



TU Clausthal

**Untersuchungen zur Aufbereitung abgelagerter
Flotationsrückstände am Bergeteich Bollrich unter
besonderer Berücksichtigung der Gewinnung
wirtschaftsstrategischer Rohstoffe**

DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades der Ingenieurwissenschaft

vorgelegt von

Felix Römer, M. Sc.

aus Bremen

genehmigt von der Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften
der Technischen Universität Clausthal,

Tag der mündlichen Prüfung

28. November 2019

I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis	I
II.	Abbildungsverzeichnis	V
III.	Tabellenverzeichnis	IX
IV.	Abkürzungsverzeichnis	XI
V.	Verzeichnis der Symbole und Indices	XII
1	Einleitung	1
1.1	<i>Einführung in das allgemeine Themenfeld und Hintergrund</i>	1
1.2	<i>Einordnung von Bergeteichen als bergbaulicher Rückstand</i>	3
1.3	<i>Einführung in das Fachgebiet und Darlegung des Problems</i>	6
1.4	<i>Ziel der Arbeit</i>	8
1.5	<i>Aufbau der Arbeit</i>	8
2	Darstellung ausgewählter Grundlagen für das Verständnis der technischen Prozessentwicklung	11
2.1	<i>Flotation</i>	11
2.1.1	<i>Wesentliche Grundlagen</i>	12
2.1.2	<i>Entwicklung in der Flotation</i>	17
2.1.3	<i>Beispiele für die Wiederaufbereitung von sulfidhaltigem Bergeteichmaterial durch Flotation</i>	20
2.1.4	<i>Feinkorn in der Flotation</i>	23
2.1.5	<i>Wechselwirkungen der Mineralien mit der Umwelt und untereinander</i>	27
2.2	<i>Laugung</i>	29
2.2.1	<i>Lösevorgang von Sulfiden</i>	30
2.2.2	<i>Gängige Reagenzien bei der Laugung von Sulfiden</i>	32
2.2.3	<i>Technische Umsetzung der Laugung</i>	33
2.2.4	<i>Beispiele für die Wiederaufbereitung durch Laugung</i>	35
3	Der Bergeteich Bollrich	37
3.1	<i>Genese des Rammelsberger Erzes</i>	37
3.2	<i>Aufbereitung des Rammelsberger Erzes und Ablagerung des Bergeteichmaterials</i>	38
3.3	<i>Lage und Zustand des Bergeteichs</i>	43
3.4	<i>Charakterisierung des Bergeteichmaterials</i>	44

3.5	<i>Vorstellung ausgewählter potenzieller Zielstoffe</i>	52
4	Gründe, Voruntersuchungen und Schlussfolgerungen für die Wiederaufbereitung des Bergeteichmaterials	57
4.1	<i>Gründe für die Wiederaufbereitung</i>	57
4.1.1	Umwelt.....	60
4.1.2	Sicherheit.....	63
4.1.3	Ökonomie.....	64
4.1.4	Ressourceneffizienz und -strategie.....	73
4.2	<i>Voruntersuchungen für die Wiederaufbereitung des Bolbrichs</i>	75
4.2.1	Untersuchungen zur Zeit des Abbaus des Rammelsbergs	76
4.2.2	Zusammenfassung der Ergebnisse für das Re-Mining	78
4.2.3	Eigene Voruntersuchungen	78
4.3	<i>Schlussfolgerungen für die Wiederaufbereitung</i>	91
5	Material und Methoden	93
5.1	<i>Versuchsmaterial</i>	93
5.2	<i>Chemikalien</i>	93
5.3	<i>Analytik</i>	98
5.3.1	Chemische Zusammensetzung	98
5.3.2	Phasenidentifizierung	101
5.3.3	Röntgendiffraktometrie	101
5.3.4	Physikalische Analytik.....	102
5.3.5	Weitere Analytik	102
5.4	<i>Auswertung</i>	103
5.4.1	Kennzahlen.....	103
5.4.2	Statistische Versuchsplanung	105
5.5	<i>Versuchsdurchführung</i>	105
5.5.1	Laborflotation.....	105
5.5.2	Flotations-Verschaltung (Scale-Up).....	107
5.5.3	Atmosphärische Laugung.....	107
5.5.4	Drucklaugung	108
5.5.5	Fällungsreihen	109
5.5.6	Ionenaustauscherversuche	110
6	Untersuchungen zur flotativen Wiederaufbereitung des Bergeteichmaterials im Labormaßstab	111
6.1	<i>Allgemeine Beobachtungen bei der Flotationsprozessentwicklung</i>	111
6.2	<i>Flotation von Sulfiden</i>	114

6.2.1	Allgemeine Beschreibung	114
6.2.2	Pyrit.....	115
6.2.3	Einsatz von Belebbern.....	120
6.2.4	Drücken der Gangartminerale und Baryt	122
6.2.5	Zeitlicher Verlauf der Flotation und asynchrone Dosierung	123
6.2.6	Sammlerauswahl	125
6.2.7	Mehrstufige Versuche	129
6.2.8	Analyse der Flotationsprodukte.....	130
6.2.9	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für das Verschalten der Flotationen im Scale-Up....	131
6.3	<i>Flotation von Baryt.....</i>	<i>132</i>
6.3.1	Allgemeine Beobachtungen	132
6.3.2	Optimierung des pH-Werts	133
6.3.3	Optimierung des Sammlereinsatzes	134
6.3.4	Optimierung des Drückereinsatzes.....	135
6.3.5	Optimierung des Belebereinsatzes	136
6.3.6	Optimierung des Schäumereinsatzes.....	137
6.3.7	Zeitlicher Verlauf der Flotation.....	138
6.3.8	Analyse der Flotationsprodukte.....	139
6.3.9	Mehrstufige Versuche	140
6.3.10	Fazit und Schlussfolgerungen für die Verschaltung der Flotationen im Scale-Up	142
6.4	<i>Flotation von Inertmaterial</i>	<i>143</i>
7	Verschaltung der entwickelten Aufbereitungsprozesse	145
7.1	<i>Grundkonzeption</i>	<i>146</i>
7.2	<i>Untersuchung zur Übertragung der Flotation auf größere Flotationszellen</i>	<i>147</i>
7.3	<i>Variation der Parameter in den Rougher-Flotationen</i>	<i>151</i>
7.4	<i>Scavenger- und Cleaner-Untersuchungen.....</i>	<i>153</i>
7.5	<i>Kombination der Flotationen und ausführliche chemische Charakterisierung.....</i>	<i>157</i>
7.6	<i>Zwischenprodukte und Abschätzung einer Kreislaufführung</i>	<i>163</i>
7.7	<i>Mikrosondenuntersuchungen.....</i>	<i>166</i>
7.8	<i>Thermische Behandlung der Produkte</i>	<i>170</i>
8	Untersuchungen zur weiteren Aufbereitung und Verwertung des Sulfidmischkonzentrats	173
8.1	<i>Charakterisierung des Konzentrates aus Sicht der Metallgewinnung.....</i>	<i>173</i>
8.2	<i>Umgang mit dem Eisenanteil sowie prinzipielle Verfahrensansätze</i>	<i>179</i>
8.3	<i>Experimentelle Untersuchungen zur Schwefelsäureherstellung.....</i>	<i>181</i>
8.4	<i>Laugung mit anorganischen Säuren.....</i>	<i>183</i>

8.4.1	Auswahl von Techniken und Parametern	184
8.4.2	Vergleich verschiedener atmosphärische Laugungen	185
8.4.3	Ansätze zur Gewinnung der Zielstoffe	189
8.4.4	Fazit zur Laugung mit anorganischen Säuren	206
8.5	<i>Laugung mit weiteren Lösemitteln</i>	208
8.5.1	Laugung mit Ammoniak	208
8.5.2	Laugung mit Citronensäure und Essigsäure	217
8.5.3	Fazit zur Laugung mit weiteren Lösemitteln	222
8.6	<i>Biolaugung</i>	223
8.7	<i>Fazit und Aussicht</i>	225
9	Untersuchungen zur weiteren Aufbereitung und Verwertung des Barytkonzentrats	227
9.1	<i>Übersicht der Verwendungen und Anforderungen</i>	227
9.2	<i>Charakterisierung des Baryt-Konzentrats</i>	230
9.3	<i>Versuche zur weiteren Konditionierung des Baryts</i>	233
9.4	<i>Fazit</i>	238
10	Untersuchungen zur weiteren Aufbereitung und Verwertung des Inertmaterials	239
10.1	<i>Übersicht der Verwendungen und Anforderungen</i>	239
10.2	<i>Charakterisierung der Berge</i>	241
10.3	<i>Versuche zur weiteren Konditionierung der Berge</i>	245
10.4	<i>Fazit</i>	246
11	Gesamtverfahren	247
11.1	<i>Darstellung des Gesamtverfahrens</i>	247
11.2	<i>Abschätzung des Ausbringens im Gesamtverfahren</i>	252
11.3	<i>Bewertung des Gesamtverfahrens im Kontext der postulierten Ziele</i>	254
11.4	<i>Einordnung der Arbeit und Übertragung</i>	255
	Zusammenfassung	i
	Literatur	iii
	Anhang	xix