

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik.....	3
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
3	Zielsetzung und experimentelle Vorgehensweise	54
4	Methoden, Charakterisierung und Durchführung	58
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 ₂ O-Lösung und CO ₂ -Karbonatisierung	83
4.2.8	Vergleichsversuche für Material M1-M4.....	88
5	Ergebnisse und Diskussion zur Bewertung von Recyclingpfaden	89
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 ₂ CO ₃ -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 ₂ O-Laugung mit und ohne CO ₂ -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
6	Fazit und Zusammenfassung.....	143
6.1	Schlüsselerkenntnisse im nasschemischen Bereich.....	144
6.2	Unterschiede zwischen LiS-Bs und LiBs.....	145
6.3	„Best-case“-LiS-Bs Recyclingverfahren	147
7	Ausblick.....	149
8	Abkürzungsverzeichnis.....	150
9	Schriftum	152
10	Anhang	179
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