

SCHRIFTENREIHE

des Bauhaus-Instituts für
zukunftsweisende
Infrastruktursysteme (b.is)

28

Herausgeber:

Bauhaus-Universität Weimar

Fakultät Bauingenieurwesen

Bauhaus-Institut für zukunftsweisende Infrastruktursysteme

99423 Weimar, Coudraystraße 7

RHOMBOS-VERLAG • BERLIN

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

© 2015 RHOMBOS-VERLAG, Berlin
Alle Rechte vorbehalten

Das Werk ist in allen seinen Teilen urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeisung und Verarbeitung in elektronischen Systemen. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Impressum

Schriftenreihe des Bauhaus-Instituts für zukunftsweisende
Infrastruktursysteme an der Bauhaus-Universität Weimar
16. Jahrgang 2015

Herausgeber der Schriftenreihe
Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen,
Bauhaus-Institut für zukunftsweisende Infratraktursysteme
Coudraystraße 7, D-99423 Weimar

Verlag
RHOMBOS-VERLAG
Fachverlag für Forschung, Wissenschaft und Politik
Kurfürstenstr. 15/ 16, 10785 Berlin
Internet: www.rhombos.de
eMail: verlag@rhombos.de
VK-Nr. 13597

Druck
PRINT GROUP Sp. z o.o.
Printed in Poland

ISBN 978-3-944101-28-6

ISSN 1862-1406

**Bauhaus-Institut für
zukunftsweisende Infrastruktursysteme
(b.is)**



Das Bauhaus-Institut für zukunftsweisende Infrastruktursysteme (b.is) verfolgt das Ziel, die Kooperation der derzeit beteiligten Professuren Siedlungswasserwirtschaft, Biotechnologie in der Ressourcenwirtschaft und Urban Energy Systems zu intensivieren sowie die Honorarprofessur Urbanes Infrastrukturmanagement, um Lehr-, Forschungs- und Beratungsaufgaben auszubauen. So werden beispielsweise die Weiterentwicklung von Studiengängen, gemeinsame Doktorandenkolloquien oder gemeinsame Forschungs- und Entwicklungsaufgaben durchgeführt.

Das b.is will sich deutlich sichtbar im Bereich der Infrastrukturforschung aufstellen. Die Forschung und Lehre in diesem Bereich orientiert sich am medienübergreifenden Modell der nachhaltigen Gestaltung von Stoff- und Energieflüssen sowie ressourcenökonomisch ausgerichteten Systemen, die verbindendes Konzept der Kernprofessuren des Instituts sind. Die Professur Betriebswirtschaftslehre im Bauwesen ist mit dem b.is assoziiert.

**Bauhaus-Institute for
Infrastructure Solutions
(b.is)**



The Bauhaus-Institute for Infrastructure Solutions (b.is) aims to strengthen the cooperation of the university's research teams in Urban Water Management and Sanitation, Biotechnology in Resources Management and Urban Energy Systems in the areas of teaching, research and consultancy work. This encompasses the further development of degree programmes, joint doctorate colloquia and joint research and development activities.

Currently the chair of urban water management and sanitation, the chair of biotechnology in resources management and the chair of urban energy systems as well as the honorary professorship for urban infrastructure management are members of the institute. The chair of construction economics is associated with the institute.

The b.is will increase its visibility in infrastructure research. Education and research are geared to the comprehensive model of sustainable material and energy flows and resource economy oriented systems, which are the linkage of the institute's chairs.

Umgang mit stickstoffbelasteten Abwässern an Ausflugszielen in exponierter Lage

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
an der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Dipl.-Ing. (FH) Daniel Meyer M.Sc.
aus Kieselbach.

Gutachter:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Londong, Weimar
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kraft, Weimar
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Tränckner, Rostock

Tag der Disputation 12.12.2014

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Siedlungswasserwirtschaft der Bauhaus-Universität Weimar. Wesentliche Forschungsarbeiten erfolgten im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes *„Realisierung eines stoffstromorientierten Abwasser- und Reststoffentsorgungskonzeptes in exponierter Lage unter Berücksichtigung objektspezifischer und ortsgebundener Randbedingungen, insbesondere des Umweltschutzes“*.

