

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verzeichnis der Abbildungen	IV
Verzeichnis der Tabellen	XIII
1 Einleitung	1
2 Ziel der Arbeit	4
3 Grundlagen und bisherige Erkenntnisse zur Schaumentwicklung in kommunalen Kläranlagen	6
3.1 Schaumentwicklung in kommunalen Kläranlagen und Charakterisierung der Schäume	6
3.2 Bisher erkannte Einflußfaktoren der Schaumbildung	10
3.2.1 <i>Einfluß der abwasser- und verfahrenstechnischen Parameter auf die Schaumbildung</i>	10
3.2.1.1 Einfluß der Abwasserbeschaffenheit	10
3.2.1.2 Einfluß der Verfahrenstechnik der Abwasserbehandlung	12
3.2.1.3 Abwassertemperatur	21
3.2.2 Biologische Zusammenhänge der Schaumbildung	23
3.2.2.1 Veränderungen der Biozönose in Abhängigkeit von der Schlammbelastung	23
3.2.2.2 Übermäßiges Wachstum bestimmter Fadenbakterien als Ursache für die Ausbildung von Schäumen	27
3.2.2.3 Beteiligung nicht-fädiger Bakterien an die Schaumbildung	30
3.2.3 Chemische Untersuchungen zur Erkennung der Ursachen für die vermehrte Schaumbildung in kommunalen Kläranlagen	31
3.3 Erkenntnisse zum Vorkommen und der Elimination anthropogener und biogener Tenside in Kläranlagen	36
3.3.1 Vorkommen und Elimination anthropogener Tenside	36
3.3.2 Biogene Tenside	44
3.4 Schaumbekämpfungsmaßnahmen	52
3.4.1 Allgemeine Maßnahmen	53
3.4.2 <i>Gezielte Maßnahmen der Schaumbekämpfung</i>	55

Inhaltsverzeichnis	Seite
4 Untersuchungen zur Schaumentwicklung	61
4.1 Planung der Untersuchungen	61
4.2 Umfrage zum Vorkommen von Schäumen in kommunalen Kläranlagen	62
4.2.1 Durchführung	62
4.2.2 Ergebnisse der Umfrage	63
4.3 Praktische Untersuchungen zum Vorkommen von Schäumen in kommunalen Kläranlagen	67
4.3.1 Beschreibung der ausgewählten Anlagen	67
4.3.2 Auswertung der zur Verfügung gestellten Betriebsdaten	68
4.3.3 Bewertung eigener abwassertechnischer Untersuchungen	76
4.3.3.1 Allgemeine Anmerkungen zu eigenen praktischen Untersuchungen	76
4.3.3.2 Ergebnisse der Untersuchungen allgemeiner abwassertechnischer Parameter	79
4.3.4 Mikroskopische Differenzierungen der Belebtschlämme	82
4.3.4.1 Durchführung der Untersuchungen	82
4.3.4.2 Untersuchungsergebnisse	83
4.3.5 Anthropogene und biogene Tenside und deren Metaboliten in schäumenden Anlagen	87
4.3.5.1 Beschreibung der analytischen Methoden zum Nachweis oberflächenaktiver Substanzen	88
4.3.5.2 Ergebnisse der Tensidbestimmungen in realen Proben (Summenparameterbestimmung entsprechend den Deutschen Einheitsverfahren (DEV))	93
4.3.5.3 Nachweis und Quantifizierung von Tensiden mittels substanzspezifischer Untersuchungsverfahren	96
4.3.5.3.1 Semiquantitative und quantitative Bestimmung anthropogener Tenside mittels substanzspezifischer Verfahren	97
4.3.5.3.2 Nachweis und Identifizierung anthropogener Tenside	102
4.3.5.3.3 Anreicherung von Tensiden in Schäumen	106
4.3.5.3.4 Nachweis biogener Tenside im Abwasserreinigungsprozeß	109

Inhaltsverzeichnis	Seite
4.4 Labortechnische Untersuchungen zur Schaumentstehung	126
4.4.1 Vorüberlegungen	126
4.4.2 Beschreibung der Versuchsanlagen	127
4.4.3 Versuchsdurchführung	127
4.4.4 Versuchsergebnisse	130
4.4.4.1 Einfluß von Oleaten auf das Wachstum von <i>Microthrix parvicella</i> und die Schaumentwicklung	130
4.4.4.2 Einfluß von Tensiden unterschiedlicher Herkunft auf das Wachstum von <i>Microthrix parvicella</i> bzw. auf die Schaumbildung	135
5 Vergleichende Gegenüberstellung eigener Ergebnisse mit Daten aus der Literatur	142
5.1 Erklärungsversuche zur Schaumentstehung	142
5.2 Einflußfaktoren zur verstärkten Schaumbildung auf Kläranlagen	147
5.2.1 Betriebsbedingungen	147
5.2.2 Fadenförmige Bakterien	150
5.2.3 Zusammenhang zwischen Tensidgehalt und Schaumbildung	155
6 Planerische und betriebliche Maßnahmen bei übermäßiger Schaumentwicklung in kommunalen Kläranlagen	162
7 Zusammenfassung	164
Literaturverzeichnis	169
Anhang	182

