
1	Kurzfassung/Abstract	1
2	Problemstellung und Zielsetzung	2
3	Kenntnisstand	4
3.1	Schwermetallbelastung kommunaler Kläranlagen	4
3.1.1	Schwermetalle im Abwasser	4
3.1.2	Verhalten in der Kläranlage	5
3.1.3	Schwermetalle im Klärschlamm	6
3.2	Beschaffenheit von Belebtschlämmen	7
3.3	Wechselwirkungen zwischen Schwermetallen und Belebtschlämmen	9
3.3.1	Mechanismen der Schwermetallanreicherung	10
3.3.1.1	Sedimentation	10
3.3.1.2	Fällung	11
3.3.1.3	Komplexbildung	12
3.3.1.4	Adsorption	13
3.3.1.5	Biosorption und Bioakkumulation	15
3.3.2	Bindungsformen von Schwermetallen in Belebtschlämmen	17
4	Material und Methoden	19
4.1	Untersuchungen im Rahmen der Schwermetallbilanz	19
4.1.1	Beschreibung der Kläranlage Emden-Larrelt	19
4.1.1.1	Abwasserbehandlung	19
4.1.1.2	Schlammbehandlung	22
4.1.2	Meß- und Probenahmestrategie in der Kläranlage	22
4.1.2.1	Beprobung der Abwasserströme	24
4.1.2.2	Beprobung der Schlammströme	23
4.1.2.3	Bestimmung der Schlammspiegelhöhe in der Vorklärung	25
4.1.2.4	Bestimmung der Durchflüsse	25
4.1.3	Analytik	25
4.1.3.1	Probenvorbehandlung	25
4.1.3.2	Schwermetallanalytik	28
4.1.3.2.1	Aufschlußverfahren	28
4.1.3.2.2	Spektrometrische Meßverfahren	31
4.1.3.2.3	Analytische Qualitätssicherung der Schwermetallanalytik	32
4.1.3.2.3.1	Nachweis- und Bestimmungsgrenzen für Kupfer und Zink	32
4.1.3.2.3.2	Prüfung und Validierung des Mikroaufschlußverfahrens	33
4.1.3.2.3.3	Prüfung und Validierung der AAS-Meßtechnik	35
4.1.3.2.3.4	Validierung der Routineanalytik durch Qualitätskontrollen	38
4.1.3.2.3.5	Unsicherheitsbereiche der Schwermetallergebnisse	40
4.1.3.3	Bestimmung der Trockensubstanzgehalte (TS)	43
4.1.3.4	Bestimmung von physikochemischen Meßgrößen	43
4.1.3.5	Bestimmung von abwasserrelevanten Meßgrößen	43

4.2	Versuche zur Biosorption von Schwermetallen an Belebtschlämmen	44
4.2.1	Anreicherung von Schwermetallen an Belebtschlämmen	44
4.2.2	Bindungsformen von Kupfer in dotierten Belebtschlämmen	45
4.2.3	Untersuchungen zum Einfluß von Exopolysacchariden auf die Biosorption von Schwermetallen an Belebtschlämmen	46
4.2.3.1	Bestimmung der Polysaccharidgehalte	46
4.2.3.2	Der Einfluß von Exopolysacchariden auf die Adsorption von Kupfer	47
4.2.3.3	Stoffliche Charakterisierung der untersuchten Belebtschlämme	47
5	Ergebnisse	48
5.1	Schwermetallbilanz einer kommunalen Kläranlage	49
5.1.1.	Ergebnisse der Durchfluß- und Schlammspiegelmessungen	49
5.1.1.1	Volumenströme in der Abwasserbehandlung	49
5.1.1.2	Volumenströme in der Schlammbehandlung	53
5.1.1.3	Ergebnisse der Schlammspiegelmessungen	54
5.1.2	Kupfer und Zink in relevanten Verfahrensstufen der Kläranlage	56
5.1.2.1	Kupfer und Zink in der Abwasserbehandlung	56
5.1.2.1.1	Kupfer und Zink im zeitlichen Verlauf (Tagesganglinien)	57
5.1.2.1.2	Korrelationen zwischen einzelnen Meßgrößen	60
5.1.2.2	Kupfer und Zink in der Schlammbehandlung	62
5.1.2.2.1	Kupfer und Zink in Rohschlamm	62
5.1.2.2.2	Kupfer und Zink in Belebt- und Überschußschlamm	64