Herrn Professor Dr. Jörg Londong gilt mein sehr herzlicher Dank für die Überlassung des Themas und seine sehr wertvolle Betreuung. Ich danke Herrn Professor Dr. Eckhard Kraft sowie Herrn Professor Dr. Jens Tränckner für die Übernahme der Korreferate sehr herzlich. Zudem bedanke ich mich bei all meinen Kolleginnen und Kollegen für die Unterstützung und die gute Zusammenarbeit – insbesondere möchte ich mich bei Frau Dipl.-Ing. Julia Alexeeva-Steiniger für die gemeinsame Zeit an der Professur sowie bei Frau Johanna Scharf für die Arbeit im Labor bedanken. Ganz besonderen Dank richte ich an Herrn Dr. Ralf Englert, der mir in den Jahren in guten wie in schwierigen Zeiten stets mit Rat und Tat zur Seite stand.

Sehr dankbar bin ich auch für die Unterstützung durch meine studentischen Hilfskräfte Frau Stefanie Hörnlein und Sebastian Goll sowie dem Praktikanten und meinem Freund Andreas Goglin. Weiterer Dank gilt dem Laborteam der Abteilung Chemie und Umwelt der MFPA Weimar.

Keinesfalls unerwähnt bleiben dürfen an dieser Stelle die Herren Dr. Hans-Jörg Temann, Dr. Jan Mauriz Kaub sowie Dr. Sten Meusel, die mir als Vorbilder galten und neben dem fachlichen Austausch auch für einen emotionalen Ausgleich sorgten.

Ferner danke ich dem Planungsbüro Poch+Zänker für die Unterstützung und die gewährten Freiräume in der Endphase der Dissertation. Herrn Dr. Dirk Poch gilt mein großer Dank für die sehr interessanten Anregungen und Diskussionen.

Meiner Familie danke ich dafür, dass sie mir diesen Weg ermöglicht hat, nicht zuletzt für die Geduld und das Verständnis für die lange Zeit.

Mein größter Dank gilt meiner Freundin Stephanie für die fachlichen Diskussionen, die wiederkehrende Aufmunterung, das Zurückstecken und die Freude in ihren Augen, als es endlich geschafft war.

Weimar, Dezember 2014

Daniel Meyer.

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Zielsetzung	1
2	Grundlagen und Ergebnisse anderer Untersuchungen	7
2.1	Abwassercharakteristik an Extremstandorten	7
2.2	Abwasseranfallstellen	8
2.3	Trinkwasserverbrauch und Abwasseranfall	9
2.4	Abwasserzusammensetzung	11
2.5	Theoretische Grundlagen zur Behandlung stickstoffhaltiger Abwässer	14
2.5.1	Konventionelle biologische Abwasserbehandlung	15
2.5.2	Behandlungsverfahren für stickstoffhaltige Abwässer	19
2.6	Fazit der theoretischen Betrachtungen	24
3	Material und Methoden	27
3.1	Arbeitsprogramm und methodische Vorgehensweise	27
3.2	Abwasserbehandlung mittels modularer Tropfkörperanlage.....	28
3.2.1	Aufbau und Funktionsweise der labortechnischen Versuchsanlage	29
3.2.2	Verwendeter Tropfkörperfüllstoff.....	32
3.2.3	Verwendetes Abwasser	34
3.2.4	Durchführung der Versuche - Versuchsprogramm	41
3.2.5	Untersuchungsmethoden	45
3.3	Urinbehandlung mittels Luftstrippung und Phosphatkristallisation ..	49
3.3.1	Aufbau und Funktion der labortechnischen Versuchsanlage	50
3.3.2	Verwendetes Substrat	54
3.3.3	Durchführung der Versuche – Versuchsprogramm.....	55
3.3.4	Untersuchungsmethoden	58
3.3.5	Potentialberechnung der Ammoniakstrippung	62
3.4	Schlammhydrolyse.....	68

