

Berichte aus der Verfahrenstechnik

**Arite Werner**

**Entwicklung eines membranbasierten Trenn- und Anreicherungsverfahrens zur selektiven Gewinnung von Indium und Germanium aus Laugungslösungen**

Shaker Verlag  
Aachen 2019

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>vii</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>xii</b>
<b>Symbol- und Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>xiv</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Indium und Germanium.....</b>	<b>4</b>
2.1 Geochemie von Indium und Germanium.....	4
2.2 Chemie von Indium und Germanium.....	6
2.3 Gewinnung von Indium und Germanium.....	11
<b>3 Biohydrometallurgie.....</b>	<b>16</b>
3.1 Grundlagen der Biolaugung.....	16
3.2 Biolaugung von Sphalerit.....	19
<b>4 Grundlagen der Membrantechnik.....</b>	<b>22</b>
4.1 Definition und Einteilung der Membranen.....	22
4.2 Stofftransport in Membranen.....	26
4.2.1 Lösungs-Diffusion-Modell.....	27
4.2.2 Porenmodell.....	29
4.2.3 Triebkraftmindernde Effekte.....	30
4.3 Prozessführung.....	32
4.3.1 Dead-End Filtration.....	32
4.3.2 Cross-Flow Filtration.....	33
<b>5 Nanofiltration.....</b>	<b>34</b>
5.1 Grundlagen der Nanofiltration.....	34
5.2 Einflussfaktoren auf das Trennverhalten von Nanofiltrationsmembranen.....	35
5.2.1 Ladungseffekte bei Nanofiltrationsmembranen.....	36
5.2.2 Donnan-Effekt.....	38

5.3	Bestimmung der Oberflächenladung von Nanofiltrationsmembranen .....	42
5.3.1	Prinzip der elektrochemischen Doppelschicht.....	42
5.3.2	Zeta-Potential .....	45
5.4	Stofftransport in Nanofiltrationsmembranen .....	48
<b>6</b>	<b>Abtrennung von Metallionen aus wässrigen Lösungen .....</b>	<b>53</b>
6.1	Ionen in wässriger Lösung .....	53
6.2	Stand der Technik .....	56
<b>7</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>64</b>
7.1	Membrancharakterisierung.....	64
7.1.1	Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie (FTIR).....	64
7.1.2	Rasterkraftmikroskopie (AFM).....	65
7.1.3	Rasterelektronenmikroskopie (REM) .....	66
7.1.4	Porengrößenbestimmung mit ungeladenen Molekülen.....	67
7.1.5	Zeta-Potential .....	69
7.2	Membranexperimente.....	71
7.2.1	Dead-End Filtration.....	73
7.2.2	Cross-Flow Filtration.....	81
7.2.3	Analytik.....	85
<b>8</b>	<b>Darstellung und Diskussion der Ergebnisse .....</b>	<b>86</b>
8.1	Membrancharakterisierung.....	86
8.1.1	Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie (FTIR).....	86
8.1.2	Rasterkraftmikroskopie (AFM).....	89
8.1.3	Porengrößenbestimmung mit ungeladenen Molekülen.....	92
8.1.4	Zeta-Potential .....	96
8.2	Dead-End Filtration .....	102
8.2.1	Reinwasserfluss.....	102
8.2.2	Ionenradius .....	104
8.2.3	Ionenrückhalt.....	108
8.2.4	Konzentrationsabhängigkeit.....	129

8.3	Cross-Flow Filtration .....	133
8.3.1	Reinwasserfluss.....	133
8.3.2	Ionenrückhalt .....	134
8.3.3	Druckabhängigkeit.....	140
8.3.4	Konzentrationsabhängigkeit.....	142
8.3.5	Vergleich Dead-End Filtration und Cross-Flow Filtration .....	148
8.3.6	Komplexe Modellösung.....	152
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>154</b>
<b>10</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>158</b>
<b>Anhang A</b>	<b>Betreute studentische Arbeiten .....</b>	<b>A-1</b>
Anhang A.1	Masterarbeiten.....	A-1
Anhang A.2	Studienarbeiten .....	A-1
Anhang A.3	Projektarbeiten .....	A-1
<b>Anhang B</b>	<b>Veröffentlichungen .....</b>	<b>B-1</b>
Anhang B.1	Posterpräsentationen.....	B-1
Anhang B.2	Vorträge .....	B-1
Anhang B.3	Veröffentlichte Paper .....	B-2
<b>Anhang C</b>	<b>Speziationsdiagramme .....</b>	<b>C-1</b>
Anhang C.1	Speziationsdaten Indium und Germanium .....	C-1
Anhang C.2	Zink.....	C-1
Anhang C.3	Kupfer .....	C-2
Anhang C.4	Eisen .....	C-3
Anhang C.5	Sulfat.....	C-4
<b>Anhang D</b>	<b>Diagramme.....</b>	<b>D-1</b>
Anhang D.1	Dead-End Filtration – Vorversuche.....	D-1
Anhang D.2	Selektivität.....	D-3
Anhang D.3	Zeta-Potential .....	D-4
Anhang D.4	Dead-End Filtration - Rückhalt.....	D-5
Anhang D.5	Cross-Flow Filtration.....	D-7

<b>Anhang E</b>	<b>Berechnungen .....</b>	<b>E-1</b>
Anhang E.1	Rauigkeitskennwerte der Rasterkraftmikroskopie (AFM).....	E-1
Anhang E.2	Reynolds-Zahl bei der Dead-End Filtration .....	E-1
Anhang E.3	Reynolds-Zahl bei der Cross-Flow Filtration .....	E-2
<b>Anhang F</b>	<b>Gerätedaten .....</b>	<b>F-1</b>
Anhang F.1	Cross-Flow Membrananlage.....	F-1
Anhang F.2	Verwendete Analysengeräte .....	F-2