

Inhalt

1	EINLEITUNG	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	3
2	WISSENSCHAFTLICHE UND VERFAHRENSTECHNISCHE GRUNDLAGEN	5
2.1	Einleitung in die Literaturrecherche	5
2.2	Element Arsen	6
2.2.1	Physikalische und chemische Eigenschaften	6
2.2.2	Arsen in wässrigen Medien	10
2.2.3	Vorkommen und Transportprozesse in der Umwelt	14
2.2.3.1	Natürliche Prozesse	14
2.2.3.2	Anthropogene Prozesse	19
2.2.4	Toxikologische Eigenschaften	21
2.2.5	Gesetzliche Regelungen bezüglich Arsen im Trinkwasser	25
2.2.6	Überblick zur weltweiten Trinkwassersituation bezüglich der Arsenbelastung	28
2.2.7	Arsenproblematik in Deutschland	33
2.3	Stand der Technik der Trinkwasseraufbereitungsverfahren zur Arsenentfernung	35
2.3.1	Strategien der Mitigation und Remediation	35
2.3.2	Oxidation zur Vorbehandlung	36
2.3.3	Oxidation und Fällung	38
2.3.4	Chemische Fällung und Flockung	39
2.3.5	Adsorption im Festbett	41
2.3.6	Ionenaustauschverfahren	45
2.3.7	Membranverfahren	46
2.3.8	Elektrochemische Verfahren	48
2.3.9	Verfahrensvergleich	49
2.4	Adsorption an oxidische Adsorbentien	51
2.4.1	Grundlagen der Adsorption	51
2.4.2	Adsorptionsisothermen und Adsorptionskinetik	55
2.4.3	Adsorption an Tonminerale	61

2.4.3.1	Tonminerale: Genese, Struktur und Klassifizierung	61
2.4.3.2	Adsorption und Ionenaustausch von Arsen an Tonmineralen und Böden	66
2.5	Elektrokoagulation zur Trinkwasseraufbereitung.....	69
2.5.1	Grundlagen der Elektrokoagulation.....	69
2.5.2	Betriebsparameter der Elektrokoagulation.....	72
2.5.3	Betriebsart, Elektrodenmaterial, Elektrodenschaltung und Arbeitssicherheit	77
2.5.4	Entfernung von Arsen mittels Elektrokoagulation.....	80
2.5.5	Mechanismus der Arsenentfernung mittels Aluminiumelektroden.....	84
2.6	Ultrafiltration zur Trinkwasseraufbereitung	87
2.6.1	Membranfiltration - grundlegende Begriffe und Kenngrößen	87
2.6.2	Ultra-Low-Pressure Ultrafiltration (ULPUF)	90
2.6.3	Arsenentfernung mittels Ultrafiltration	95
3	MATERIAL UND METHODEN	99
3.1	Überblick über Versuche und Versuchsstände	99
3.2	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung.....	102
3.2.1	Laboruntersuchungen zur Überprüfung der As(III)- und As(V)- Adsorptionsfähigkeit tonhaltiger Adsorbentien	102
3.2.1.1	Aufbau und Methodik der Laborversuche	102
3.2.1.2	Untersuchte Adsorbentien.....	104
3.2.2	Halbtechnische Untersuchungen zur Erweiterung von ULPUF-Anlagen um eine Verfahrensstufe zur Arsenentfernung.....	107
3.2.2.1	ULPUF: stoffliche Leistungsfähigkeit ohne Erweiterung zur Arsenentfernung und bei einem erhöhten Eisengehalt im Rohwasser.....	107
3.2.2.2	C-ULPUF: Arsenentfernung mittels Adsorption an tonmineralhaltige Adsorbentien.....	110
3.2.2.3	EC-ULPUF: Arsenentfernung mittel Elektrokoagulation.....	115
3.2.2.4	Analytische Bestimmung stofflicher und hydraulischer Leistungsfähigkeit	123
3.3	Auswertung von Messgrößen und statistische Datenauswertung	125
3.3.1	Datenauswertung der Laboruntersuchungen	125
3.3.2	Datenauswertung der halbtechnischen Versuchsanlagen	127
3.3.3	Statistische Datenauswertung.....	128

