



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften

Thema der Dissertation
**Verhinderung der Sulfidbildung in
Abwasserdruckleitungen
durch lineare Belüftung**

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor -Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Ute Urban

Gutachter:

Herr Prof. Dr. sc.tech. Peter Krebs
Technische Universität Dresden

Frau Prof. Dr.-Ing. Andrea Heilmann
Hochschule Harz Wernigerode

Tag der mündlichen Prüfung: 23.03.2011

Erklärung des Promovenden

Die Übereinstimmung dieses Exemplars mit dem Original der Dissertation zum Thema „Verhinderung der Sulfidbildung in Abwasserdruckleitungen durch lineare Belüftung“ wird hiermit bestätigt. Die vorliegende gedruckte Fassung enthält die Änderungen durch die Auflagen der Gutachter. Die Prüfung und Verteidigung der Arbeit erfolgte am 23.03.2011 an der TU Dresden.

Wernigerode, 04.07.2011

Regionales Innovationszentrum für nachhaltiges Wirtschaften
und Umwelt-/Geoinformation

Band 1

Ute Urban

**Verhinderung der Sulfidbildung in Abwasserdruck-
leitungen bei linearer Belüftung**

Shaker Verlag
Aachen 2011

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0277-5

ISSN 2192-7146

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Für die Anregung zur Bearbeitung des Projektes danke ich Herrn Jost Freystein und Nikolaus Weth. Weiterer Dank geht an AIF e. V., die das Projekt im Programm FH³ (FKZ 1758X05) des BMBF förderten, das als Grundlage für diese Arbeit diente.

Mitarbeitern des Abwasserverbandes Holtemme, insbesondere Herrn Bodo Leßmann danke ich für die Diskussion der Praxisanwendung, Herrn Suske für die zusätzlichen Laborarbeiten und Herrn Michael Weingarten, der jeden erforderlichen Umbau der Anlage erledigte.

Dank an Frau Frauke Gerlach, die die Analysen im Hochschullabor gewissenhaft durchführte.

Frau Prof. Dr. Andrea Heilmann und Herrn Prof. Dr. Peter Krebs danke ich für die anregenden Kommentare, Diskussionen über die Durchführung der Untersuchungen und für die Betreuung der Arbeit.

Weiterer Dank gilt meinen Eltern, die mir nicht nur mein Studium ermöglichten, sondern auch bei den Korrekturarbeiten unterstützt haben.

Weiterhin danke ich meiner Familie, die mir Freiraum für das Schreiben der Arbeit gegeben hat und bei jeder Ausflugsfahrt, nicht nur in den Harz, die Besichtigung von Anlagen mitmachte und als Geruchsprobanden dienten.

Thesen

Im Ableitungssystem für das kommunale Abwasser finden neben der Ablagerung und Mobilisierung von Feststoffen Stoffumwandlungsprozesse statt, die die Abwasserzusammensetzung und damit die Abbaubarkeit auf der Kläranlage wesentlich beeinflussen. Das Kanalsystem und dabei insbesondere Druckleitungen können nicht mehr als das reine hydraulische Transportsystem betrachtet werden, sondern als Reaktoren zur Vorbehandlung des Abwassers.

Deutlich werden diese Prozesse meist im Bereich der Osmogen- und insbesondere der Sulfidbildung, die Geruchsbelästigungen und Korrosion verursachen. Als Leitparameter für die Osmogenbildung kann Schwefelwasserstoff verwendet werden.

- Durch die Belüftung direkt in Druckleitungen können die Stoffumwandlungsprozesse verändert und die Sulfidbildung deutlich reduziert werden,
- Die Art der Belüftungseinrichtung ist von wesentlicher Bedeutung und beeinflusst die Wirkung der dosierten Luftmenge,
- Durch die Realisierung einer feinblasigen Belüftung wird die Sulfidbildung um das 10-fache vermindert. Dabei ist es nicht erforderlich, dass durch die Belüftung eine Erhöhung des gelösten Sauerstoffgehaltes erreicht wird,
- Die Sulfidoxidationsrate wird in der Literatur bislang unterschätzt und kann deutlich erhöht werden,
- Für die Vorhersage der Sulfidbildung sind Einflussparameter in den Modellen zu ergänzen,
- Das vorgestellte Modell kann die Sulfidbildung deutlich besser vorhersagen, als dies mit den bisher bekannten Modellen möglich war.

