

**Inhaltsverzeichnis**

	Seite
I. Abbildungsverzeichnis .....	V
II. Tabellenverzeichnis .....	IX
III. Kurzfassung .....	XI
IV. Abstract .....	XII
V. Extended Abstract .....	XIII
<b>1 Einleitung und Zielsetzung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Marktsituation und Stand der Recyclingtechnik für Silber .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Eigenschaften und Anwendungen des Silbers .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2 Versorgungslage und Kritikalität .....</b>	<b>4</b>
<b>2.3 Bedeutung des Silbers für Deutschland .....</b>	<b>6</b>
<b>2.4 Silberhaltige Sekundärmaterialien .....</b>	<b>7</b>
<b>2.5 Prozessrouten der Silberrückgewinnung .....</b>	<b>8</b>
2.5.1 Metallische Ausgangsmaterialien .....	8
2.5.2 Oxidische Ausgangsstoffe .....	11
<b>2.6 Vorstellung des zu untersuchenden Schlackensystems .....</b>	<b>12</b>
<b>3 Grundlagen .....</b>	<b>14</b>
<b>3.1 Schlackenmetallurgische Grundlagen .....</b>	<b>14</b>
3.1.1 Struktur silikatischer Schlacken .....	15
3.1.2 Einfluss verschiedener Metalloxide auf silikatische Schlacken .....	16
3.1.3 Sauerstofflöslichkeit in Schlacken .....	18
3.1.4 Farbgebung in Gläsern und Schlacken .....	23
3.1.5 Grundlagen der Diffusion und Diffusion in der Schlackenmetallurgie .....	24
3.1.6 Sauerstoffpermeabilität .....	29
3.1.7 Zusammenfassung der schlackenmetallurgischen Grundlagen .....	30
3.1.8 Anwendung der schlackenmetallurgischen Grundlagen auf das zu untersuchende System .....	31
<b>3.2 Thermochemische, thermodynamische und physikalische Grundlagen .....</b>	<b>37</b>
3.2.1 Ideal verdünnte Lösung und reale Mischung .....	38
3.2.2 Aktivität .....	40

## Inhaltsverzeichnis

---

3.2.3	Thermodynamische Gleichgewichtskonstante und freie Standardreaktionsenthalpie .....	40
3.2.4	Verteilungskoeffizient .....	42
3.2.5	Zusammenfassung der thermochemischen, thermodynamischen und physikalischen Grundlagen.....	42
3.2.6	Anwendung der thermochemischen Grundlagen auf das zu untersuchende System.....	43
<b>3.3</b>	<b>Experimentelle Ergebnisse zur Verschlackung von Wertmetallen in ähnlichen Schlackensystemen .....</b>	<b>46</b>
3.3.1	Einfluss der Atmosphäre auf die Verschlackung von Wertmetallen .....	47
3.3.2	Einfluss der Temperatur auf die Verschlackung von Wertmetallen .....	49
3.3.3	Einfluss der chemischen Zusammensetzung und von Schlackenadditiven auf die Verschlackung von Wertmetallen .....	51
<b>3.4</b>	<b>Zusammenfassung Grundlagen und Ableitung des Forschungsbedarfs .....</b>	<b>58</b>
<b>4</b>	<b>Experimentelle Arbeiten.....</b>	<b>60</b>
4.1	Zielsetzung der experimentellen Arbeiten .....	60
4.2	Arbeitshypothesen.....	60
4.2.1	Sauerstoffpartialdruck.....	61
4.2.2	Temperatur .....	61
4.2.3	Schlackenadditive.....	61
<b>4.3</b>	<b>Grundsätzliches methodisches Konzept .....</b>	<b>62</b>
<b>4.4</b>	<b>Versuchsdurchführung .....</b>	<b>63</b>
4.4.1	Vorbereitende Arbeiten .....	64
4.4.2	Kinetik- und Gleichgewichtsversuche .....	66
<b>4.5</b>	<b>Versuchsnachbereitung.....</b>	<b>68</b>
4.5.1	Chemische Analyse der Schlackenphase .....	69
<b>4.6</b>	<b>Versuchsergebnisse.....</b>	<b>69</b>
4.6.1	Phase 1: Klärung der Verschlackungsform.....	70
	▪ Bestimmungsmethodik und Versuchsreihen .....	70
	▪ Ergebnisse und Diskussion .....	71
	▪ Zwischenrésumé und Übertrag der Erkenntnisse auf einen industriellen Prozess .....	74
4.6.2	Phase 2: Aufschlüsselung des Verschlackungsmechanismus .....	75

