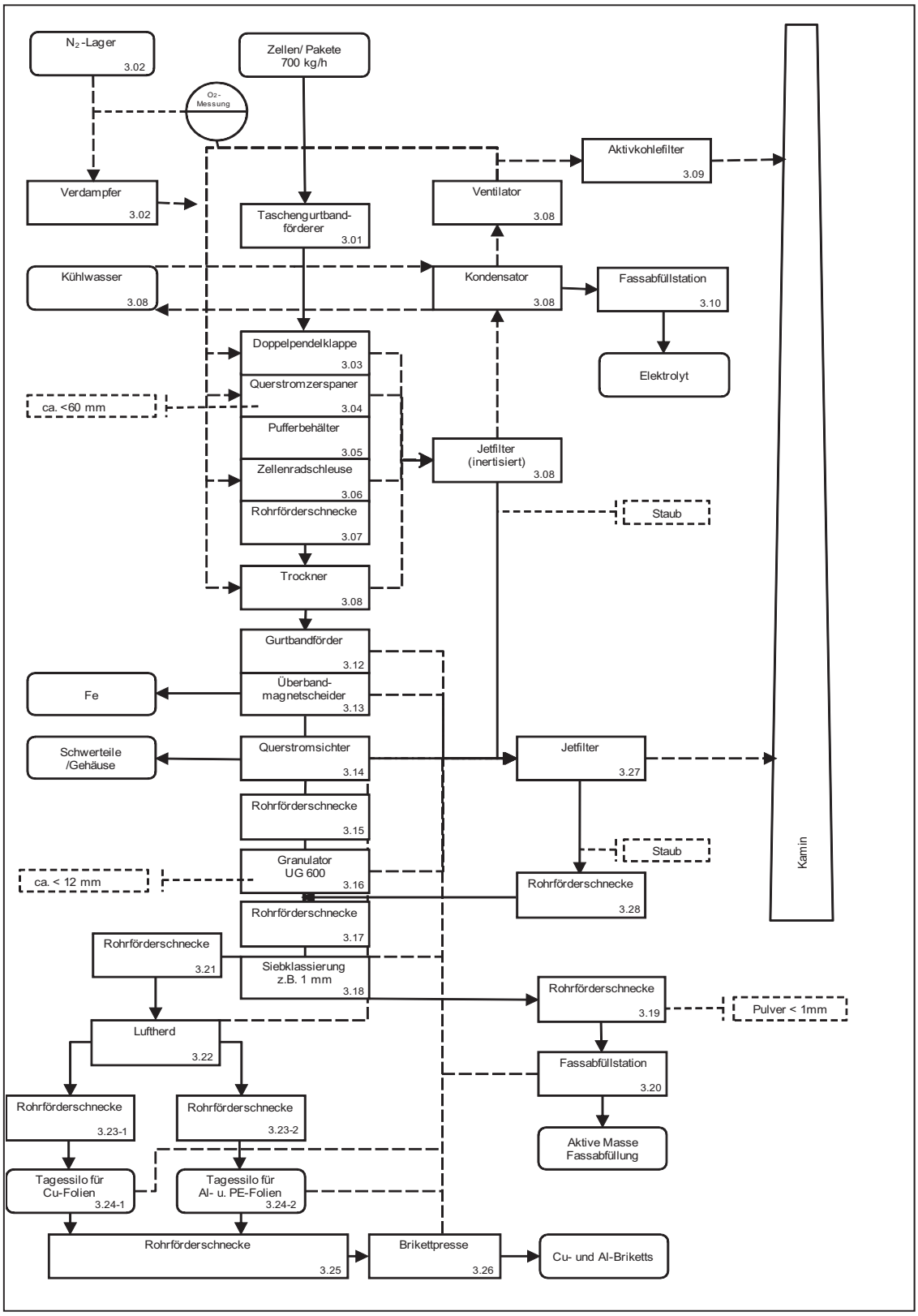


Abbildung G-1: Verfahrensfließbild mechanische Aufbereitung

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

G.3 Planung des Gesamtsystems und Auslegung der Prozessschritte

Basierend auf den Laborversuchen für die vorgelagerten Schritte des Recyclingprozesses wurden die Anforderungen an die Inputmaterialien für Chemetalls Recyclingprozess ermittelt. In einem Kick-off Meeting in Braunschweig wurde das Vorgehen für die Planung des Gesamtsystems abgestimmt.

Die Kapazität der Pilotanlage für die mechanische Separation der Batteriematerialien wurde spezifiziert. Weiterhin wurde eine Spezifikation der Kontaminationsgrenzen der Produkte der Pilotanlage vorgelegt.

Es wurde eine Bewertung der einzelnen Prozessschritte der mechanischen Aufbereitung vorgenommen, um die verfahrenstechnisch optimale Prozesskette für den folgenden hydrometallurgischen Prozess festzulegen. Es kommt darauf an, die höchste ökologische und ökonomische Effizienz in der Rückgewinnung von Lithium und Übergangsmetallsalzen zu gewährleisten.

Planungsgrundlagen

Folgende Rahmenbedingungen wurden für die Gestaltung der Anlage festgelegt.

- Verarbeitungskapazität von 700 kg Zellmasse je Stunde
- einschichtiger Betrieb
- zu verarbeitende Batterietypen sind Lithium-Ionen Akkumulatoren in der Form von Traktionsbatterien, Hybridbatterien und Plug-In-Batterien
- es ist keine thermische Behandlung der Akkumulatorzellen vorgesehen

Anordnung und Verkettung der Bereiche Lagerung, Demontage und mechanische Aufbereitung

Auf die Verkettung und die spezifische Auslegung der einzelnen Arbeitsbereiche innerhalb des Gesamtsystems wurde bereits an den relevanten Stellen in den **AS G.1** und **AS G.2** eingegangen. Hier sei nur noch einmal kurz resümiert, dass der Transport vom Eingangslager zu den Demontagestationen per Gabelstapler durchgeführt wird und die entladenen Batteriezellen zur mechanischen Verarbeitung mittels Taschengurtbandförderer weitertransportiert werden. Der Transport innerhalb der mechanischen Aufbereitung läuft pneumatisch ab. Wie in Abbildung G-2 erkennbar ist dieser innerbetriebliche Transport notwendig, da sich die Gesamtanlage in drei Bereiche gliedert.

Die Anlieferung erfolgt in das Eingangslager, in dem auch die Vorentladung stattfindet. Die per LKW angelieferten Batteriesysteme werden mittels Gabelstapler entnommen und eingelagert. Der Gabelstapler bringt dann auch die entsprechenden Batteriesysteme zur Demontagestation.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

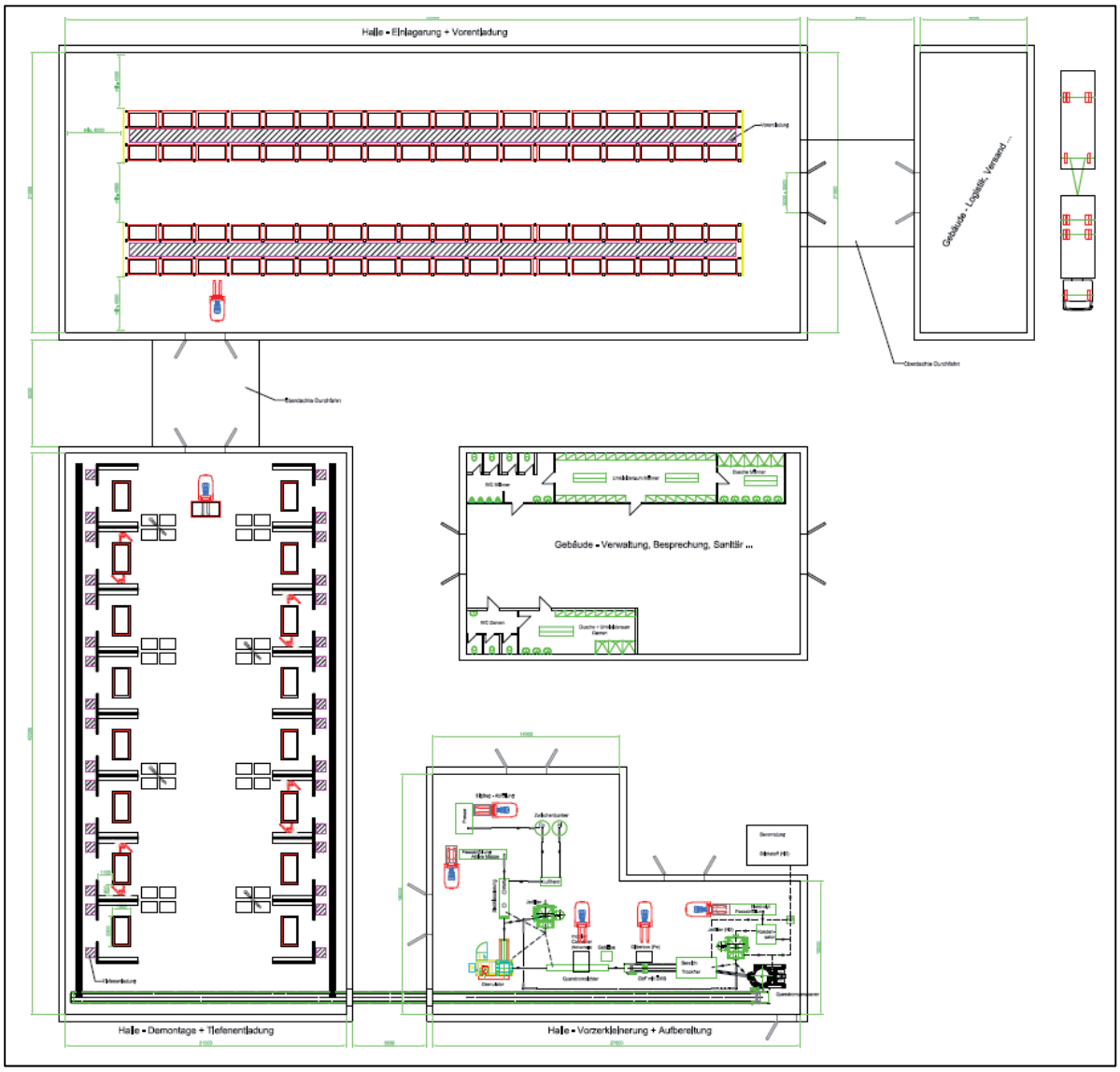


Abbildung G-2: Layout der Aufbereitungsanlage für Lithium-Ionen-Batterien

Nachdem die Batteriesysteme demontiert wurden und die Zellen entnommen sind, werden diese auf ein Taschengurtförderband gelegt und gelangen so in den Bereich der mechanischen Aufbereitung. Innerhalb dieser Aufbereitungsanlage erfolgt der Transport nach der Zerkleinerung, dem ersten Prozessschritt, ausschließlich pneumatisch.

Materialflussplanung

Der Materialfluss wird in die zwei Bereiche Demontage und mechanische Aufbereitung aufgeteilt (s. Abbildung G-3). Im Bereich der Demontage werden die System-, wie auch die Modulgehäuse, die in der Regel aus Stahl oder Aluminium bestehen, aber auch kupferhaltige Stromschienen und Kabel entfernt. Der Kunststoffanteil stammt hauptsächlich ebenfalls aus dem Gehäuse, wie auch vom Kühlsystem.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

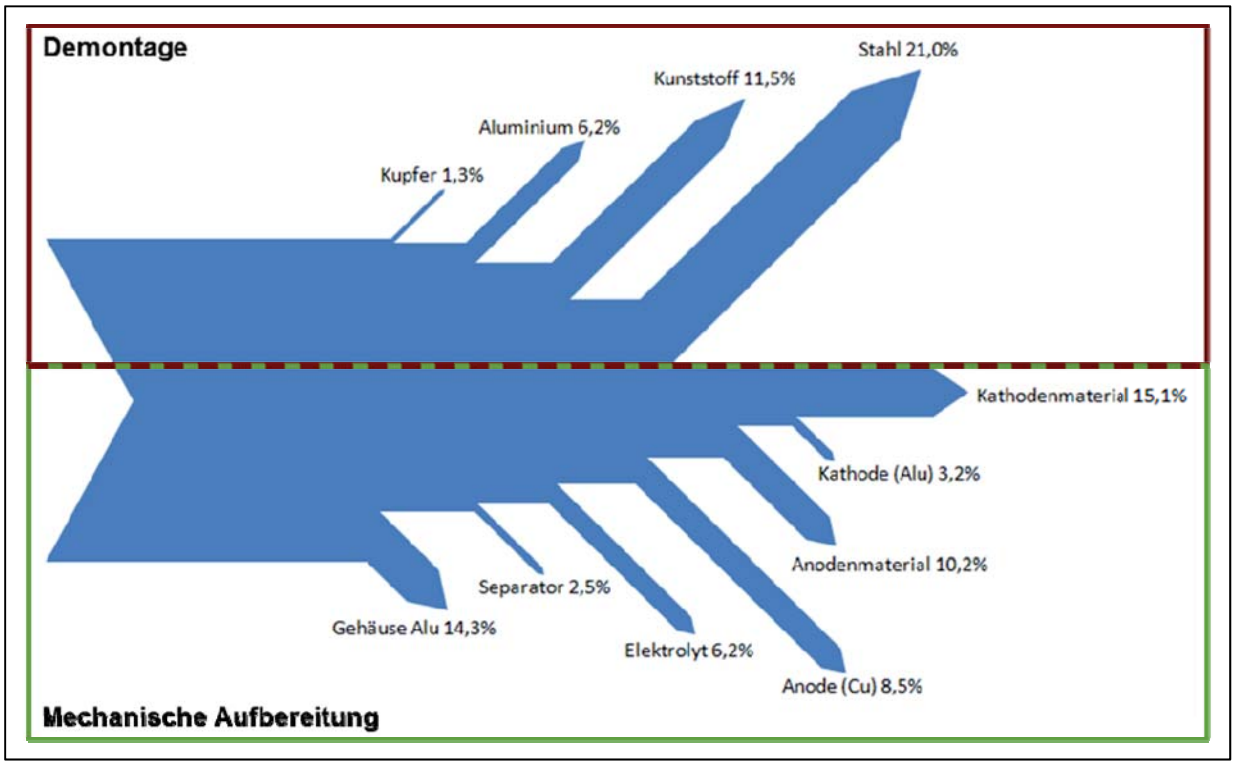


Abbildung G-3: Sankey-Diagramm zum Materialfluss in den Prozessen

Die Stoffe, die aus der mechanischen Aufbereitung kommen, stammen alle aus den Batteriezellen. Das Aluminium der Kathode ist die Stromsammlerfolie, auf der das Aktivmaterial aufgebracht ist. Das Graphit der Anode ist auf eine Stromsammlerfolie aus Kupfer aufgebracht. Das Kathodenmaterial wird in späteren Schritten in der Chemetall-Anlage weiterverarbeitet.

Annahme, Lagerung der Traktionsbatterien und der Produktfraktionen, Versand

Die Batterien werden mit Support auf LKW bis zum Zerlegebetrieb transportiert. Traktionsbatterien sind Niederspannungsstromversorgungsanlagen im Sinne der DIN VDE 0100-717 und damit als solche zu behandeln.

Deshalb sollen bereits der Umschlag und die Lagerung der Batterien nicht auf einem Freilager, sondern in geschlossenen Räumen erfolgen. Das Lager wird konzipiert für die Vorhaltung des Inputmaterials für die Dauer von zehn Arbeitstagen.

Auf den Transportgestellen werden die Batterien vom Lieferfahrzeug entladen und im nachfolgend beschriebenen Lager entgegengenommen.

Bei Unterstellung, dass nur Batterien ohne Leckagen (TÜV) für Fahrzeuge im öffentlichen Straßenverkehr eingesetzt werden dürfen, ist eine Umverpackung nicht erforderlich (Masse- und Platzersparnis). Durch Verkehrsunfälle oder andere Ereignisse zerstörte Batterien stellen nicht den Hauptanteil am Altbatterieaufkommen dar und sind deshalb nicht Gegenstand weiterer Betrachtungen.

Die Annahme der Batterien erfolgt über eine Materialschleuse mit den Abmessungen Breite x Höhe von ca. 2,50 m x 2,50 m. Bei einer Vorhaltung von zwei Produktionswochen (zehn Arbeitstage) ist eine rechnerische Lagerkapazität für 431 große Traktionsbatterien zu schaffen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Bei angenommenen Abmessungen von 2,0 m x 1,0 m x 0,5 m bietet sich eine mehrtägige Lagerung in Schwerlastregalen an. Zur Nutzung der bebauten Fläche wird im Lagerbereich die Grundentladung der Akkumulatoren durchgeführt. Die Bedienung dieser Regale erfolgt mittels Gabelstapler bzw. Regalbediengeräten, die diese zum einen einstapeln und nach der Grundentladung direkt zu den Demontageplätzen befördern bzw. an Flachtransportwagen übergeben.

Die Aufbereitungsanlage soll eine Kapazität zur Verarbeitung einer Zellmasse von 700 kg/h haben. Der Betrieb der Aufbereitungsanlage erfolgt einschichtig.

Tabelle G-5: Berechnung des Lagerbedarfs für die Batterietypen

	Traktion, groß	**Traktion, klein**	**Hybrid**
Batterieabmessungen	1 m x 2 m	1 m x 0,6 m	0,8 m x 0,5 m
Zellmasse/Stück.	130 kg	75 kg	25 kg
Anzahl	431	747	2240
Gesamtmasse/Stück.	300 kg		
Gesamtmasse	129 t		
Spez. Lagerbedarf	0,35 t/m²	0,8 t/m²	0,8 t/m²
Nettolagerbedarf	370 m²		

Für weitere Betrachtungen wird die Lagerung von großen Traktionsbatterien in sechs Einheiten übereinander angesetzt. Dann werden für die Lagerung von 432 Batterien zuzüglich notwendiger Stellflächen für Regale 370 m² Lagerfläche beansprucht. Unter Berücksichtigung notwendiger Logistikflächen (Bedienung der Lagerregale) sollte für das Lager eine Grundfläche von 1.155 m² vorgesehen werden. Bei einer Gebäudegestaltung mit einem flachen Spitzdach ergeben sich unter der Annahme einer Traufhöhe von 6 m und einer Firsthöhe von 8 m ein umbauter Raum von 8.100 m³ u. R.

Das Lager selbst bleibt ein Kaltraum und wird aus ungedämmten Lindapter Wandbauelementen errichtet. Zum Betrieb erhält der Raum eine für die Durchführung der Umschlag- und Lagerarbeiten ausreichend dimensionierte Beleuchtung.

Da im Lagerbereich keine Batterien geöffnet werden sollen, kann auf eine Bewetterung verzichtet werden.

Die erzeugten Produkte, ausgenommen die groben Metallfraktionen (Batteriegehäuse, Buntmetalle), die im Freien gelagert werden können, werden in dem hierfür zu errichtenden Gebäude für Logistik, Versand zwischengelagert.

Für die Lagerung der groben Metallfraktionen sind entsprechende Container im Außengelände aufzustellen.

Die bei der Aufbereitung der Akkumulatorzellen anfallenden Produkte ergeben einen geschätzten Lagerplatzbedarf, der der nachstehenden Tabelle G-6 zu entnehmen ist.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tabelle G-6: Abschätzung des Lagerplatzbedarfs für die Produkte

Material	kg/h	Fass / h	Paletten /d
Elektrolytflüssigkeit	74	0,37	1,48
aktive Masse	300	1,25	5
Aluminiumbriketts	44		0,3 BigBag
Kupferbriketts	122		0,35 BigBag

Ausstattung der Gesamtanlage

In Tabelle G-7 befindet sich eine Übersicht über die einzelnen Posten die im Verfahrensfließbild genannt sind und die sich in der Layout der Gesamtanlage wiederfinden. Diese Tabelle enthält neben der Positionsbezeichnung und der benötigten Anzahl der Positionen auch technische Daten, so diese vorhanden sind, sowie mögliche Hersteller der Geräte.

Tabelle G-7: Liste der Maschinen und Ausrüstungen

Nr.	Bezeichnung	Typ/techn. Daten	Hersteller	Anzahl
1.0	***Lager- und Transporttechnik***			
1.01	Lagerregal	LxBxH: 45,0x4,5x5,0 m (2Stück)	GALLER Lager- u. Regaltechnik	2
1.02	Schmalgangstapler		Köttgen Service GmbH Kerpen	3
1.03	Entladearmaturen			4
2.0	***Entladung und Demontage***			
2.01	Demontageplätze			16
2.02	Hebezeuge			16
2.03	Werkzeugausstattung			16
2.04	Entladebesteck			16
3.0	***Mechanische Aufbereitung***			
3.01	Taschengurtbandförderer			1
3.02	Stickstoffversorgung	12000 l. Tankanlage, inkl. Verdampfer	Linde-Mietanlage	1
3.03	Eintragsschleuse	z.B. Doppelpendelklappe od. Doppelschieber mit Druckentlastung		1
3.04	Querstromzerspaner	QZ 1200 druckentlastet	MEWA	1
3.05	Pufferbehälter	100 Liter Fassungsvermögen;		1
3.06	Austragsschleuse	Zellenradschleuse Dm. 400mm; druckfest		1
3.07	Rohrförderschnecke	200mm x 2m		1
3.08	Trocknungsanlage	2000 m³/h; inkl. Pulse-Jet-Filter; Gebläse, Kondensator Ex-geschützt inkl. Druckentlastungseinrichtungen		1
3.09	Aktivkohlefilter		NORIT-Mietanlage	
3.10	Kondensatabfüllung	SlimLine 6.1-00 exgeschützt mit Fasspalettierung	Feige Filling GmbH	1

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Nr.	Bezeichnung	Typ/techn. Daten	Hersteller	Anzahl
3.11	Rohrleitung - Vorzerkleinerung +Trocknung	Edelstahlausführung		1
3.12	Transportband zum Magnetscheider	500mm x 6m partiell Edelstahl		1
3.13	Überbandmagnet-scheider	Steinert UM 650mm	Steinert Elektromagnetbau	1
3.14	Querstromsichter		Eigenbau	1
3.15	Rohrförderschnecke	140mm x 5m		1
3.16	Granulator	UG 600	MEWA	1
3.17	Rohrförderschnecke	140mm x 3m		1
3.18	Siebmaschine	Horizontalmehrdecksiebmaschine MHR 7/20/III	Siebtechnik Mülheim	1
3.19	Rohrförderschnecke	80mm x 3 m für Siebunterlauf		1
3.20	Fassbefüllung	Fassbefüllstation mit Fasspalettierung	Hecht Technologie	1
3.21	Rohrförderschnecke	140mm 3m Siebüberlauf zum Luftherd		1
3.22	Luftherd	TTS 300/1000/1 (inkl. Behälter u. Dosierer)	Trennso Trenntechnik	1
3.23	Förderschnecken für Herdprodukte	140mm x 6m		2
3.24	Tagessilo für Herdprodukte			2
3.25	Förderschnecken zur Brikettpresse	140mm x 8m		1
3.26	Brikettpresse	RUF 5,5/1700/80	RUF	1
3.27	Pulse-Jet-Filter zur Anlagenentstaubung	25000 m³/h, inkl. Gebläse, Verrohrung, Absaughauben		1
3.28	Rohrförderschnecke	80mm x 2m für Entstaubung		1

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

H Literaturverzeichnis

Bass, F. M. (1969): A New Product Growth for Model Consumer Durables. Management Science, Vol. 15, No. 5, S. 215–227.

Buchert, M; Jenseit, W.; Merz, C.; Schüler, D. (2011): Ökobilanz zum „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec). Endbericht. Öko-Institut e. V., Darmstadt

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.

Konietzko, S.; Gernuks, M. (2011): Ressourcenverfügbarkeit von sekundären Rohstoffen. Potenzialanalyse für Lithium und Kobalt. Umbrella-Arbeitsgruppe Ressourcenverfügbarkeit im Rahmen der BMU-geförderten Projekte LithoRec und LiBRi. Abschlussbericht. O.V.

Sarre, Guy; Blanchard, Philippe; Broussely, Michel (2004): Aging of lithium-ion batteries. Journal of Power Sources 127 (2004), S. 65 – 71.

Statistisches Bundesamt (2009): Statistik des Kraftfahrzeug- und Anhängerbestandes. Stand: 19.07.2010. Abgerufen am: 19.07.2010. http://www-genesis.destatis.de.

Sterman, J. D. (2000): Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Boston: Irwin McGraw-Hill

UN (2008): European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR) – Applicable as from 1 January 2009. Hrsg.: United Nations Publications. ISBN 978-92-1-139131-2.
http://www.unece.org/trans/danger/publi/adr/adr2009/09ContentsE.html.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

I Anhang

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Anhang 1: Exogene Faktoren des Altbatterieaufkommen

Bezeichner	Beschreibung	Variablenbezug	Maßeinheit
A1	Initiales Marktpotenzial	Antriebskonzept	1.000 Fahrzeuge
A2	Zeitpunkt der Erreichung (zu A1)		Jahr
A3	Langfristiges Marktpotenzial		1.000 Fahrzeuge
A4	Zeitpunkt der Erreichung (zu A3)		Jahr
A5	Erwartete Lebensdauer des Fahrzeugs		Jahr
B1	Durchschnittliche Zellenkapazität der Referenzbatterie		kWh
B2	Durchschnittliche Zellenkapazität der Referenzbatterie		Ah
B3	Masse der Referenzbatterie		kg
B4	Kapazität der Referenzbatterie		kWh
C1	Erwarteter Anteil Batterievariante an Antriebskonzept	Antriebskonzept und Batterievariante	Prozent
C2	Durchschnittliche Anzahl Zellen im Batteriesystem je Batterievariante und Antriebskonzept		Zelle
C3	Erwartete Lebensdauer für den Betrieb als Traktionsbatterie		Monate
D1	Durchschnittliche Verzögerung beim Rücklauf	Weiterverwendung außerhalb des Systems	Monate
D2	Anteil der verzögerten Rückläufer		Prozent

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Anhang 2: Szenarioparametrierung, Masse (B3) und Kapazität (B4) der Batterien

		HEV[28]	PHEV[29]	BEV[30]
Batteriemasse (B3)	[kg]	38	140	255
Batteriekapazität (B4)	[kWh]	1,3	12,1	23,0

[28] Referenz: Audi-Q5-Hybridbatterie.

[29] Masse und Kapazität aus Umbrella-LCA-Randbedingungen.

[30] Bezogen auf 23-kWh-Batterie und eine Energiedichte von 90 Wh/kg (Umbrella-LCA-Randbedingungen). Referenz: VW E-Up!. Energiedichte aus Umbrella-LCA-Randbedingungen. Masse rechnerisch ermittelt.

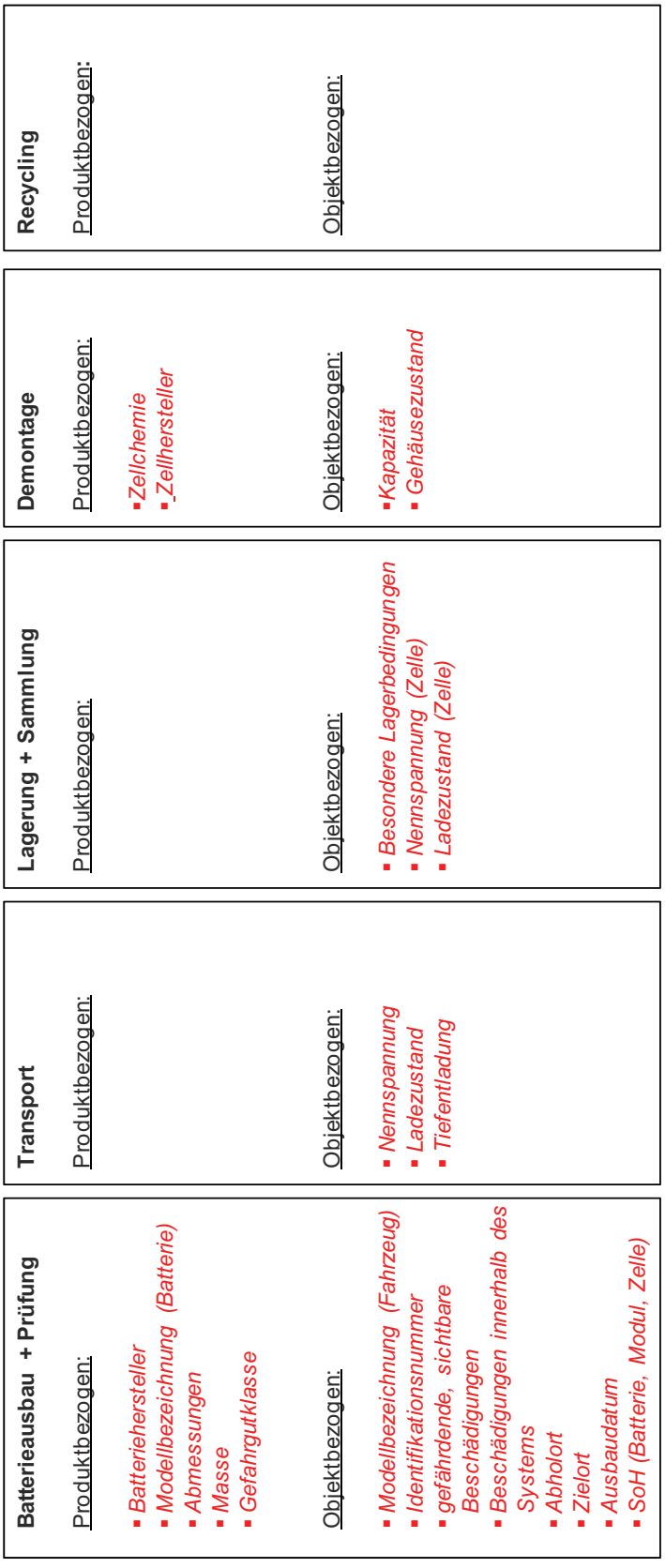
Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Anhang 3: Informationsbedarf entlang der Prozesskette



Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Anhang 4: Informationsangebot entlang der Prozesskette



Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Anhang 5:Batterietypen, Normierung sowie Kapazitäts- und Transformationskoeffizient

Batterietyp	**Normierung** [BEV-Äquivalente]	**Kapazitätskoeffizient Umschlaglager und Demontagewerk** [Kap.-Einheiten/BEV-Äq.]	**Transformationskoeffizient Zellen** [kg/BEV-Äq.]
HEV	0,1	0,1	20
PHEV	0,5	0,5	100
BEV	1,0	1,0	200
BEV-Äq.	1,0	1,0	200

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Anhang 6:Transportkosten für Batteriesysteme (Vor-/Hauptlauf) und Zellen

	Vorlauf (Sammlung) **Quellen zu Umschlaglagern und Demontagewerken**	Hauptlauf **Umschlaglager zu Demontagewerken**	Zelltransport **[EUR / (t*km)]**
Annahme	Keine Stapelung, 4 Europaletten pro BEV-Äquivalent, Kleintransporter)	Sammeltransport, keine Stapelung, 4 Europaletten pro BEV-Äquivalent, 40-Tonner	Sammeltransport, max. 25 Tonnen Zuladung, 40-Tonner
Verrechnungskostensatz pro 100 km	60 EUR / 100 km	140 EUR / 100 km	140 EUR / 100 km
Durchschn. Transportmenge	1 BEV-Äq.	8,25 BEV-Äq.	25 t Zellen
Spezifischer Transportkostensatz	0,600 EUR / (BEV-Äq.*km)	0,170 EUR / (BEV-Äq.*km)	0,056 EUR / (t*km)

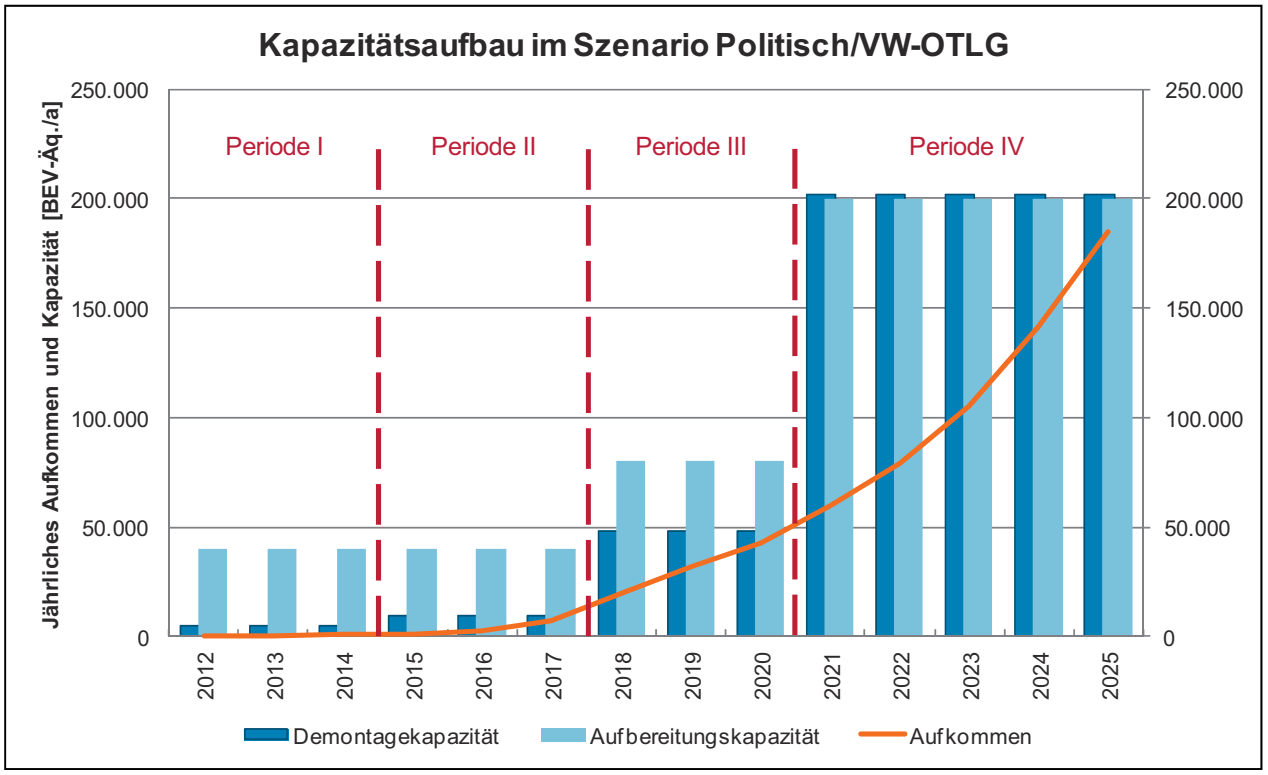
Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Anhang 7: Kapazitätsklassen und Zahlungen für Umschlaglager, Demontage- und Aufbereitungswerke

Modul	**Umschlaglager**		**Demontagewerk**		**Aufbereitungswerk**
Klasse	Klein	Groß	Klein	Groß	Groß
Kapazität	10.000 BEV-Äq./a	100.000 BEV-Äq/a	4.800 BEV-Äq./a	38.400 BEV-Äq./a	8.000 t Zellen/a
Errichtungsauszahlung	327.900 EUR	1.487.000 EUR	558.000 EUR	1.710.000 EUR	14.602.000 EUR
Fixe jährliche Auszahlungen	47.000 EUR/a	87.000 EUR/a	273.000 EUR/a	930.000 EUR/a	1.612.000 EUR
Zahlungsgleicher Deckungsbeitrag	-3,50 EUR/BEV-Äq.		(75 EUR/BEV-Äq.)		(1,196 EUR/kg)

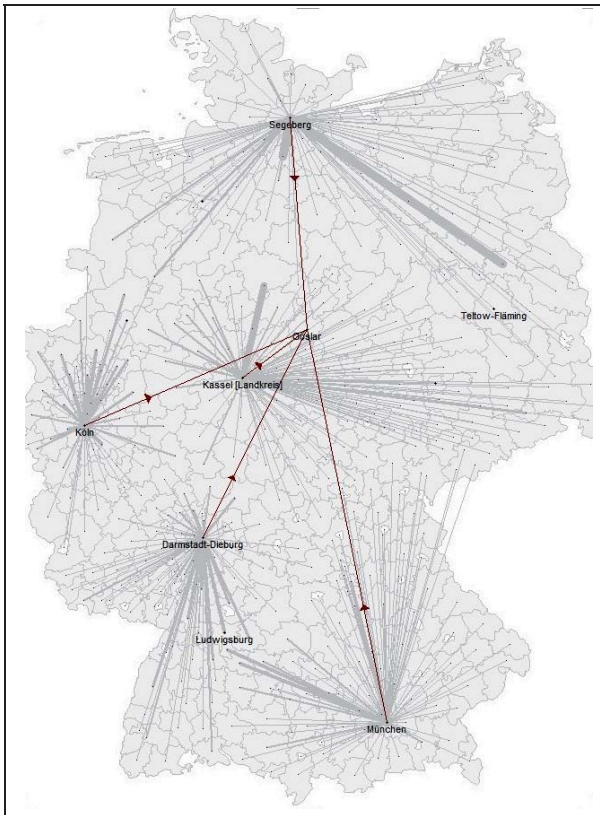
Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Anhang 8: Kapazitätsaufbau zur Demontage und Aufbereitung in Relation zum Altbatterieaufkommen im Planungszeitraum

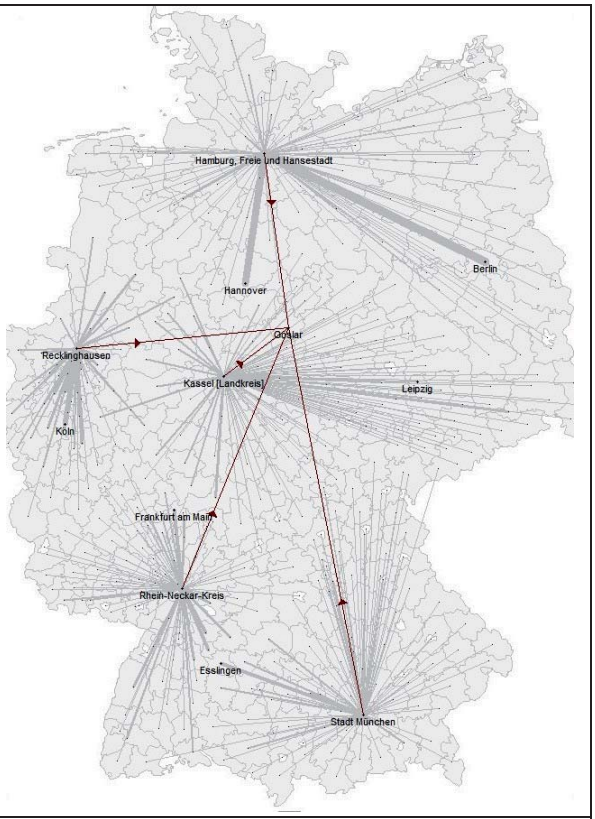


Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Anhang 9: Vergleich der Netzwerkstrukturen bei Vorgabe von VW-OTLG- (a) respektive VG-10-Standortmengen (b) bei Realisierung des Szenarios „Realistisch“ in der vierten Periode



a) Netzwerkstruktur „Realistisch/VW-OTLG“, Periode IV



b) Netzwerkstruktur „Realistisch/VG10“, Periode IV

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Anhang 10: Umschlagleistung und Schätzung der Gesamtinvestition kleiner und großer Umschlaglager

Bezug	Posten	Einheit	Klein	Groß
Umschlag- und Lagerleistung	**Umschlagleistung max.**	**BEV-Äq./a**	**10.000**	**100.000**
	Umschlagleistung bei 50 Umschlägen/a		2.500	25.000
	Umschlagleistung bei 100 Umschlägen/a		5.000	50.000
	Lagerleistung	**BEV-Äq.**	**50**	**500**
Lagertechnik	Regaltyp	Typ	1	2
	Anzahl benötigter Regale	Regale	5	32
	Spezifische Investition Lagertechnik	**EUR**	**8.500**	**54.400**
Gebäude	Lager- und Förderbodenfläche	qm	188	1204
	Lager- und Förderbodenfläche mit Aufschlag	qm	207	1324
	Hallenbodenfläche, insgesamt	qm	300	1400
	Spezifische Investition Gebäude	**EUR**	**240.000**	**1.260.000**
Grundstück	Seitenmaß bei quadratischer Halle	m	17	37
	Erschließungsfläche, gerundet	qm	180	380
	Grundstückfläche	qm	480	1780
	Spezifische Investition Grundstück	**EUR**	**14.400**	**53.400**
Fördertechnik	Anzahl benötigter Flurförderfahrzeuge	Fahrzeuge	1	2
	Spezifische Investition Fördertechnik	**EUR**	**30.000**	**60.000**
Sicherheitscontainer	Anzahl benötigter F90-Sicherheitscontainer	Container	1	2
	Spezifische Investition Sicherheitscontainer	**EUR**	**35.000**	**70.000**
	Gesamtinvestition	**EUR**	**327.900**	**1.497.800**

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Anhang 11: Schätzung der investitionsabhängigen Kosten für kleine und große Umschlaglager

Bezug	Posten		Klein [EUR]	Groß [EUR]
	Kalk. Zinssatz	9%		
Kalk. Zinskosten		Restwert*		
	Grundstück	100%	1.296	4.806
	Gebäude	0%	10.800	56.700
	Lagertechnik	10%	459	2.938
	Fördertechnik	5%	1.485	2.970
	Sicherheitscontainer	10%	1.890	3.780
	Kalkulatorische Zinskosten		**15.930**	**71.194**
Kalk. Abschreibungskosten[31]		Nutzungsdauer [a]		
	Gebäude	40	6.000	31.500
	Lagertechnik	20	383	2.448
	Fördertechnik	20	1.425	2.850
	Sicherheitscontainer	20	1.575	3.150
	Kalkulatorische Abschreibungskosten		**11.715**	**39.948**
Reparatur- und Instandhaltungskosten		Kostensatz*		
	Grundstück und Gebäude	0,80%	2.035	10.507
	Lagertechnik	1,00%	85	544
	Fördertechnik	2,00%	600	1.200
	Sicherheitscontainer	1,00%	350	700
	Reparatur- und Instandhaltungskosten		**3.070**	**12.951**
Sonstige investitionsabh. Kosten	Investitionsbezogene Verwaltung	0,50%	1.640	7.489
	Investitionsbezogene Versicherung	1,00%	3.279	14.978
	Kalkulatorisches Wagnis	0%	□	□
	Sonstige investitionsabhängige Kosten		**4.919**	**22.467**
Gesamte investitionsabhängige Kosten			**33.301**	**146.560**

*) Als Anteil der spezifischen Investition

[31] Grundstücke unterliegen keiner Abnutzung und werden nicht abgeschrieben.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Anhang 12: Kalkulatorische und pagatorische jährliche Fixkosten der Umschlaglager

Bezug	Posten		Klein[EUR]	Groß[EUR]
Kalkulatorische Kosten	**Kalkulatorische Kosten inkl. FfU**		**25.313**	**111.142**
Pagatorische Kosten	zurechenbare investitionsbezogene Kosten		7.989	35.418
	Betriebsnebenkosten		3.600	16.800
	Führungspersonalkosten (BPK-Aufschlag)		15.750	63.000
	Sonstige Gemeinkosten (BPK-Aufschlag)		15.750	63.000
	Pagatorische Kosten		**43.089**	**178.218**
		Fixkosten	**68.401**	**289.360**

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Anhang 13: Schätzung der Gesamtinvestition für die Errichtung kleiner und großer Demontagewerke

Bezug	Posten	Einheit	Klein	Groß
Demontage-leistung	Tägliche Demontagekapazität	BEV-Äq/d	20	200
	Tägliche Demontagekapazität	t BEV-Äq/d	7	66
	Jährliche max. Demontagekapazität	BEV-Äq/a	6.000	60.000
	Jährliche max. Demontagekapazität	t BEV-Äq/a	1.980	19.800
Lager- und Fördertechnik	Lagerbedarf Systeme	BEV-Äq.	25	250
	Lagertechnik Systeme	EUR	3.400	27.700
	Lagertechnik Teile	EUR	3.000	20.000
	Fördertechnik Systeme	EUR	4.000	20.000
	Anzahl benötigter F90-Sicherheitscontainer	Stück	1	2
	F90-Sicherheitscontainer	EUR	35.000	70.000
	Anzahl benötigter Flurförderfahrzeuge	Stück	2	4
	Investition Flurförderfahrzeuge	EUR	60.000	120.000
	Spez. Investition Lager- und Fördertechnik	**EUR**	**104.800**	**265.400**
Systemprüf- und -entlade-stationen	Anzahl Prüfstationen	Stück	1	2
	Anzahl Entladestationen	Stück	3	29
	Flächenbedarf	qm	16	147
	Spez. Investition Prüf- und Entladestationen	**EUR**	**47.000**	**416.000**
Demontage-stationen	Anzahl Demontagestationen	Stück	2	11
	Flächenbedarf	qm	60	330
	Spezifische Investition Demontagestationen	**EUR**	**6.000**	**33.000**
Zellentlade-stationen	Anzahl Entladestationen	Stück	3	29
	Flächenbedarf	qm	9	87
	Spezifische Investition Zellentladestationen	**EUR**	**63.000**	**609.000**
Gebäude & Grundstück	Größe Lagerhalle	qm	150	1.000
	Investition Lagerhalle	EUR	120.000	800.000
	Größe Demontagewerk	qm	200	800
	Investition Demontagewerk	EUR	160.000	640.000
	Grundstückgröße	qm	525	2.700
	Investition Grundstück	EUR	15.750	81.000
	Spez. Investition Gebäude & Grundstück	**EUR**	**296.625**	**1.525.500**
	Summe der spezifischen Investitionen	**EUR**	**517.425**	**2.848.900**
	Faktor für Unvorhergesehenes (FfU)	8%	41.394	227.912
	Gesamtinvestition	**EUR**	**558.819**	**3.076.812**

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Anhang 14: Schätzung der investitionsabhängigen Kosten für kleine und große Demontagewerke

Bezug	Posten		Klein [EUR]	Groß [EUR]
	Kalk. Zinssatz	9%		
Kalk. Zinskosten		Restwert*		
	Lagertechnik	10%	346	2.576
	Fördertechnik	5%	3.168	6.930
	Sicherheitscontainer	10%	1.890	3.780
	Prüf- und Entladestationen Systeme	10%	2.538	22.464
	Demontagestationen	5%	297	1.634
	Zellentladestationen	10%	3.402	32.886
	Gebäude	0%	12.600	64.800
	Grundstück	100%	2.126	10.935
	Kalkulatorische Zinskosten		**26.367**	**146.004**
Kalk. Abschreibungskosten		Nutzungsdauer [a]		
	Lagertechnik	20	288	2.147
	Fördertechnik	20	3.040	6.650
	Sicherheitscontainer	20	1.575	3.150
	Prüf- und Entladestationen Systeme	20	2.115	18.720
	Demontagestationen	20	285	1.568
	Zellentladestationen	20	2.835	27.405
	Gebäude	40	7.000	36.000
	Kalkulatorische Abschreibungskosten		**17.138**	**95.639**
Reparatur- und Instandhaltungskosten		Kostensatz*		
	Lagertechnik	1,00%	64	477
	Fördertechnik	2,00%	1.280	2.800
	Sicherheitscontainer	1,00%	350	700
	Prüf- und Entladestationen Systeme	1,00%	470	4.160
	Demontagestationen	1,00%	60	330
	Zellentladestationen	1,00%	630	6.090
	Grundstück und Gebäude	0,80%	2.366	12.168
	Reparatur- und Instandhaltungskosten		**5.220**	**26.725**
Sonstige investitionsabh. Kosten	Investitionsbezogene Verwaltung	0,50%	2.587	14.245
	Investitionsbezogene Versicherung	1,00%	5.174	28.489
	Kalkulatorisches Wagnis	0%	-	-
	Sonstige investitionsabhängige Kosten		**7.761**	**42.734**
Summe der investitionsabhängigen Kosten			**56.486**	**311.102**
Faktor für Unvorhergesehenes (FfU)		8%	4.519	24.888
Gesamte investitionsabhängige Kosten			**61.005**	**335.990**

*) Als Anteil der spezifischen Investition

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Anhang 15: Kalkulatorische und pagatorische jährliche Fixkosten der Demontagewerke

Bezug	Posten	Klein [EUR]	Groß [EUR]
Kalkulatorische Kosten	**Kalkulatorische Kosten inkl. FfU**	**46.985**	**260.975**
Pagatorische Kosten	zurechenbare investitionsbezogene Kosten inkl. FfU	14.020	75.015
	Betriebsnebenkosten	4.200	21.600
	Führungspersonalkosten (BPK-Aufschlag)	104.250	460.500
	Sonstige Gemeinkosten (BPK-Aufschlag)	104.250	460.500
	Pagatorische Kosten	**226.720**	**1.017.615**
	Fixkosten	**273.705**	**1.278.590**

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Anhang 16: Investitionsschätzung für kleine und große Mechanische Aufbereitungswerke

Bezug	Posten	Zuschlag schlag-satz (ge-rundet) [%]	Spez. Investition	
			Klein [EUR]	Groß [EUR]
Direkte Investitionen	Basisinvestition		**860.000**	**2.150.000**
	Rohrleitungen (installiert)	10%	84.417	211.043
	Elektrik (installiert)	6%	52.761	131.902
	Bauwerke (inklusive Service)	15%	131.902	329.755
	Geländeerschließung	9%	79.141	197.853
	Betriebseinrichtungen und Nebenanlagen	25%	211.043	527.607
	Direkte Investitionen		**1.419.264**	**3.548.160**
Indirekte Investitionen	Technische Planung und Bauaufsicht	20%	174.110	435.276
	Bauleitung	24%	205.767	514.417
	Genehmigungsverfahren	2%	21.104	52.761
	Gebühren für Auftragnehmer	10%	89.693	224.233
	Unvorhergesehenes	21%	184.663	461.656
	Indirekte Investitionen		**675.337**	**1.688.344**
	Anlageinvestition	**244%**	**2.094.601**	**5.236.503**

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Anhang 17: Schätzung der investitionsabhängigen Kosten für kleine und große Mech. Aufbereitungswerke

Bezug	Posten		Klein [EUR]	Groß [EUR]
	Kalk. Zinssatz	9%		
Kalk. Zinskosten		Restwert*		
	Apparate und Maschinen	5%	42.570	106.425
	Rohrleitungen	5%	4.179	10.447
	Elektrik	5%	2.612	6.529
	Gebäude	0%	5.936	14.839
	Grundstück	100%	10.684	26.710
	Betriebseinrichtung & Nebenanlagen	5%	10.447	26.117
	Indirekte Investitionen	0%	30.390	75.975
	Kalkulatorische Zinskosten		**106.817**	**267.042**
Kalk. Abschreibungskosten		Nutzungsdauer [a]		
	Apparate und Maschinen	20	40.850	102.125
	Rohrleitungen	20	4.010	10.025
	Elektrik	20	2.506	6.265
	Gebäude	40	3.298	8.244
	Betriebseinrichtung & Nebenanlagen	20	10.025	25.061
	Indirekte Investitionen	20	33.767	84.417
	Kalkulatorische Abschreibungskosten		**94.455**	**236.137**
Reparatur- und Instandhaltungskosten		Kostensatz*		
	Grundstück und Gebäude	0,80%	1.688	4.221
	Apparate und Maschinen	2,00%	17.200	43.000
	Rohrleitungen	1,50%	1.266	3.166
	Elektrik	1,00%	528	1.319
	Betriebseinrichtung & Nebenanlagen	1,00%	2.110	5.276
	Reparatur- und Instandhaltungskosten		**22.793**	**56.982**
Sonstige investitionsabh. Kosten	Investitionsbezogene Verwaltung	0,50%	10.473	26.183
	Investitionsbezogene Versicherung	1,00%	20.946	52.365
	Kalkulatorisches Wagnis	0%	-	-
	Sonstige investitionsabhängige Kosten		**31.419**	**78.548**
Gesamte investitionsabhängige Kosten			**255.483**	**638.708**

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Anhang 18: Kalkulatorische und pagatorische jährliche Fixkosten der Mechanischen Aufbereitungswerke

Bezug	Posten	Klein [EUR]	Groß [EUR]
Kalkulatorische Kosten	**Kalkulatorische Kosten**	**201.272**	**503.179**
Pagatorische Kosten	zurechenbare investitionsbezogene Kosten	54.212	135.529
	Betriebsnebenkosten	2.400	14.400
	Führungspersonalkosten (BPK-Aufschlag)	31.500	52.500
	Sonstige Gemeinkosten (BPK-Aufschlag)	31.500	52.500
	Pagatorische Kosten	**119.612**	**254.929**
	Fixkosten	**320.883**	**758.108**

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.