In der Arbeit werden die Einflussparameter ermittelt, die Wirkungsweise der Belüftung auf die Sulfidbildung beschrieben und die Berechnung der Luftmenge dargestellt.

Insgesamt kann durch die Arbeit nachgewiesen werden, dass

- bestehende Sulfidbildungsmodelle angepasst und Einflussgrößen ergänzt werden müssen,
- die feinblasige Druckbelüftung geeignet ist, die Sulfidbildung zu vermindern, wenn der Eintragsort sorgfältig ausgewählt wird,
- gezielte anaerobe und aerobe Zonen im Leitungsnetz eine Vorbehandlung des Abwassers übernehmen können.

Verhinderung der Sulfidbildung in Abwasserdruckleitungen durch lineare Belüftung

1. Einleitung und Problemstellung.....	1
2. Schwefelverbindungen im Abwasser	6
2.1. Schwefelkreislauf /Physikochemische Vorgänge des Schwefels	6
2.2. Quellen des Schwefeleintrags in Abwasserleitungen	8
2.3. Primäre Osmogene und sekundäre Osmogene	9
2.4. Eigenschaften des Schwefelwasserstoffs	14
2.5. Redox-Reaktionen.....	15
2.6. Wasser-Luft-Austausch-Prozesse	18
2.7. Sulfidbildung: Bekannte Modelle	21
3. Biologische Prozesse in Leitungen	29
3.1. Kinetik biologischer Prozesse	29
3.2. Aerobe Prozesse	31
3.3. Zehrung und Sauerstoffbedarf in Leitungen	34
3.4. Anaerobe Prozesse	36
3.5. Schwefelumsetzende Mikroorganismen	40
3.6. Schlussfolgerung	44
4. Stand der Technik zur Verminderung der Geruchsemissionen.....	45
4.1. Übersicht der Maßnahmen	45
4.2. Kennzahlen des Sauerstoffeintrages	47
4.2.1. Blaseneigenschaften.....	47
4.2.2. Kennzahlen zum Strömungsverhalten	48
4.3. Verhalten von Luft in Leitungen.....	51
4.4. Belüftungstechnik	53

5. Methodik der Versuche	55
5.1. Übersicht zur eingesetzten Analytik	55
5.2. Sulfidmesstechnik	56
5.2.1. Sulfidmessung in der Wasserphase	56
5.2.2. Sulfidmessung in der Gasphase	59
5.3. Verwendete Versuchsanordnungen.....	61
5.4. Ermittlung der Sauerstoffeintragsrate und Blasengröße	62
5.5. Charakterisierung des Abwassers	65
5.6. Zehrungsverhalten des Abwassers	66
5.7. Batch-Untersuchungen.....	69
5.8. Versuchsanlage	70
5.8.1. Aufbau.....	70
5.8.2. Messtechnik.....	74
5.8.3. Hydraulik und Verweilzeitverhalten.....	75
5.9. Praxisanlagen	78
6. Ergebnisse.....	80
6.1. Batch-Voruntersuchungen	80
6.1.1. Einfluss der Vorbelastung.....	80
6.1.2. Einfluss der Luftrate auf die Sulfidbildung	81
6.1.3. Untersuchung des Strippeffektes durch die Belüftung	83
6.2. Batch-Versuche	84
6.2.1. Unbelüftete Batch-Versuche.....	85
6.2.2. Belüftete Batch-Versuche	87
6.3. Versuchsanlage	90
6.3.1. Ergebnisse in der Versuchsanlage ohne Belüftung.....	90
6.3.3. Ergebnisse der punktuellen Belüftung	96
6.4. Praxisanlagen	98
6.4.1. Untersuchung Zulauf und Ablauf der Druckleitung Halle	98
6.4.2. Untersuchung der unbehandelten Druckleitung Braunlage-Sorge	104
6.4.3. Untersuchung von Behandlungsstrategien Ilsenburg –Drübeck.....	106
6.4.4. Demonstrationsstrecke Drausy-Belüftung von Hasselfelde-Tanne	108

