

Einfluss der Abwassertemperatur auf Bemessung, Auslegung und Reinigungsleistung von Scheibentauchkörpern

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften

der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Andreas Blank

aus

Landau in der Pfalz

Tag der mündlichen
Prüfung:

15.05.2009

Hauptreferent:

em. Prof. Dr. Ing. E.h. Hermann H. Hahn, Ph.D., Karlsruhe

Korreferent:

Prof. Dr. rer. nat. habil. Josef Winter, Karlsruhe

Karlsruhe 2009

Dissertation genehmigt von der Fakultät für
Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH) 2009

Hauptreferent: em. Prof. Dr.-Ing. E.h. Hermann H. Hahn, Ph.D., Karlsruhe

Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. habil. Josef Winter, Karlsruhe

Andreas Blank

Einfluss der Abwassertemperatur auf Bemessung, Auslegung und Reinigungsleistung von Scheibentauchkörpern

Karlsruhe: Universität Karlsruhe (TH), Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft, 2009

Schriftenreihe SWW Karlsruhe – Band 135

Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2009

ISBN 978-3-9811461-8-9

ISBN 978-3-9811461-8-9

Alle Rechte vorbehalten

Satz: Institut für Wasser und Gewässerentwicklung
Bereich Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütewirtschaft
Universität Karlsruhe (TH)

Druck: E&B printware, Digital- und Schnelldruck GmbH, 76131 Karlsruhe

Printed in Germany

Zusammenfassung

In Schwellen- und Entwicklungsländern ist der Bedarf an „Nachhaltiger Entwicklung“ hinsichtlich der Abwasserreinigung zum Schutze des Gutes Wasser besonders groß. Hier ist der Anschlussgrad an die Kanalisation sehr gering und ein Ausbau der Infrastruktur im urbanen Raum kaum finanzierbar.

Bestehende Kanalisationen sind häufig in einem schlechten Zustand und leiten das Abwasser überwiegend unbehandelt in die Vorfluter.

Um diesem Problem entgegen zu treten, sind dezentrale, robuste, energetisch günstige und betriebssichere Technologien - wie die Scheibentauchkörpertechnologie - nötig, um eine Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser zu ermöglichen.

Die Dimensionierung solcher Scheibentauchkörper erfolgt in Deutschland anhand des ATV-DVWK-Arbeitsblattes A-281 und basiert daher auf einer Bemessungstemperatur von 12°C. Diese Bemessungstemperatur ist jedoch nur für den mitteleuropäischen Raum sinnvoll und führt in wärmeren Regionen zu unnötig großen Anlagen.

In der vorliegenden Arbeit wurde daher im Wesentlichen der Einfluss von Abwasser- und Lufttemperatur auf die Reinigungsleistung respektive auf die Umsatzraten des auf den Scheiben haftenden Biofilms quantifiziert.

Hierzu wurden einerseits anhand von labormaßstäblichen Batch-Untersuchungen maximale Umsatzraten für einen Abwassertemperaturbereich zwischen 15 °C und 40 °C bestimmt. Andererseits wurden im Dauerstrombetrieb die maximal zulässige BSB₅- und TKN-Scheibenbelastung in Abhängigkeit vom Reinigungsziel und von der Abwassertemperatur (19,5 °C - 35 °C) bestimmt. Die Dauerstromuntersuchungen wurden dabei an labormaßstäblichen Versuchsanlagen in einer Klimakammer durchgeführt.

Um diese Ergebnisse mit realen Bedingungen vergleichen zu können, wurde eine Demonstrationsanlage mit einem Scheibendurchmesser von 2 m im technischen Maßstab in Delhi, Indien betrieben.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse aus den Untersuchungen im Labormaßstab und dem Demonstrationsbetrieb wurde der Einfluss der Abwassertemperatur auf die Reinigungsleistung eines Scheibentauchkörpers zu einer Bemessungsempfehlung - in Anlehnung an das ATV-DVWK-Arbeitsblattes A-281 und in Abhängigkeit vom angestrebten Reinigungsziel - zusammengefasst.

Abstract

There is a massive need for sustainable development in the field of wastewater treatment to protect water sources especially in emerging and developing countries. There is only limited access to sewage systems and the amelioration of the infrastructure is hardly to finance especially in urban areas.

In many cases existing sewage systems are in a poor condition and mostly discharge untreated wastewater in to the receiving water bodies.

To counter that problem decentralized, robust, energy efficient and foolproof technologies such as rotating biological contactors are necessary, enabling the reuse of cleaned wastewater to be reused.

Dimensioning of rotating biological contactors in Germany is done according to the ATV-DVWK-Worksheet A - 281 and therefore based on a design temperature of 12 °C.

However, that temperature only makes sense for Central Europe since it leads to unnecessary oversized installations if applied in warmer regions.

Therefore, this present thesis puts emphasis on the influence of temperature (wastewater and air) on the RBC loading capacity and conversion rate of the biofilm attached to the contactor disks, respectively.

On the one hand maximum conversion rates for temperatures between 15 °C and 40 °C have been determined by bench-scale batch analyses. On the other hand continuous flow analyses have been conducted quantifying the maximum allowable BOD₅ and TKN surface load in relation to the treatment goal and wastewater temperature (19.5 °C - 35 °C). The continuous flow analyses have been carried out on bench-scale rotating biological contactor-plants in a climate chamber.

To compare these results with a full-scale demonstration plant, a RBC with a disc diameter of 2 m has been operated under real conditions in Delhi, India.

As an important result of the bench-scale and the demonstration investigations the influence of wastewater temperature for different treatment goals on the loading capacity of a rotating biological contactor has been summarized to design recommendation following the ATV-DVWK-Worksheet A - 281.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Ausgangssituation in Schwellen- und Entwicklungsländern	3
3	Motivation und Zielsetzung	5
4	Biofilmverfahren in der Abwasserreinigung	7
5	Historische Entwicklung der Scheibentauchkörpertechnologie	9
5.1	Tauchkörper	9
5.2	Bewegliche Tauchkörper	9
5.3	Scheibentauchkörper.....	10
6	Grundlagen	13
6.1	Das Scheibentauchkörperverfahren	13
6.2	Biofilm.....	16
6.2.1	Wachstums- und Reaktionskinetik von Biofilmen	16
6.2.2	Temperatureinfluss auf das Biofilmwachstum	18
6.3	Nitrifikation	20
6.3.1	Chemolithotrophe Nitrifikation.....	20
6.3.2	Heterotrophe Nitrifikation	21
6.4	Einflussfaktoren auf die Nitrifikation.....	22
6.4.1	Einfluss des pH-Wertes bzw. der Alkalinität auf die Nitrifikation.....	22
6.4.2	Einfluss der Sauerstoffkonzentration auf die Nitrifikation	23
6.4.3	Einfluss des Substrates auf die Nitrifikation.....	25
6.4.4	Einfluss der organischen Belastung auf die Nitrifikation	25
6.4.5	Temperatureinfluss auf die Nitrifikation	27
6.4.6	Maximale spezifische Nitrifikationsleistung.....	28
6.4.7	Einfluss der Betriebsbedingungen auf die Nitrifikation	30
6.4.8	Schlammalter	31
6.5	Heterotropher Abbau organischer Substanzen - Denitrifikation	33
6.6	Einflussfaktoren auf den heterotrophen Abbau	34
6.6.1	Einfluss des pH-Wertes	35
6.6.2	Einfluss der Sauerstoffkonzentration	35
6.6.3	Einfluss der Abwasserzusammensetzung	36
6.6.4	Einfluss der Temperatur	37
6.7	Aerobe Denitrifikation	39

6.8	Anaerobe Ammoniumoxidation (Anammox®)	39
6.9	Bemessungsansätze für Scheibentauchkörperanlagen	40
6.9.1	Bemessung nach Gujer, Krejci und Fleckseder.....	41
6.9.2	Bemessung nach Wolf.....	41
7	Material und Methoden	45
7.1	Versuchsanlagen in Karlsruhe, Klimakammeruntersuchungen.....	45
7.1.1	Labormaßstäbliche Versuchsanlagen - Dauerstrombetrieb und Batch- Untersuchungen (Batch 1)	45
7.1.2	Versuchsphasen der Labor-Untersuchungen	48
7.1.3	Batch-Versuche in den Kaskaden der Versuchsanlagen (Batch 1).....	49
7.1.4	Batch-Versuche parallel zum Dauerstrombetrieb (Batch 2)	49
7.1.5	Substrat	50
7.1.6	Analytik	52
7.2	Demonstrationsanlage in Delhi, Indien.....	52
7.2.1	Randbedingungen des Demonstrationsbetriebes.....	53
7.2.2	Phaseneinteilung des Demonstrationsbetriebes	54
7.3	Struktur der Untersuchungen	57
8	Ergebnisse	59
8.1	Batch-Untersuchungen.....	59
8.1.1	Batch-Versuche in den Kaskaden der Versuchsanlage (Batch 1).....	59
8.1.2	Biofilmdicke, -dichte und Trockensubstanzgehalt (Batch 1)	64
8.1.3	Batch-Versuche parallel zum Dauerstrombetrieb (Batch 2)	68
8.1.4	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse Kapitel 8.1.....	70
8.2	Betriebsergebnisse des Dauerstrombetriebs (labormaßstäblichen Versuchsanlagen)	78
8.2.1	BSB ₅ -Abbauleistung (Ø 25 cm)	78
8.2.2	Nitrifikationsleistung (Ø 25 cm).....	82
8.2.3	BSB ₅ -Abbauleistung (Ø 50 cm)	86
8.2.4	Nitrifikationsleistung (Ø 50 cm).....	89
8.2.5	Einfluss des Maßstabes auf die Untersuchungsergebnisse der Versuchsanlagen	92
8.2.6	Bestimmung der maximalen Umsatzraten durch Linearisierung nach Lineweaver und Burk	93
8.2.7	Einfluss der BSB ₅ -Scheibenbelastung auf die Nitrifikationsleistung	99
8.2.8	Hydraulische Aufenthaltszeit (Ø = 25 cm und Ø = 50 cm).....	100

8.2.9	pH-Wert ($\varnothing = 25$ cm und $\varnothing = 50$ cm).....	101
8.2.10	Sauerstoffkonzentrationen ($\varnothing = 25$ cm und $\varnothing = 50$ cm).....	102
8.2.11	Spezifische Überschussschlammproduktion, abfiltrierbare Stoffe und Schlammalter ($\varnothing = 25$ cm und $\varnothing = 50$ cm)	103
8.2.12	Stickstoffbilanz: Labormaßstäbliche Versuchsanlagen	106
8.2.13	Verdunstung	110
8.2.14	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse des Kapitels 8.2	113
8.3	Betriebsergebnisse der Demonstrationsanlage in Delhi.....	124
8.3.1	Randbedingungen der Untersuchungen.....	124
8.3.2	BSB ₅ -Reinigungsleistung (Demonstrationsanlage)	125
8.3.3	CSB _{filtriert} -Abbauleistung	129
8.3.4	CSB _{homogenisiert} -Abbauleistung	131
8.3.5	NH ₄ -N-Abnahme	132
8.3.6	Nitrifikation – N _{ges} -Elimination	134
8.3.7	Stickstoffbilanz.....	136
8.3.8	Sauerstoffkonzentration und pH-Wert	138
8.3.9	AFS und Überschussschlammproduktion.....	139
8.3.10	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse des Kapitels 8.3	140
9	Abschließende Diskussion	147
9.1	Temperaturabhängigkeit der Umsatzleistung.....	147
9.2	N _{ges} -Elimination.....	152
9.3	pH-Wert und Sauerstoffkonzentration	152
9.4	Hydraulische Aufenthaltszeit	153
9.5	Rotationsgeschwindigkeit – Umfangsgeschwindigkeit – Sauerstoffeintrag	153
9.6	Überschussschlammproduktion und abfiltrierbare Stoffe	154
9.7	Verdunstung	155
10	Zusammenfassung	157
11	Bemessungsempfehlung	159
11.1	Allgemein.....	159
11.2	Vorbehandlung	159
11.3	Kohlenstoffabbau; BSB ₅ -Elimination	159
11.4	Vollständige Nitrifikation	160
12	Literaturverzeichnis.....	165

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4.1:	Biofilmverfahren im Überblick.....	7
Abbildung 6.1:	Lebenszyklen eines Biofilms	16
Abbildung 6.2:	Maximale Wachstumsraten von <i>Nitrosomonas</i> und <i>Nitrobacter</i> in Abhängigkeit von der Temperatur (Rolf, 2002)	19
Abbildung 6.3:	Abhängigkeit der Nitrifikationsrate von der Alkalinität bzw. vom pH-Wert (Boller et al., 1994).....	23
Abbildung 6.4:	Hemmwirkung von NH_3 und HNO_2 auf die Nitrifikation in Abhängigkeit vom pH-Wert nach Anthonisen et al. (1976) und Hwang et al. (2000); $\text{FA} = \text{C}_{\text{NH}_3}$; $\text{FNA} = \text{C}_{\text{HNO}_2}$	23
Abbildung 6.5:	Nitrifikation in Scheibentauchkörpern - Nitrifikationsleistung in Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration und der Rotationsgeschwindigkeit (Nowak, 2000).....	24
Abbildung 6.6:	Abhängigkeit der Stickstoffoxidation von der organischen Belastung (nach Cheung, 1982).....	26
Abbildung 6.7:	Zu erwartende Ablaufwerte bezüglich der NH_4^+ -N- und BSB_5 -Konzentration bei kommunalem Abwasser in Abhängigkeit von der BSB_5 -Scheibenbelastung bei Scheibentauchkörpern (nach Cheung, 1982).....	26
Abbildung 6.8:	Abhängigkeit der Nitrifikationsrate von den Betriebsbedingungen (Boller et al., 1994).....	31
Abbildung 6.9:	Einfluss des pH-Wertes auf aerobe Abbauprozesse (nach Henze et al., 2002, linke Abbildung) und Denitrifikation (nach EPA, 1975, rechte Abbildung)	35
Abbildung 6.10:	Relative Denitrifikationsrate in Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration (nach Oh und Silverstein, 1999)	35
Abbildung 6.11:	Relative NO_x -N-Reduktion in Abhängigkeit des BSB_5/NO_x -N-Verhältnisses für kommunales Abwasser nach Vorklärung (Narkis et al., 1979)	36
Abbildung 6.12:	Denitrifikationsgeschwindigkeit als Funktion von Temperatur und C-Quelle (nach Henze und Bundgaard, 1982).....	37
Abbildung 6.13:	Abhängigkeit der Denitrifikation von der Temperatur in Scheibentauchkörperanlagen (Davis und Pretorius, 1975).....	37
Abbildung 6.14:	BSB_5 - und NH_4 -Umsatz in Tropfkörpern resp. in Scheibentauchkörpern (nach Wolf; 1987).....	42
Abbildung 7.1:	Labormaßstäbliche Versuchsanlagen: Scheibendurchmesser 25 cm... 45	
Abbildung 7.2:	Labormaßstäbliche Versuchsanlagen: Scheibendurchmesser 50 cm... 46	
Abbildung 7.3:	Schematische Darstellung der Versuchsanlagen.....	46

Abbildung 7.4:	Versuchsaufbau zur Bestimmung der maximalen Umsatzraten/-geschwindigkeiten	49
Abbildung 7.5:	Kultivierung des Biofilms	50
Abbildung 7.6:	Demonstrationsanlage auf der STP Yamunah Vihar in Delhi, Indien	53
Abbildung 7.7:	Schematische Darstellung der Demonstrationsanlage.....	56
Abbildung 7.8:	Struktur der Untersuchungen	58
Abbildung 8.1:	Maximale BSB ₅ -Umsatzleistung pro Stunde in Kaskade 1.....	60
Abbildung 8.2:	Maximale BSB ₅ -Umsatzrate in Abhängigkeit von der Abwassertemperatur (Kaskade 1).....	62
Abbildung 8.3:	Maximale NH ₄ -N-Umsatzleistung als Mittelwert der Kaskaden 2 + 3	63
Abbildung 8.4:	Maximale NH ₄ -N-Umsatzrate in Abhängigkeit von der Abwassertemperatur (Kaskade 2).....	64
Abbildung 8.5:	Biofilmdicke auf den Scheiben der unterschiedlichen Kaskaden	65
Abbildung 8.6:	Biofilmverteilung in den Kaskaden (Ø = 25 cm; 8,3 gBSB ₅ /(m ² *d); T = 31,5 °C).....	65
Abbildung 8.7:	Mittlerer Trockensubstanzgehalt auf den Scheiben der Kaskaden	66
Abbildung 8.8:	Mittlere Dichte des Biofilms in den Kaskaden	66
Abbildung 8.9:	Zusammenhang zwischen Biofilmdicke und Trockensubstanzgehalt bzw. Biofilmdichte.....	67
Abbildung 8.10:	Maximale BSB ₅ -Umsatzraten in Abhängigkeit von der Temperatur (4 U/min).....	68
Abbildung 8.11:	Maximale Nitrifikationsleistung in Abhängigkeit von der Abwassertemperatur (synthetisches und reales Abwasser)	69
Abbildung 8.12:	Vergleich der maximalen BSB ₅ -Umsatzrate und der maximalen Nitrifikationsleistung in Abhängigkeit von der Abwassertemperatur	70
Abbildung 8.13:	Zusammenhang zwischen Scheibenbelastung (BSB ₅ und NH ₄ -N) und Biofilmdicke in den Kaskaden.....	74
Abbildung 8.14:	BSB ₅ -Ablaufkonzentration (BSB _{5,ab}) in Abhängigkeit von der Scheibenbelastung bei Abwassertemperaturen zwischen 19,5 und 28,5 °C (Ø 25 cm); Versuchsphasen K1 - K6 (siehe Tabelle 8.7).....	80
Abbildung 8.15:	BSB ₅ -Ablaufkonzentration (BSB _{5,ab}) in Abhängigkeit von der Scheibenbelastung bei Abwassertemperaturen zwischen 31,5 und 33,6 °C(Ø 25 cm); Versuchsphasen K7-K11 (siehe Tabelle 8.7).....	81
Abbildung 8.16:	BSB ₅ -Ablaufkonzentration in Abhängigkeit von der Scheibenbelastung und der Abwassertemperatur (Ø 25 cm).....	81
Abbildung 8.17:	Temperaturabhängigkeit der NH ₄ -N-Abbauleistung (Abbauleistung und Reinigungsleistung = 100 % bei einer Abwassertemperatur von T = 23,9 °C ; BSB ₅ -Scheibenbelastung = 8 g BSB ₅ /(m ² *d), Ø 25 cm)...	83

Abbildung 8.18: $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufkonzentration ($\text{NH}_4\text{-N}_{\text{ab}}$) in Abhängigkeit von der Scheibenbelastung bei Abwassertemperaturen zwischen 23,9 und 31,6 °C; Versuchsphasen (K2, K3 und K5 - K7 und K9)(Ø 25 cm)	84
Abbildung 8.19: $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufkonzentration ($\text{NH}_4\text{-N}_{\text{ab}}$) in Abhängigkeit von der Scheibenbelastung bei Abwassertemperaturen zwischen 31,5 und 33,6 °C; Versuchsphasen (K7 bis K11) (Ø 25 cm)	84
Abbildung 8.20: $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufkonzentration in Abhängigkeit von den Scheibenbelastungen und der Abwassertemperatur	85
Abbildung 8.21: BSB_5 -Ablaufkonzentration ($\text{BSB}_{5,\text{ab}}$) in Abhängigkeit von der Scheibenbelastung bei Abwassertemperaturen zwischen 23,3 und 28,7 °C (Ø 50 cm); Versuchsphasen G1 - G3 (siehe Tabelle 8.11)	87
Abbildung 8.22: BSB_5 -Ablaufkonzentration ($\text{BSB}_{5,\text{ab}}$) in Abhängigkeit von der Scheibenbelastung bei Abwassertemperaturen zwischen 31,8 und 35,2 °C (Ø 50 cm); Versuchsphasen G4 - G8 (siehe Tabelle 8.11)	88
Abbildung 8.23: $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufkonzentration in Abhängigkeit von der Scheibenbelastung bei Abwassertemperaturen zwischen 23,2 und 32,4 °C (Ø 50 cm); Versuchsphasen G1 - G4 und G6 (siehe Tabelle 8.13)	90
Abbildung 8.24: $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufkonzentration in Abhängigkeit von der Scheibenbelastung bei Abwassertemperaturen zwischen 31,7 und 35,2 °C (Ø 50 cm); Versuchsphasen G4 - G8 (siehe Tabelle 8.13)	91
Abbildung 8.25: Vergleich der BSB_5 -Untersuchungsergebnisse der beiden Versuchsanlagen (Ø 25 cm und Ø 50 cm; synthetisches Abwasser)	92
Abbildung 8.26: Vergleich der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Untersuchungsergebnisse der beiden Versuchsanlagen (Ø 25 cm und Ø 50 cm, synthetisches Abwasser)	92
Abbildung 8.27: Prozentualer BSB_5 -Abbau in Kaskade 1 bei unterschiedlichen BSB_5 -Scheibenbelastung	94
Abbildung 8.28: Bestimmung von $r_{s,\text{max},\text{C}}$ und $K_{m,\text{C}}$; Abwassertemperaturbereich 23,2 °C - 24,8 °C (MW = 24 °C)	95
Abbildung 8.29: Bestimmung von $r_{s,\text{max},\text{C}}$ und $K_{m,\text{C}}$; Abwassertemperaturbereich 27,7 °C - 28,7 °C (MW = 28,4 °C)	95
Abbildung 8.30: Bestimmung von $r_{s,\text{max},\text{C}}$ und $K_{m,\text{C}}$; Abwassertemperaturbereich 31,5 °C - 32,4 °C (MW = 31,8 °C)	95
Abbildung 8.31: Bestimmung von $r_{s,\text{max},\text{C}}$ und $K_{m,\text{C}}$; Abwassertemperaturbereich 33,3 °C - 35,2 °C (MW = 34,1 °C)	96
Abbildung 8.32: Bestimmung von $r_{s,\text{max},\text{NH}_4\text{-N}}$ und $K_{m,\text{NH}_4\text{-N}}$; Abwassertemperaturbereich 23,2 °C - 24,8 °C (MW = 24 °C)	98
Abbildung 8.33: Bestimmung von $r_{s,\text{max},\text{NH}_4\text{-N}}$ und $K_{m,\text{NH}_4\text{-N}}$; Abwassertemperaturbereich 27,7 °C - 28,7 °C (MW = 28,4 °C)	98
Abbildung 8.34: Bestimmung von $r_{s,\text{max},\text{NH}_4\text{-N}}$ und $K_{m,\text{NH}_4\text{-N}}$; Abwassertemperaturbereich 31,5 °C - 32,4 °C (MW = 31,8 °C)	98

Abbildung 8.35: Bestimmung von r_{s,max,NH_4-N} und K_{m,NH_4-N} ; Abwassertemperaturbereich 33,3 °C - 35,2 °C (MW = 34,1 °C).....	99
Abbildung 8.36: Einfluss der BSB ₅ -Scheibenbelastung auf die NH ₄ -N-Abnahme bei unterschiedlichen Temperaturen (Ø 25 cm und Ø 50 cm)	100
Abbildung 8.37: Scheibenbelastungen und Sauerstoffkonzentration im Ablauf der Versuchsanlagen in Abhängigkeit von der Abwassertemperatur	103
Abbildung 8.38: Spezifische Überschussschlammproduktion in Abhängigkeit von der BSB ₅ -Scheibenbelastung bei unterschiedlichen Abwassertemperaturen	104
Abbildung 8.39: Konzentration der abfiltrierbaren Stoffe in Abhängigkeit von der BSB ₅ -Scheibenbelastung bei unterschiedlichen Abwassertemperaturen	105
Abbildung 8.40: Schlammalter in Abhängigkeit von der BSB ₅ -Scheibenbelastung.....	106
Abbildung 8.41: Verhältnis der Stickstofffracht in den Kaskaden zur Zulauffracht (NH ₄ -N + NO ₃ -N; ohne Berücksichtigung der NO ₂ -N-Bildung und ohne Inkorporation in die Biomasse; Ø = 25 cm	106
Abbildung 8.42: N _{ges} -Frachten (Zulauf und Kaskaden des Scheibentauchkörpers: NH ₄ -N+NO ₃ -N; Ablauf des Scheibentauchkörpers: NH ₄ -N+ NO ₃ -N+ NO ₂ -N+ Inkorporation) Ø = 25 cm	108
Abbildung 8.43: Verhältnis der Stickstofffracht in den Kaskaden zur Zulauffracht (NH ₄ -N + NO ₃ -N); ohne Berücksichtigung der NO ₂ -N-Bildung und ohne Inkorporation; Ø = 50 cm.....	108
Abbildung 8.44: N _{ges} -Frachten (Zulauf und Kaskaden des Scheibentauchkörpers: NH ₄ -N + NO ₃ -N; Ablauf des Scheibentauchkörpers: NH ₄ -N + NO ₃ -N + NO ₂ -N + Inkorporation) Ø = 50 cm	109
Abbildung 8.45: Abhängigkeit der N _{ges} -Ablauffracht von der BSB ₅ -Scheibenbelastung.....	110
Abbildung 8.46: Korrelation zwischen gemessenen und berechneten Verdunstungsmengen für einen Verdunstungsbeiwert von 10 g/(mbar*m ² *h)	111
Abbildung 8.47: Gemessene Verdunstungsmenge bezogen auf die Scheibenfläche in Abhängigkeit von der Temperatur bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 60 - 70 % (Rotationsgeschwindigkeit 4 U/min).....	112
Abbildung 8.48: Verdunstungsmenge in Abhängigkeit von der Abwassertemperatur und der relativen Luftfeuchte (berechnet; Rotationsgeschwindigkeit 4 U/min)	112
Abbildung 8.49: Zulässige BSB ₅ -Scheibenbelastungen in Abhängigkeit von der Temperatur bei BSB ₅ -Ablaufkonzentrationen von 20 mg/l	115
Abbildung 8.50: Vergleich der maximalen BSB ₅ -Umsatzraten im Dauerstrombetrieb in Kaskade 1 und der Batch 2-Untersuchungen.....	115

Abbildung 8.51: Zu erwartende BSB ₅ -Ablaufkonzentration in Abhängigkeit von der Abwassertemperatur und der BSB ₅ -Scheibenbelastung (durchgehende Linie: Untersuchter Temperaturbereich).....	117
Abbildung 8.52: Zulässige NH ₄ -N-Scheibenbelastungen in Abhängigkeit von der Temperatur bei NH ₄ -N-Ablaufkonzentrationen von 10 mg/l bei einem mittleren C:N-Verhältnis von 4,5:1.....	118
Abbildung 8.53: Vergleich der maximalen NH ₄ -N-Umsatzraten im Dauerstrombetrieb in Kaskade 2 und der Batch 2-Untersuchungen.....	118
Abbildung 8.54: Zu erwartende NH ₄ -N-Ablaufkonzentrationen in Abhängigkeit von der Abwassertemperatur und der NH ₄ -N-Scheibenbelastung (mittleres C:N – Verhältnis = 4,5:1)	120
Abbildung 8.55: Vergleich der Ergebnisse der Bestimmung der spezifischen Überschussschlammproduktion mit Literaturdaten	122
Abbildung 8.56: Abwassertemperaturverlauf während der Untersuchungen in Delhi, Indien (21.5.2007 – 10.12.2007)	125
Abbildung 8.57: BSB ₅ -Abbauraten bei unterschiedlichen Scheibenbelastungen; Demonstrationsanlage Delhi (weiß: mit Vorklärung, schwarz: ohne Vorklärung).....	126
Abbildung 8.58: Betriebsergebnisse der Demonstrationsanlage in Delhi (23.5.2007-11.12.2007), Parameter BSB ₅	127
Abbildung 8.59: BSB ₅ -Ablaufkonzentration in Abhängigkeit von der BSB ₅ -Scheibenbelastung bei unterschiedlichen Abwassertemperatur (Demonstrationsanlage).....	128
Abbildung 8.60: Korrelation zwischen AFS- und BSB ₅ -Konzentration in Kaskade 3 und im Ablauf der Nachklärung (Demonstrationsanlage).....	129
Abbildung 8.61: CSB _{filtriert} -Abbauraten bei unterschiedlichen Scheibenbelastungen; Demonstrationsanlage Delhi	130
Abbildung 8.62: Betriebsergebnisse der Demonstrationsanlage in Delhi (17.08.2007-11.12.2007), Parameter CSB _{filtriert}	131
Abbildung 8.63: NH ₄ -N-Reduktion bei unterschiedlichen Scheibenbelastungen der Demonstrationsanlage in Delhi, Ergebnisse nach Nachklärung (weiß: mit Vorklärung, schwarz: ohne Vorklärung).....	132
Abbildung 8.64: Betriebsergebnisse der Demonstrationsanlage in Delhi (21.5.2007-11.12.2007), Parameter NH ₄ -N	133
Abbildung 8.65: NH ₄ -N-Ablaufkonzentration nach der Nachklärung der Demonstrationsanlage, Delhi	134
Abbildung 8.66: TKN-Reinigungsleistung bei unterschiedlichen Abwassertemperaturen (Einzelergebnisse der Demonstrationsanlage, Delhi)	136

Abbildung 8.67: Prozentuale Fracht in den Kaskaden zur Zulauffracht der Anlage (ohne Berücksichtigung der NO ₂ -N-Bildung) Demonstrationsanlage Delhi	137
Abbildung 8.68: Stickstoffbilanz der Demonstrationsanlage Delhi, Indien	138
Abbildung 8.69: Mittlere Konzentration der abfiltrierbaren Stoffe in Abhängigkeit von der BSB ₅ -Scheibenbelastung der Demonstrationsanlage, Delhi.....	139
Abbildung 8.70: Überschussschlammproduktion in Abhängigkeit von der BSB ₅ -Scheibenbelastung der Demonstrationsanlage, Delhi.....	140
Abbildung 8.71: Biofilmdicke und Sauerstoffkonzentration in den Kaskaden der Demonstrationsanlage, Delhi	142
Abbildung 8.72: Vergleich der Ergebnisse der Konzentrationsbestimmung an abfiltrierbaren Stoffen im Ablauf der Demonstrationsanlage mit Daten von Cheung et al. (1980).....	143
Abbildung 8.73: BSB ₅ -Ablaufkonzentration in Abhängigkeit von der Scheibenbelastung und für verschiedene Abwassertemperaturen der Demonstrationsanlage in Delhi	144
Abbildung 8.74: TKN-Scheibenbelastung in Abhängigkeit von der Abwassertemperatur (Demonstrationsanlage).....	145
Abbildung 9.1: Vergleich der BSB ₅ -Umsatzraten in Abhängigkeit von der Temperatur (alle Untersuchungen).....	149
Abbildung 9.2: Vergleich der Nitrifikationsleistung in Abhängigkeit von der Temperatur (alle Untersuchungen).....	151
Abbildung 9.3: Überschussschlammproduktion	154
Abbildung 11.1: BSB ₅ -Ablaufkonzentration in Abhängigkeit von der Abwassertemperatur und der BSB ₅ -Scheibenbelastung (Reinigungsziel: BSB ₅ -Elimination).....	162
Abbildung 11.2: NH ₄ -N-Ablaufkonzentration in Abhängigkeit von der Abwassertemperatur und der TKN-Scheibenbelastung (BSB ₅ :TKN \cong 4:1).....	163

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Ausgewählte Kennzahlen zur Abwasserzusammensetzung in verschiedenen Ländern (nach BMBF, 2005)	3
Tabelle 2.2:	Grenzwerte für die Einleitung von gereinigtem Abwasser in Oberflächengewässer (ausgewählte Parameter)(BMBF, 2005)	4
Tabelle 2.3:	Grenzwerte für die Verwendung von gereinigtem Abwasser für Bewässerungszwecke (ausgewählte Parameter)(BMBF, 2005)	4
Tabelle 6.1:	Einteilung der Kaskaden (nach Henze et al.; 2002).....	14
Tabelle 6.2:	Überschussschlammproduktion in Abhängigkeit von der Scheibenbelastung (nach Ouyang, 1980).....	15
Tabelle 6.3:	Einteilung der Bakterien nach Temperaturbereichen.....	27
Tabelle 6.4:	Konstanten zur Berechnung der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Umsatzraten (nach Henze et al., 2002)	29
Tabelle 6.5:	Literaturzusammenstellung für θ -Werte für die Nitrifikation	30
Tabelle 6.6:	Literaturzusammenstellung der θ -Werte für die Denitrifikation	38
Tabelle 6.7:	Literaturzusammenstellung der θ -Werte für den Abbau organischer Inhaltsstoffe.....	38
Tabelle 6.8:	k_B -Werte und zul. B_A nach Wolf (1987).....	43
Tabelle 6.9:	v_N -Werte nach Wolf (1987) (bei Ablaufkonzentrationen unter 2 mg $\text{NH}_4\text{-N/l}$).....	43
Tabelle 7.1:	Versuchsbedingungen (\varnothing 25 cm und 50 cm).....	47
Tabelle 7.2:	Spezifikation der Versuchsanlage (\varnothing 25 cm).....	47
Tabelle 7.3:	Spezifikation der Versuchsanlage (\varnothing 50 cm).....	47
Tabelle 7.4:	Scheibendurchmesser 25 cm; Scheibenfläche 3,14 m ²	48
Tabelle 7.5:	Scheibendurchmesser 50 cm; Scheibenfläche 11,8 m ²	48
Tabelle 7.6:	Versuchsbedingungen der Batch 1-Versuche.....	49
Tabelle 7.7:	Hauptbestandteile von Melasse (Durchschnittswerte nach van der Poel et al., 2000)	51
Tabelle 7.8:	Analyse der Hauptkomponenten C, N und P der verwendeten Melasse ...	51
Tabelle 7.9:	Versuchsbedingungen Demonstrationsanlage (\varnothing 200 cm)	54
Tabelle 7.10:	Spezifikation der Demonstrationsanlage.....	54
Tabelle 7.11:	Untersuchungsphasen des Demonstrationsbetriebs	55
Tabelle 8.1:	Maximale BSB_5 -Umsatzleistung pro Tag in Kaskade 1	60
Tabelle 8.2:	Sauerstoffkonzentration zu Beginn und am Ende der Batch 1-Versuche (Versuchsdauer 1h); Kaskade 1.....	61

Tabelle 8.3:	Maximale $\text{NH}_4\text{-N}$ -Umsatzleistung in Kaskade 2 und 3	63
Tabelle 8.4:	Maximale Umsatzraten in Abhängigkeit von der Temperatur (Mittelwerte aus Einzelmessungen; $c_{\text{O}_2} > 4 \text{ mg/l}$)	70
Tabelle 8.5:	θ -Werte für unterschiedliche Temperaturbereiche (Batch 2)	76
Tabelle 8.6:	Untersuchungsbedingungen BSB_5 : Abwassertemperatur während der unterschiedlichen Versuchsphasen (K1-K11) in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (in Klammern die tatsächliche Scheibenbelastung) (\varnothing 25 cm)	78
Tabelle 8.7:	Ergebnisse der BSB_5 -Bestimmungen im Zulauf und Ablauf während der unterschiedlichen Szenarien (\varnothing 25 cm).....	79
Tabelle 8.8:	Untersuchungsbedingungen $\text{NH}_4\text{-N}$: Abwassertemperatur während der unterschiedlichen Versuchsphasen in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (in Klammern die tatsächlichen Scheibenbelastungen).....	82
Tabelle 8.9:	Ergebnisse der Bestimmung der Nitrifikationsleistung in Abhängigkeit von der Abwassertemperatur	82
Tabelle 8.10:	Untersuchungsbedingungen BSB_5 : Abwassertemperatur während der unterschiedlichen Versuchsphasen in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (in Klammern die tatsächliche Scheibenbelastung) (\varnothing 50 cm)	86
Tabelle 8.11:	Ergebnisse der BSB_5 -Bestimmung im Zulauf und Ablauf während der unterschiedlichen Phasen (\varnothing 50 cm).....	87
Tabelle 8.12:	Untersuchungsbedingungen $\text{NH}_4\text{-N}$: Abwassertemperatur während der unterschiedlichen Versuchsphasen in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (in Klammern die tatsächliche Scheibenbelastung) (\varnothing 50 cm)	89
Tabelle 8.13:	Ergebnisse der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Bestimmung im Zulauf und Ablauf während der unterschiedlichen Phasen (\varnothing 50 cm).....	90
Tabelle 8.14:	BSB_5 -Konzentrationen in den Kaskaden bei unterschiedlichen Abwassertemperaturen und BSB_5 -Scheibenbelastungen	94
Tabelle 8.15:	$r_{s,\text{max,C}}$ und $K_{m,C}$	96
Tabelle 8.16:	$\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen in den Kaskaden bei unterschiedlichen Abwassertemperaturen und $\text{NH}_4\text{-N}$ -Scheibenbelastungen	97
Tabelle 8.17:	$r_{s,\text{max,NH}_4\text{-N}}$ und $K_{m,\text{NH}_4\text{-N}}$	99
Tabelle 8.18:	Maximalen Umsatzraten und mittlere Scheibenbelastungen bei verschiedenen Abwassertemperaturen.....	101
Tabelle 8.19:	pH-Werte in den Kaskade ($\varnothing = 25 \text{ cm}$).....	101
Tabelle 8.20:	pH-Werte in den Kaskade ($\varnothing = 50 \text{ cm}$).....	101
Tabelle 8.21:	Sauerstoffkonzentrationen in den Kaskaden ($\varnothing = 25 \text{ cm}$)	102
Tabelle 8.22:	Sauerstoffkonzentrationen in den Kaskaden ($\varnothing = 50 \text{ cm}$)	102

Tabelle 8.23: Spezifische Überschussschlammproduktion der Versuchsanlagen (mittlere Abwassertemperatur 24 °C bzw. 34,1 °C; berechnet anhand Gleichung 8.2).....	104
Tabelle 8.24: Stickstoffbilanz Versuchsanlage Ø = 25 cm (Angaben in [g/d])	107
Tabelle 8.25: Stickstoffbilanz Versuchsanlage Ø = 50 cm (Angaben in [g/d])	109
Tabelle 8.26: Berechnete und gemessenen tägliche Verdunstungsmengen während der Untersuchungsphasen	111
Tabelle 8.27: Parameterspezifische Scheibenbelastungen während der unterschiedlichen Phasen der Untersuchungen (Demonstrationsanlage)	124
Tabelle 8.28: Ergebnisse der BSB ₅ -Bestimmung im Zulauf und Ablauf während der unterschiedlichen Szenarien (Demonstrationsanlage Delhi)	126
Tabelle 8.29: BSB ₅ -Scheibenbelastung [g/(m ² *d)] in Abhängigkeit vom Reinigungsziel und der Abwassertemperatur (Demonstrationsanlage) ...	128
Tabelle 8.30: Ergebnisse der CSB _{filtriert} -Bestimmung im Zulauf und Ablauf während der unterschiedlichen Phasen (Demonstrationsanlage Delhi)	130
Tabelle 8.31: Ergebnisse der CSB _{hom} -Bestimmung der Demonstrationsanlage.....	131
Tabelle 8.32: Ergebnisse der NH ₄ -N-Bestimmung im Zulauf und Ablauf während der unterschiedlichen Phasen (Demonstrationsanlage Delhi)	133
Tabelle 8.33: NH ₄ -N-Reduktion für unterschiedliche Temperaturen und Scheibenbelastungen in Abhängigkeit vom verwendeten Abwasser (Demonstrationsanlage).....	134
Tabelle 8.34: Ergebnisse der N _{ges} und NH ₄ -N-Bestimmung (Phase 4: Werte in Klammern ohne Messwerte vom 12.10.07; Demonstrationsanlage)	135
Tabelle 8.35: Berechnung der N-Inkorporation in die Biomasse (Demonstrationsanlage)	137
Tabelle 8.36: Sauerstoffkonzentration und pH-Wert in den Kaskaden der Demonstrationsanlage in Delhi.....	138
Tabelle 8.37: Spezifische Überschussschlammproduktion der Demonstrationsanlage (Abwassertemperaturbereich 19,4 °C – 30 °C).....	140
Tabelle 8.38: Indische Standards zur Einleitung in Oberflächengewässer bzw. zur Nutzung als Bewässerungswasser (Auszug) (CPCB, 2008)	144
Tabelle 9.1: Zusammenstellung der $\theta_{20,C}$ -Koeffizienten.....	148
Tabelle 9.2: Zusammenstellung der $\theta_{20,N}$ -Koeffizienten.....	151