5.1.2.2.3	Kupfer und Zink in Nacheindicker- und Klärschlamm	65
5.1.2.3	Frachtbetrachtung und -bilanz für Kupfer und Zink	66
5.1.2.3.1	Kupfer- und Zinkfrachten im Abwasser	66
5.1.2.3.2	Kupfer- und Zinkfrachten in Schlamm	71
5.1.2.3.3	Kupfer- und Zinkbilanzierung der KA Emden-Larrelt	72
5.1.2.3.3.1	Systembilanz der Kläranlage (Bilanzraum 1)	72
5.1.2.3.3.2	Bilanzierungen in der Abwasserbehandlung (Bilanzräume 2a bis 4b)	74
5.1.2.3.3.3	Bilanzierungen in der Schlammbehandlung (Bilanzräume 5 bis 7)	78
5.1.2.3.3.4	Ergänzende Betrachtungen zur Bilanzierung	80
5.1.2.4	Verteilung von Kupfer und Zink auf gelöste und gebundene Phase	83
5.1.2.5	Verhalten von Kupfer und Zink in der Kläranlage	84
5.1.3	Gehalt an Trockensubstanz (TS)	88
5.1.3.1	Trockensubstanz-Gehalte in der Abwasserreinigung	88
5.1.3.2	Trockensubstanz-Gehalte in der Schlammbehandlung	91
5.1.4	Ergebnisse der Bestimmungen der physikochemischen Meßgrößen	91
5.1.4.1	pH-Wert und Leitfähigkeit in Abwasserproben	91
5.1.4.2	pH-Wert und Leitfähigkeit in Schlamm	94
5.1.5	Abwassertechnische Charakterisierung der KA Emden-Larrelt	95
5.1.5.1	Organische Belastung und Abbauleistung	95

5.1.5.2	Stickstoffbelastung und -elimination in der Kläranlage	96
5.1.5.3	Phosphatbelastung und -elimination	98
5.1.5.4	Organische und Nährstofffrachten im zeitlichen Verlauf	98
5.2	Charakterisierung der zur Biosorption eingesetzten Belebtschlämme	100
5.2.1	Charakterisierung anhand verfahrenstechnischer Kenngrößen	100
5.2.2	Stoffliche Charakterisierung der Belebtschlämme	101
5.3	Wechselwirkungen zwischen Schwermetallen und Belebtschlämmen	102
5.3.1	Anreicherung von Schwermetallen an Belebtschlämme	102
5.3.1.1	Einfluß der Reaktionszeit	102
5.3.1.2	Einfluß der Belebtschlammart	103
5.3.1.3	Adsorptionsisothermen für Cadmium und Kupfer	104
5.3.1.4	Biokonzentrationsfaktoren (BCF)	107
5.3.2	Bindungsformen von Kupfer in dotierten Belebtschlämmen	109
5.3.3	Der Einfluß von Exopolysacchariden auf die Biosorption von Schwermetallen an Belebtschlämmen	112
5.3.3.1	Polysaccharidgehalte der untersuchten Belebtschlämme	113
5.3.3.2	Einfluß von Exopolysacchariden auf die Biosorption von Kupfer	113
6	Diskussion	115
6.1	Schwermetalle in kommunalen Kläranlagen	115
6.1.1	Herkunft der Kupfer- und Zinkbelastung im kommunalen Abwasser	115
6.1.2	Bilanzierung von Kupfer und Zink in einer kommunalen Kläranlage	116
6.1.3	Verhalten von Kupfer und Zink in der Kläranlage	117
6.1.3.1	Zulauf	118
6.1.3.2	Vorklärung	118
6.1.3.3	Belebung	119
6.1.3.4	Schlammbehandlung	120
6.2	Beschaffenheit des Biosorptionsmaterials Belebtschlamm	121
6.3	Wechselwirkungen zwischen Schwermetallen und Belebtschlämmen	122
6.3.1	Anreicherung von Schwermetallen an Belebtschlämmen	124
6.3.2	Bindungsformen von Kupfer in Belebtschlämmen	127
6.3.3	Der Einfluß von Exopolysacchariden auf die Biosorption von Kupfer	129
6.4	Zusammenfassung	130
7	Literaturverzeichnis	131
8	Anhang	139