7. Bewertung der Ergebnisse.....	109
7.1. Erweiterung der Parameter für die Sulfidbildung.....	110
7.2. Entwicklung eines neuen Modellansatzes.....	111
7.3. Anwendung der neuen Modellgleichung auf Batch-Versuche	115
7.4. Anwendung der Modellgleichung: Versuchsanlage	116
7.4.1. Anpassung an Betriebsweise ohne Belüftung.....	116
7.4.2. Anpassung an Betriebsweise mit Belüftung	118
7.5. Einbindung in bekannte Modellierungen.....	123
8. Übertragung auf die Praxis.....	128
8.1. Entscheidungsbaum zur Lösung von Sulfidproblemen in Abwassernetzen	128
8.2. Mess- und Analysetechnik	130
8.3. Ermittlung des Luftbedarfes.....	132
8.4. Konstruktive Hinweise/Verweilzeit.....	135
9. Ausblick.....	139
10. Zusammenfassung.....	142

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER ABWASSERANLAGE	2
ABBILDUNG 2: SCHWEFELUMSATZ UNTER AEROBEN UND ANAEROBEN BEDINGUNGEN	7
ABBILDUNG 3: DARSTELLUNG DER OSMOGENE IM KANALSYSTEM	10
ABBILDUNG 4: MODELL DES SCHWEFELWASSERSTOFFMOLEKÜLS	14
ABBILDUNG 5: POURBAIX-DIAGRAMME SULFID-SULFAT UND IN GEGENWART VON EISEN	16
ABBILDUNG 6: DISSOZIATIONSGLEICHGEWICHT DES SULFIDES	17
ABBILDUNG 7: THEORETISCHES SULFIDEMISSIONSPOTENZIAL ALS FUNKTION DES pH-WERTES NACH HENRY-GESETZ FÜR UNTERSCHIEDLICHE TEMPERATUREN	19
ABBILDUNG 8: VERÄNDERUNG DES TEMPERATURFAKTORS FÜR DIE UMSATZGESCHWINDIGKEIT ÜBER DER TEMPERATUR FÜR DIE VERSCHIEDENEN BAKTERIENARTEN	27
ABBILDUNG 9: SULFIDBILDUNG ÜBER DER VERWEILZEIT NACH DEN BESCHRIEBENEN MODELLGLEICHUNGEN FÜR DIE NENNDURCHMESSER 100 UND 300	28
ABBILDUNG 10: STOFFUMSATZ IN ABWASSERKANÄLEN BEI BIOGENER SCHWEFELÄUREKORROSION	37
ABBILDUNG 11: STOFFUMSÄTZE IN DRUCKLEITUNGEN UNTER ZUNEHMENDEM SAUERSTOFFMANGEL	39
ABBILDUNG 12: QUALITATIVER VERLAUF VON STOFFGRUPPEN ÜBER DER KANALLÄNGE EINES GESCHLOSSENEN LEITUNGSABSCHNITTES	39
