

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	IV
Abstract	V
Verwendete Zeichen und Abkürzungen	XV
Extended Abstract	XVI
I Thermochemical Modelling and Experimental Validation of In-Situ-Indium-Volatilization by Released Halides During Pyrolysis of Smartphone Displays.....	XVI
II Recovery of Gallium from Smartphones – Part I: Thermal and Mechanical Pretreatment.....	XXXII
III Recovery of Gallium from Smartphones - Part II: Oxidative Alkaline Pressure Leaching of Gallium from Pyrolysis Residue.....	XLV
1 Einleitung	1
2 Elektronikschrottrecycling in Europa	2
2.1 Allgemeine Aspekte zum Elektronikschrottrecycling	2
2.2 Zusammensetzung von Elektronikschrott	4
2.2.1 Kunststoffe	4
2.2.2 Glas und Keramik	7
2.2.3 Basis- und Edelmetalle in Elektronikschrott.....	7
2.2.4 Kritische Technologiemetalle in Elektronikschrott	8
2.2.5 Fallbeispiel Smartphone.....	11
2.3 Gegenwartige Recyclingverfahren für Elektronikschrott.....	14
2.3.1 Schrottvorbehandlung	14
2.3.2 Schmelzprozesse	14
2.3.3 Nachteile etablierter Recyclingverfahren.....	15
3 Thermische Vorbehandlung als alternativer Recyclingschritt	18
3.1 Das Prinzip der Pyrolyse	18
3.2 Anlagen- und Verfahrenskonzepte zur Pyrolyse von Elektronikschrott	19
3.3 Forschungsstand zur Pyrolyse von Elektronikschrott	22
3.3.1 Einfluss der Temperatur auf Pyrolyseprodukte	22
3.3.2 Metallrückgewinnung nach der Pyrolyse.....	24
3.4 Metallextraktion durch Halogenierung und Gasphasentransport.....	28

3.4.1	Grundlagen zur Halogenierung von Metallen	28
3.4.2	Industrielle Anwendung von Halogenierung und Gasphasentransport zur Metallextraktion	29
3.4.3	Einsatz von Tetrabrombisphenol-A (TBBPA) zur Bromierung und Verfluchtigung von Metallen.....	32
3.4.4	Indiumverfluchtigung durch Halogenierung	32
3.5	Fazit zur Pyrolyse als alternativer Verfahrensschritt	35
4	Ableitung für weiteren Forschungsbedarf	36
4.1	Forschungsbedarf zur Indiumruckgewinnung durch Verfluchtigung.....	36
4.2	Forschungsbedarf zur Galliumruckgewinnung aus Elektronikschrott	37
4.3	Verfahrenskonzept zur Ruckgewinnung von Indium und Gallium.....	38
4.4	Konzeptionierung der experimentellen Arbeiten.....	39
4.4.1	Wahl des Einsatzmaterials	39
4.4.2	Vorstellung der experimentellen Arbeiten	40
5	Untersuchung der Indiumverfluchtigung aus Smartphonedisplays	41
5.1	Thermodynamische Modellierung der Halogenierungs- und Verfluchtigungsreaktionen	41
5.2	Vorstellung der Experimentellen Arbeiten zur Verfluchtigung von Indium aus Smartphonedisplays.....	47
5.3	Herstellung und Analyse des Einsatzmaterials.....	47
5.4	Versuchsaufbau und allgemeines Vorgehen	50
5.5	Einfluss der Prozesstemperatur während der Pyrolyse von Smartphonedisplays.	51
5.5.1	Massenverlust.....	51
5.5.2	Verfluchtigung von Brom und Kohlenstoff	52
5.5.3	Indiumausbeute mit und ohne additives Halogenierungsmittel	54
5.5.4	Abgaszusammensetzung	56
5.6	Fazit zu den Untersuchungen zur Indiumverfluchtigung aus Smartphonedisplays	59
6	Untersuchung zur Galliumreicherung durch mechanische Aufbereitung nach der Pyrolyse	60
6.1	Vorstellung der experimentellen Arbeiten und des Einsatzmaterials	60
6.2	Pyrolyse	63
6.2.1	Versuchsaufbau und Durchfuehrung	63
6.2.2	Ergebnis der Pyrolyse	64
6.3	Mechanische Behandlung nach Route 1	65
6.3.1	Gerate und Durchfuehrung.....	65
6.3.2	Auswertung der Ergebnisse von Route 1	66

6.4	Mechanische Behandlung nach Route 2	66
6.4.1	Geräte und Durchführung	67
6.4.2	Auswertung der Ergebnisse von Route 2	67
6.5	Fazit zur thermischen und mechanischen Galliumanreicherung und weiteres Vorgehen.....	71
7	Untersuchungen zur selektiven hydrometallurgischen Galliumrückgewinnung aus pyrolysierten Smartphones	75
7.1	Theoretische Überlegungen zu hydrometallurgischen Galliumextraktion	75
7.1.1	Wissenstand zur Laugung und zum Atzen von GaAs-Halbleitern.....	75
7.1.2	Wissensstand zur Galliumextraktion aus mineralischen Materialien und alkalischen Lösungen.....	78
7.1.3	Wissensstand zur Alkali-Sauerstoff-Oxidation von Braunkohle in wässrigen Medien	81
7.1.4	Fazit zur hydrometallurgischen Extraktion von Gallium und Ableitung der experimentellen Arbeiten	83
7.2	Versuchsplan und Wahl der Parameter	85
7.3	Experimentelle Methodik, Versuchsaufbau und Analysemethoden	88
7.4	Verhalten des Kohlenstoffs während der Laugung und Gestalt der Laugungsprodukte	91
7.5	Galliumausbeute und Koextraktion bei hohen Temperaturen	99
7.6	Galliumausbeute und Koextraktion bei verringelter Temperatur	104
7.7	Galliumausbeute und Koextraktion bei niedrigem Alkali- und Sauerstoffangebot	106
7.8	Alkaliverbrauch, Kohlenstoffverbrauch und Massenverlust bei niedrigen Temperaturen und Alkalikonzentrationen ..	108
7.9	Gesamtbetrachtung der Galliumlöslichkeit und weiterer Begleitelemente.....	110
7.10	Chemische Analyse des Laugungsrückstands und Bewertung der Feststoffanalytik	112
7.11	Bewertung des Laugungsprozesses	113
8	Zusammenfassung und Aufbau einer Prozesskette zur Rückgewinnung von In und Ga aus Smartphones.....	116
8.1	Massenbilanz	117
8.2	Eingliederung der untersuchten Prozesskette in bestehende industrielle Verfahren	119
8.3	Fazit und weiterer Forschungsbedarf	122
9	Anhang.....	135
9.1	Losungsreaktionen von Metalloxiden in Natronlauge	135
9.2	Abbildungen	135