3.4.1	Versuchsaufbau.....	69
3.4.2	Versuchsmaterialien	71
3.4.3	Durchführung der Versuche - Versuchsprogramm.....	73
3.4.4	Untersuchungsmethoden	77
4	Abwasserbehandlung mittels Tropfkörper	79
4.1	Einführung.....	79
4.2	Ergebnisse zur Abwasserbehandlung mittels Tropfkörper	84
4.2.1	Versuchsphase 1 – ohne Urinzugabe.....	85
4.2.2	Versuchsphase 2 – mit Urindosierung.....	93
4.3	Phosphorelimination	103
4.4	Überschussschlammproduktion.....	105
4.5	Fazit – Leistungsgrenzen der modularen Tropfkörperanlage	111
5	Urinbehandlung mittels Luftstrippung und Phosphatkristallisation	115
5.1	Einführung.....	115
5.2	Ergebnisse zur Urinbehandlung.....	124
5.2.1	Ammoniakstrippung.....	124
5.2.2	Phosphatelimination	133
5.2.3	Weitere Beobachtungen von Einflüssen und Wechselwirkungen.....	137
5.3	Fazit – Leistungsgrenzen der Urinbehandlungsanlage.....	140
6	Klärschlammhydrolyse	143
6.1	Einführung.....	143
6.2	Ergebnisse der Klärschlammhydrolyse	154
6.2.1	Trockensubstanzgehalt und organischer Trockenrückstand.....	154
6.2.2	Organische Säuren	161
6.2.3	Weitere Beobachtung von Einflüssen und Wechselwirkungen.....	165
6.2.4	Abschätzung des Potentials von Toilettenpapier als interne C-Quelle	168
6.2.5	Säurekapazität und pH-Wert	170

6.3	Fazit – Diskussion der Versuchsergebnisse und Ausblick.....	176
7	Entwicklung einer Abwasserentsorgungsstrategie für Ausflugsziele in exponierten Lagen	181
7.1	Wahl des Abwasserentsorgungssystems.....	181
7.2	Dezentrales Abwasserentsorgungskonzept für Ausflugsziele in exponierter Lage	182
8	Zusammenfassung und Ausblick	193
9	Anhang	211

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Unterschiedliche Schwankungen der Besucherzahlen im Jahres- und Wochenverlauf in der Mittelgebirgs- und Flachlandregion in Thüringen (120 Objekte)	10
Abbildung 3-1: Schematischer Versuchsaufbau und Konfiguration der Versuchsanlage während der ersten Versuchsphase.....	30
Abbildung 3-2: Draufsicht aerob betriebenes Modul mit Verteilung und Filtersubstrat	33
Abbildung 3-3: Stoffliche Zusammensetzung des verwendeten Schmutzwassers.....	37
Abbildung 3-4: Chemische Eigenschaften des verwendeten Schmutzwassers.....	38
Abbildung 3-5: Erfassung des Urins aus wasserlosen Urinalen (oben links); separate Ableitung (unten links) und Speicherung in einem Edelstahltank (rechts).....	39
Abbildung 3-6: Zusammensetzung des gesammelten Urins.....	40
Abbildung 3-7: Übersicht zu den Versuchsphasen – ohne Urindosierung ...	41
Abbildung 3-8: Übersicht zu den Versuchsphasen – mit Urindosierung.....	43
Abbildung 3-9: Schematischer Aufbau der Versuchsanlage zur Urinvorbehandlung.....	50
Abbildung 3-10: Realer Aufbau der Versuchsanlage zur Urinvorbehandlung.....	51
Abbildung 3-11: Funktionsprinzip des Tschechischen Lufthebers.....	52
Abbildung 3-12: Verwendetes Dichtungshanf	53
Abbildung 3-13: Bilanzgrenze zum Ammoniumstickstoff	56
Abbildung 3-14: Bilanzgrenze zum Phosphat.....	57
Abbildung 3-15: Zeiteinteilung der Versuchsreihe	57
Abbildung 3-16: Übersicht zu den Kriterien der Erfolgskontrolle	60
Abbildung 3-17: NH_3 – NH_4^+ -Verhältnis bei $\text{pH} = 8,87$ und $T = 20,0$ °C	64
Abbildung 3-18: Henry-Koeffizient	65