ABBILDUNG 13: SUBSTRATVERWERTUNGSPFADE VON SULFATREDUZIERENDEN BAKTERIEN, ACETOGENEN BAKTERIEN UND METHANBAKTERIEN	42
ABBILDUNG 14: ÜBERBLICK ÜBER MAßNAHMEN ZUR GERUCHS- UND KORROSIONSVERMEIDUNG U, 20	45
ABBILDUNG 15: STATISTISCHE AUFSTIEGSGESCHWINDIGKEIT VON LUFTBLASEN IN WASSER	48
ABBILDUNG 16: WIRKENDE KRÄFTE AN EINER BLASE	49
ABBILDUNG 17: VERHALTEN DES DRAUSY-BELÜFTUNGSSYSTEMS BEI VERSCHIEDENEN INNENDRÜCKEN	54
ABBILDUNG 18: FOTO DES POCKET-TITRATORS ZUR BESTIMMUNG DES GELÖSTEN SULFIDES MIT AUSWERTUNG AM COMPUTERBILDSCHIRM	59
ABBILDUNG 19: FUNKTIONSPRINZIP DES AMPEROMETRISCHEN GASSENSORS ZUR H ₂ S-BESTIMMUNG	60
ABBILDUNG 20: GASMESSUNG MIT ODALOG GERÄT	61
ABBILDUNG 21: SAUERSTOFFKONZENTRATION ÜBER DER ZEIT IM EINTRAGSVERSUCH	63
ABBILDUNG 22: VERBRAUCH DES SAUERSTOFFS BEI AUFGABE VON ABWASSER ZUR INBETRIEBNAHME DER ANLAGE	66
ABBILDUNG 23: SAUERSTOFFKONZENTRATION IN DER BELÜFTETEN VERSUCHSANLAGE NACH DER ERSTEN BESCHICKUNG	67
ABBILDUNG 24: BATCH-REAKTOR FÜR DIE ANALYSEN IM LABOR	69
ABBILDUNG 25: VERSUCHSANLAGE AUF DER KLÄRANLAGE	70
ABBILDUNG 26: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER VERSUCHSANLAGE	72
ABBILDUNG 27: FOTOS DER VERSUCHSANLAGE MIT EINGEBAUTER MESSTECHNIK	73
ABBILDUNG 28: SONDEN IN DER VERSUCHSANLAGE	74
ABBILDUNG 29: ANTWORT AUF PEAKSIGNAL BEI FÖRDERVOLUMENSTROM 100 L/MIN	75
ABBILDUNG 30: ANTWORTFUNKTION DURCH VERDRÄNGUNGSMARKIERUNG (100 L/MIN)	76
ABBILDUNG 31: ANTWORTSIGNAL AUF SPRUNGMARKIERUNG (FÖRDERLEISTUNG VON 1,3 L/MIN) ..	77
ABBILDUNG 32: SCHEMA DES ENTWÄSSERUNGSNETZES	79
ABBILDUNG 33: SCHWEFELWASSERSTOFFGEHALT DES ABWASSERS IM 25-LITER-BEHÄLTERS ÜBER ZWEI TAGE OHNE BELÜFTUNG	80
ABBILDUNG 34: BELÜFTUNG VON ABWASSER (8 L/H ABLAUF DUCKROHRLEITUNG; 16 L/H ZULAUF DRUCKROHRLEITUNG)	82
ABBILDUNG 35: SULFIDKONZENTRATION IN MG/L BEI BELÜFTUNG VON ABWASSER (25 L) MIT 10 L/H LUFT	83

