

IV. Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Aktuelle Gesetzeslage zum Batterierecycling	3
3	Li-Ionen Batterie	5
3.1	Kathodenmaterialien	8
3.2	Anodenmaterialien	8
3.3	Elektrolyt	8
3.4	Separator	9
3.5	Element- und Stoffverteilung in Li-Ionen Batterien	9
3.6	Ausblick auf kommende Li-Ionen Batteriesysteme	10
4	Bestehende Recyclingverfahren, –konzepte und Forschungsprojekte	11
4.1	Industrielle Recyclingverfahren	11
4.1.1	Recupyl-Verfahren	11
4.1.2	RETRIEV-Verfahren	12
4.1.3	Batrec-Verfahren	12
4.1.4	Umicore Verfahren	13
4.2	Konzepte und Forschungsprojekte	15
4.2.1	AEA-Verfahren	15
4.2.2	Etoile-Rebatt Verfahren	15
4.2.3	IME-ACCUREC-Verfahren	17
5	Anforderungsprofil für ein verbessertes Recyclingverfahren und das daraus abgeleitete Konzept	19
5.1	Verfahrensoptionen	19
5.1.1	Sortierung	19
5.1.2	Tiefentladung	19
5.1.3	Demontage von Batteriesystemen	20
5.1.4	Deaktivierung	21
5.1.5	Mechanische Aufbereitung	21
5.1.6	Agglomerationsverfahren	21
5.1.7	Metallurgie	21
5.2	Eigenes Recyclingkonzept für Industriebatterien	22
6	Experimentelle Erprobung von Pyrolyse und mechanischer Aufbereitung	26
6.1	Pyrolyse	26
6.2	Demontage	28
7	Grundlagen zur Verflüchtigung von Li und seinen Verbindungen	30
7.1	Zersetzungs- und Verdampfungsreaktionen von Lithium und dessen Verbindungen aus der Literatur	30
7.1.1	Lithiummetall, Lithiumfluorid und Lithiumoxid	30

7.1.2	Lithiummanganspinell	33
7.1.3	Lithiumkobaltoxalat	34
7.1.4	Lithiumkobalt-Verbindungen	36
7.1.5	Lithiumeisenphosphat	37
7.1.6	Lithiumnickeloxid	37
7.1.7	Lithiumkarbonat	37
7.1.8	Lithiumtitanat	37
7.2	Zusammenfassung des Verhaltens von Li und seinen Verbindungen	38
8	Bestimmung der Phasenumwandlungen von Lithium und dessen Verbindungen	40
8.1	DTA Analyse	40
8.2	Thermogravimetrie (TGA)	40
8.3	Analysengerät und Vorgehensweise	41
8.4	Auswertung der Analyseergebnisse	41
9	Charakterisierung der Feinfraktion	45
9.1	Temperaturverhalten der Feinfraktion im Tammanofen	47
9.1.1	Versuchsaufbau	48
9.1.2	Durchführung der Tammanofenversuche	48
9.1.3	Beobachtung und Auswertung	49
10	Schlackenentwicklung für Selektive Lithiumverdampfung im LBO	52
10.1	Ergebnisse der Literaturrecherche	53
10.2	Gleichgewichtsberechnungen mit Hilfe der FactSage-Software	58
10.3	Ergebnisse der Gleichgewichtsberechnungen	58
10.4	Experimentelle Überprüfung der Eignung modellierter Schlacken	64
10.4.1	Vorversuche zur Auswahl eines geeigneten Tiegelmaterials	64
10.4.2	Experimentelle Bestimmung der Li-Löslichkeit	66
10.4.3	Experimentelle Überprüfung der modellierten Werte der Verschlackung von Co, Ni und Mn im CaO-SiO ₂ -MgO System	70
11	Erprobung im Labor-LBO mit Li-Recyclingmaterial	74
11.1	Versuchsaggregat	74
11.2	Agglomeration der Feinfraktion	75
11.3	Versuchsdurchführung	76
11.4	Generelle Eignungsprüfung	77
11.5	Minimierung Schlackeneinsatz	80
11.6	Einfluss von Al-Oxid auf die Lithiumlöslichkeit	82
12	Scale-up im Demonstrationsmaßstab	86
12.1	Versuchsaggregat	86
12.2	Durchführung und Ergebnisse des Demonstrationsversuchs	87

12.3	Auswertung des Großversuches	89
13	Metallurgische Bewertung des Verfahrens	97
14	Alternative Verfahrenskonzepte für das Recycling der Feinfraktion	100
14.1	Selektive Verdampfung im Drehrohr	100
14.1.1	Eigenschaften von Drehrohrprozessen	100
14.1.2	Versuchsdurchführung und Auswertung	101
14.1.3	Bewertung DR-Verfahren	104
14.2	Erzeugung von Li-Sulfat	106
14.2.1	Versuchsdurchführung und Auswertung	107
14.2.2	Bewertung des Verfahren	109
15	Zusammenfassung und Ausblick	111
16	Literaturverzeichnis	118
17	Anhang	126