Abbildung 3-19: Änderung der NH ₃ -Fracht über die Zeit	67
Abbildung 3-20: Versuchsaufbau mit Messinstrumenten	70
Abbildung 3-21: Versuchsanordnung in der Klimakammer	71
Abbildung 3-22: Herstellen der Proben.....	74
Abbildung 3-23: Versuchsschema der Versuche 1 und 2	75
Abbildung 3-24: Versuchsschema der Versuche 3 und 4	75
Abbildung 3-25: Versuchsschema des Versuches 5.....	76
Abbildung 3-26: Versuchsschema des Versuches 6.....	76
Abbildung 4-1: CSB-Konzentrationen im Zu- und im Ablauf der modularen Tropfkörperanlage während der Versuchsphase 1.....	86
Abbildung 4-2: CSB-Eliminationsrate und BSB ₅ -Raumbelastung der modularen Tropfkörperanlage während der Versuchsphase 1.....	87
Abbildung 4-3: BSB ₅ -Eliminationsraten und Raumbelastung während der Versuchsphase 1.....	87
Abbildung 4-4: TKN-Konzentrationen im Zu- und im Ablauf der modularen Tropfkörperanlage während der Versuchsphase 1.....	89
Abbildung 4-5: Konzentrationen der Stickstoffparameter Ammonium, Nitrat und Nitrit im Ablauf der modularen Tropfkörperanlage während der Versuchsphase 1	90
Abbildung 4-6: TKN-Eliminationsrate in Abhängigkeit der TKN-Raumbelastung während der Versuchsabschnitte 1/1; 1/3; 1/4 und 1/5	92
Abbildung 4-7: CSB-Zu- und Ablaufkonzentration sowie CSB-Eliminationsrate bezogen auf das gesamte Anlagenvolumen während der Versuchsabschnitte 2/3 und 2/4.....	94
Abbildung 4-8: Konzentrationen der Stickstoffverbindungen TKN im Zulauf und NH ₄ -N, NO ₃ -N und NO ₂ -N im Ablauf während der Versuchsabschnitte 2/3 und 2/4	95

Abbildung 4-9: TKN-Raumumsatzrate in Abhängigkeit der TKN-Raubelastung bezogen auf das aerob betriebene Tropfkörpervolumen während der Versuchsphase 2	97
Abbildung 4-10: pH-Wert und Säurekapazität in Abhängigkeit der täglichen TKN-Zulaufmengen während der Versuchsabschnitte 2/2 und 2/3.....	99
Abbildung 4-11: Denitrifikationsrate (BSB_5 und NO_3-N) sowie das Verhältnis der berechneten Tagesfrachten während der Versuchsabschnitte 2/3 und 2/4.....	100
Abbildung 4-12: Phosphorelimination in Abhängigkeit der BSB_5 -Elimination während der Versuchsphase 1 und 2	105
Abbildung 5-1: Dissoziationsgleichgewichte von NH_3/NH_4^+ für ausgewählte Temperaturen	118
Abbildung 5-2: Henry'scher Koeffizient für Ammoniak aus TETTENBORN [2011].....	119
Abbildung 5-3: Löslichkeit verschiedener Magnesiumphosphate in Abhängigkeit vom pH-Wert, nach SCHULZE-RETTMER & YAWARI [1988], verändert aus MONTAG [2008].....	122
Abbildung 5-4: Löslichkeit verschiedener Phosphate in Abhängigkeit vom pH-Wert, nach ATV [1985], verändert aus MONTAG [2008]	123
Abbildung 5-5: Prozentualer Reduktionsgrad der Ammoniumstickstofffracht und der Verlauf der Ammoniumstickstoffkonzentrationen in den Versuchsphasen 1-1 und 1-2	127
Abbildung 5-6: Nachgewiesene Ammoniumstickstofffrachten in der Gaswäsche mit den entsprechenden Abbauraten aus dem Urin	130
Abbildung 5-7: Verlauf der PO_4-P -Fracht im Urin während der Versuchsreihe	134
Abbildung 5-8: Analyse im Dichtungshanf in der Versuchsphase 2	135
Abbildung 5-9: Temperaturverlauf und Volumenabnahme über die Versuchsdauer	138
Abbildung 5-10: pH-Werte, gemessen im Urin während der Versuchsphasen 1-1 und 1-2	139