ABBILDUNG 36: BEHANDLUNG DES ABWASSERS (25 L) MIT UNTERSCHIEDLICHEN GASEN (LUFT /STICKSTOFF)	84
ABBILDUNG 37: SULFIDBILDUNG IN BATCH-ANSÄTZEN OHNE BELÜFTUNG	86
ABBILDUNG 38: SULFIDBILDUNG IN BATCH-ANSÄTZEN MIT BELÜFTUNG	88
ABBILDUNG 39: SULFIDBILDUNG IN DER VERSUCHSANLAGE OHNE BELÜFTUNG	91
ABBILDUNG 40: SULFIDUMSATZ IN DER LINEAR BELÜFTETEN VERSUCHSANLAGE	93
ABBILDUNG 41: SULFIDUMSATZ IN DER LINEAR BELÜFTETEN VERSUCHSANLAGE MIT REDUZIERTEM LUFTVOLUMENSTROM VON 16 L/H	95
ABBILDUNG 42: SULFIDBILDUNG BEI PUNKTUELLER BELÜFTUNG	97
ABBILDUNG 43: MESSUNG VON H ₂ S IM ABWASSER, TAGESGANG FÜR WERKTAG JULI100	
ABBILDUNG 44: H ₂ S-KONZENTRATION IM ABWASSER DES ZULAUFES UND IN DER GASPHERE DES ABLAUFES DER DRUCKLEITUNG, WERKTAG	102
ABBILDUNG 45: H ₂ S-KONZENTRATION IM ABWASSER DES ZULAUFES UND IN DER GASPHERE DES ABLAUFES DER DRUCKROHRLEITUNG AN EINEM WERKTAG, KURZE PUMPENPAUSEN	103
ABBILDUNG 46: ANALYSENERGEBNISSE DER STICHPROBE BRAUNLAGE-SORGE/TANNE VOM 07.05.08	104
ABBILDUNG 47: ANALYSENERGEBNISSE DER 24-H-MISCHPROBE DER STRECKE BRAUNLAGE-SORGE/TANNE; 02.-03.06.08	105
ABBILDUNG 48: GASMESSUNG AM DRUCKLEITUNGSENDE VON BRAUNLAGE, AUGUST 2008	105
ABBILDUNG 49: GASEMISSIONSMESSUNG AM DRUCKLEITUNGSENDE IN DRÜBECK, VERGLEICH DER BEHANDLUNGSMETHODEN (UNBEL.: UNBELÜFTETER AUSGANGSZUSTAND, DB: DÜSENBELÜFTUNG, GB: GROBLASIG ÜBER STUTZEN BELÜFTET)	107
ABBILDUNG 50: GASMESSUNGEN AM DRUCKLEITUNGSENDE VON HASSELFELDE, MESSORT TANNE IM SOMMER 2008	108
ABBILDUNG 51: VERÄNDERUNG DER SULFIDKONZENTRATION ÜBER NITRAT-N IM BATCH-VERSUCH APRIL 2008	114
ABBILDUNG 52: ERGEBNIS DES UNBELÜFTETEN BATCH-VERSUCHES UND DER BERECHNETEN SULFIDBILDUNG	115
ABBILDUNG 53: ERGEBNIS DES BELÜFTETEN BATCH-VERSUCHS UND DER BERECHNETEN SULFIDBILDUNG	115
ABBILDUNG 54: VERGLEICH DER BERECHNETEN UND GEMESSENEN SULFIDBILDUNGSRATE, 14.08.2008	117
ABBILDUNG 55: VERGLEICH DER BERECHNETEN UND GEMESSENEN SULFIDBILDUNGSRATE, VERSUCHSANLAGE PUNKTUELL BELÜFTET, 30.10.08	119
ABBILDUNG 56: VERGLEICH DER BERECHNETEN UND GEMESSENEN SULFIDBILDUNGSRATE, VERSUCHSANLAGE PUNKTUELL BELÜFTET, 06.11.08	119
ABBILDUNG 57: VERGLEICH DER BERECHNETEN UND GEMESSENEN SULFIDBILDUNGSRATE, VERSUCHSANLAGE 40 L/H LINEAR, 02.07.2008	120
ABBILDUNG 58: VERGLEICH DER BERECHNETEN UND GEMESSENEN SULFIDBILDUNGSRATE, VERSUCHSANLAGE 40 L/H LINEAR, 10.07.2008	121
ABBILDUNG 59: VERGLEICH DER BERECHNETEN UND GEMESSENEN SULFIDBILDUNGSRATE, VERSUCHSANLAGE 40 L/H LINEAR, 16.07.2008	121
ABBILDUNG 60: VERGLEICH DER THEORETISCHEN SULFIDKONZENTRATION UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER SULFIDBILDUNG, -OXIDATION, UND -EMISSION	122
ABBILDUNG 61: SCHWEFELUMSATZ IM KANAL	124
ABBILDUNG 62: ENTSCHEIDUNGSBAUM ZUR AUSWAHL DES GEEIGNETEN ORTES ZUR SULFIDBEKÄMPFUNG DURCH BELÜFTUNGSMAßNAHMEN IN DRUCKLEITUNGEN	129
ABBILDUNG 63: GESTALTUNGSEMPFEHLUNG FÜR ABWASSERZULÄUFE IN SAMMELSCHÄCHTE	136
ABBILDUNG 64: SCHEMATISCHER LÄNGSSCHNITT EINER STEILLEITUNG MIT OFFENEN SCHÄCHTEN ZUR LUFTANREICHERUNG	137
ABBILDUNG 65: KOSTENVERGLEICH VON VERSCHIEDENEN BEHANDLUNGSMAßNAHMEN ZUR GERUCHSBEKÄMPFUNG IN KANALSISTEMEN	140

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: GESUNDHEITLICHE WIRKUNGEN DES SCHWEFELWASSERSTOFFS	4
TABELLE 2: HERKUNFT DER SCHWEFELFRACHT IM ABWASSERSYSTEM	8
TABELLE 3: LEITKOMPONENTEN FÜR GERUCHSEMISSIONEN KOMMUNALER KLÄRANLAGEN	11
TABELLE 4: SCHWEFELGEGHALT VON VERSCHIEDENEN LEBENSMITTELEN	12
TABELLE 5: WICHTIGE EIGENSCHAFTEN AUSGEWÄHLTER GERUCHSVURURSACHENDER STOFFE	
TABELLE 6: REDOX-GLEICHUNGEN FÜR AUSGEWÄHLTE MIKROBIOLOGISCHE PROZESSE ZUR ENERGIEBEREITSTELLUNG	16
TABELLE 7: EINFLUSSPARAMETER AUF DIE SULFIDEMISSION DER VERSCHIEDENEN BERECHNUNGSANSÄTZE	21
TABELLE 8: EINFLUSSPARAMETER AUF DIE SULFIDBILDUNG DER BEKANNTEN MODELLE	21
TABELLE 9: GUJER-MATRIX DES ALLGEMEINEN BIOFILM-MODELLS	32
TABELLE 10: EXPERIMENTELL BESTIMMTE SAUERSTOFFZEHRUNGSRATEN DURCH DIE SIELHAUT VON UNTERSCHIEDLICHEN AUTOREN	35
TABELLE 11: EXPERIMENTELL BESTIMMTE SAUERSTOFFZEHRUNG DES ABWASSERS VON UNTERSCHIEDLICHEN AUTOREN	35
TABELLE 12: SCHWEFELOXIDIERENDE MIKROORGANISMEN	38
TABELLE 13: MILIEUBEDINGUNGEN FÜR DESULFURIZIERER	41
TABELLE 14: KLASSIFIZIERUNG DES NÄHRSTOFFBEDARFES VON MIKROORGANISMEN	41
TABELLE 15: KINETISCHE PARAMETER FÜR MESOPHILE ACETATVERWERTENDE SULFATREDUZIERENDE BAKTERIEN UND METHANBAKTERIEN	43
TABELLE 16: BERECHNUNG DES DIMENSIONSLOSEN DURCHFLUSSES FÜR VERSCHIEDENE ROHRDURCHMESSER UND FLIEßGESCHWINDIGKEITEN	52
TABELLE 17: SÄTTIGUNGSKONZENTRATION VON LUFTSAUERSTOFF IN WASSER FÜR VERSCHIEDENE UMGEBUNGSDRÜCKE UND TEMPERATUREN	52
TABELLE 18: VERWENDETE MATERIALIEN UND METHODEN	55
TABELLE 19: BESTIMMUNGSGRENZEN DER KÜVETTENTESTS	56
TABELLE 20: ERGEBNISSE DER PHOTOMETRISCHEN BESTIMMUNG VON SULFID IN STANDARDLÖSUNGEN UND ABWASSERPROBEN	58
TABELLE 21: ÜBERSICHT ÜBER DIE AUSGEWERTETEN VERSUCHE UND DEREN ZIELSETZUNG	62
TABELLE 22: VERGLEICH VON SYNTHETISCHEM ABWASSER (NACH DIN 38 142 T24)	65
TABELLE 23: ANALYSENWERTE DES ABWASSERS IN DER VERSUCHSANLAGE	68
TABELLE 24: GEGENÜBERSTELLUNG DER RELEVANTEN DIMENSIONEN DER PRAXISANLAGE ZUR AUSWAHL DER DIMENSION DER MINIPLANT-ANLAGE ZUR AUSWAHL DER AUSLEGUNG	71
TABELLE 25: BEPROBTE DRUCKLEITUNGSABSCHNITTE OHNE BEHANDLUNG UND BELÜFTUNG	78
TABELLE 26: BEPROBTE DRUCKLEITUNGSABSCHNITTE MIT BELÜFTUNGSEINRICHTUNGEN	78
TABELLE 27: STARTWERTE FÜR DIE BATCH-VERSUCHE IM LABOR	85
TABELLE 28: START- UND ENDWERTE FÜR DIE UNBELÜFTETEN BATCH-VERSUCHE	87
TABELLE 29: START- UND ENDWERTE DER BELÜFTETEN BATCH-VERSUCHE	89
TABELLE 30: STARTWERTE IN DER VERSUCHSANLAGE	90
TABELLE 31: GEGENÜBERSTELLUNG DER THEORETISCH BERECHNETEN SULFIDKONZENTRATIONEN AM LEITUNGENDE DER VERSUCHSANLAGE MIT DEN MESSWERTEN	109
TABELLE 32: ERMITTELTE PARAMETER A FÜR DIE UNBELÜFTETEN VERSUCHE IN DER VERSUCHSANLAGE	116
TABELLE 33: ERMITTELTE PARAMETER A FÜR DIE BELÜFTETEN VERSUCHE IN DER VERSUCHSANLAGE	118
TABELLE 34: ÜBERSICHT DER SCHWEFELUMSATZPROZESSE IN DER GUJER-MATRIX	126
TABELLE 35: ERFORDERLICHE UNTERSUCHUNGSPARAMETER FÜR DIE AUSWAHL DER BEHANDLUNGSRORTE	130
TABELLE 36: BERECHNUNGSTOOL ZUR ERMITTLUNG DES SAUERSTOFFBEDARFES FÜR DRUCKLEITUNGEN	133
TABELLE 37: STANDARD-WERTE FÜR DIE BERECHNUNG DES LUFTBEDARFES	134
TABELLE 38: BERECHNETER LUFTBEDARF IN L/MIN NACH LOHSE UND URBAN FÜR DIE VERSCHIEDENEN UNTERSUCHTEN LEITUNGSABSCHNITTE	134
TABELLE 39: ERFORDERLICHER VOLUMENSTROM Q_s ZUM ABRIEB DER SIELHAUT	138

