

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung..... IV

Abstract V

Verwendete Zeichen und AbkürzungenXV

Extended AbstractXVI

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 PretreatmentXXXII

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 Gegenwärtige 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 Metallerkennung 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 Indiumrückgewinnung durch Verfluchtigung.....	36
4.2	Forschungsbedarf zur Galliumrückgewinnung aus Elektronikschrott	37
4.3	Verfahrenskonzept zur Rückgewinnung 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 Galliumanreicherung 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 Durchführung	63
6.2.2	Ergebnis der Pyrolyse	64
6.3	Mechanische Behandlung nach Route 1	65
6.3.1	Geräte und Durchführung.....	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 zur hydrometallurgischen Galliumextraktion	75
7.1.1	Wissenstand zur Laugung und zum Atzen von GaAs-Halbleitern.....	75
7.1.2	Wissenstand zur Galliumextraktion aus mineralischen Materialien und alkalischen Lösungen.....	78
7.1.3	Wissenstand 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 verringerter 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