

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik .....</b>	<b>3</b>
2.1	Aufbau und Funktionsweise von aktuellen Li-Ionen-Batterien .....	3
2.1.1	Elektrochemische Reaktionen in Li-Ionen-Batterien .....	3
2.1.2	Elektrodenmaterialien von Li-Ionen-Batterien .....	5
2.2	Das System Lithium-Schwefel als zukünftige Hochenergiebatterie .....	9
2.2.1	Elektrochemische Reaktionen in Lithium-Schwefel-Batterien .....	12
2.2.2	Elektrodenmaterialien von Lithium-Schwefel-Batterien .....	14
2.3	Stand der Technik im Batterierecycling in Forschung und Industrie .....	18
2.3.1	Zentrale Aspekte für ein industrielles Batterierecycling .....	19
2.3.2	Darstellung von Prozessoptionen zum Recycling von Li-basierten Batterien .....	22
2.3.3	Deaktivierung und thermische Behandlung .....	24
2.3.4	Mechanische Behandlung .....	29
2.3.5	Metallurgische Extraktion .....	30
2.3.6	Weiterführende Forschungsansätze im Li-Ionen-Batterierecycling .....	40
2.3.7	Erste Ansätze zum Recycling von Lithium-Schwefel-Batterien .....	46
2.4	Bewertungsmethoden für das Batterierecycling: Der direkte Vergleich der Energiespeichersysteme Lithium-Schwefel und Li-Ionen .....	48
2.5	Fazit aus dem Stand der Technik .....	51
<b>3</b>	<b>Zielsetzung und experimentelle Vorgehensweise .....</b>	<b>54</b>
<b>4</b>	<b>Methoden, Charakterisierung und Durchführung .....</b>	<b>58</b>
4.1	Analytische Methodik .....	58
4.2	Experimentelles Vorgehen .....	59
4.2.1	Verwendete Zellen .....	59
4.2.2	Thermische und mechanische Vorbehandlung von Li-Ionen-Batterien .....	60
4.2.3	Zusammensetzung der LiBs-Aktivmasse .....	63
4.2.4	Thermische und mechanische Vorbehandlung von Lithium-Schwefel-Batterien .....	66
4.2.5	Zusammensetzung der LiS-Bs Aktivmasse .....	72
4.2.6	Verfahrensoption (1): Hydrometallurgischer Recyclingansatz mittels Säuren und Basen .....	76
4.2.7	Verfahrensoption (2): Frühzeitige Li-Separierung durch H <sub>2</sub> O-Lösung und CO <sub>2</sub> -Karbonatisierung .....	83
4.2.8	Vergleichsversuche für Material M1-M4 .....	88
<b>5</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion zur Bewertung von Recyclingpfaden .....</b>	<b>89</b>
5.1	Mechanismus der Li-Phasentransformationen in M1-M4 im Zuge der thermischen Vorbehandlung mittels thermodynamischer Modellierungen, chemischer Reaktionen und Phasenanalysen .....	89
5.2	Auswertung von Verfahrensoption (1): Hydrometallurgischer Ansatz mittels Säuren und Basen .....	96
5.2.1	Optimierung der Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -Separation mittels Filtration bei Verfahrensoption (1) .....	97
5.2.2	Ergebnisse der Vorversuche von Verfahrensoption (1) .....	101
5.2.3	Ergebnisse der Hauptversuche von Verfahrensoption (1) .....	105

5.3	Auswertung von Verfahrensoption (2), der ESLR-Prozess .....	117
5.3.1	Parametereinfluss auf Li-Rückgewinnung bezogen auf Li-Ionen-Batterien .....	117
5.3.2	Lineare Regression zur Gewichtung der Einflussfaktoren .....	122
5.3.3	Verunreinigungen im Li-Produkt durch frühzeitiges Li-Auswaschen .....	124
5.3.4	Einordnung der Ergebnisse aus den Vorversuchen an Li-Ionen-Batterien .....	128
5.3.5	Ergebnisse der H <sub>2</sub> O-Laugung mit und ohne CO <sub>2</sub> -Zusatz (Verfahrensoption (2)) bezogen auf Lithium-Schwefel-Batterien .....	130
5.4	Robustheitstests für LiS-Batterie-Prozesse .....	137
5.5	Ergebnisse und Identifizierung einer „best-case“-Verarbeitung zur Li-Rückgewinnung aus Lithium-Schwefel-Batterien .....	141
<b>6</b>	<b>Fazit und Zusammenfassung.....</b>	<b>143</b>
6.1	Schlüsselerkenntnisse im nasschemischen Bereich.....	144
6.2	Unterschiede zwischen LiS-Bs und LiBs.....	145
6.3	„Best-case“-LiS-Bs Recyclingverfahren .....	147
<b>7</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>149</b>
<b>8</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>150</b>
<b>9</b>	<b>Schriftum .....</b>	<b>152</b>
<b>10</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>179</b>
10.1	Redoxreaktionen im System LiBs .....	179
10.2	Redoxreaktionen im System LiS-Bs.....	179
10.3	Detaillierte Abgrenzung zum Stand der Technik.....	180
10.4	FTIR Diagramme am Beispiel von Li-Ionen-Batterien.....	182
10.5	XRD-Auswertung LiS Aktivmasse (M3 und M4) .....	183
10.6	Thermodynamische Modellierungen und chemische Reaktionen von Li-Phasen in Abhängigkeit von Temperatur und Atmosphäre.....	184
10.7	Ergänzende Daten zu Verfahrensoption (1).....	191
10.8	Ergänzende Daten zu Verfahrensoption (2).....	197
10.9	Zusammenfassung der Dissertation .....	207
10.10	Dissertation summary .....	209