Verzeichnis der Abbildungen	Seite
Abbildung 3-1: Querschnitt durch einen Schaum	7
Abbildung 3-2: Biologisch bedingte Schäume auf dem Belebungsbecken einer kommunalen Kläranlage mit Nährstoffelimination	8
Abbildung 3-3: Abhängigkeit des Schlammvolumenindex von der Abwassertemperatur im Belebungsbecken der Kläranlage Gümmerwald	22
Abbildung 3-4: Konkurrierendes Wachstum zweier Organismenarten mit unterschiedlichem Wachstumsverhalten in Abhängigkeit von der Substratkonzentration	26
Abbildung 3-5: Mikroskopische Aufnahme eines typisch biologischen Schaumes	28
Abbildung 3-6: Proteinkonzentrationen im durchmischten Schlamm bzw. im Schaum einer kommunalen Kläranlage	33
Abbildung 3-7: Quotient aus BSB ₅ -Schlammbelastung und Schlammbelastung durch Fette sowie Tensidkonzentrationen eines ausgewählten Abwassers	34
Abbildung 3-8: Enzymatische Angriffspunkte beim Primärabbau von Tensiden	43
Abbildung 3-9: Struktur des Lipopeptid-Tensids „Surfactin“, isoliert aus <i>Bacillus subtilis</i>	45
Abbildung 3-10: Struktur eines Ornithin Lipids, produziert von <i>Pseudomonas rubescens</i>	46
Abbildung 3-11: Allgemeine Molekülstruktur der aus Mikroorganismen isolierten Phospholipide	50
Abbildung 3-12: Allgemeine Molekülstruktur aus Mikroorganismen isolierter <i>Corynomycolsäuren</i>	51
Abbildung 4-1: Schaumbildung in Abhängigkeit vom Betriebsverfahren und der Schlammbelastung	64
Abbildung 4-2: Einfluß der Jahreszeit auf die Schaumbildung in Kläranlagen	65
Abbildung 4-3: Zusammenhang zwischen der Schaumbildung und der Schlammbelastung bzw. den pH-Werten in der Kläranlage Niederkassel in Abhängigkeit von der Jahreszeit	70
Abbildung 4-4: Abhängigkeit der Absetzeigenschaften des Belebtschlammes von der Temperatur des Abwassers im Belebungsbecken	71

Abbildung 4-5:	Zeitlicher Verlauf der Nährstoffverhältnisse CSB/NH ₄ -N und CSB/PO ₄ -P im Zulauf der Kläranlage Niederkassel	72
Abbildung 4-6:	Der Einfluß der Schaumbildung im Belebungsbecken auf die Stickstoffelimination in der Kläranlage Niederkassel	73
Abbildung 4-7:	Der Einfluß der Schaumbildung auf die Kohlenstoff- und Phosphorelimination in der Kläranlage Niederkassel	74
Abbildung 4-8:	Vorgehensweise bei der Probenahme, Probenaufbereitung und Untersuchung der Proben schäumender Kläranlagen	78
Abbildung 4-9:	Mittelwerte und Schwankungsbereiche der Parameter CSB, TOC und N _{ges} -N im Zulauf, Schaum und Ablauf	80
Abbildung 4-10:	Mittelwerte und Schwankungsbereiche der oTS- und N _{ges} -N-Gehalte korrespondierender Schaum- und Belebtschlammphasen	81
Abbildung 4-11:	Typische Erscheinungsformen von Schlämmen und Schäumen während (a) nicht-schäumender und (b-c) schäumender Phasen	87
Abbildung 4-12:	ESI-FIA/MS(-)-Übersichtsspektren der Eluate der C ₁₈ -Festphasenextrakte (SPE) des Zulaufs (a) und des Ablaufs (b) der KA Eilendorf	103
Abbildung 4-13:	APCI-FIA/MS(+)-Übersichtsspektren der Eluate der C ₁₈ -Festphasenextrakte (SPE) des Zulaufs (a) und des Ablaufs (b) der KA Eilendorf	104
Abbildung 4-14:	APCI-FIA/MS(+)-Übersichtsspektrum des Eluats der C ₁₈ -Festphasenextrakte (SPE) des durch Zentrifugation erhaltenen Schaumwassers der KA Eilendorf	107
Abbildung 4-15:	APCI-FIA/MS(-)-Übersichtsspektrum des Eluats der C ₁₈ -Festphasenextrakte (SPE) des durch Zentrifugation erhaltenen Schaumwassers der KA Eilendorf	107
Abbildung 4-16:	FIA/MS(+)-Übersichtsspektrum des Zentrifugats einer Schaumprobe der Kläranlage Niederkassel mit Ionen von nichtionischen Tensiden	112
Abbildung 4-17:	APCI-LC/MS(+) Totalionenstromchromatogramm (RIC) aus dem Extrakt des Schaumes der Kläranlage Niederkassel nach RP-C ₁₈ -Trennung	112

Abbildung 4-18:	APCI-LC/MS(+) Massenspektren der Signale 1-3 aus dem TIC des Schaumes der Kläranlage Niederkassel	113
Abbildung 4-19:	LC/MS/MS-Spektrum des Elternions m/z 392	114
Abbildung 4-20:	LC/MS/MS-Spektrum des Elternions m/z 554	114
Abbildung 4-21:	Allgemeine Strukturformel anthropogener Alkylpolyglykoside	115
Abbildung 4-22:	FIA/MS-Übersichtsspektrum der Polyglykosidhomologen nach LC-Fraktionierung des Schaumextrakts aus der Kläranlage Niederkassel	115
Abbildung 4-23:	GC/MS Totalionenstromchromatogramm der oxidativen Abbauprodukte (Carbonsäuren) des Primärabbauprodukts „Alkanol“ aus dem biochemischen Abbau nichtionischer Alkylpolyglykoether	117
Abbildung 4-24:	FIA/MS(-)-Übersichtsspektrum mit vermuteten Primärabbauprodukten des LAS aus dem Extrakt des Schaumes der Kläranlage Aachen-Brand	119
Abbildung 4-25:	LC-Trennung mit UV-DAD und MS(-) Detektion der Primärabbauprodukte von LAS aus dem Extrakt des Schaumes der Kläranlage Aachen-Brand	120
Abbildung 4-26:	LC/MS/MS(-)-Tochterionen des ausgewählten LAS-Abbauprodukts m/z 309	121
Abbildung 4-27:	Tochterionenspektrum des LAS-Homologen mit m/z 311, aufgenommen im FIA/MS/MS(-) Modus	121
Abbildung 4-28:	Schematische Darstellung eines verwendeten Versuchsreaktors	127
Abbildung 4-29:	Zeitliche Aufgliederung des Abwasserreinigungsprozesses nach dem SBR-Verfahrens Bitte Abbildungsnummer überprüfen	128
Abbildung 4-30:	Zeitliche Entwicklung des Schlammindex sowie Veränderung der Gesamtfädigkeit und Häufigkeit des Vorkommens von <i>Microthrix parvicella</i> im Reaktor ohne Zugabe von Oleaten	133
Abbildung 4-31:	Zeitliche Entwicklung des Schlammindex sowie Veränderung der Gesamtfädigkeit und Häufigkeit von <i>Microthrix parvicella</i> im Reaktor 2 unter Zugabe von Oleaten	134

Abbildung 4-32: Zeitliche Entwicklung des Schlammindex sowie Veränderung der Gesamtfädigkeit und Häufigkeit des Vorkommens von <i>Microthrix parvicella</i> in dem als Referenzanlage betriebenen Reaktor 1	139
Abbildung 4-33: Zeitliche Entwicklung des Schlammindex sowie Veränderung der Gesamtfädigkeit und Häufigkeit des Vorkommens von <i>Microthrix parvicella</i> im Reaktor 2 unter Zugabe von Tensiden	139
Abbildung 4-34: Zeitliche Entwicklung des Schlammindex sowie Veränderung der Gesamtfädigkeit und Häufigkeit des Vorkommens von <i>Microthrix parvicella</i> im Reaktor 3 unter Zugabe von Textilabwasser	140
Abbildung 4-35: Schaumbildung bei der Zugabe von Textilabwasser im Reaktor 3	141
Abbildung 5-1: Einflußfaktoren und ihr Zusammenwirken bei der Bildung biologischer Schäume auf Belebungsbecken	143
Abbildung 5-2: Typische Mischbiozönose im Schaum einer zur Phosphorelimination nach dem Bio-P-Verfahren ausgelegten Kläranlage	151
Abbildung 5-3: Fragmentierungsschema (a) und EI-Massenspektrum (b) des Trimethylsilylesters einer hypothetischen Mycolsäure aus <i>Nocardia</i> -Zellen	153
Abbildung 5-4: Fotografische Darstellung der durch hydrophobe Bakterien eingefangenen Gasbläschen	154
Abbildung 5-5: Gegenüberstellung der gram-gefärbten Biozönosen im durchmischten Belebtschlamm und im Schaum der KA AC-Soers; Links: Belebtschlamm; rechts: Schaumprobe mit deutlicher Anreicherung von <i>Microthrix parvicella</i>	154

Verzeichnis der Tabellen	Seite
Tabelle 3-1: Durchschnittliche Fädigkeit und prozentualer Anteil der Anlagen mit einer Fädigkeit $\geq 3,0$	14
Tabelle 3-2: Repräsentative abwassertechnische Daten der Kläranlage Dietikon (Schweiz)	19
Tabelle 3-3: Repräsentative abwassertechnische und mikrobiologische Daten der Kläranlage Dietikon (Schweiz)	20
Tabelle 3-4: Leitorganismen unterschiedlich belasteter Belebungsanlagen nach Schürmann	24
Tabelle 3-5: Häufig vorkommende fadenförmige Bakterien in Kläranlagen mit Kohlenstoff- bzw. Nährstoffelimination	27
Tabelle 3-6: Wichtige Eigenschaften und Parameter von <i>Microthrix parvicella</i>	29
Tabelle 3-7: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Tensidklassen	38
Tabelle 3-8: Verbrauchsmengen der WRMG-relevanten Tenside (Wasch- und Reinigungsmittelgesetz) im Jahr 1997 in der Bundesrepublik Deutschland	39
Tabelle 3-9: Abbaubarkeit anthropogener Tenside im kontinuierlichen Kläranlagensimulationstest nach DIN38412, Teil 26	42
Tabelle 3-10: Wichtige Vertreter von Glycolipide	48
Tabelle 3-11: Möglichkeiten der Schaumbekämpfung durch Zugabe chemischer und biochemischer Zusätze	60
Tabelle 4-1: Grundlegende Betriebsdaten der zur Untersuchung ausgewählten vom Schaumereignis betroffenen Anlagen	68
Tabelle 4-2: Mittelwerte, Konzentrationsbereiche und Anzahl n der auf die Parameter CSB, TOC und N_{ges} -N untersuchten Proben des Zulaufs, Ablaufs und des Schaum der Kläranlagen Niederkassel, AC-Eilendorf, AC-Brand, AC-Soers und Hürth	79
Tabelle 4-3: Einstufung der Fädigkeit in Schaum- und Schlammproben	83
Tabelle 4-4: Wachstum und Ausprägung der Fadenbakterienpopulationen in den Kläranlagen Niederkassel, AC-Eilendorf, -Brand, -Soers und Hürth während unterschiedlicher Phasen der Schaumentwicklung	84
Tabelle 4-5: Tensidgehalte in schäumenden und/oder mit Schwimmschlamm bedeckten Anlagen. Bestimmung mittels DEV H 23 und H 20	94

Tabelle 4-6:	Semiquantitative, substanzspezifische Ergebnisse der Bestimmung nichtionischer und anionischer Tenside in drei Kläranlagen mit Schaumproblemen	98
Tabelle 4-7:	Quantitative, substanzspezifische Ergebnisse der Bestimmung nichtionischer und anionischer Tenside in drei Kläranlagen mit Schaumproblemen	100
Tabelle 4-8:	Mittlere Zulaufkonzentrationen x , Anzahl der Proben n und Standardabweichungen s der untersuchten Parameter ohne bzw. mit Oleat-Aufstockung	131
Tabelle 4-9:	Mittelwerte der Betriebsparameterbestimmungen der Reaktoren über einen Betriebszeitraum von 45 Tagen	131
Tabelle 4-10:	Zu- und Ablaufkonzentrationen ausgewählter Parameter und deren Eliminationsraten bei der Abwasserreinigung mit und ohne Oleat-Zugabe	132
Tabelle 4-11:	Übersicht über die Betriebsbedingungen bei Versuchen zur Induzierung von Schaum	136
Tabelle 4-12:	Mittlere Konzentrationen der Parameter CSB, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{N}_{\text{ges}}\text{-N}$ und $\text{P}_{\text{ges}}\text{-P}$ im Zulauf, Anzahl der Proben n und Standardabweichungen s	136
Tabelle 4-13:	C, N, P-Mittelwerte der Abläufe und Eliminationsleistungen bei der Untersuchung des Einflusses von Tensiden bzw. Textilabwasser auf das Wachstum von <i>Microthrix parvicella</i>	137
Tabelle 5-1:	Gegenüberstellung über das Vorkommen fädiger Bakterien in den schäumenden Anlagen und in den Anlagen mit Kohlenstoffelimination	152