Abbildung 6-1:	Energiediagramm einer enzymkatalysierten Reaktion nach KARLSON [1988], ergänzt.....	146
Abbildung 6-2:	Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von der Substratkonzentration nach Michaelis-Menten-Modell	147
Abbildung 6-3:	Zielstellungen der Versuche zur Hydrolyse von Toilettenpapier	154
Abbildung 6-4:	TS-Konzentrationen der Versuche 1, 2 und 3	155
Abbildung 6-5:	TS-Konzentrationen des Langzeitversuches 6	157
Abbildung 6-6:	Magnetrührstab mit Aufwuchs.....	158
Abbildung 6-7:	Rückstände in der Probe.....	158
Abbildung 6-8:	Biofilm auf Magnetrührstab vergrößert	158
Abbildung 6-9:	Biofilm stark vergrößert	158
Abbildung 6-10:	Cellulosefasern setzen sich ab	159
Abbildung 6-11:	Filtratrückstand der Probe 6 im V 5	159
Abbildung 6-12:	Organischer Anteil (oTS) bezogen auf den Trockensubstanzgehalt (TS) der Proben.....	160
Abbildung 6-13:	Essigsäurekonzentration der Proben in den Versuchen 1 und 2	162
Abbildung 6-14:	Essigsäurekonzentration der Proben im Versuch 6.....	163
Abbildung 6-15:	Gasbildung in der Proben P5 im HV 6 nach einer Hydrolysezeit von 136,5 Stunden	164
Abbildung 6-16:	Gasbildung in der Probe P4 im HV 5 nach einer Hydrolysezeit von 112,5 Stunden	164
Abbildung 6-17:	pH-Wert-Verlauf der Proben P5 im Langzeitversuch 6	165
Abbildung 6-18:	Essigsäurekonzentration der Proben in den Versuchen 3 und 4	166
Abbildung 6-19:	Essigsäurekonzentration der Proben im Versuch 5.....	167
Abbildung 6-20:	Essigsäurekonzentration der Proben nach einer Hydrolysezeit von 3 bis 5 Tagen.....	169
Abbildung 6-21:	Mittlere Säurekapazität der Proben in den Versuchen 1, 2 und 3	170
Abbildung 6-22:	Säurekapazität der Proben im Versuch 6	172

Abbildung 6-23: Acetat/Essigsäurepuffersystem: Doppelt-logarithmische Darstellung der Konzentrationsverhältnisse in Abhängigkeit vom vorliegenden pH-Wert	173
Abbildung 6-24: Carbonat/Hydrogencarbonat-Puffersystem: Doppelt-logarithmische Darstellung der Konzentrationsverhältnisse in Abhängigkeit vom vorliegenden pH-Wert	174
Abbildung 6-25: Bewertung des Acetat/Essigsäure- und Carbonat/Hydrogencarbonat-Puffersystems der Versuche 5 und 6 mit der FOS/TAC-Titrations-Methode .	175
Abbildung 6-26: Versuchsaufbau eines Hydrolysereaktors im Labormaßstab	179
Abbildung 7-1: Exemplarisches Zusammenspiel emissionsmindernder Einzelkomponenten in einem Gesamtsystem.....	183

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Darstellung ausgewählter Objektarten und deren Angebote/ Nutzungsmöglichkeiten	12
Tabelle 2-2:	Inhaltsstoffe von Grau- und Schwarzwasser (Urin, Fäzes, Toilettenpapier) nach FRIEDLER ET AL. [2013]	12
Tabelle 2-3:	Gegenüberstellung relevanter Abwasserparameter verschiedener Abwässer	14
Tabelle 3-1:	Eigenschaften des eingesetzten Blähglasgranulats nach Herstellerangaben	33
Tabelle 3-2:	Rohabwasserdaten (Mittelwerte) aus Untersuchungen an der Herberge „Polana Chocholowska“	36
Tabelle 3-3:	Nährstoffrelationen des verwendeten Abwassers (Mittelwerte) und nach ATV-DVWK-A 131	38
Tabelle 3-4:	Konzentrationsangaben für Urin nach DWA, 2008	40
Tabelle 3-5:	Messanalytisch bestimmte Parameter aus den Zu- und Ablaufproben	46
Tabelle 3-6:	Messanalytisch bestimmte Parameter aus den Schlammproben	46
Tabelle 3-7:	Förderleistung des Lufthebers	53
Tabelle 3-8:	Chemische und physikalische Kennwerte des Dichtungshanfes	54
Tabelle 3-9:	Chemische und physikalische Kennwerte der Urinchargen	55
Tabelle 3-10:	Messanalytisch bestimmte Parameter aus dem Urin	61
Tabelle 3-11:	Messanalytisch bestimmte Parameter aus der Lösung in den Gaswaschflaschen	61
Tabelle 3-12:	Messanalytisch bestimmte Parameter aus dem Hanfeinbau	61
Tabelle 3-13:	Mittlerer Luftvolumenstrom aus Gasmessung	66
Tabelle 3-14:	Kennwerte des Toilettenpapiers nach eigenen Untersuchungen	72