---

▪ Bestimmungsmethodik und Versuchsreihen .....	75
▪ Ergebnisse und Diskussion.....	75
▪ Zwischenrésumé und Übertrag der Erkenntnisse auf einen industriellen Prozess .....	79
<b>4.6.3 Phase 3: Kinetische Betrachtung der Verschlackung .....</b>	<b>80</b>
▪ Bestimmungsmethodik und Versuchsreihen .....	80
▪ Ergebnisse und Diskussion.....	80
▪ Zwischenrésumé und Übertrag der Erkenntnisse auf einen industriellen Prozess .....	85
<b>4.6.4 Phase 4: Einfluss der Temperatur auf die Verschlackung .....</b>	<b>86</b>
▪ Bestimmungsmethodik und Versuchsreihen .....	86
▪ Ergebnisse und Diskussion.....	87
▪ Zwischenrésumé und Übertrag der Erkenntnisse auf einen industriellen Prozess .....	92
<b>4.6.5 Phase 5: Einfluss von Additiven auf die Verschlackung.....</b>	<b>93</b>
▪ Bestimmungsmethodik und Versuchsreihen .....	93
▪ Ergebnisse und Diskussion.....	94
▪ Zwischenrésumé und Übertrag der Erkenntnisse auf einen industriellen Prozess .....	103
<b>5 Diskussion der Fehlerquellen .....</b>	<b>105</b>
<b>6 Erkenntnisgewinn und Gesamtbewertung .....</b>	<b>109</b>
<b>7 Anhang .....</b>	<b>115</b>
<b>7.1 Weltweite Entwicklung der Verwendung von Silber in den Jahren 2002, 2006 und 2011 .....</b>	<b>115</b>
<b>7.2 Alternative Basizitätsgleichungen.....</b>	<b>115</b>
<b>7.3 Diffusionsgeschwindigkeit und 1. Fick'sches Gesetz .....</b>	<b>116</b>
<b>7.4 Chemische Bindung/Arrhenius-Beziehung .....</b>	<b>117</b>
<b>7.5 Räumliche Barriere/Frenkel-Beziehung.....</b>	<b>117</b>
<b>7.6 Datensatz zur Abbildung 27 .....</b>	<b>118</b>
<b>7.7 Verwendete Materialien und Anlagen .....</b>	<b>119</b>
<b>7.7.1 Verwendete Reinchemikalien.....</b>	<b>119</b>
<b>7.7.2 Verwendete sonstige Chemikalien .....</b>	<b>119</b>

## Inhaltsverzeichnis

---

7.7.3	Verwendete Keramiken.....	120
7.7.4	Verwendete Versuchsaggregate.....	120
<b>7.8</b>	<b>Aufbereitung des Silberregulus.....</b>	<b>122</b>
<b>7.9</b>	<b>Analyseergebnisse .....</b>	<b>123</b>
7.9.1	Phase 1: Klärung der Verschlackungsform.....	123
7.9.2	Phase 2: Aufschlüsselung des Verschlackungsmechanismus .....	124
7.9.3	Phase 3: Kinetische Betrachtung der Verschlackung .....	125
7.9.4	Phase 4: Einfluss der Temperatur auf die Verschlackung .....	127
7.9.5	Phase 5: Einfluss ausgewählter Additive.....	128
<b>7.10</b>	<b>Ellingham-Diagramm.....</b>	<b>133</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>134</b>