

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung II

Executive Summary III

Inhaltsverzeichnis VI

Abbildungsverzeichnis IX

Tabellenverzeichnis XIII

Danksagung..... XIV

1 Einleitung 1

 1.1 Ausgangssituation und Problemstellung 1

 1.2 Problemstellung 5

 1.3 Übergeordnetes Ziel und Forschungsfragen 9

 1.4 Wissenschaftstheoretische Positionierung 11

 1.5 Aufbau der Arbeit 14

2 Stand der Wissenschaft und Technik 16

 2.1 Primärgewinnung von Neodym und Herstellung von Magneten 16

 2.1.1 Lagerstätten und Minen..... 16

 2.1.2 Produktionsprozess..... 22

 2.2 Recycling von Neodym und anderen Seltenen Erden 34

 2.2.1 Magnetrecycling 34

 2.2.2 Recycling von Seltenen Erden aus anderen Quellen 43

 2.3 Zwischenfazit und Präzisierung der Forschungsfragen 45

 2.4 Reduktionsverfahren für Neodym 48

 2.4.1 Allgemeines..... 48

 2.4.2 Industrielle Prozesse zur Neodym-Reduktion..... 50

 2.4.3 Wissenschaftliche Forschung zur Neodym-Reduktion..... 58

 2.5 Wissens- und Forschungslücke..... 64

3 Lösungsansatz 66

 3.1 Forschungslücke..... 66

 3.2 Zielsetzung und Forschungsfragen..... 67

 3.3 Prozessanforderungen 69

3.4	Vorgehensweise	74
4	Aufbau und Durchführung der Experimente	77
4.1	Aufbau der Elektrolysezelle	77
4.1.1	Ofenkonstruktion	77
4.1.2	Referenzelektrode	81
4.1.3	Elektrochemische Messapparatur	82
4.1.4	Herausforderungen des Ofenaufbaus	84
4.2	Vorversuche zu Elektrolytsalzen	86
4.2.1	Auswahl möglicher Salze	86
4.2.2	Schmelzexperimente	88
4.2.3	Löslichkeit von NdCl_3 in KCl-LiCl	93
4.2.4	Fazit	97
4.3	Durchführung Elektrolyseversuche	98
4.3.1	Vorbereitung der Elektrolytsalze	99
4.3.2	Elektrolyseexperimente	101
5	Experimentelle Ergebnisse	104
5.1	Elektrochemische Experimente und Elektrolyse	104
5.1.1	Elektrochemische Analyse	104
5.1.2	Elektrolyse bei konstanter Spannung	109
5.1.3	Galvanostatische Elektrolyse und Kurzschluss	114
5.2	Produktanalyse	117
5.2.1	Neodymbelag auf Kathodenoberfläche	117
5.2.2	Produkt aus Langzeitelektrolyse	122
5.3	Fazit	127
6	Mechanismus und neue Lösungsansätze	129
6.1	Modell des elektrochemischen Abscheidungsmechanismus	129
6.2	Weiterentwicklung der Lösungsansätze	132
6.2.1	Beeinflussung Reaktionsmechanismus	133
6.2.2	Umschmelzen von Rohprodukt	137
6.3	Fazit	139
7	Gesamtfazit	142
7.1	Zusammenfassung	142
7.2	Bewertung der Ergebnisse	143

	7.2.1 Inhaltliche Bewertung.....	143
	7.2.2 Ökonomische und ökologische Bewertung.....	147
	7.2.3 Vergleich mit Stand der Wissenschaft.....	149
	7.3 Ausblick	150
8	Literaturverzeichnis	152
A	Anhang	168
	A.1 Informationen zur Kritikalität von Rohstoffen.....	168
	A.2 Konstruktionszeichnungen Ofenaufbau	171
	A.3 Weitere Informationen zu den experimentellen Ergebnissen.....	176
	A.4 Weitere Informationen zu den verwendeten Analysemethoden.....	184
	A.4.1 Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	184
	A.4.2 Rasterelektronenmikroskop mit energiedispersiver Röntgen- spektroskopie (REM-EDX)	185
	A.4.3 Röntgendiffraktometrie (XRD).....	186
	A.5 Veröffentlichungen im Rahmen der Dissertation	188