Tabelle 3-15:	Kennwerte der ausgewählten Enzympräparate nach Herstellerangaben	72
Tabelle 3-16:	Versuchsplan zur Hydrolyse von Toilettenpapier	73
Tabelle 3-17:	Messanalytisch bestimmte Parameter der Hydrolyseproben	77
Tabelle 4-1:	Zulässige Raumbelastungen nach ATV-DVWK-A 281 für die Auslegung von einstufigen Tropfkörpern mit Nitrifikation	83
Tabelle 4-2:	Richtwerte für die Bemessung des erforderlichen Denitrifikationsvolumens nach ATV-DVWK-A 281	83
Tabelle 4-3:	Systemgrenze bzw. Referenz der Dissertation und somit der Versuchsauswertung	84
Tabelle 4-4:	Überschussschlammanfall während der Versuchsphasen...	107
Tabelle 4-5:	Überschussschlammproduktion berechnet über die CSB-Elimination	108
Tabelle 4-6:	Berechnungen zur Phosphorbilanz	109
Tabelle 4-7:	Berechnung der Phosphatgehalte in der Biomasse	110
Tabelle 4-8:	Leistungsgrenzen der kleintechnischen modularen Tropfkörperversuchsanlage, abgeleitet aus den ermittelten Raumabbauleistungen	112
Tabelle 5-1:	Charakteristik von Urin	116
Tabelle 5-2:	Prozentuale Frachtreduktion von Ammoniumstickstoff in der Versuchsphase 1-1	125
Tabelle 5-3:	Prozentuale Frachtreduktion von Ammoniumstickstoff in der Versuchsphase 1-2	126
Tabelle 5-4:	Effektivität der Gaswäsche	129
Tabelle 5-5:	Vergleich der theoretisch berechneten Werte mit den Versuchsergebnissen	131
Tabelle 5-6:	Gesamtbilanz der Stickstoffbehandlungsprozesse	132
Tabelle 5-7:	Übersicht der Orthophosphatwerte	133
Tabelle 5-8:	Analyse des Aufwuchsmaterials (Dichtungshanf)	135
Tabelle 6-1:	SI-Einheiten der Enzymaktivität nach KARLSON [1988]	148

Tabelle 6-2:	Ergebnisse aus groß- und kleintechnischen Untersuchungen von WINKLER & HAHN [1999]	150
Tabelle 6-3:	Industrielle Anwendung von Cellulasepräparaten nach RUTTLOFF [1994]; AEHLE [2007], TELSCHOW [2006]; ANTRANIKIAN ET AL. [2006]	153
Tabelle 6-4:	Anaerober Substratabbau nach 5 Tagen	161
Tabelle 6-5:	Zunahme der Pufferkapazität nach einer Hydrolysezeit von 15 Tagen.....	172
Tabelle 9-1:	Mess- und Rechenwerte zum Ammoniumstickstoff	212
Tabelle 9-2:	Frachtberechnung für Ammoniumstickstoff in der Versuchsphase 1-1.....	213
Tabelle 9-3:	Frachtberechnung für Ammoniumstickstoff in der Versuchsphase 1-2, einschl. Summe.....	214
Tabelle 9-4:	Mess- und Rechenwerte zum Ammoniumstickstoff in den Gaswaschflaschen während der Versuchsphase 1-1 ..	215
Tabelle 9-5:	Mess- und Rechenwerte zum Ammoniumstickstoff in den Gaswaschflaschen während der Versuchsphase 1-2 ..	216
Tabelle 9-6:	Theoretische Berechnung der Ammoniakstrippung, Rechnungsabschnitt 1	217
Tabelle 9-7:	Theoretische Berechnung der Ammoniakstrippung, Rechnungsabschnitt 2	218
Tabelle 9-8:	Mess- und Rechenwerte der Phosphorelimination.....	219
Tabelle 9-9:	Frachtberechnung für Orthophosphat Teil 1	220
Tabelle 9-10:	Frachtberechnung für Orthophosphat Teil 2	221
Tabelle 9-11:	Werte zur Ermittlung der Förderhöhe	222