3.3.3.1	Box-Whisker-Plot.....	128
3.3.3.2	Korrelationsanalyse	129
3.3.3.3	Lineare Regressionsanalyse und das Bestimmtheitsmaß R^2	130
3.3.3.4	Multiple Regressionsanalyse und ihre Gütemaße	130
4	ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....	133
4.1	Laborversuche zur Arsenadsorptionsfähigkeit tonmineralhaltiger Adsorbentien	133
4.1.1	pH-Wert-Kontrolle.....	133
4.1.2	Arsenbeladungskapazität	135
4.1.3	Adsorptionsisothermen	138
4.1.4	Arsenbeladung der Tonerde im niedrigen und hohen Konzentrationsbereich	141
4.1.5	Arsenbeladungsfähigkeit der Tonerde in Abhängigkeit von mineralischer Zusammensetzung.....	144
4.1.6	Entwicklung eines Modellansatzes zur Beschreibung der Arsenadsorptionsfähigkeit von Tonerde	145
4.1.7	Adsorptionskinetik	150
4.1.8	Abschätzung von Tonerdemengen zur Arsenentfernung aus Trinkwasser	154
4.2	ULPUF und C-ULPUF	157
4.2.1	Gesamtübersicht zu ULPUF- und C-ULPUF-Untersuchungen.....	157
4.2.2	Chemisch-physikalische Rohwasserparameter	158
4.2.3	ULPUF: Arsenentfernung mittels ULPUF ohne Erweiterung	160
4.2.3.1	Übersicht zu ULPUF ohne Erweiterung	160
4.2.3.2	Trinkwasser	161
4.2.3.3	Oberflächenwasser.....	161
4.2.3.4	Trinkwasser mit erhöhtem Eisengehalt.....	163
4.2.4	C-ULPUF: Erweiterung von ULPUF um die Arsenentfernung mittels Adsorption an Tonerde	165
4.2.4.1	Übersicht zu C-ULPUF	165
4.2.4.2	Trübung und Absetzverhalten von Tonerde.....	166
4.2.4.3	Voruntersuchungen zur Arsenentfernung der C-ULPUF-Anlage	168
4.2.4.4	Optimierungsversuche zur Arsenentfernung der C-ULPUF-Anlage	171

4.2.4.5	Erforderliche Tonerdedosierung zur Arsenreduktion auf den WHO-Richtwert.....	174
4.2.5	Hydraulische Leistungsfähigkeit in ULPUF- und C-ULPUF-Untersuchungen.....	178
4.2.5.1	Übersicht.....	178
4.2.5.2	ULPUF-Betrieb.....	180
4.2.5.3	C-ULPUF-Betrieb.....	180
4.2.6	Fazit zur ULPUF- und C-ULPUF-Betriebsweise	185
4.3	EC-ULPUF: Erweiterung von ULPUF um die Arsenentfernung mittels Elektrokoagulation	187
4.3.1	Gesamtübersicht zu EC-ULPUF	187
4.3.2	Chemisch-physikalische Wasserparameter	189
4.3.2.1	Rohwasserqualität	189
4.3.2.2	Änderung der chemisch-physikalischen Wasserparameter im Verlauf der EC.....	191
4.3.2.3	Trübung und Absetzverhalten von Elektrokoagulationsschlamm.....	193
4.3.3	Leistungsfähigkeit der EC-Zelle	195
4.3.3.1	Zusammenhang zwischen elektrochemisch freigesetztem Aluminium und Arsenkonzentration während EC	195
4.3.3.2	Leistungsvergleich der untersuchten Elektrodenhaltungen	199
4.3.3.3	Auswirkung der Rohwasserqualität.....	207
4.3.3.4	Auswirkung des Elektrodenabstandes	210
4.3.3.5	Auswirkung der Elektrodenpassivierung	213
4.3.3.6	Zusammenfassender Überblick zur Leistungsfähigkeit der EC-Zelle.....	223
4.3.4	Leistungsfähigkeit der EC-ULPUF-Anlage.....	226
4.3.4.1	Arsenentfernung der EC-ULPUF-Anlage	226
4.3.4.2	Auswirkung von ULPUF auf die Arsenentfernung der EC-ULPUF-Anlage.....	231
4.3.5	Hydraulische Leistungsfähigkeit in EC-ULPUF-Untersuchungen.....	237
4.3.6	Erforderliche Ladungsdosis zur Arsenreduktion auf den WHO-Richtwert...241	
4.3.7	Abschätzung der Arsenentfernung mittels Trübungsmessung.....	245
4.3.8	Fazit zur EC-ULPUF-Betriebsweise	248
5	DISKUSSION DER ERGEBNISSE IM HINBLICK AUF DIE PRAKTISCHE ANWENDBARKEIT.....	250

5.1	Entsorgung anfallender Aufbereitungsrückstände.....	250
5.2	Wirtschaftlichkeitsanalyse	254
5.2.1	Kosten der Arsenaufbereitung und Zahlungsbereitschaft der Haushalte....	254
5.2.2	Kostenvergleich der untersuchten Verfahrensvarianten	257
6	ZUSAMMENFASSUNG	263
6.1	Hintergrund der Arbeit.....	263
6.2	Literaturstudie zur Arsenproblematik	264
6.3	ULPUF ohne Erweiterung	267
6.4	C-ULPUF-Kombinationsverfahren	268
6.4.1	Adsorptionsfähigkeit tonmineralhaltiger Adsorbentien	268
6.4.2	Leistungsfähigkeit des C-ULPUF-Verfahrens	272
6.5	EC-ULPUF-Kombinationsverfahren.....	274
6.5.1	Leistungsfähigkeit der EC-Zelle.....	274
6.5.2	Leistungsfähigkeit des EC-ULPUF-Verfahrens.....	278
6.6	Gegenüberstellung der untersuchten Verfahrensvarianten	282
6.7	Ausblick	285
7	LITERATURVERZEICHNIS	287
8	ANHANG	316
8.1	Übersicht über die wichtigsten Oxidationsmitteln	316
8.2	Übersicht über die wichtigsten Tonmineralgruppen.....	316
8.3	Vergleich zwischen Elektrokoagulation und chemischer Koagulation	317
8.4	Messdaten: Schüttelversuche im Labor.....	317
8.5	Messdaten: ULPUF- und C-ULPUF-Versuchsreihe	334
8.6	Messdaten: EC-ULPUF-Versuchsreihe.....	336
8.7	Adsorptionsisothermen bei einer Kontaktzeit von 24 Stunden	346
8.8	Untersuchungen der Adsorptionskinetik.....	346
8.9	Abschätzung benötigter Tonerdemenge zur Arsenreduktion auf 10 µg As/L bei einer Kontaktzeit von 24 Stunden.....	348
8.10	Arsenentfernung der C-ULPUF-Anlage im Betrieb mit T8 und T9	349
8.11	Arsenentfernung der C-ULPUF-Anlage im Betrieb mit T7 und T11	350

8.12 Abschätzung der Tonerdedosierung mit C-ULPUF-Betrieb.....	351
8.13 Ladungsdosis und Aluminiumgehalt im EC-Betrieb	351
8.14 Leistungsfähigkeit untersuchter Elektrodenschaltungen.....	352
8.15 Statistische Größen zur Darstellung von Box-Whisker-Plot.....	353
8.16 Kosten verschiedener Arsenaufbereitungsverfahren	358
8.17 Weitere Varianten der Kostenvergleichsrechnung.....	359