Formelverzeichnis

FORMEL 1: DISSOZIATIONSGLEICHGEWICHT.....	18
FORMEL 2: BERECHNUNG DES GASFÖRMIGEN ANTEILS H ₂ S (EIGENE ANPASSUNG)	18
FORMEL 3: HENRY-KONSTANTE FÜR SCHWEFELWASSERSTOFF IN ABHÄNGIGKEIT DER TEMPERATUR	18
FORMEL 4: PARTIALDRUCK FÜR SCHWEFELWASSERSTOFF IN WASSER.....	19
FORMEL 5: BERECHNUNG DER SULFIDEMISSION NACH MODELL YONGSIRI 03	20
FORMEL 6: SULFIDBILDUNG NACH HADJIANGHELOU ET AL.	22
FORMEL 7: SULFIDBILDUNG NACH ATV -M154	22
FORMEL 8: SULFIDBILDUNG NACH THISTLETHWAYTE.....	23
FORMEL 9: BERECHNUNG SULFIDKONZENTRATION AM DRUCKLEITUNGSENDE NACH THISTLETHWAYTE.....	23
FORMEL 10: : SULFIDBILDUNG NACH POMEROY	24
FORMEL 11: BERECHNUNG SULFIDKONZENTRATION AM DRUCKLEITUNGSENDE NACH POMEROY	24
FORMEL 12: SULFIDBILDUNG NACH BOON	24
FORMEL 13: BERECHNUNG DER SULFIDKONZENTRATION AM DRUCKLEITUNGSENDE NACH BOON.....	24
FORMEL 14: SULFIDBILDUNG NACH NIELSEN, HV-JACOBSEN, RAUNKJAER 98.....	25
FORMEL 15: SULFIDBILDUNG NACH YONGSIRI	25
FORMEL 16: VERHÄLTNIS VON OBERFLÄCHE ZU VOLUMEN FÜR KREISRUNDE ROHRQUERSCHNITTE	26
FORMEL 17: MONOD-KINETIK	29
FORMEL 18: BIOLOGISCHE UMWANDLUNGSPROZESSE 1. ORDNUNG	30
FORMEL 19: MICHAELIS-MENTEN-KINETIK	30
FORMEL 20: CHEMISCHE OXIDATIONSRATE FÜR SCHWEFELWASSERSTOFF	33
FORMEL 21: SULFIDOXIDATION VON SYNTHETISCHEM ABWASSER NACH NIELSEN	34
FORMEL 22: BERECHNUNG DER MITTLEREN ZEHRUNG DES BIOFILMS	35
FORMEL 23: BERECHNUNG DES LUFTBEDARFES OV IN ABHÄNGIGKEIT DER ZEHRUNG	36
FORMEL 24: REYNOLDS-ZAHL IN BLASENSTRÖMUNGEN	49
FORMEL 25: KRÄFTE AN EINER BLASE.....	50
FORMEL 26: ZUSAMMENFASSUNG DER WIRKENDEN KRÄFTE AN EINER BLASE IN WASSER	50
FORMEL 27: RESULTIERENDE GESCHWINDIGKEIT DER BLASE	50
FORMEL 28:BERECHNUNG DES DIMENSIONSLOSEN DURCHFLUSSES	51
FORMEL 29 DRUCKVERLUST	53
FORMEL 30: BERECHNUNG DER VERWEILZEIT FÜR KREISFÖRMIGE ROHRLEITUNGEN. 75	
FORMEL 31: SCHWEFELREDUZIERENDE BAKTERIENMASSE BASIEREND AUF SULFAT 112	
FORMEL 32: BERECHNUNG DER MAXIMALEN VERWEILZEIT NACH HADJIANGHELOU 138	

Symbolverzeichnis

a	Korrekturkoeffizient Sulfidbildung.)	
BSB ₅	Biochemischer Sauerstoffbedarf in	[mg/l]
c	Konzentration	[mg/l]
C	Koeffizient:	
	0,5 Unterdruckleitungen	
	2,0 Druckleitungen	
	1,0 druckluftgespülte Einzelleitungen	
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf in	[mg/l]
CSBs	Gelöster chemischer Sauerstoffbedarf	[g O ₂ / m ³]
c _w	Widerstandbeiwert	[-]
D	Druckleitungsdurchmesser	[m]
d	Rohrdurchmesser	[cm]
d _D	Blasendurchmesse	[m]
d _m	Belüftungstiefe	[m]
dS/dt	Sulfidbildung	[mg/lh]
F _A	Auftriebskraft	[N]
F _G	Gewichtskraft	[N]
F _R	Reibungskraft	[N]
Fr	Froudezahl	[-]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
h	Fallhöhe	[m]
H ₂ S _g	Schwefelwasserstoff in der Gasphase	[ppm]
H ₂ S	gelöster undissoziierter Schwefelwasserstoff	[mg/l]
HS ⁻	Hydrosulfid	[mg/l]
H	Henry-Konstante	[-]
K _{xy}	Reaktionskonstante für Stoff xy	[mg/l]
K _S	Halbsättigungskonstante für Substrat	[mg/l]
L	Leitungslänge	[m]
O ₂	Sauerstoffgehalt	[mg/l]
O _c	Sauerstoffzufuhr	[kg/h]
OV	Sauerstoffverbrauch	[kg/h]
r _{Abw}	Sauerstoffverbrauch des Abwassers	[kg/m ² h]
r _{Sh}	Sauerstoffverbrauch der Sielhaut	[kg/ m ² h]

Q	Durchflussmenge	[m ³ /s]
pH	neg. dek. Logarithmus der H ⁺ -Ionen- Konz.	[-]
pKs	Säurekapazität	
r	Hydraulischer Radius	[m]
Re	Reynolds-Zahl	[-]
r _{abw}	mittlere Zehrung des Abwassers	[g O ₂ /m ³ h]
r _s	Sulfidproduktionsrate	[g S/m ² h]
r _{Sh}	mittlere Zehrung des Biofilms/Sielhaut	[g O ₂ /m ² h]
R	Allgemeine Gaskonstante	[Jmol ⁻¹ K ⁻¹]
ρ	Dichte eines Stoffes	[kg/m ³]
S _{xy}	Substratkonzentration von Stoff xy	[mg/l]
SH ₂ S	Sulfidkonzentration (gelöst)	[mg/l]
SH ₂ S _{sat}	Sättigungskonzentration des gelösten Sulfides	[mg/l]
ΔS	Änderung der Sulfidkonzentration	[g/m ³]
S _{NO}	Nitrat-Nitritkonzentration	[g/m ³]
S _O	Sauerstoffgehalt	[mg/l]
s	Gefälle der Leitung in	[m/m]
SOB	Schwefeloxidierende Bakterien	
SRB	Schwefelreduzierende Bakterien	
S _{S(-II)}	Sulfidkonzentration, s.a. SH ₂ S	
T	Abwassertemperatur	[° C oder K]
t	Aufenthaltszeit in der Druckleitung	[h]
TS	Trockensubstanzgehalt	[kg/ m ³]
τ	Verweilzeit	[h]
u	Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]
w _{rel}	relative Blasengeschwindigkeit	[m/s]
w _D	Blasengeschwindigkeit	[m/s]
μ _{max}	maximale Wachstumsrate	[d ⁻¹]
μ	Wachstumsrate	[d ⁻¹]
X	Konzentration Bakterienmasse	[mg/l]
Y	Ausbeutekoeffizient (Yield)	[g Biomasse/g Substrat]