Gunnar Bärwaldt (Autor)
Arno Kwade (Autor)

# LithoRec Recycling von Lithium-Ionen-Batterien

https://cuvillier.de/de/shop/publications/6085

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: https://cuvillier.de

# I Inhaltsverzeichnis

I Inhaltsverzeichnis ..... I

II Abbildungsverzeichnis ..... VIII

III Tabellenverzeichnis ..... XIII

1 Kurzzusammenfassung ..... 1

1.1 Wesentliche Ergebnisse in den einzelnen Projektbereichen ..... 2

1.1.1 Projektbereich A ..... 2

1.1.2 Projektbereich B ..... 3

1.1.3 Projektbereich C ..... 3

1.1.4 Projektbereich D ..... 4

1.1.5 Projektbereich E ..... 4

1.1.6 Projektbereich F ..... 5

1.1.7 Projektbereich G ..... 5

1.2 Veröffentlichungen ..... 6

1.3 Begriffsbestimmungen ..... 8

A Analyse und Entwicklung logistischer Sammel- und Rückführungsprozesse ..... 9

A.1 Analyse des Altbatterieaufkommens ..... 9

A.1.1 Identifikation und Analyse der für den Rückfluss von Li-Ionen Altbatterien relevanten Einflussgrößen ..... 9

A.1.2 Entwicklung eines Simulationsmodells zur Abschätzung des Rückflusses von Li-Ionen Altbatterien ..... 10

A.1.2.1 Beschreibung der Module ..... 10

A.1.3 Erarbeitung von Szenarien zur langfristigen Absatzentwicklung und zur Nutzung von Elektrofahrzeugen im Zeitverlauf ..... 12

A.1.3.1 Grundlegende Annahmen ..... 12

A.1.3.2 Annahmen der Szenarien ..... 12

A.1.4 Durchführung einer Simulationsstudie zum Altbatterierücklauf mit expliziter Berücksichtigung unsicherer Einflüsse ..... 15

A.1.4.1 Szenario „Pessimistisch“ ..... 15

A.1.4.2 Szenario „Politisch“ ..... 16

A.1.4.3 Szenario „Realistisch“ ..... 16



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.