Verzeichnis der Abkürzungen und Indizes

Lateinische Buchstaben

B	[kg/d]	Fracht
C	[mg/l]	Konzentration
d	[m]	Durchmesser
E	[J]	Energie
H	[-]	Henry-Koeffizient
H	[kJ*s]	Planksches Wirkungsquantum
h	[m]	Höhe
P	[g/(m ³ *d)]	Umsatzrate
Q	[l/h]	Durchfluss, Volumenstrom
K	[-]	Michaeliskontante
R	[J/(mol*K)]	Gaskonstante
S	[mg/l]	Konzentration
S	[mol/l]	Stoffmengenkonzentration
T	[K]	Temperatur
V	[m ³]	Volumen
v	[mol/(l*s)]	Reaktionsgeschwindigkeit
X	[mg/l]	Konzentration
Y	[mg/l]	Konzentration

Griechische Buchstaben

η	[%]	Wirkungsgrad
ψ	[-]	Verhältniswert

Indizes

A	Fläche, Aktivierungs-
a	Säure
Ab	Ablauf
Abw	Abwasser
AD	Ablauf Denitrifikationsmodul
ALH	Auslauf Luftheber
AN	Ablauf Nachklärung
BM	Biomasse
D	Denitrifikation
Deni	Denitrifikation
elim	eliminiert
G	Gas
gas	gasförmig
ges	Gesamt-
H	Hinreaktion
LB	Lochblech
lq	Flüssig (in wässriger Lösung)
M	Modul, Massen-
N	Nitrifikation
max	Maximum
org	organisch
PS	Primärschlamm
R	Raum, Rückreaktion
TK	Tropfkörper
US	Urinspiegel
ÜS	Überschussschlamm
ZB	Zulauf in die biologische Stufe
Zu	Zulauf

Abkürzungen

AA	Analyseabschnitt
AbwV	Abwasserverordnung
AFS	Abfiltrierbare Stoffe
Anammox	Anaerobe Ammoniumoxidation
ATV	Abwassertechnische Vereinigung e.V.
BSB	Biochemischer Sauerstoffverbrauch
BUW	Bauhaus-Universität Weimar
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DIN	Deutsches Institut für Normung
DVWK	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft u. Kulturbau e.V.
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser u. Abfall e.V.
EN	Europäische Norm
EPA	Environment Protection Agency
EPS	Extrazelluläre polymere Substanz
ES	Enzym-Substrat-Komplex
EU	Europäische Union
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
GV	Glühverlust
ISO	International Organisation for Standardization
KA	Korrespondenz Abfall, Abwasser
MAP	Magnesiumammoniumkomplex
MEK	Multi-Enzym-Komplex
MFPA	Materialforschungs- und -prüfanstalt an der BUW
oTS	Organischer Trockensubstanzgehalt
PE	Polyethylen
PG	Probengemisch

PWC	Parkplatz WC-Anlage
RAW	Rohabwasser
RV	Rückführverhältnis
SAC	Schweizer Alpenverein
TAN	total anorganic nitrogen
TKN	total Kjehldahl nitrogen
TLH	Tschechischer Luftheber
TOC	total organic carbon
TP	Toilettenpapier
TR	Trockenrückstand
TS	Trockensubstanzgehalt
U.S.	United States
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VR	Versuchsreihe
WC	water closet
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie