

Energieeinsparung durch moderne Regelsysteme (Fuzzy-Logik) Demonstrationsprojekt ARA Emsdetten-Austum

Gefördert durch das Landesumweltamt NRW

- Nr. VW/3433/1298/A1289-

Projektträger:

Stadt Emsdetten - Abwasserwerk
Der Bürgermeister
Begleitet durch:
Dipl.-Ing. R. Scholtes

Wissenschaftliche Bearbeitung:

Institut für Abfall- und
Abwasserwirtschaft e. V.
an der Fachhochschule Münster
Prof. Dr.-Ing. M. Lohse
Dipl.-Ing. G. Hegemann
Dipl.-Ing. T. Böning

EUREGIO Computational-Intelligence-Center

Prof. Ing. E. Weiner
Dipl.-Ing. L. Wessendorf
Dipl.-Ing. K. Katerkamp

Mai 2000

Inhaltsverzeichnis

Seite

1	Veranlassung und Ziele	1
2	Aufbau und Kenndaten der ARA Emsdetten-Austum (konventioneller Betrieb: Juni 1998 bis Juli 1999)	2
2.1	Reinigungsprinzip der ARA	2
2.2	Einzugsgebiet und Abwasserherkunft	4
2.3	Abwasserzu- und Ablaufwerte	4
2.4	Energieverbrauch	6
3	Fuzzy-Logik Regelung für den Sauerstoffeintrag in die Belüftungsstufe mit vorgeschalteter Denitrifikation	8
3.1	Ziele und Vorgehensweise	8
3.2	Eingesetzte Sensorik und Eigenschaften der Aktorik	10
3.2.1	Eingesetzte Hard-/Software zur Datenübermittlung und - verarbeitung	10
3.2.2	Eingesetzte Messgerätetechnik	12
3.2.3	Vorhandene Aktorik	13
3.3	Funktionsweise und Aufbau der entwickelten Fuzzy-Logik Regelung	14
3.3.1	Stickstoff-Regelblock	15
3.3.2	Belüftungs-Regelblock	18
3.4	Versuchsergebnisse	20
3.4.1	Reinigungsleistung	20
3.4.2	Energieverbrauch	31
4	Optimierungen in der Schlammlinie	32
4.1	Klärschlammwässerung	32
4.2	Schlammwasserrückführung	34
4.3	Schlammalter	35
5	Nutzung freier Beckenvolumina	37
6	Zusammenfassung	39
7	Literaturverzeichnis	41
8	Anhang	41

Tabellenverzeichnis

	<u>Seite</u>
Tab. 2.1: Abwasserzulauf (Juni 1998 – Juli 1999)	4
Tab. 2.2: Zulaufwerte (Juni 1998 – Juli 1999)	5
Tab. 2.3: Zulauffrachten (Juni 1998 – Juli 1999).....	5
Tab. 2.4: Ablaufwerte Nachklärbecken (Juni 1998 – Juli 1999)	5
Tab. 2.5: Ablauf- und Überwachungswerte (Juni 1998 – Juli 1999)	6
Tab. 2.6: Strommessstellen auf der ARA.....	6
Tab. 2.7: Energieverbrauch (Juni 1998 bis Juli 1999).....	7
Tab. 3.1: Kenndaten der Belebungsstufe(Fuzzy-Logik Betrieb).....	9
Tab. 3.2: Eingesetzte Messgerätetechnik im Belebungsbeckenbereich (Fuzzy-Logik Betrieb)	13
Tab. 3.3: Vorhandene Belüftungsaggregate für den Sauerstoffeintrag in der Belebungsstufe	14
Tab. 3.4: Regelbasis des Stickstoff-Regelblocks.....	16
Tab. 3.5: Ein- und Ausschaltbedingungen der Drehkolbengebläse Nr. 1, 3 und 4 (Fuzzy-Logik Betrieb)	20
Tab. 3.6: Rahmenbedingungen bei der Datenaufzeichnung: Fuzzy- Logik Betrieb.....	21
Tab. 3.7: Abwassermengen (Fuzzy-Logik Betrieb)	21
Tab. 3.8: Zulaufwerte (Fuzzy-Logik Betrieb).....	21
Tab. 3.9: Zulauffrachten (Fuzzy-Logik Betrieb)	22
Tab. 3.10: Vergleich der mittleren Zulauffrachten des konventionellen und des Fuzzy-Logik Betriebes.....	22

Tab. 3.11: Stickstoffkonzentrationen im Belebungsbeckenablauf (Fuzzy-Logik Betrieb: 02.03. bis 16.04.2000).....	27
Tab. 3.12: Werte im Nachklärungsablauf (Fuzzy-Logik Betrieb)	28
Tab. 3.13: Werte im Anlagenablauf (Fuzzy-Logik Betrieb)	29
Tab. 3.14: Vergleich der Ablaufwerte der konventionellen Regelung mit den Werten der Fuzzy-Logik Regelung	29
Tab. 3.15: Maßnahmen zur Erhöhung der Prozessstabilität	30
Tab. 3.16: Energieverbrauch und –einsparung der Fuzzy-Logik Sauerstoffregelung in der Belebungsstufe	31
Tab. 3.17: Energetische Kennwerte im Vergleich mit den Vorgaben des MURL	32
Tab. 4.1: Daten der Versuchsreihen mit organischen Konditionierungsmitteln	32
Tab. 4.2: Jährliche Klärschlamm Entsorgungskosten in Abhängigkeit vom Konditionierungsmittel	33
Tab. 4.3: Belastungen des Schlammwassers.....	34
Tab. 4.4: Resultierende Frachten aus der Schlammwasserrückführung	34

Abbildungsverzeichnis

	<u>Seite</u>
Abb. 2.1: Fließschema der ARA Emsdetten-Austum (konventionelle Regelung).....	2
Abb. 3.1: Versuchsaufbau – Fließbild mit installierten On-/in-line-Messstellen	9
Abb. 3.2: Schematik der Datenübermittlung und -verarbeitung am Fuzzy-Versuchs-PC (Fuzzy-Logik Betrieb)	11
Abb. 3.3: Messgeräteanordnung (Fuzzy-Logik Betrieb)	12
Abb. 3.4: Struktur der entwickelten Fuzzy-Logik Regelung	14
Abb. 3.5: Zugehörigkeitsfunktionen im Stickstoff-Regelblock	16
Abb. 3.6: 3D-Kennfeld: Sauerstoff-Sollwert	17
Abb. 3.7: 3D-Kennfeld: Stellung der Rezirkulationsklappe	17
Abb. 3.8: Erhöhter Sauerstoffeintrag des TVD während belastungsschwacher Phasen	18
Abb. 3.9: Regelung des Sauerstoffgehaltes mit den TVD.....	19
Abb. 3.10: Stickstoffkonzentrationen im Belebungsbeckenablauf und Verhalten der Gebläse (Fuzzy-Logik Betrieb: 08.04. – 10.04.2000)	23
Abb. 3.11: Stickstoffkonzentrationen im Belebungsbeckenablauf und Verhalten der Gebläse (Fuzzy-Logik Betrieb: 10.04. – 12.04.2000)	24
Abb. 3.12: Stickstoffkonzentrationen im Belebungsbeckenablauf und Verhalten der Gebläse (Fuzzy-Logik Betrieb: 12.04. – 14.04.2000)	25

Abb. 3.13: Stickstoffkonzentrationen im Belebungsbeckenablauf und Verhalten der Gebläse (Fuzzy-Logik Betrieb: 14.04. – 16.04.2000)	26
Abb. 3.14: Häufigkeitsverteilung der Stickstoffkonzentrationen im Belebungsbeckenablauf (Fuzzy-Logik Betrieb: 02.03. – 16.04.2000)	27
Abb. 4.1: Abwassertemperaturen im Anlagenzulauf (01.05.1997 – 01.04.2000)	35
Abb. 4.2: Abhängigkeit des erforderlichen TS-Gehaltes_{BB} von der Abwassertemperatur.....	36

1 Veranlassung und Ziele

Nach dem Bau der ARA Emsdetten-Austum (1979) wurde die Anlage in den Jahren 1992 und 1993 auf der Basis von Prognosen für 150.000 Einwohnerwerte ausgelegt. Derzeit reinigt die ARA das Abwasser von 34.600 Einwohnern. Zusammen mit den Industrie- und Gewerbebetrieben ergibt sich eine aktuelle Belastung der ARA von ca. 52.500 E (E_{B60} -Mittelwert im Zulauf) bzw. ca. 62.250 E ($E_{B60-85\%}$ -Wert im Zulauf). Die Anlage ist somit im Vergleich zur effektiven Belastung relativ gering ausgelastet. In Kombination mit dem vorliegenden Verfahrensprinzip und der Anlagensteuerung bzw. -regelung führt dieses u. a. zu überhöhten Energieverbräuchen.

Im Rahmen eines vom Landesumweltamt NRW geförderten Forschungsprojektes der „Initiative ökologische und nachhaltige Wasserwirtschaft NRW“ wurden Maßnahmen zur Energieeinsparung auf der ARA Emsdetten-Austum betrachtet und durchgeführt. Dazu wurde während der Untersuchung auf die folgenden Punkte eingegangen:

- Einsatz der Fuzzy-Logik für eine bedarfsorientierte Sauerstoffregelung und angepasste Nitratrückführung im Bereich der Belebungsstufe mit einhergehender Verringerung des Belebungsvolumens
- Optimierungen in der Schlammlinie (organische Konditionierungsmittel, Schlammwasser und -alter)
- Nutzung freier Beckenvolumina (z. B. als Zulaufzwischenpeicher)

Im Folgenden werden zunächst der Aufbau und die wesentlichen Daten des bisherigen Betriebs der ARA Emsdetten-Austum dargestellt, um eine Vergleichsgrundlage für die Auswirkungen der durchgeführten Maßnahmen zu schaffen. Im Anschluss daran erfolgt eine Betrachtung der o. g. Maßnahmen.

2 Aufbau und Kenndaten der ARA Emsdetten-Austum (konventioneller Betrieb: Juni 1998 bis Juli 1999)

2.1 Reinigungsprinzip der ARA

Die ARA Emsdetten-Austum arbeitet nach dem Belebungsverfahren mit vorgeschalteter Denitrifikation und mit anaerober mesophiler Schlammstabilisierung. Der Aufbau der ARA ist in der folgenden Abbildung 2.1 vereinfacht dargestellt.

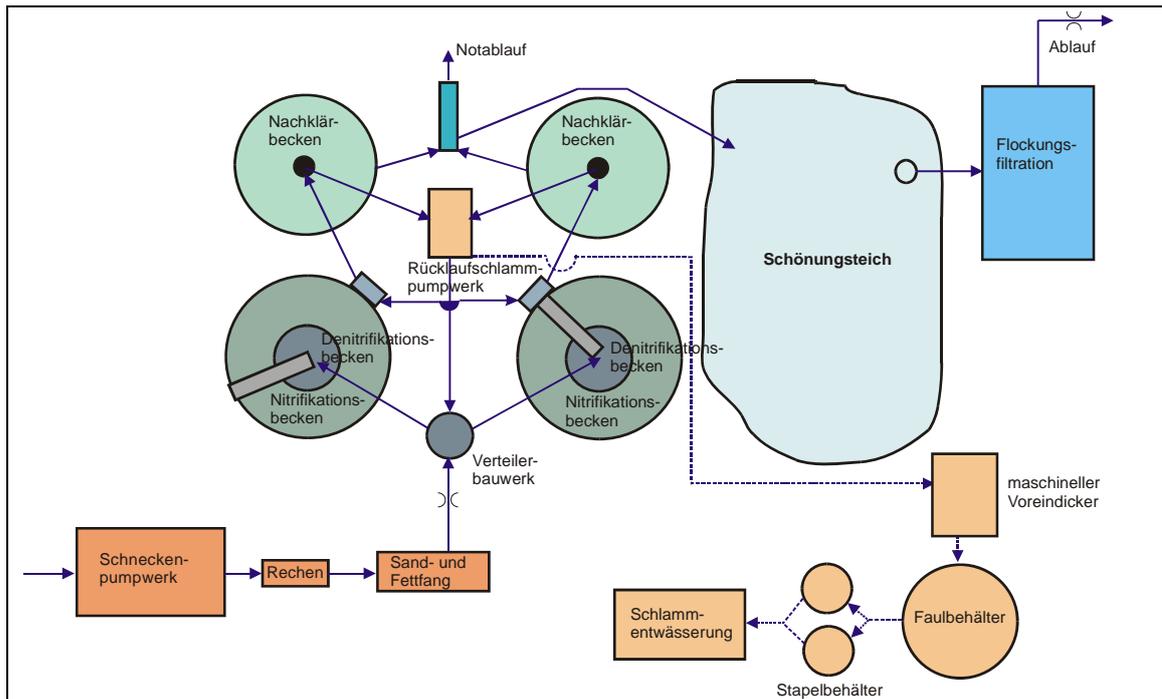


Abb. 2.1: Fließschema der ARA Emsdetten-Austum (konventionelle Regelung)

Im Zulaufbereich der ARA befindet sich ein Schneckenpumpwerk, durch welches das zufließende Abwasser um ca. 9 m gehoben wird. Dem Schneckenpumpwerk sind ein Gegenstromrechen und ein belüfteter Sand-/Fettfang nachgeschaltet. In der anschließenden Venturierinne erfolgt die Durchflussmessung. Im Auslaufbereich der Venturierinne können Fällungsmittel zur chemischen P-Elimination zugegeben werden (Simultanfällung); zweiwertige Eisensalze (Lager- und Löseeinheit) und dreiwertiges Eisenchloridsulfat (Lagerbehälter) sind einsetzbar.

Die biologische Stufe der ARA ist zweistraßig mit einem Belebungs- und Nachklärbecken je Straße ausgeführt. Die Belebungsbecken sind Rundbecken mit innenliegender, vorgeschalteter Denitrifikation. Die Becken werden über eine feinblasige Druckbelüftung mit Sauerstoff versorgt; die Druckluftversorgung erfolgt über Turboverdichter. Für den Notbetrieb werden sechs Drehkolbengebläse vorgehalten. Sowohl die Nitrifika-

ons- als auch die Denitrifikationszone sind mit Gummimembranbelüftern ausgerüstet, wobei einzelne Bereiche manuell abgeschaltet werden können.

Die Nachklärbecken sind als vorwiegend horizontal durchflossene Rundbecken mit Schildräumen ausgeführt. Die Rücklaufschlammförderung erfolgt über ein Schneckenpumpwerk.

Der Ablauf der Nachklärbecken läuft über einen Sammelschacht im freien Gefälle einem Schönungsteich zu. Diesem ist eine Flockungsfiltration zur weitergehenden P-Elimination nachgeschaltet. Das gereinigte Wasser fließt über einen Ablaufschacht im freien Gefälle zum Vorfluter (Ems).

Der Überschussschlamm wird mittels einer Pumpe zur maschinellen Schlammeindickung gefördert. Die Eindickung erfolgt in Siebtrommeln. In einem Faulbehälter wird der eingedickte Überschussschlamm anaerob stabilisiert. Die Klärschlamm entwässerung erfolgt in zwei Kammerfilterpressen; es werden anorganische Konditionierungsmittel (Kalk) sowie Eisen-(II)-Chlorid (alternativ Eisen-(III)-Chloridsulfat) eingesetzt. Der entwässerte Schlamm wird über einen Trogkettenförderer in Mulden gegeben.

Die wichtigsten Regelkreise sind in der nachstehenden Auflistung aufgeführt:

- Zulaufschneckenpumpwerk

Die Zulaufschnecken werden über eine Füllstandsmessung (Druckmessdosen) gesteuert. In Abhängigkeit des Füllstands werden die Schnecken zu- bzw. abgeschaltet.

- Belebungsstufe

Im Bereich der Belebungsbecken ($TS_{BB} = 4,5 \text{ g/l}$) wird die Sauerstoffkonzentration in der aeroben Zone geregelt (je Becken eine O_2 -Messung, $O_{2 \text{ Soll}}$ -Wert = 2 mg/l).

Die Rückführrate für die Denitrifikation wird über verstellbare Eintrittsöffnungen im Bereich der kreisförmigen Abtrennung von Denitrifikations- und Nitrifikationszone eingestellt. Eine Regelung der Rückführrate wird nicht durchgeführt.

- Rücklaufschlammumpwerk

Das Rücklaufverhältnis wird über frequenzgeregelter Rücklaufschlammumpfen in Abhängigkeit vom in-line-gemessenen TS-Gehalt im Rücklaufschlamm eingestellt.

- Fällmitteldosierung

Die Dosierung der Fällmittel zur P-Elimination erfolgt auf Basis von Tagesganglinien. Eine P-on-line-Messung ist derzeit nicht vorhanden.

Eine Auflistung der Kenndaten der wesentlichen Bauwerke und Aggregate der ARA Emsdetten-Austum ist dem Anhang beigefügt.

2.2 Einzugsgebiet und Abwasserherkunft

Das Einzugsgebiet der ARA Emsdetten-Austum erstreckt sich über eine befestigte Fläche von 5,5 km². Das Kanalsystem der Stadt Emsdetten besteht aus insgesamt 260 km Kanalleitungen (inkl. Stauraumkanälen). Davon sind:

- Mischwasserkanal: 10 km
- Schmutzwasserkanal: 125 km
- Regenwasserkanal: 125 km

Ca. 1/3 des anfallenden Abwassers stammt aus gewerblichen- und industriellen Bereichen.

2.3 Abwasserzu- und Ablaufwerte

Die im folgenden tabellarisch dargestellten Zu- und Ablaufwerte beziehen sich auf die Angaben des Betriebstagebuchs aus dem Zeitraum Juni 1998 bis Juli 1999. Von August bis Oktober 1999 war i. d. R. nur ein Belebungsbecken in Betrieb, da die Belüftungsvorrichtungen gewartet wurden. Ab November 1999 erfolgte in Absprache mit den zuständigen Behörden die offizielle Umstellung auf den Versuchsbetrieb mit Einstrahigkeit.

Die Probenahmen erfolgen auf der ARA Emsdetten-Austum in Form von 24-h-Mischproben.

Tab. 2.1: Abwasserzulauf (Juni 1998 – Juli 1999)

Datenbasis = Tageswerte	Gesamt	Trockenwetter	Regenwetter (>1mm /d)
	m ³ /d	m ³ /d	m ³ /d
Mittelwert	9.653	8.557	11.351
Medianwert	8.958	8.287	10.500
Min.-Wert	5.113	5.113	5.219
Max.-Wert	28.185	19.890	28.185
85 %-Wert	12.588	10.256	15.063
99 %-Wert	20.319	14.287	22.919

Tab. 2.2: Zulaufwerte (Juni 1998 – Juli 1999)

24-h-Mischproben inkl. Rückbelastung aus der Schlammlinie	BSB₅	CSB	N_{ges}	NH₄-N	P_{ges}
Datenbasis = 06.98 - 07.99	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Mittelwert	321	627	57	39	8,7
Medianwert	320	627	58	38	8,7
Min.-Wert	50	238	24	16	4,4
Max.-Wert	610	976	86	70	12
85 %-Wert	408	736	71	48	10
99 %-Wert	532	955	84	63	12
Datenanzahl	69	66	56	63	65

Tab. 2.3: Zulauffrachten (Juni 1998 – Juli 1999)

Datenbasis = 06.98 - 07.99	BSB₅	CSB	N_{ges}	NH₄-N	P_{ges}	E_{B60}
inkl. Rückbelastung aus der Schlammlinie	kg/d	kg/d	kg/d	kg/d	kg/d	E
Mittelwert	3.147	6.126	554	375	84	52.449
Medianwert	3.026	5.949	530	357	80	50.440
Min.-Wert	792	2.885	308	183	47	---
Max.-Wert	8.266	15.318	1.131	1.001	178	---
85 %-Wert	3.733	7.416	655	440	103	62.215
99 %-Wert	7.853	11.604	1.048	844	144	130.889
Datenanzahl	69	66	56	63	65	69

Tab. 2.4: Ablaufwerte Nachklärbecken (Juni 1998 – Juli 1999)

Datenbasis = 06.98 - 07.99	BSB₅	CSB	N_{ges}	NH₄-N	NO₃-N	NO₂-N	PO₄-P
(24-h-Mischproben)	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Mittelwert	4,6	42	8,1	0,43	4,4	0,04	1,0
Medianwert	4,3	43	7,8	0,15	3,9	0,03	1,0
Min.-Wert	2,0	20	4,1	0,01	0,43	0,01	0,40
Max.-Wert	9,0	57	13	4,5	9,7	0,13	2,7
85 %-Wert	6,0	51	11	0,83	6,4	0,06	1,3
95 %-Wert	7,0	53	12	1,7	8,0	0,09	1,5
Datenanzahl	48	67	50	75	70	45	216

Tab. 2.5: Ablauf- und Überwachungswerte (Juni 1998 – Juli 1999)

Datenbasis = 06.98 - 07.99 (24-h-Mischproben)	BSB ₅	CSB	N _{ges}	N _{anorg}	NH ₄ -N	NO ₃ -N	NO ₂ -N	P _{ges}
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Mittelwert	2,3	32	7,5	4,2	0,20	3,9	0,01	0,31
Medianwert	2,0	32	6,4	3,5	0,06	3,4	0,01	0,29
Min.-Wert	1,0	15	3,1	2,2	0,01	0,04	0,01	0,01
Max.-Wert	5,5	55	15	10	4,4	10	0,06	0,90
85 %-Wert	3,0	40	10	6,1	0,19	5,6	0,02	0,50
95 %-Wert	4,0	44	13	7,7	0,5	7,3	0,03	0,60
Datenanzahl	61	291	64	73	83	76	61	266
Überwachungswert ¹⁾	12	75	---	18	5	---	---	1

1) als qualifizierte Stichprobe oder 2-h Mischprobe

2.4 Energieverbrauch

In der folgenden Tabelle sind die auf der ARA Emsdetten-Austum vorhandenen Strommessstellen mit den daran angeschlossenen Verbrauchern dargestellt.

Tab. 2.6: Strommessstellen auf der ARA

Strommessstelle	Wesentliche Verbraucher
Netzeinspeisung ¹⁾	Erfassung aller Verbraucher auf der ARA Emsdetten-Austum
→ Gebläsestation ¹⁾	Belebungsbecken mit: HV-Turbogebläsen, Raumluftgebläsen, etc.
→ Flockungsfiltration ²⁾	Flockungsfiltration mit: Gebläsen, Intensivmischer, Rückspül- und Schlammumpfen, etc.
→ Schlammbehandlung ¹⁾	Überschussschlammumpfen Schlammeindickung mit: Trommelantrieben, Dickschlammumpfen, Rührwerken, etc. Heizungsanlage und Lager Faulbehälter Gasspeicher
→ Betriebsgebäude ¹⁾	Zulaufschneckenpumpwerk Grobrechen Sandfang mit: Gebläsen, Pumpen, etc. Fäkalschlammannahme Simultanfällung Nachklärbecken mit: Räumern, Pumpen, etc. Rücklaufschlammumpfenwerk einschließlich Drehkolbengebläse für die Belebungsbecken
→ Schlammwässerung ¹⁾	Kammerfilterpresse mit: Schlamm- und Kalkmilchumpfen, Hoch- und Niederdruckumpfen, etc.
→ Rührwerke ²⁾	Rührwerke in den Belebungsbecken

1) Daten werden mit der EDV und mechanischem Stromzähler erfasst und per EDV aufgezeichnet

2) Daten werden mit mechanischem Stromzähler erfasst; es erfolgt i.d.R. keine Aufzeichnung

Die Daten der in der nachstehenden Tabelle aufgeführten Energieverbräuche beziehen sich ebenfalls auf den Zeitraum Juni 1998 bis Juli 1999.

Tab. 2.7: Energieverbrauch (Juni 1998 bis Juli 1999)

Strommessstelle	Energieverbrauch ³⁾	
	kWh/d	kWh/a
Netzeinspeisung ^{1) 5)}	5.970	2.179.050
→ Gebläsestation ¹⁾	3.110	1.135.150
→ Flockungsfiltration ^{2) 4)}	295	107.652
→ Schlammbehandlung ¹⁾	560	204.342
→ Betriebsgebäude ¹⁾	2.190	799.350
→ Schlammwässerung ¹⁾	175	63.792
→ Rührwerke in der Belebung ^{2) 4)}	1.030	375.950

1) Daten werden mit der EDV und mechanischem Stromzähler erfasst und per EDV aufgezeichnet

2) Daten werden mit mechanischem Stromzähler erfasst; es erfolgt i.d.R. keine Aufzeichnung

3) Daten der EDV-Aufzeichnungen

4) Tägliche Aufzeichnung per Hand über einen Zeitraum von 2 Monaten

5) Summenabweichungen zu den Einzelmessstellen durch Rundungsfehler und Messungenauigkeiten

Somit ergibt sich für die Belebungsbecken ein Energieverbrauch von insgesamt 4.140 kWh/d (Gebläsestation und Rührwerke).

3 Fuzzy-Logik Regelung für den Sauerstoffeintrag in die Belebungsstufe mit vorgeschalteter Denitrifikation

3.1 Ziele und Vorgehensweise

Ziel der großtechnischen Versuchsreihe war die Entwicklung einer Fuzzy-Logik Regelung für

- eine bedarfsorientierte Sauerstoffzufuhr in der Nitrifikationszone und
- angepasste Nitratrückführung in die Denitrifikationszone

in der Belebungsstufe zur Reduzierung des Energiebedarfs bei gleichzeitigen Einhaltung der Überwachungswerte. Die erarbeitete Regelungsstrategie soll nach Abschluss der Untersuchungen auf der ARA Emsdetten-Austum für den alltäglichen Betrieb eingesetzt werden.

Die Auswertung der Anlagenkenndaten im Vorfeld der großtechnischen Versuchsreihen eröffnete die Möglichkeit, durch die Stilllegung eines Belebungsbeckens das gesetzte Ziel der Energieeinsparung bei gleichbleibender Reinigungsleistung erreichen zu können. Weiterhin wurde deutlich, dass im Falle einer Umstellung auf Einstraßigkeit aufgrund der somit erhöhten Belastung der Belebungsstufe die konventionelle Regelungsstruktur (fixer Sauerstoffwert und fixe Nitratrückführungsrate) ersetzt werden musste; eine erhöhte Prozesstransparenz (permanente Erfassung der Zustände im Belebungsbecken) und eine damit mögliche Verbesserung der Prozessstabilität war erforderlich, um die geltenden Überwachungswerte auch bei einer Umstellung auf Einstraßigkeit weiterhin garantieren zu können. Die Umsetzung sollte auf Basis der Fuzzy-Logik erfolgen.

Im November 1999 erfolgte nach Absprache mit den zuständigen Behörden die Umstellung auf Einstraßigkeit durch die Außerbetriebnahme eines Belebungsbeckens. Der Reinigungsbetrieb wurde mit einem Belebungsbecken (innenliegende Denitrifikationszone) und zwei Nachklärbecken aufrechterhalten (s. Abbildung 3.1). Die Sauerstoffzufuhr erfolgte bei Versuchsbeginn weiterhin über die Turboverdichter (TVD). Die vorhandenen Kolbengebläse übernahmen zu Beginn der Versuche wiederum die Notbelüftung im Falle eines Stromausfalles oder Defektes an den TVD. Parallel zur Umstellung auf Einstraßigkeit wurden eine Reihe von Umbauarbeiten (z. B. Aufstellung neuer Messgeräte, Verlegen von Datenwegen, etc.) durchgeführt, so dass im Januar 2000 die erste Fuzzy-Logik Regelung in Betrieb genommen werden konnte.

Die Versuchsreihen wurden nach einer Reihe von Optimierungen gegen Mitte April 2000 mit einer intensiven Datenaufzeichnung beendet.

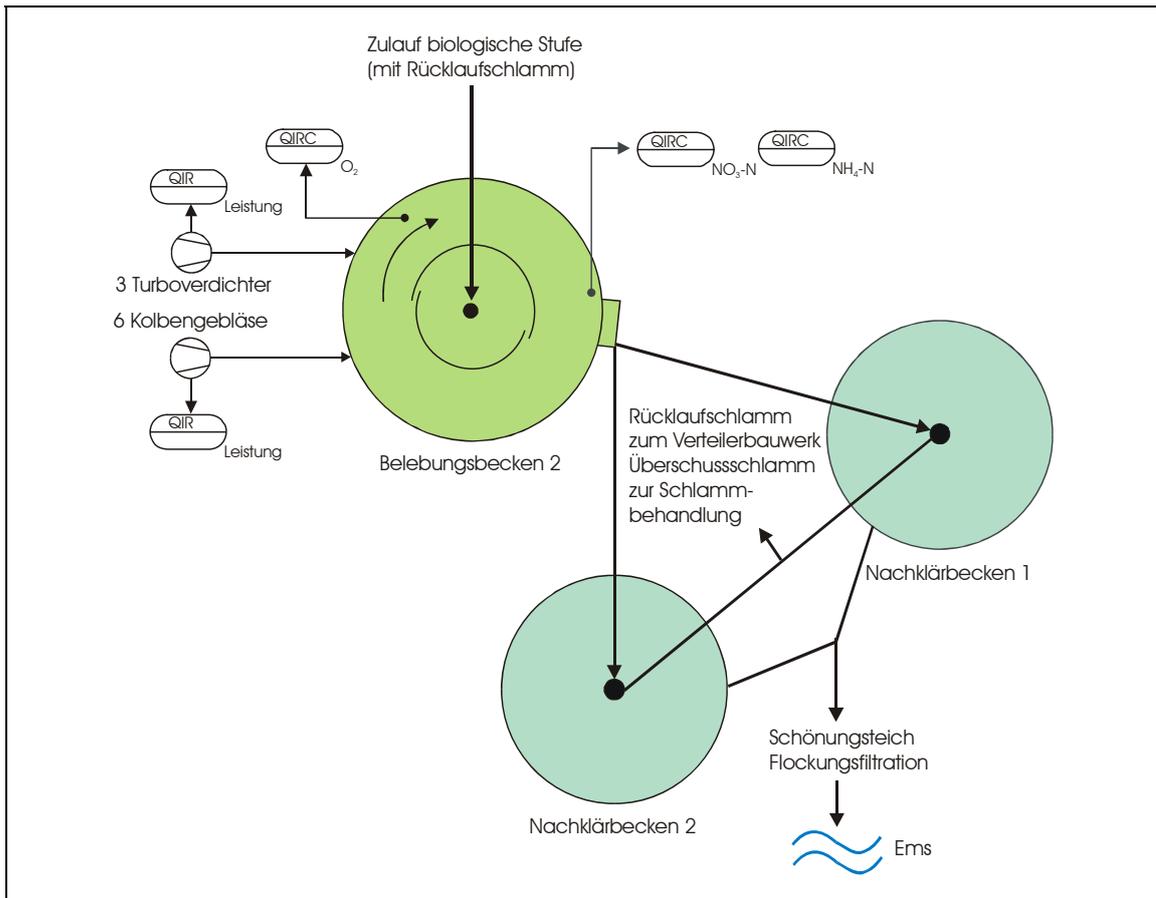


Abb. 3.1: Versuchsaufbau – Fließbild mit installierten On-/in-line-Messstellen

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Kenndaten der Belebungsstufe nach der Umstellung auf Einstraßigkeit zusammengefasst.

Tab. 3.1: Kenndaten der Belebungsstufe (Fuzzy-Logik Betrieb)

Belebungsbecken	
Verfahrensart	Vorgeschaltete Denitrifikation (innenliegend)
Charakteristische Parameter (Januar – April 2000)	<ul style="list-style-type: none"> • TS-Gehalt_{BB}¹⁾: 7,7 kg/m³ • Schlammindex: 68 ml/g • Schlammalter¹⁾: 18 d • Schlammbelastung: 0,058 kg BSB₅/(kg TS · d) • Raumbelastung: 0,45 kg BSB₅/(m³ · d)
Beckenart und -volumen	9.000 m ³ als Rundbecken, davon ↳ 3.100 m ³ Denitrifikationsvolumen 5.900 m ³ als Nitrifikationsvolumen Beckentiefe = 5,45 m Abwassertiefe = 5,00 m
Belüftungsart	Feinblasige Druckbelüftung

Fortsetzung der Tabelle 3.1

Belüftungsaggregate	<ul style="list-style-type: none"> • 3 Turboverdichter • 6 Kolbengebläse (technische Angaben sind dem Kapitel 3.2.3 zu entnehmen) 	⇒ bisher: alleinige Abdeckung der erforderlichen Luftmengen ⇒ bisher: Funktion als Notbelüftungsaggregate
Belüftungsvorrichtung	<ul style="list-style-type: none"> • Typ: • Anzahl: • Hersteller: 	Belüfterkerzen 1.575 Stück Koopmeiers GmbH
Rührwerke	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl: • Typ/Hersteller: • Technische Daten je Rührwerk: 	8 Stück, davon ↳ 2 in Denitrifikationszone 6 in Nitrifikationszone Banana ITT Flygt GmbH $p_{\text{mot}} = 3,1 \text{ kW}$ 24-h-Betrieb
Nachklärbecken		
Verfahrensart	horizontaldurchflossen	
Beckenart	2 Rundbecken mit Schildräumen, jeweils mit: Volumen = 2.782 m ³ Oberfläche = 962 m ² Tiefe (2/3) = 2,92 m	

1) Der durch die Umstellung auf Einstraßigkeit erhöhte TS-Gehalt_{BB} konnte aus technischen Gründen bis Versuchsende nicht auf den betriebsüblichen Wert von 4 – 5 kg/m³ verringert werden.

In den folgenden Kapiteln wird/werden:

- die eingesetzte Sensorik und die Eigenschaften der Aktorik,
 - die Funktionsweise und der Aufbau der entwickelten Fuzzy-Logik Regelung und
 - die Versuchsergebnisse
- des Projektes detailliert dargestellt.

3.2 Eingesetzte Sensorik und Eigenschaften der Aktorik

3.2.1 Eingesetzte Hard-/Software zur Datenübermittlung und -verarbeitung

Die nachstehende Abbildung 3.2 zeigt die eingesetzten Hardwarekomponenten der Versuchsphase mit ihren Kommunikationswegen, die erforderlich waren, um die Daten der On-/In-line-Messungen sowie der Belüftungsaggregate während des Versuchbetriebes zu erfassen und um die entsprechenden Ansteuerungen vornehmen zu können. Zudem wurde auf dem Fuzzy-Versuchs-PC direkt die Regelung der Belebungsstufe vorgenommen.

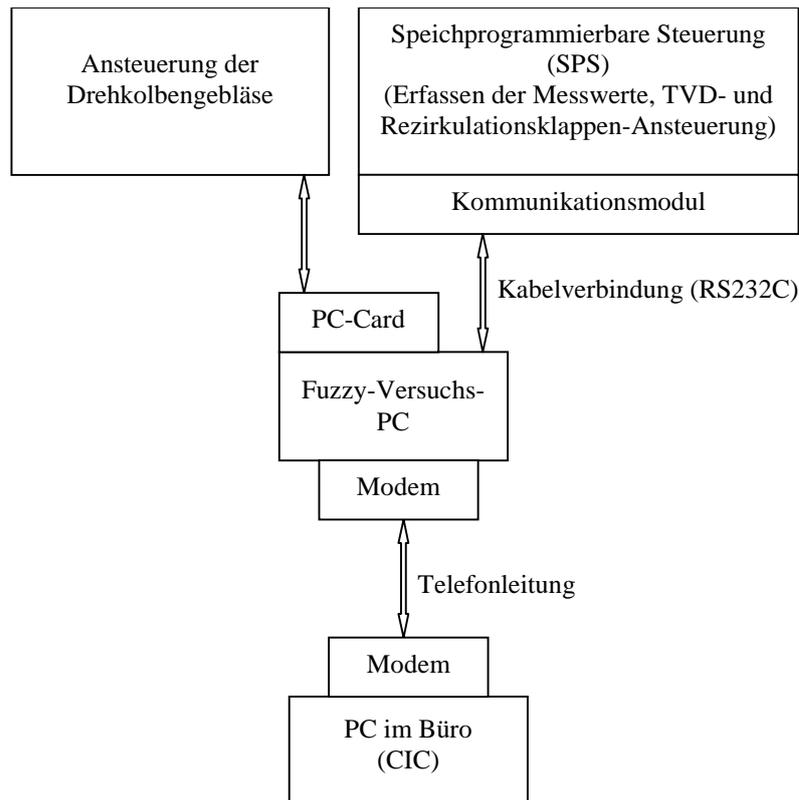


Abb. 3.2: Schematik der Datenübermittlung und -verarbeitung am Fuzzy-Versuchs-PC (Fuzzy-Logik Betrieb)

Für den Datenaustausch zwischen der SPS und dem Fuzzy-Versuchs-PC wurde die vorhandene SPS in der Gebläsestation um einen Kommunikationsprozessor (CP544 der Fa. Siemens) erweitert. Mit diesem Prozessor wurde eine Punkt-zu-Punkt-Kopplung über eine RS232C-Verbindung mit dem Fuzzy-Versuchs-PC hergestellt. Durch diese Verbindung erfolgte während der Versuchsphase der Datenaustausch zur Sammlung sämtlicher Messwerte und zur Ansteuerung der TVD. Die Drehkolbengebläse konnten nicht direkt über die SPS angesteuert werden. Aufgrund dessen wurde der Fuzzy-Versuchs-PC um eine PC-Card, in diesem Falle einer Relaiskarte, erweitert. Mit dieser Relaiskarte war dann ein direktes Ein- bzw. Ausschalten der Drehkolbengebläse mittels Fuzzy-Versuchs-PC möglich.

Zur Regelung der Vorgänge in der biologischen Stufe mittels des Fuzzy-Versuchs-PCs wurde das Softwaretool WinFACT98 aus dem Ingenieurbüro Dr. Kahlert eingesetzt. Das Softwaretool enthält Werkzeuge zur Analyse, Synthese und Simulation von konventionellen Regelungssystemen sowie Komponenten zur Behandlung von Fuzzy-Systemen. Die Programmierung dieses Softwaretools erfolgte in sogenannten Blöcken, die eine schnelle und komfortable Möglichkeit für Änderungen der Regelung ermöglichen. Des Weiteren können mit diesem Softwaretool die Zeitdiagramme aller benötigten Parameter direkt angezeigt werden.

Zur Fernverwaltung des Fuzzy-Versuchs-PCs wurde das Software-Produkt pcANYW-HERE32 von der Fa. SYMANTEC eingesetzt. Dadurch war es jederzeit möglich, den Fuzzy-Versuchs-PC über die Telefonleitung zu kontrollieren und ggf. Parameter zu ändern.

3.2.2 Eingesetzte Messgerätechnik

Aufgrund der ausgewerteten Anlagenbasisdaten, des vorliegenden Verfahrensprinzips und der Reinigungsziele war für die Umsetzung der Fuzzy-Logik Regelung die Installation von zwei neuen Messparametern inkl. Probenaufbereitung und Messcontainer notwendig, um die o. g. Ziele erreichen zu können:

- Ammoniumstickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$ als Konzentration im Belebungsbeckenablauf) und
- Nitratstickstoff ($\text{NO}_3\text{-N}$ als Konzentration im Belebungsbeckenablauf).

Zudem wurde für die Fuzzy-Logik Regelung auf die vorhandene Sauerstoffmessung im Belebungsbecken zurückgegriffen (vgl. Abbildung 3.1).

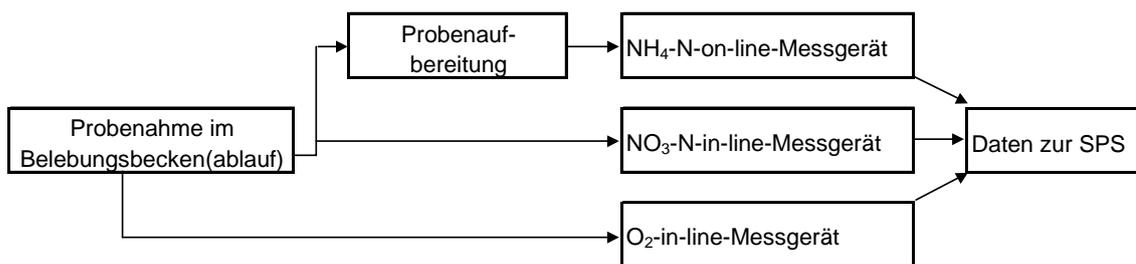


Abb. 3.3: Messgeräteanordnung (Fuzzy-Logik Betrieb)

In der nachstehenden Tabelle werden die Funktionsweise und Messbereiche der installierten Messungen dargestellt.

Tab. 3.2: Eingesetzte Messgerätetechnik im Belebungsbeckenbereich (Fuzzy-Logik Betrieb)

NO ₃ -N (In-line) Belebungsbeckenablauf	<ul style="list-style-type: none"> – Status: – Hersteller: – Bezeichnung: – Messverfahren: – Ansprechzeit: – Messbereiche: – Analogausgang: 	<p>Für Versuch installiert</p> <p>Dr. Lange GmbH</p> <p>Nitrax als In-situ-Sonde</p> <p>UV-Absorption (4-Strahlkompensation)</p> <p>20 s (einstellbar) (Gewählt: 5 Min. Mittelwert)</p> <p>0,10 ... 200 mg/l NO₃</p> <p>0,10 ... 50 mg/l NO_x-N (eingesetzt)</p> <p>0/4 ... 20 mA an max. 500 Ohm</p>
NH ₄ -N (On-line) Belebungsbeckenablauf	<ul style="list-style-type: none"> – Status: – Hersteller: – Bezeichnung: – Messverfahren: – Auswertung: – Ansprechzeit: – Messbereiche: – Analogausgang: 	<p>Für Versuch installiert</p> <p>Dr. Lange GmbH</p> <p>Amtax – inter</p> <p>Indophenolblau-Verfahren (abgeleitet aus DIN 38406 E5)</p> <p>Photometrisch im Zweistrahl-Zweifilter-Verfahren</p> <p>t₁₀₀ = 5 Min. bzw. 10 Min. (gewählt)</p> <p>0,01 – 2,0 ... 20 mg/l (eingesetzt)</p> <p>0,1-20 ... 80 mg/l</p> <p>0/4 ... 20 mA an max. 500 Ohm</p>
Sauerstoff (In-line) Belebungsbecken	<ul style="list-style-type: none"> – Status: – Hersteller: – Kombielektrode: – Messumformer: – Messbereich: – Messintervall: – Analogausgang: 	<p>Bestandteil des konventionellen Betriebs</p> <p>Fa. Züllig GmbH</p> <p>S 12</p> <p>DO-34</p> <p>Eisen-Elektrode: 0 – 15 ppm</p> <p>Zink-Elektrode: 0 – 25 ppm</p> <p>kontinuierlich</p> <p>0/4 – 20 mA</p>
Probenaufbereitung für das NH ₄ -N-on-line-Messgerät	<ul style="list-style-type: none"> – Status: – Hersteller: – Verfahren: – Bezeichnung: – Zyklus: – Einsatzbereich: – Probenmenge: 	<p>Für Versuch installiert</p> <p>Dr. Lange GmbH</p> <p>Sedimentation</p> <p>Seditax 2</p> <p>10 – 20 min</p> <p>VS: 0 – 800 ml/g bis 1.000 (ISV < 150)</p> <p>für bis zu 2 Prozess-Photometer</p>

3.2.3 Vorhandene Aktorik

Der Sauerstoffeintrag ist eine Stellgröße zur Regelung der Abbauvorgänge innerhalb der biologischen Belebungsstufe. Zum Eintrag des entsprechenden Luftstroms in die Nitrifikationszone sind auf der ARA Emsdetten-Austum drei Turboverdichter und sechs Drehkolbengebläse vorhanden. Die Drehkolbengebläse dienen bisher nur dem Notbetrieb, d. h. während Wartungsarbeiten an den TVD oder bei Stromausfall.

Tab. 3.3: Vorhandene Belüftungsaggregate für den Sauerstoffeintrag in der Belebungsstufe

Turboverdichter	<ul style="list-style-type: none"> – bisheriger Status: – Hersteller: – Anzahl: – Leistung: – Ansteuerbereich: 	Alleinige Abdeckung des Sauerstoffeintrages in der Belebungsstufe HV Turbo-AS 3 je 200 kW ca. 124 bis 190 kW über Diffuserstellklappe Stellbereich: 10 bis 90 %
Drehkolbengebläse	<ul style="list-style-type: none"> – bisheriger Status: – Hersteller: – Anzahl: – Leistung: – Ansteuerbereich: 	Aufrechterhaltung des Notbetriebes Aerzener Gebläse 6 2 x 37 kW, 4 x 18,5 kW einzeln ein- bzw. ausschaltbar

Die Änderung des Nitrat-Rezirkulationsvolumenstroms vom aeroben zum anoxischen Becken-Teil (innenliegende Denitrifikationszone) erfolgt über eine Änderung des Öffnungswinkels der Rezirkulationsklappe. Die Ansteuerung der Rezirkulationsklappe wird über einen Stellantrieb in den Bereichen von 0 % (Klappe geschlossen) bis 100 % (maximaler Öffnungswinkel) ermöglicht.

3.3 Funktionsweise und Aufbau der entwickelten Fuzzy-Logik Regelung

Die Struktur der entwickelten Fuzzy-Logik Regelung ist in der nachstehende Abbildung vereinfacht dargestellt.

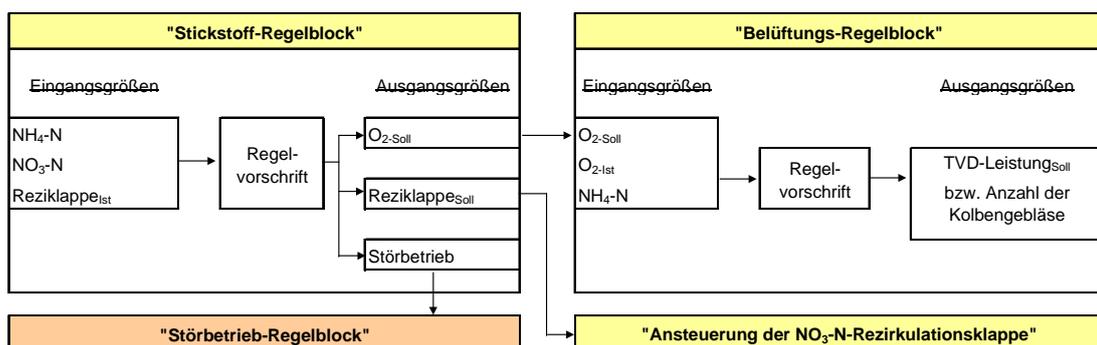


Abb. 3.4: Struktur der entwickelten Fuzzy-Logik Regelung

Die Aufgabe der entwickelnden Fuzzy-Regelung ist die Realisierung eines stabilen und energiearmen Prozesses mit optimaler Sauerstoffzufuhr in der Nitrifikationszone und angepasster Nitratrückführung in die Denitrifikationszone. Um dieses Ziel zu erreichen, werden in einem „Stickstoff-Regelblock“ die im Belebungsbeckenablauf gemessenen

„Ammonium- und Nitratstickstoffkonzentrationen“ sowie die „aktuelle Stellung der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Rezirkulationsklappe“ ($\text{Reziklappe}_{\text{Ist}}$) mit einer Regelvorschrift – basierend auf der Fuzzy-Logik – verarbeitet. Es werden die Sauerstoff-Sollkonzentration ($\text{O}_{2\text{-Soll}}$) und die „Sollstellung der Nitrat-Rezirkulationsklappe“ ($\text{Reziklappe}_{\text{Soll}}$) berechnet.

Der ermittelte Sauerstoff-Sollwert bildet zusammen mit dem gemessenen „Sauerstoff-Istwert“ ($\text{O}_{2\text{-Ist}}$) sowie der aktuellen Ammoniumstickstoffkonzentration die Eingangsgrößen für den „Belüftungs-Regelblock“, in dem die neuen Einstellungen für die Belüftungsaggregate ermittelt werden. Mit Hilfe einer Regelvorschrift wird ermittelt, welche Leistung der TVD ($\text{TVD-Leistung}_{\text{Soll}}$) erbringen muss oder, ob die Drehkolbengebläse aktiviert und der TVD deaktiviert wird. Der Einsatz der Drehkolben erfolgt bei der erarbeiteten Fuzzy-Logik Regelung in belastungsschwachen Phasen (s. Kapitel 3.3.2).

Die ebenfalls vom Stickstoff-Regelblock ermittelte Ausgangsgröße „ $\text{Reziklappe}_{\text{Soll}}$ “ wird direkt an der Rezirkulationsklappe eingestellt.

Bei einer Überschreitung von internen Grenzwerten wird ein „Störbetrieb-Regelblock“ aktiviert, der während der Versuchsphase die konventionelle Regelungsstrategie wieder aktiviert.

3.3.1 Stickstoff-Regelblock

Der Stickstoff-Regelblock hat zwei Aufgaben: Ermittlung

- des belastungsabhängigen Sauerstoff-Sollwertes in der Nitrifikationszone und
- der Soll-Stellung der Nitrat-Rezirkulationsklappe zur Denitrifikationszone.

Die Umsetzung erfolgt auf der Basis eines Fuzzy-Systems. Die entsprechende Regelbasis wurde aus den allgemein bekannten Zusammenhängen zwischen Nitrifikation und Denitrifikation abgeleitet. Der Schwerpunkt der Regelbasis liegt aufgrund der Gesetzgebung in Deutschland auf dem Abbau der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Verbindungen.

Im Folgenden werden die Regelbasis, die entsprechenden Zugehörigkeitsfunktionen und die 3D-Kennfelder des eingesetzten Fuzzy-Systems dargestellt.

Tab. 3.4: Regelbasis des Stickstoff-Regelblocks

Regel Nr.:	Eingangsgrößen		Ausgangsgrößen		Gewichtung
	NH ₄ -N	NO ₃ -N	O ₂ -Soll	Rezirklappe _{Soll}	
1.	Small	Small	Small		1
2.	Small	Middle	Small		1
3.	Small	Large	Small		1
4.	Middle	Small	Middle		1
5.	Middle	Middle	Middle		1
6.	Middle	Large	Small		1
7.	Large	Small	Big		1
8.	Large	Middle	Big		1
9.	Large	Large	Big		1
10.		Small		Small	1
11.		Middle		Middle	1
12.		Large		Large	1

Die Bezeichnungen *Small*, *Middle* and *Large* stehen für *kleine*, *mittlere* und *hohe* Konzentrationen der jeweiligen Zugehörigkeitsfunktionen, deren Wertebereiche in den folgenden Abbildungen dargestellt sind.

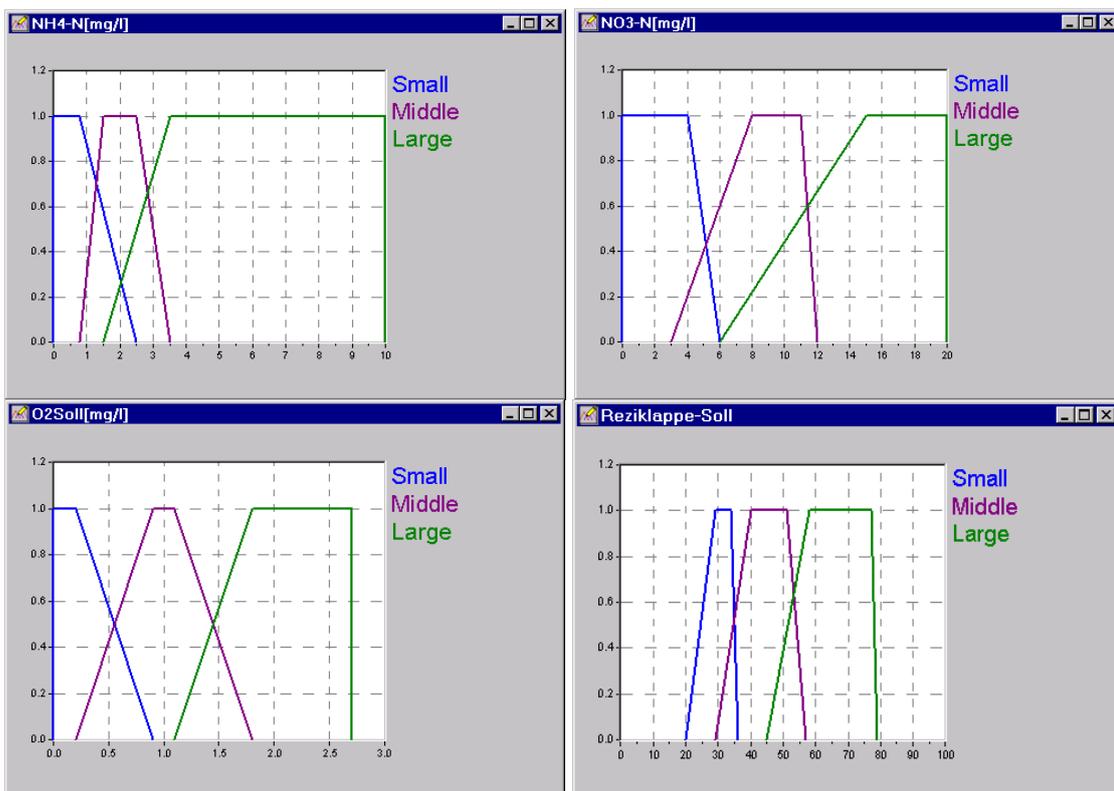


Abb. 3.5: Zugehörigkeitsfunktionen im Stickstoff-Regelblock

Bei den Angaben auf den Abszissen der Zugehörigkeitsfunktionen handelt es sich bei den Größen NH₄-N, NO₃-N und O₂-Soll um Konzentrationsangaben (mg/l) bzw. beim Parameter Rezirklappe_{Soll} um den Öffnungswinkel der Rezirkulationsklappe (%).

Zur Verdeutlichung der Funktionsweise des Stickstoff-Regelblocks werden im folgenden die 3D-Kennfelder „Sauerstoff-Sollwert“ und „Stellung der Rezirkulationsklappe“ dargestellt.

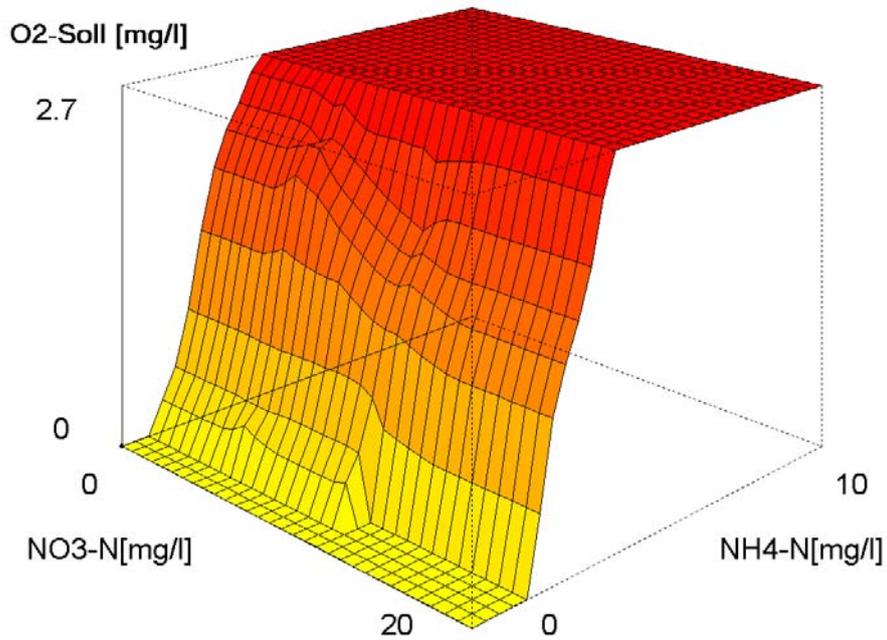


Abb. 3.6: 3D-Kennfeld: Sauerstoff-Sollwert

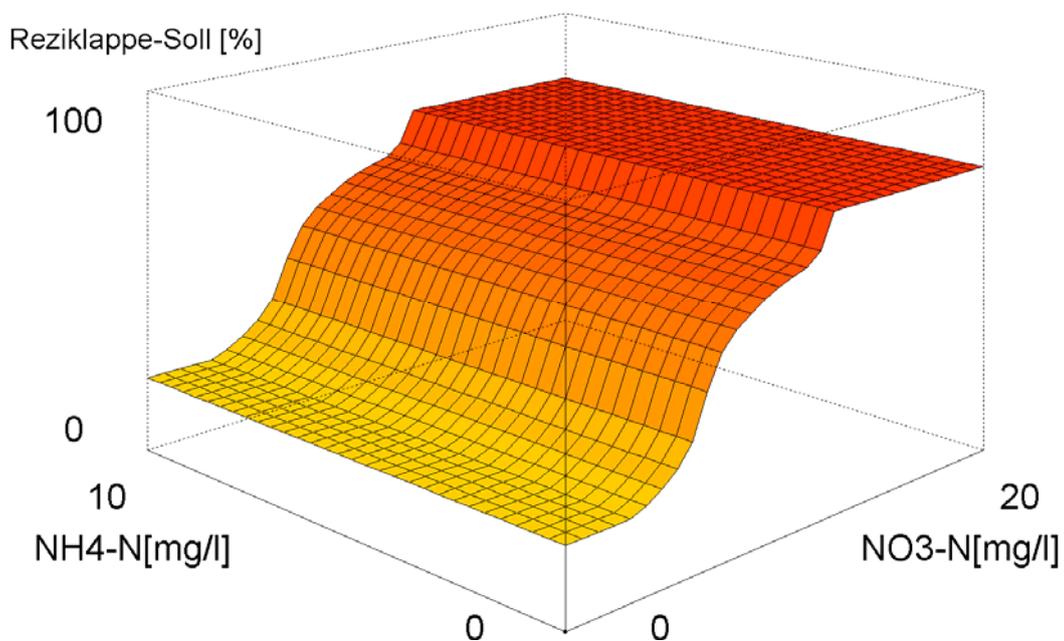


Abb. 3.7: 3D-Kennfeld: Stellung der Rezirkulationsklappe

3.3.2 Belüftungs-Regelblock

Der Belüftungs-Regelblock hat die Aufgabe, den vom Stickstoff-Regelblock vorgegebenen O_2 -Soll-Gehalt einzustellen.

Während der ersten Versuchsdurchführungen, bei denen die Sauerstoffzufuhr ausschließlich über den TVD erfolgte, stellte sich heraus, dass während belastungsschwacher Zuläufe (in den Abend- und Nachtstunden sowie am Wochenende) trotz niedrigster Leistungsstufe des TVD (minimale Diffusorstellung = 10 %) der vom Stickstoff-Regelblock ermittelte Sauerstoff-Sollwert (O_2 -Soll) nicht eingestellt werden konnte. Es lag in diesen Phasen ein Sauerstoffeintrag (O_2 -Ist) von größer 2,5 mg/l und somit ein unnötig hoher Energieverbrauch vor (s. Abbildung).

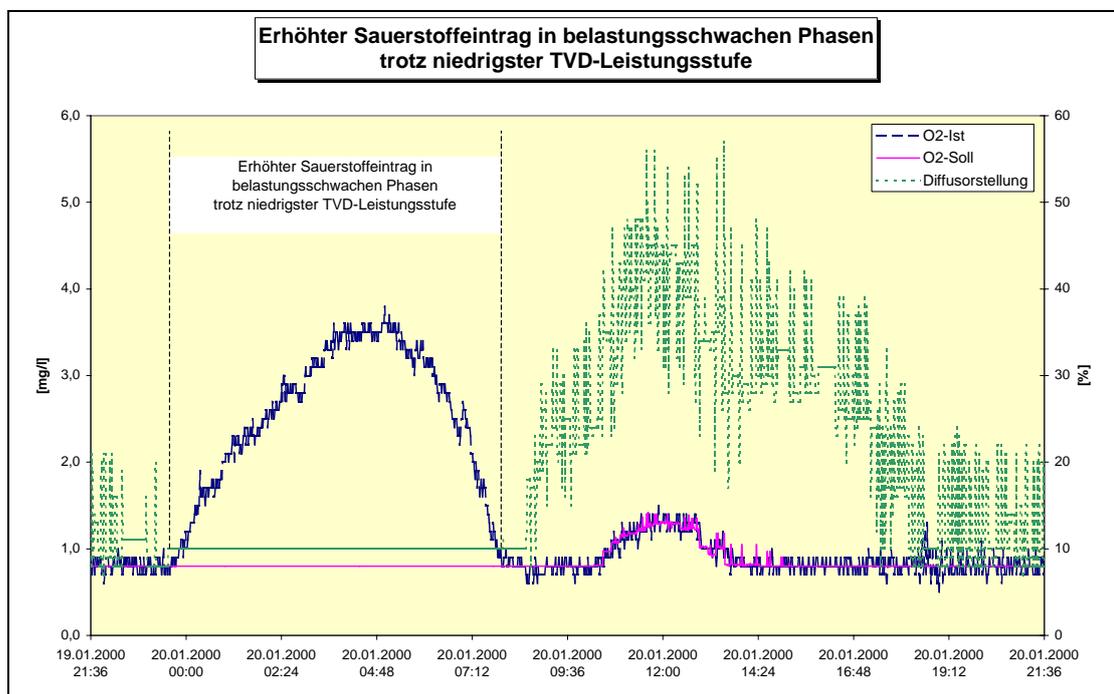


Abb. 3.8: Erhöhter Sauerstoffeintrag des TVD während belastungsschwacher Phasen

Zur Ausschöpfung dieses Energieeinsparpotentials wurden während der schwachbelasteten Zuläufe die Drehkolbengebläse der bisherigen Notbelüftung mit in die Regelung eingebunden. Die Aktivierung der Drehkolbengebläse bzw. die Deaktivierung des TVD erfolgte, wie die Ermittlung des Sauerstoff-Sollwertes, belastungsabhängig.

Die Belüftung mittels TVD erfolgt i. d. R. während der Tagesstunden. Dabei wird nicht wie bei der bisherigen konventionellen Betriebsphase auf einen festen O_2 -Soll-Wert (z. B. 2,0 mg/l) ausgeregelt, sondern in einem relativ breiten Bereich (0,3 – 2,5 mg/l) gefahren. Die Regelung des Sauerstoffgehaltes erfolgt mit einem PI-Regler. Folgende Abbildung verdeutlicht den Sachverhalt:

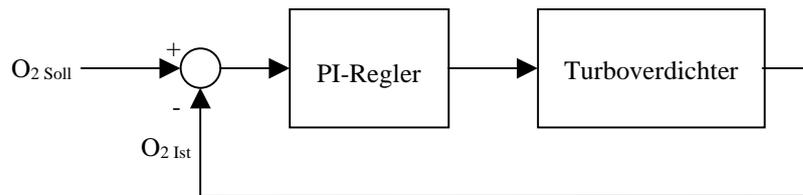


Abb. 3.9: Regelung des Sauerstoffgehaltes mit den TVD

Die Parameter für den PI-Regler wurden durch Aufnahme der Sprungantwort ermittelt. Aus dieser Sprungantwort wurde ein Modell der Strecke erstellt, mit dem dann die Parameter für den PI-Regler berechnet wurden. Diese wurden anschließend in der Versuchsphase durch Beobachtungen weiter abgeglichen. Folgende Parameter wurden endgültig festgelegt: P-Beiwert: 25

I-Beiwert: 400

Zur Aktivierung der Drehkolbengebläse während belastungsschwacher Phasen wurden folgende Einschaltbedingungen festgelegt:

$$O_{2\text{-Ist}} > 1,5 \text{ mg/l} \text{ und } NH_4\text{-N} < 1,5 \text{ mg/l}$$

Die Ausschaltbedingungen zur Aktivierung des TVD lauten:

$$O_{2\text{-Ist}} < 0,3 \text{ mg/l} \text{ oder } NH_4\text{-N} > 3 \text{ mg/l}$$

In die Ausschaltbedingungen musste während der Versuchsphase der Parameter $O_{2\text{-Ist}}$ mit eingebunden werden, da keine direkte Störmeldung der Drehkolbengebläse während der Versuchsdurchführung vorlag und somit über einen zu tiefen Sauerstoffgehalt ein evtl. Ausfall erfasst werden musste. Dieses führte aufgrund von Fehlmessungen der Sauerstoffsonde teilweise zu einer verfrühten Deaktivierung der Drehkolbengebläse bzw. Aktivierung der TVD während schwachbelasteter Phasen. Bei einer Umsetzung in den alltäglichen Betrieb müssen in diesem Bereich noch weitere Optimierungen vorgenommen werden.

Aufgrund der Tatsache, dass die Drehkolbengebläse nur stufenweise zu- bzw. abgeschaltet werden können, ist das Einstellen eines exakten Sauerstoffwertes in diesem Fall nicht möglich. Der Eintrag muss über die Anzahl der Drehkolbengebläse geregelt werden. Dabei wird die Anzahl der aktivierten Drehkolbengebläse in Abhängigkeit vom $NH_4\text{-N}$ - und Sauerstoffwert gesetzt. Diese $NH_4\text{-N}$ -Regelung wird ebenfalls vom Fuzzy-Versuchs-PC ausgeführt. Im Drehkolbengebläsebetrieb wird zwischen einem Betrieb von 2 bis 5 Drehkolbengebläse variiert. Die nachstehende Tabelle zeigt die jeweiligen Ein- und Ausschaltbedingungen der einzelnen Drehkolbengebläse Nr. 1, 3 und 4 bei aktiviertem Drehkolbenbetrieb. Die Gebläse Nummer 2 und 5 mit jeweils 37 kW Leis-

tungsaufnahme lieferten bei aktivierter Drehkolbenregelung den Sauerstoffgrundeintrag.

Tab. 3.5: Ein- und Ausschaltbedingungen der Drehkolbengebläse Nr. 1, 3 und 4 (Fuzzy-Logik Betrieb)

Gebäl- senr. ¹⁾	Leistungsab- gabe ²⁾	Einschaltbedingung NH ₄ -N >	Ausschaltbedingung NH ₄ -N <
2	37,0 kW	Sauerstoffgrundeintrag (Aktivierung bei den o. g. Einschaltbedingungen)	
5	37,0 kW		
1	18,5 kW	1,0 mg/l	0,5 mg/l
3	18,5 kW	1,5 mg/l	1,0 mg/l
4	18,5 kW	2,0 mg/l	1,5 mg/l

1) Eine automatische Umschaltung der Reihenfolge der Gebläse Nr. 1, 3 und 4 zur Vergleichmäßigung der Betriebsstunden wurde während des Versuchsbetriebs nicht durchgeführt.

2) gemäß Typenschild

3.4 Versuchsergebnisse

3.4.1 Reinigungsleistung

Zur Darstellung der Reinigungsleistung und Verdeutlichung der Arbeitsweise der erarbeiteten Fuzzy-Logik Regelung werden im Folgenden:

- die Anlagenzulaufwerte (Abwassermengen und Zulaufwerte/-frachten),
- die Datenaufzeichnungen der Messgeräte im Belebungsbeckenbereich und
- die Ablaufwerte (Nachklärungs- und Anlagenablauf)

der optimierten Fuzzy-Logik Regelung über einen Zeitraum von ca. sieben Wochen (02.03. bis 16.04.2000) dargestellt und bewertet.

Während des betrachteten Versuchszeitraums lagen folgende betriebliche Rahmenbedingungen vor:

Tab. 3.6: Rahmenbedingungen bei der Datenaufzeichnung: Fuzzy-Logik Betrieb

Parameter	Bemerkung
Raumbelastung	0,47 kg BSB ₅ /(m ³ · d)
Schlammbelastung	0,06 kg BSB ₅ /(kg TS · d)
Schlammindex	66 ml/g
TS-Gehalt _{BB}	8,1 kg/m ³
Abwassertemperatur	13,2 °C
Datenzeitraum	02.03. bis 16.04.2000
Wetter	26 Tage RW; 20 Tage TW

RW = Regenwetter TW = Trockenwetter

In den Tabellen 3.7 bis 3.9 sind die entsprechenden **Anlagenzulaufwerte** der ARA Emsdetten-Austum – entnommen aus dem Betriebstagebuch – dargestellt.

Tab. 3.7: Abwassermengen (Fuzzy-Logik Betrieb)

Datenbasis = Tageswerte (02.03 - 16.04.00)	Gesamt	Trockenwetter	Regenwetter (>1mm /d)
	m ³ /d	m ³ /d	m ³ /d
Mittelwert	10.660	9.466	12.213
Medianwert	10.099	9.675	11.547
Min.-Wert	5.013	5.246	5.013
Max.-Wert	24.085	11.332	24.085
85 %-Wert	12.419	11.043	15.508
99 %-Wert	21.544	11.289	22.980

Tab. 3.8: Zulaufwerte (Fuzzy-Logik Betrieb)

24-h-Mischproben inkl. Rückbelastung aus der Schlammlinie	BSB ₅	CSB	N _{ges}	NH ₄ -N	P _{ges}
Datenbasis = 02.03 - 16.04.00	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Mittelwert	372	718	64	41	9
Medianwert	320	607	72	41	8
Min.-Wert	280	565	43	28	7
Max.-Wert	570	1.061	77	50	13
85 %-Wert	435	833	75	49	11
99 %-Wert	561	1.046	77	50	13
Datenanzahl	7	7	5	7	7

Tab. 3.9: Zulauffrachten (Fuzzy-Logik Betrieb)

Datenbasis = 02.03 - 16.04.00	BSB ₅	CSB	N _{ges}	NH ₄ -N	P _{ges}	E _{B60}
inkl. Rückbelastung aus der Schlammlinie	kg/d	kg/d	kg/d	kg/d	kg/d	E
Mittelwert	4.250	8.225	684	477	105	70.841
Medianwert	4.151	8.032	677	457	104	69.188
Min.-Wert	3.347	6.550	532	346	79	---
Max.-Wert	5.216	9.709	837	608	128	---
85 %-Wert	4.836	9.427	792	574	125	80.597
99 %-Wert	5.191	9.690	834	606	128	86.512
Datenanzahl	7	7	5	7	7	

Wie aus den oben dargestellten Tabellen ersichtlich ist, liegt während der Versuchsphase (02.03. bis 16.04.2000) im Vergleich zu den in Kapitel 2 dargestellten Zulaufwerten der konventionellen Regelung (Juni 1998 bis Juli 1999) eine teilweise deutliche Erhöhung der Abwassermengen, Konzentrationen und somit Zulauffrachten (Mittelwerte) vor. Im Falle der BSB₅-Fracht ist ein Anstieg um ca. 1.100 kg/d bzw. um 35 % und bei der NH₄-N-Fracht um ca. 100 kg/d bzw. um 27 % zu verzeichnen (s. Tabelle 3.10). Ein Grund für diesen Anstieg ist u. a. der verstärkte Überschussschlammabzug zur Reduzierung des TS-Gehaltes_{BB} und somit die erhöhte Rückbelastung durch das Schlammwasser seit Ende März 2000.

Tab. 3.10: Vergleich der mittleren Zulauffrachten des konventionellen und des Fuzzy-Logik Betriebes

Parameter (Mittelwerte) inkl. Rückbelastung aus der Schlammlinie	Konventioneller Betrieb (01.06.98 -31.07.99)	Fuzzy-Logik Betrieb (02.03. - 16.04.00)	Differenz	
	kg/d	kg/d	kg/d	%
BSB ₅	3.147	4.250	+ 1.103	+ 35
CSB	6.126	8.225	+ 2.099	+ 34
N _{ges}	554	684	+ 131	+ 24
NH ₄ -N	375	477	+ 102	+ 27
P _{ges}	84	105	+ 21	+ 26

In den nachstehenden Abbildungen werden **die Datenaufzeichnungen der Messgeräte** im Belebungsbeckenbereich in Form von Ganglinien der Stickstoffkonzentrationen (gemessen im Belebungsbeckenablauf) und dem Verhalten der Gebläse (Anzahl der Turboverdichter und Drehkolbengebläse) einer typischen Woche mit belastungsschwachem Wochenende (i. d. R. Samstag bis Montag) und belastungsreicher Woche (i. d. R. Dienstag bis Freitag) beispielhaft dargestellt.

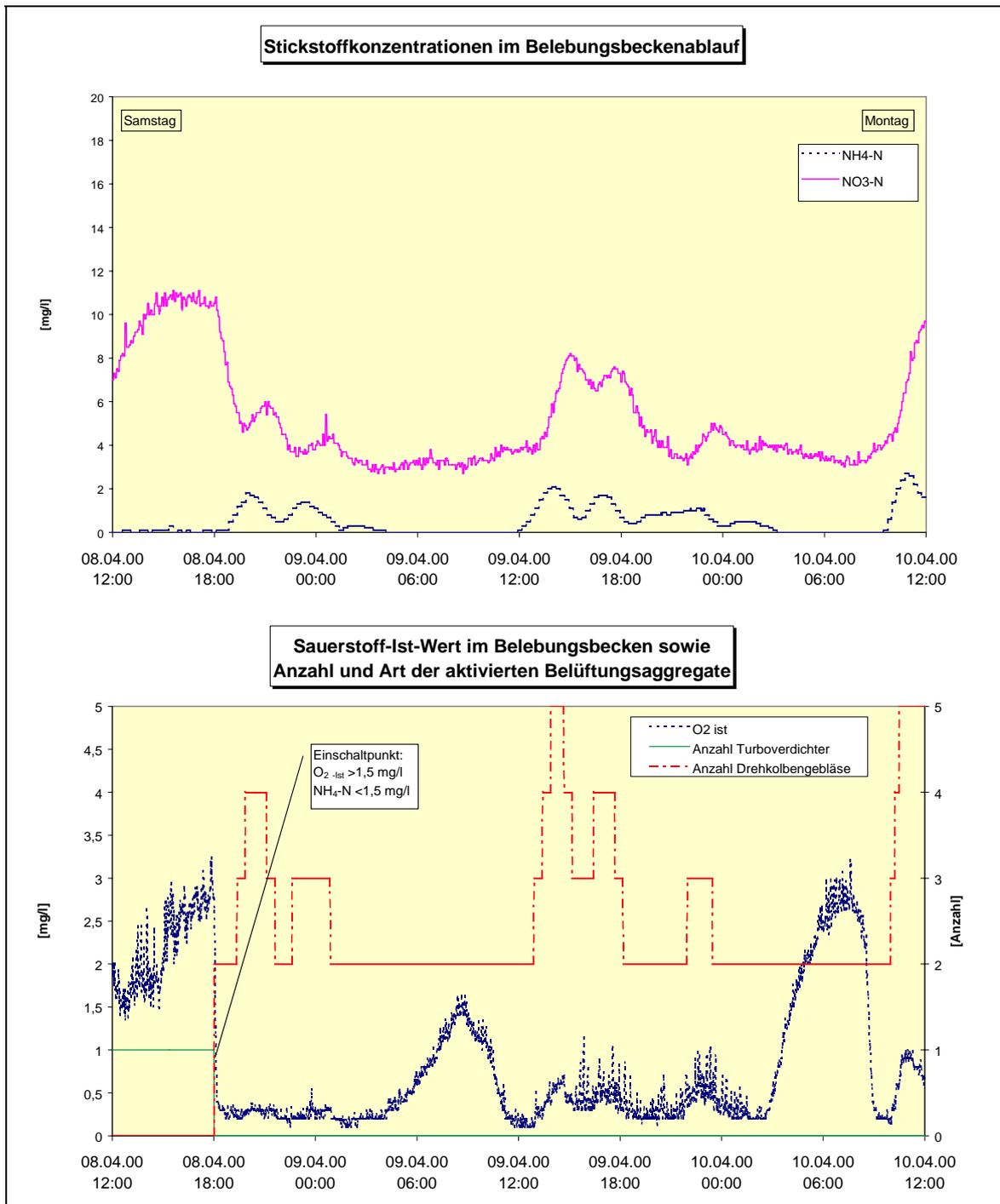


Abb. 3.10: Stickstoffkonzentrationen im Belebungsbeckenablauf und Verhalten der Gebläse (Fuzzy-Logik Betrieb: 08.04. – 10.04.2000)

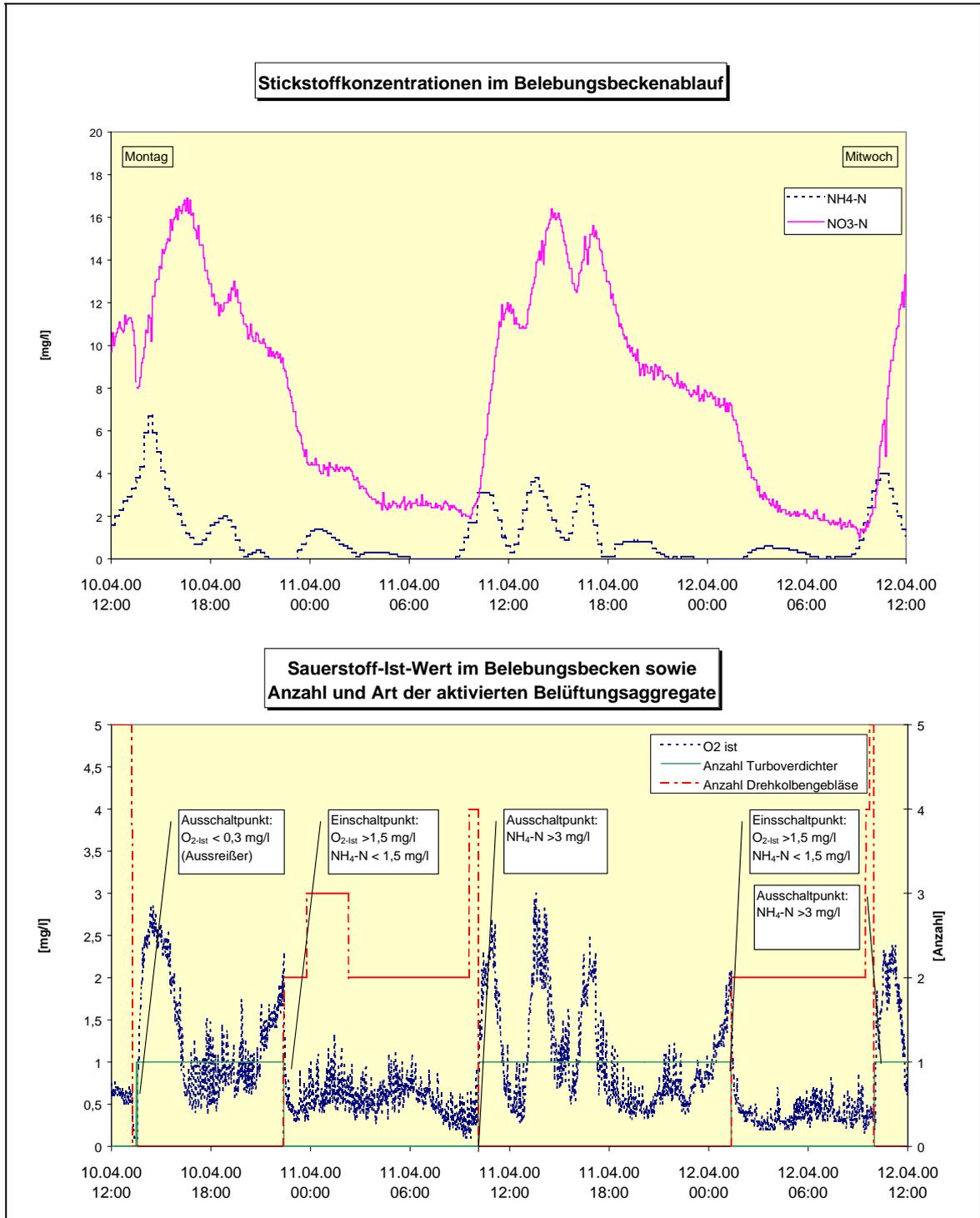


Abb. 3.11: Stickstoffkonzentrationen im Belebungsbeckenablauf und Verhalten der Gebläse (Fuzzy-Logik Betrieb: 10.04. – 12.04.2000)

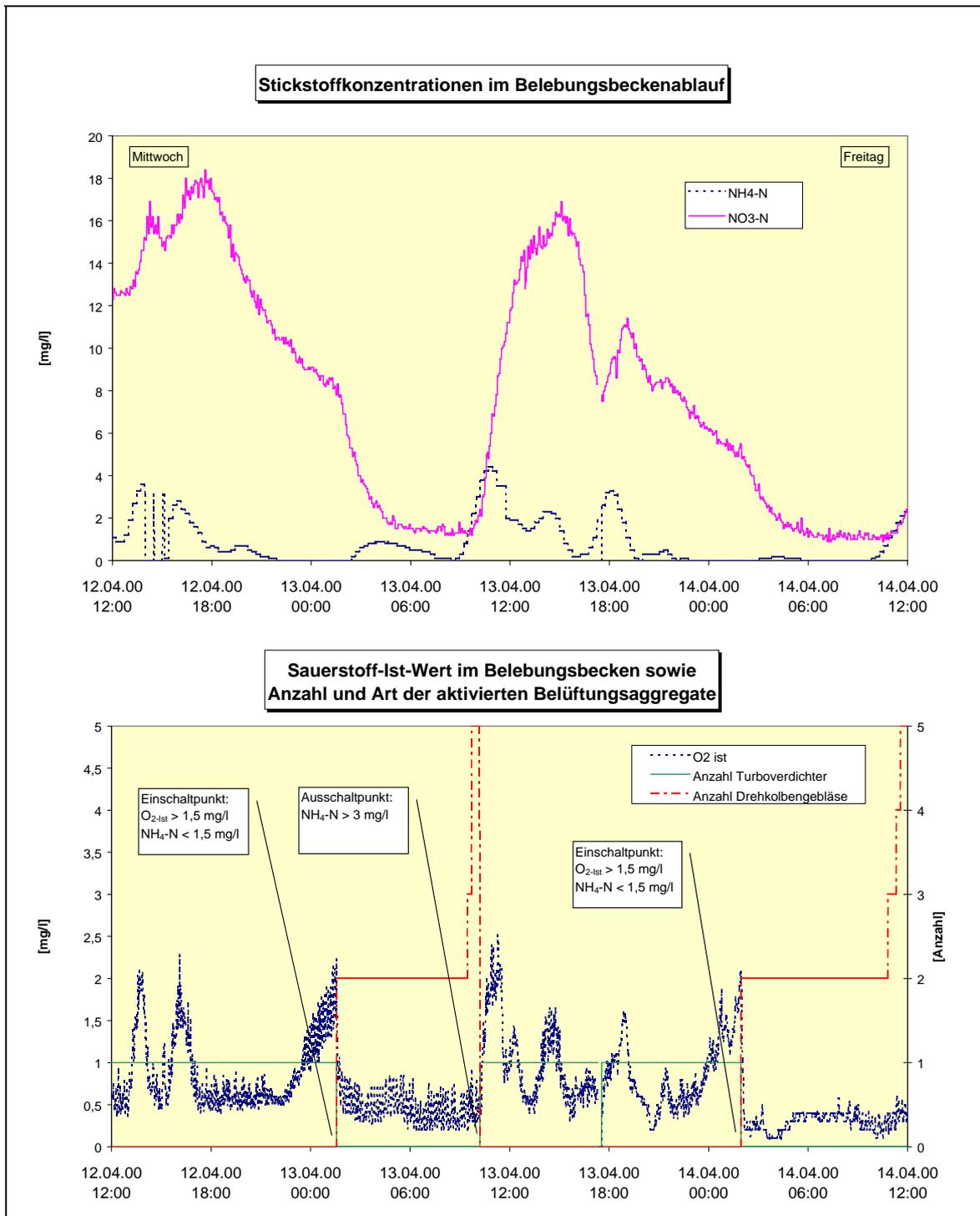


Abb. 3.12: Stickstoffkonzentrationen im Belebungsbeckenablauf und Verhalten der Gebläse (Fuzzy-Logik Betrieb: 12.04. – 14.04.2000)

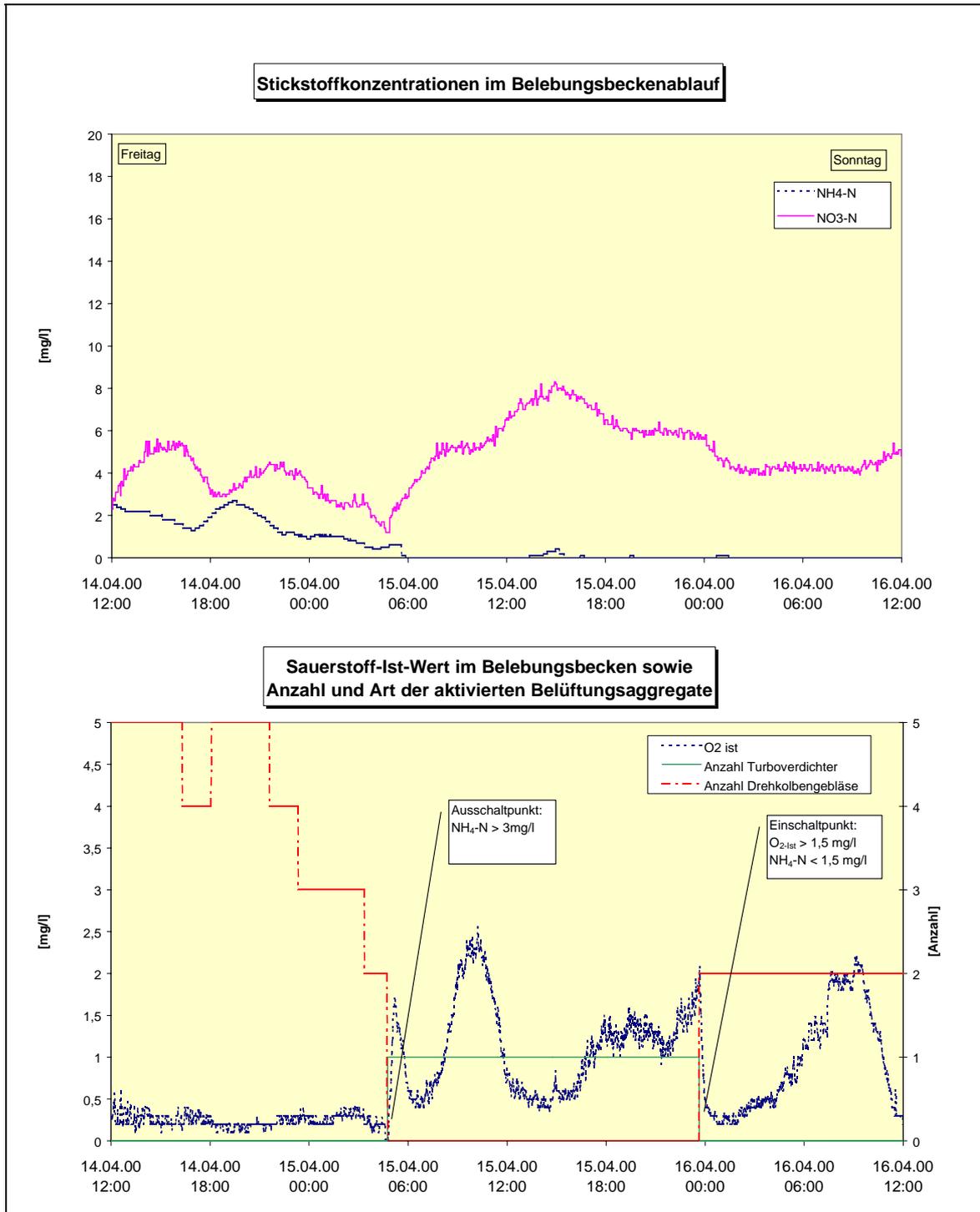


Abb. 3.13: Stickstoffkonzentrationen im Belebungsbeckenablauf und Verhalten der Gebläse (Fuzzy-Logik Betrieb: 14.04. – 16.04.2000)

In der nachfolgenden Abbildung ist die Häufigkeitsverteilung der im Belebungsbeckenablauf gemessenen Stickstoffverbindungen vom 02.03. bis 16.04.2000 dargestellt.

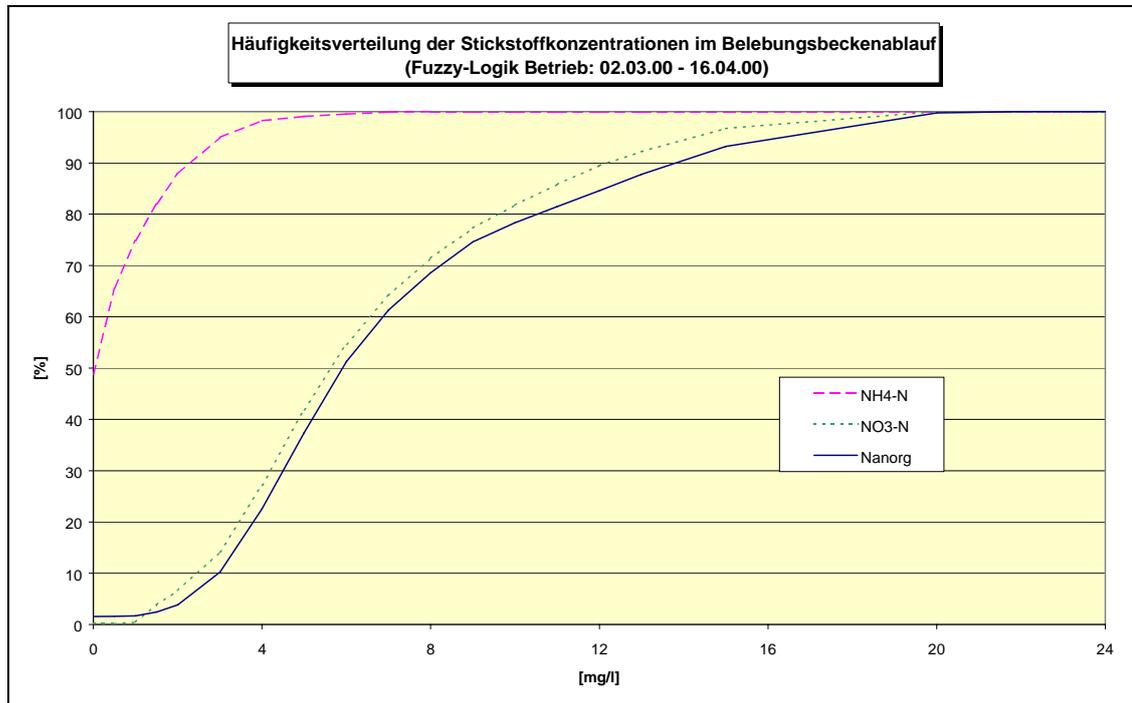


Abb. 3.14: Häufigkeitsverteilung der Stickstoffkonzentrationen im Belebungsbeckenablauf (Fuzzy-Logik Betrieb: 02.03. – 16.04.2000)

Zum Abschluss erfolgt eine tabellarische Auswertung aller aufgenommenen Werte des Zeitraums 02.03. bis 16.04.2000.

Tab. 3.11: Stickstoffkonzentrationen im Belebungsbeckenablauf (Fuzzy-Logik Betrieb: 02.03. bis 16.04.2000)

Parameter	Einheit	Mittel.	Median.	Min.	Max.	85%-Wert	95%-Wert
NH ₄ -N ¹⁾	[mg/l]	0,69	0,10	0	7,5	1,8	3,1
NO ₃ -N ¹⁾	[mg/l]	6,6	5,7	0	19	11	14
N _{anorg} ²⁾	[mg/l]	7,2	5,9	0	22	12	16

1) On/In-line-Messungen im Belebungsbeckenablauf (10-Min-Werte)

2) Summe der NH₄-N- und NO₃-N-Messwerte

In den oben dargestellten Abbildungen 3.10 bis 3.13 wird die Arbeitsweise der erarbeiteten Regelungsstrategie nochmals verdeutlicht. Während der Tagesstunden mit erhöht belastetem Zulauf erfolgt die Sauerstoffzufuhr in die Nitrifikationszone über den TVD, dessen Sauerstoffsollwert durch die Fuzzy-Logik Regebasis im Stickstoff-Regelblock vorgegeben wird. Deutlich wird in den Abbildungen der variable Arbeitsbe-

reich zwischen 0,3 bis 2,5 mg/l Sauerstoff (O_{2-ist}) wiedergegeben. In den Abschnitten mit einem gering belastetem Zulauf (i. d. R. in den Abend- und Morgenstunden sowie am Wochenende) wird der TVD deaktiviert und die Drehkolbengebläse aktiviert (stufenweise Erhöhung bzw. Verringerung der Anzahl).

Die im Belebungsbeckenablauf on-line-gemessenen NH_4 -N-Ablaufspitzen von max. 7,5 mg/l sind von kurzer Dauer und seltener Häufigkeit (s. Abbildung 3.14). Somit liegt der NH_4 -N-Mittel- (0,70 mg/l) und der NH_4 -N-Medianwert (0,10 mg/l) deutlich unterhalb des geforderten Überwachungswertes (5 mg/l). Der zeitgleich in-line-erfasste NO_3 -N-Wert im Belebungsbeckenablauf liegt mit im Mittel 6,6 mg/l im tolerierbaren Bereich, so dass – in Summe mit dem NH_4 -N-Werten – der N_{anorg} -Wert im Ablauf des Belebungsbeckens i. d. R. (zu 95 %) unterhalb des zu erfüllenden Überwachungswertes (18 mg/l) liegt (s. Abbildung 3.14).

Aus den oben dargestellten Stickstoffkonzentrationen im Belebungsbeckenablauf ergaben sich im betrachteten Zeitraum vom 02.03. bis 16.04.2000 die folgenden Werte für den **Nachklärungs- und den Anlagenablauf** (24-h-Mischproben). Zur Vervollständigung der Daten werden auch weitere Parameter wie CSB, BSB_5 , etc. aufgeführt. Da keine zeitgleiche Vergleichsbasis zur Verfügung steht, werden den Ablaufwerten der Nachklärbecken die on-/in-line-gemessenen Stickstoffablaufwerte des Belebungsbeckens (10-Min-Werte) gegenübergestellt (vgl. Tabelle 3.11).

Tab. 3.12: Werte im Nachklärungsablauf (Fuzzy-Logik Betrieb)

Datenbasis = 02.03. - 16.04.00	Ablaufwerte der Nachklärung (24-h-Mischproben)								Ablaufwerte des Belebungsbeckens (10-Min-Werte)		
	BSB_5	CSB	N_{ges}	N_{anorg}	NH_4 -N	NO_3 -N	NO_2 -N	PO_4 -P	N_{anorg}	NH_4 -N	NO_3 -N
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Mittelwert	5,8	58	10	7,0	0,62	6,3	0,15	0,80	7,2	0,69	6,6
Medianwert	5,3	60	11	7,2	0,53	6,2	0,17	0,80	5,9	0,10	5,7
Min.-Wert	4,0	45	8,8	5,3	0,35	4,6	0,08	0,50	0	0	0
Max.-Wert	9,0	67	12	8,8	1,0	8,2	0,23	1,1	22	7,5	19
85 %-Wert	7,5	63	11	7,7	1,0	7,2	0,19	1,0	12	1,8	11
95 %-Wert	8,5	66	12	8,4	1,0	7,9	0,22	1,1	16	3,1	14
Datenanzahl	8	8	6	8	8	8	7	26	-	-	-

Tab. 3.13: Werte im Anlagenablauf (Fuzzy-Logik Betrieb)

Datenbasis = 02.03 - 16.04.00 (24-h-Mischproben)	BSB ₅	CSB	N _{ges}	N _{anorg}	NH ₄ -N	NO ₃ -N	NO ₂ -N	P _{ges}
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Mittelwert	1,8	44	8,7	6,2	0,34	5,9	0,03	0,25
Medianwert	2,0	45	9,3	6,5	0,26	5,9	0,03	0,25
Min.-Wert	1,0	29	6,1	4,2	0,03	4,1	0,01	0,03
Max.-Wert	3,0	57	11	7,9	0,86	7,5	0,05	0,67
85 %-Wert	2,5	53	10	7,3	0,60	7,0	0,05	0,34
95 %-Wert	2,8	55	11	7,8	0,73	7,4	0,05	0,36
Datenanzahl	8	29	10	12	12	12	11	28
Überwachungswert ¹⁾	12	75	---	18	5	---	---	1

1) als qualifizierte Stichprobe oder 2-h-Mischprobe

Wie aus der Tabelle 3.13 ersichtlich ist, wurden die jeweiligen Überwachungswerte – wie bei der konventionellen Regelung mit zwei Belebungsbecken – eingehalten. Die nachstehende Tabelle 3.14 enthält einen Vergleich der überwachungsrelevanten Ablaufwerte während des konventionellen und des Fuzzy-Logik Betriebes.

Tab. 3.14: Vergleich der Ablaufwerte der konventionellen Regelung mit den Werten der Fuzzy-Logik Regelung

Parameter (24-h-Mischproben)		Konventioneller Betrieb (01.06.98 -31.07.99)			Fuzzy-Logik Betrieb (02.03. - 16.04.00)			Überwachungswerte ¹⁾
		Mittelwert	95 %-Wert	Max.wert	Mittelwert	95 %-Wert	Max.wert	
BSB ₅	mg/l	2,3	4,0	5,5	1,8	2,8	3,0	12
CSB	mg/l	32	44	55	44	55	57	75
N _{anorg}	mg/l	4,2	7,7	10	6,2	7,8	7,9	18
NH ₄ -N	mg/l	0,20	0,53	4,4	0,34	0,73	0,86	5
P _{ges}	mg/l	0,31	0,60	0,90	0,25	0,36	0,67	1

1) als qualifizierte Stichprobe oder 2-h-Mischprobe

Im Vergleich zu den mittleren Ablaufwerten des Zeitraums Juni 1998 bis Juli 1999 mit konventioneller Regelung (zwei Belebungsbecken) liegen während der Versuchsphase mit Fuzzy-Logik Betrieb (ein Belebungsbecken) i. d. R. geringfügig höhere Ablaufmittelwerte vor. Dieser Anstieg ist, neben der erhöhten Anlagenbelastung (s. Tabelle 3.10), zum Teil auch auf die Funktionsweise der Fuzzy-Logik Regelung für die Sauerstoffzufuhr im Belebungsbecken zurückzuführen. Aufgrund der erstellten Regelbasis wird prinzipiell eine geringe Stickstoffgrundbelastung zugelassen und der Sauerstoffbedarf belastungsorientiert zugeführt. Bei der konventionellen Regelung erfolgte bisher – insbesondere während belastungsschwacher Phasen an den Wochenenden und in den Abendstunden – eine überhöhte Sauerstoffzufuhr, die in den schwachbelasteten Phasen einen beinahe vollständigen Abbau der Abwasserinhaltsstoffe zur Folge hatte. Nach Untersuchungen von RECKERZÜGL et al. 1999 ist jedoch aus gesamtökologi-

scher Sicht eine vollständige Ammoniumelimination nicht erforderlich. Das theoretische Betriebsoptimum befindet sich nach diesen Untersuchungen zwischen 2 bis 4 mg/l $\text{NH}_4\text{-N}$ im Ablauf. Nach RECKERZÜGL überwiegt bei geringeren Stickstoffkonzentrationen die durch erhöhten Energiebedarf bedingte CO_2 -Emission gesamtökologisch die Verringerung der Gewässerbelastung. Bei diesem Niveau (2 bis 4 mg/l $\text{NH}_4\text{-N}$) ist im Vergleich zum Betrieb mit maximaler Ammoniumelimination ein CO_2 -Reduktionspotential von 13 bis 16 % vorhanden.

Die maximalen Ablaufwerte wurden während der Versuchsphase trotz Umstellung auf Einstraßigkeit und erhöhter Zulaufmengen durch die Fuzzy-Logik Regelung gesenkt. Die bisherigen Erfahrungen aus dem konventionellen Betrieb haben gezeigt, dass kurzfristige Spitzen im Belebungsbeckenablauf durch die anschließenden Verfahrensstufen (Schönungsteich und Flockungsfiltration) abgefangen werden.

Die in den Abbildungen 3.10 bis 3.13 dargestellten Stickstoffkonzentrationsganglinien – insbesondere die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Ablaufwerte – zeigen bzgl. der Prozessstabilität ein für Fuzzy-Logik Betrieb untypischen Verlauf auf. Die möglichen Ursachen und Lösungen für eine weitere Erhöhung der Prozessstabilität sind in der nachstehenden Tabelle 3.15 zusammengefasst.

Tab. 3.15: Maßnahmen zur Erhöhung der Prozessstabilität

Parameter	Ursachen	Lösungsansätze
$\text{NH}_4\text{-N}$	Die Einstellung des belastungsabhängigen Sauerstoffgehaltes kann nicht immer ausreichend exakt vorgenommen werden.	Verbesserung der Sauerstoffversorgung durch Anpassung der entsprechenden Aktorik: a) Austausch der TVD gegen kleinere, stufenlos regelbare Aggregate, die dann auch die Sauerstoffversorgung in belastungsschwachen Phasen übernehmen; in diesem Fall werden die Drehkolbengebläse wieder nur für den Notbetrieb eingesetzt oder b) beibehalten der erarbeiteten Regelungsstruktur und Ergänzen der Drehkolbengebläse mit Frequenzumrichter, so dass ein stufenweises Zuschalten minimiert bzw. optimiert werden kann
$\text{NO}_3\text{-N}$	Fuzzy-untypische Konzentrationsschwankungen im Belebungsbeckenablauf durch a) ein zu kleines Denitrifikationsvolumen oder b) eine nicht ausreichende $\text{NO}_3\text{-N}$ -Rückführung in die Denitrifikationszone trotz belastungsabhängiger Regelung	Die Kontrollberechnung der Belebungsstufe mit den Daten während des Fuzzy-Logik Betriebes (s. Anhang A2) bestätigte mit: $V_{\text{D-Soll}} = 2.400 \text{ m}^3$ ein ausreichendes Denitrifikationsvolumen ($V_{\text{D-Ist}} = 3.100 \text{ m}^3$); somit scheint die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Rückführung während Spitzenbelastungen trotz maximalem Öffnungswinkel der Rezirkulationsklappe nicht ausreichende zu sein. In diesem Bereich sind strömungstechnische und bauwerkliche Veränderungen vorzunehmen.

3.4.2 Energieverbrauch

In diesem Kapitel wird der Energieverbrauch der mit Fuzzy-Logik geregelten Belebungsstufe dargestellt und mit den Werten des konventionellen Betriebs verglichen. Aufgrund der Tatsache, dass die zu vergleichenden Daten aus unterschiedlichen Zeiträumen mit abweichenden betrieblichen Rahmenbedingungen stammen, ist es für den Vergleich erforderlich, eine einheitliche Vergleichsgrundlage zu schaffen. Als Vergleichsbasis dient hier die eliminierte Schmutzfracht, die direkt auf die verbrauchte Energiemenge der Belebungsstufe bezogen wird. Es wird dabei auf die Größen $BSB_{5\text{-eliminiert}}$ und $NH_4\text{-}N_{\text{eliminiert}}$ zurückgegriffen. Da seit dem Jahr 1997 ein jährlicher Belastungsanstieg im Anlagenzulauf zu verzeichnen ist, werden auch die Zeiträume März bis April 1997 bzw. 1998 dargestellt.

Tab. 3.16: Energieverbrauch und –einsparung der Fuzzy-Logik Sauerstoffregelung in der Belebungsstufe

Parameter	Einheit	Fuzzy-Logik Betrieb	Konventioneller Betrieb			
		März bis April 2000	Juni 1998 bis Juli 1999	März bis April 1999	März bis April 1998	März bis April 1997
Energiebedarf ¹⁾	kWh/d	3.250	4.140	4.320	4.260	4.185
BSB_5 -Zulauffracht ²⁾	kg/d	4.260	3.150	3.310	2.590	-
BSB_5 -Eliminationsrate	%	99,5	99,3	99,3	98,9	-
BSB_5 -eliminierte Fracht	kg/d	4.240	3.130	3.290	2.560	-
$NH_4\text{-}N$ -Zulauffracht ²⁾	kg/d	480	375	415	390	360
$NH_4\text{-}N$ -Eliminationsrate	%	99,2	99,3	96,9	99,9	97,8
$NH_4\text{-}N$ -eliminierte Fracht	kg/d	475	370	405	390	350
spezifischer Energiebedarf	kWh/(kg BSB_5 eliminiert)	0,77	1,3	1,3	1,7	-
	kWh/(kg $NH_4\text{-}N_{\text{eliminiert}}$)	6,8	11	11	11	12
erzielte Energieeinsparung	% (BSB_5 eliminiert)	-	42	42	54	-
	% ($NH_4\text{-}N_{\text{eliminiert}}$)	-	39	36	37	43
	% (im Mittel)	-	40	39	46	43

1) Darin enthalten: Energieaufnahme der Gebläse und der Rührwerke in der Belebungsstufe
2) Mittelwerte; inkl. Rückbelastung aus der Schlammlinie

Wie aus der Tabelle 3.16 ersichtlich ist, resultiert – unter Berücksichtigung der eliminierten Schmutzfracht – aus dem bedarfsorientierten Sauerstoffeintrag mit Hilfe der Fuzzy-Logik Regelung eine Energieeinsparung von ca. 40 %. Bezogen auf den Vergleichszeitraum Juni 1998 bis Juli 1999 mit 4.140 kWh/d ergibt sich im Bereich der Belebungsstufe ein rechnerisches Einsparpotential von ca. 1.660 kWh/d bzw. ca. 604.000 kWh/a. Wird der Energieverbrauch der Fuzzy-Logik Regelung (3.250 kWh/d) direkt mit dem Verbrauch der konventionellen Regelung (4.140 kWh/d) verglichen, liegt eine absolute Energieeinsparung von 890 kWh/d bzw. 21,5 % vor.

In der Tabelle 3.17 werden orientiert am Handbuch „Energie in Kläranlagen“ des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft NRW (1999) anlagenspezifische Energiekennzahlen dargestellt und mit den Richt- bzw. Idealwerten des MURL verglichen.

Tab. 3.17: Energetische Kennwerte im Vergleich mit den Vorgaben des MURL

Beurteilungskriterium	Regelungsart	Verbrauchsbasis	anlagenspezifischer Kennwert	MURL ⁵⁾			
				Richtwert		Idealwert	
				kWh/d	kWh/(E a)	kWh/(E a)	%-Abweichung
e _{ges}	Konventionell ²⁾	5.970	41,5	37,5	+11	29,5	+41
	Fuzzy-Logik ³⁾	4.310	30,0		-20		+2
e _{BB} ¹⁾	Konventionell ²⁾	4.480	31,2	23,0	+36	18,0	+73
	Fuzzy-Logik ³⁾	2.650	18,4		-20		+2
	Fuzzy-Logik ⁴⁾	3.420	17,6		-23		-2

1) Darin enthalten: Belüftung, Rührwerke, Rezirkulation, Rücklaufschlamm

2) Daten von 06.98 bis 07.99; Einwohnermittelwert = 52.450 E

3) 40 % Energieeinsparung bezogen auf die Daten von 06.98 bis 07.99

4) Ansatz mit den Betriebsdaten März bis April 2000 = 70.800 E

5) MURL: Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft NRW; Handbuch "Energie in Kläranlagen", 1999

Aus der Tabelle wird deutlich, dass mit der konventionellen Betriebsweise die Ideal- und die Richtwerte des MURL teilweise deutlich überschritten wurden. Unter Berücksichtigung der Energieeinsparung mit Hilfe der auf ein Fuzzy-Logik-Kennfeld basierenden Sauerstoffeintragsregelung in der Belebungsstufe können die Richtwerte bis zu ca. 20 % unterschritten und die entsprechenden Idealwerte eingehalten werden.

4 Optimierungen in der Schlammlinie

4.1 Klärschlammwässerung

Parallel zur Umstellung der Regelungsstrategie in der Belebungsstufe erfolgten Versuchsreihen zur Klärschlammwässerung bei Konditionierung mit organischen Flockungshilfsmitteln. Es wurden halbtechnische Versuche mit einer Kammerfilterpresse durchgeführt. Die wesentlichen Daten sind in der Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Tab. 4.1: Daten der Versuchsreihen mit organischen Konditionierungsmitteln

Organisches Konditionierungsmittel	
Ansatz:	0,2 %ige Lösung
Verbrauch:	13 kg/t TS
Klärschlamm-trockensubstanzgehalt	
Eingangsgehalt:	4 bis 5 % TS
Ausgangsgehalt:	20 bis 25 % TS
Kammerfilterpresse	
Presszeit:	1,5 bis 2,0 h
Pressdruck:	16 bar

Auffällig bei den Versuchen waren – im Vergleich zu Literaturwerten (s.u.) – insbesondere der erhöhte Chemikalienbedarf und der geringe TS-Ausgangsgehalt des entwässerten Schlammes. In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass es sich um halbtechnische Versuche handelte. Zu nennen sind hierbei die teilweise nicht ausreichend intensive Einbringung des organischen Konditionierungsmittels (Handmischer), die begrenzte Größe des Vorlagenbehälters (120 l) und der Kammerfilterpresse (5 Kammern mit 13,7 l Filtervolumen). Aufgrund dessen werden in der folgenden Tabelle zur Ermittlung der anfallenden Entsorgungskosten neben den derzeitigen Betriebsdaten und den Werten der Versuchsreihe auch praxisübliche Werte angesetzt.

Tab. 4.2: Jährliche Klärschlamm Entsorgungskosten in Abhängigkeit vom Konditionierungsmittel

Szenario	Erzielter Trockensubstanzgehalt	entstehende Klärschlammmenge	Kosten für die Konditionierungsmittel ²⁾	Entsorgungskosten ³⁾	Gesamtkosten
	%	t/a	DM/a	DM/a	DM/a
Derzeitige Entwässerung mit anorganischem Konditionierungsmittel (Kalk) ¹⁾	36	3.150	70.000	220.500	290.500
organische Konditionierungsmittel:					
Versuchsreihen	25	3.900	101.400	273.100	374.500
Praxiswerte ^{4) 5)}	35	2.790	62.400	195.100	257.500

1) Daten aus dem Betriebstagebuch 1999; Klärschlammmenge inkl. 440 t Kalk

2) Kalk: 102,- DM/t; Eisen-II-Chlorid: 95 DM/t; org. Konditionierungsmittel: 8.000 DM/t Wirksubstanz; inkl. Mehrwertsteuer

3) angesetzt mit 70,- DM/t

4) Trockensubstanzgehalt entnommen aus [WAGNER, 1990]

5) mit 8 kg Wirksubstanz/ t TS entnommen aus [ATV-Handbuch, 1996]

Wie aus der Tabelle 4.2 ersichtlich ist, wird ein Einsatz organischer Konditionierungsmittel erst unter praxisüblichen Bedingungen wirtschaftlich (ca. 33.000 DM Einsparungen/a). Eine Konditionierung mit Polymeren kann insbesondere bei steigenden Entsorgungskosten sinnvoll sein. Im Rahmen einer großtechnischen Umsetzung kann durch weitere Optimierungsschritte im alltäglichen Betrieb eine weitere Kostenreduzierung erfolgen. Durch eine verfeinerte Dosierung und Steuerung kann z. B. der Verbrauch des kostenintensiven organischen Konditionierungsmittels erheblich gesenkt werden [SCHMITT, 1990]. Vor einer endgültigen Umsetzung sind jedoch weitere Untersuchungen zur Entwässerung des Schlammes bei polymerer Konditionierung erforderlich. Gegebenenfalls können verfahrenstechnische Probleme, wie z. B. erhöhter Reinigungsaufwand für verklebte Filtertücher, zu einem unwirtschaftlichen Betrieb führen.

4.2 Schlammwasserrückführung

Die Rückführung des Schlammwassers erfolgt im Zulaufbereich der ARA (Pumpensumpf des Zulaufhebwerks im Bereich der Fäkalienannahmestation, vgl. Kapitel 2). Die Beprobung des Schlammwassers ergab die in Tabelle 4.3 dargestellten Belastungen; es wurden der Ablauf der Schlammeindicker (Trommelsiebe) und der Schlamm-entwässerung (Kammerfilterpressen) mittels qualifizierter Stichproben beprobt.

Tab. 4.3: Belastungen des Schlammwassers

Parameter		Schlammeindickung			Schlammmentwässerung		
		Mittelwert	Min.-Wert	Max.-Wert	Mittelwert	Min.-Wert	Max.-Wert
CSB	mg/l	113	92	126	1.076	871	1.309
BSB ₅ ¹⁾	mg/l	38	31	42	359	290	436
N _{ges}	mg/l	13	10	18	1.397	1.241	1.491
NH ₄ -N	mg/l	1,3	0,37	3,4	1.245	1.028	1.352
P _{ges}	mg/l	0,86	0,27	1,8	4,1	3,2	6,3
Datenanzahl		12			6		

1) Da nur eine Analyse vorhanden, aus Literaturwerten und dem Verhältnis CSB zu BSB₅ abgeleitet.

Aus der 1999 abgezogenen Überschussschlammmenge und den entsprechenden Entwässerungsgraden der einzelnen Aggregate (Daten aus dem Betriebstagebuch) ergeben sich folgende mittlere Schlammwassermengen:

- Schlammeindickung: ca. 300 m³/d
- Schlammmentwässerung: ca. 25 m³/d

Die Einleitung des Schlammwassers erfolgt derzeit i. d. R. zwischen 8.00 bis 16.00 Uhr parallel zur Eindickung bzw. Entwässerung. Aus den Belastungen und Mengen ergeben sich die in der Tabelle 4.4 dargestellten Rücklaufmengen.

Tab. 4.4: Resultierende Frachten aus der Schlammwasserrückführung

Parameter		Schlammeindickung			Schlammmentwässerung			Gesamt
		Mittelwert	Min.-Wert	Max.-Wert	Mittelwert	Min.-Wert	Max.-Wert	Mittelwert
CSB	kg/d	34	28	38	27	22	33	61
BSB ₅ ¹⁾	kg/d	11	9	13	9,0	7,3	11	20
N _{ges}	kg/d	4,0	3,1	5,3	35	31	37	39
NH ₄ -N	kg/d	0,38	0,11	1,0	31	26	34	32
P _{ges}	kg/d	0,26	0,08	0,53	0,10	0,08	0,16	0,36
Datenanzahl		12			6			

1) Da nur eine Analyse vorhanden, aus Literaturwerten und dem Verhältnis CSB zu BSB₅ abgeleitet.

Die erarbeitete Fuzzy-Logik Regelung reagiert im Vergleich zu starren Regelungssystemen durch eine Erhöhung oder Verringerung der Sauerstoffeintrages direkt auf Belastungsveränderungen im Belebungsbecken. Als Datenbasis dienen die on-/in-line-gemessenen Stickstoffkonzentrationen im Belebungsbeckenablauf. Während Phasen mit geringen Stickstoffkonzentrationen erfolgt ein Sauerstoffmindesteintrag zur Erhaltung des Kohlenstoffabbaus. Wie durch die Versuchsreihen bestätigt wurde, können somit auftretende Belastungsspitzen – auch aus der Schlammwasserrückführung – abgefangen werden (s. Kapitel 3), so dass derzeit eine Zwischenspeicherung des Schlammwassers nicht notwendig ist.

Eine solche Maßnahme kann jedoch bei einem zukünftigen Anstieg der Anlagenauslastung eine Möglichkeit sein, Belastungsspitzen (i. d. R. an den Wochentagen von 12.00 bis 17.00 Uhr) durch innerbetriebliche Maßnahmen abzdämpfen und damit Beckenvolumina einzusparen. Die technische Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit einer solchen Maßnahme wurden im Rahmen dieses Projektes nicht weitergehend betrachtet.

4.3 Schlammalter

Prinzipiell bedeutet eine Reduzierung des Schlammalters durch eine Senkung des Trockensubstanzgehaltes im Belebungsbecken eine Verringerung des Sauerstoff- und somit des Energiebedarfs. Der erforderliche TS-Gehalt_{BB} wird u. a. erheblich durch die Abwassertemperatur beeinflusst, die wiederum saisonalen Schwankungen unterliegt. In der nachfolgenden Abbildung 4.1 ist der Temperaturverlauf (über 24 h-gemittelte In-line-Werte im Zulauf) über den Zeitraum 01.05.1997 bis 01.04.2000 dargestellt.

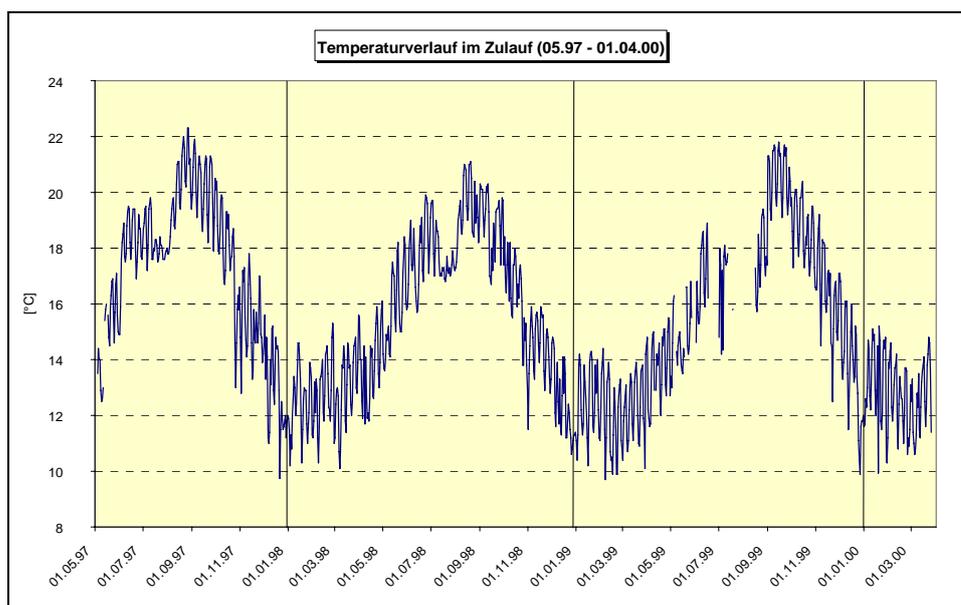


Abb. 4.1: Abwassertemperaturen im Anlagenzulauf (01.05.1997 – 01.04.2000)

Der Zusammenhang von erforderlichem TS-Gehalt_{BB} und Abwassertemperatur bei konstanter Zulaufkraft ist in der nachstehenden Abbildung 4.2 dargestellt. Die ange-setzten Zulaufkräften entsprechen den Betriebsdaten der Versuchsphase (vgl. Anhang A2).

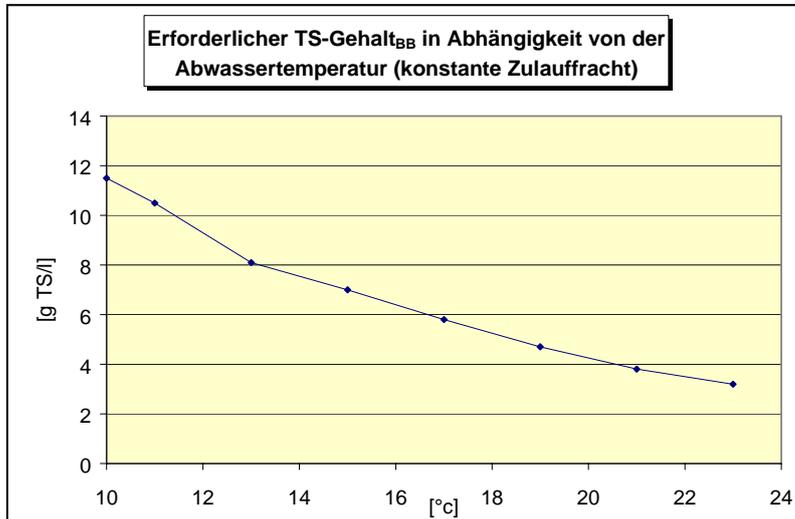


Abb. 4.2: Abhängigkeit des erforderlichen TS-Gehaltes_{BB} von der Abwassertemperatur

Aus der Abbildung 4.2 wird deutlich, dass ab Abwassertemperaturen von ca. 18°C der TS-Gehalt_{BB} auf 4 bis 5 g/l gesenkt werden kann. Dabei ist jedoch mit keiner nennenswerten Energieeinsparung zu rechnen, da gleichzeitig mit dem Temperaturanstieg die Löslichkeit des Sauerstoffs sinkt. Ein Anstieg von z. B. 10°C auf 20°C bedeutet ca. 20 % weniger Löslichkeit, so dass seitens der Belüftungsaggregate eine höhere Leistungsaufnahme erforderlich ist. Somit wird die Energieeinsparung durch eine Optimierung des Schlammalters (TS-Gehalt_{BB}) sehr gering ausfallen.

5 Nutzung freier Beckenvolumina

Durch die Umstellung der Anlage auf Einstraßigkeit steht auf der ARA Emsdetten-Austum ein verfügbares Beckenvolumen von ca. 9.000 m³ als zweigeteiltes Rundbecken zur freien Verfügung. Dieses Rundbecken ist unterteilt in ein 3.100 m³ großes innenliegendes Denitrifikationsbecken (optional Belüftungsvorrichtungen vorhanden) und ein 5.900 m³ fassendes außenliegendes Nitrifikationsbecken. Derzeit ist dieses Becken teilgefüllt, um ein Aufschwimmen aufgrund des hohen Grundwasserspiegels zu verhindern. Ein Einsatz dieses Belebungsbeckens in seiner eigentlichen Funktion als zweite Reinigungsstraße ist in den nächsten Jahren bei den derzeitigen Zulaufwerten auszuschließen, da durch den Einsatz der Fuzzy-Logik für eine bedarfsorientierte Sauerstoffregelung und eine angepasste Nitratrückführung in der Belebungsstufe ein einstraßiger Reinigungsbetrieb möglich ist (s. Kapitel 3), der die gesetzlichen Anforderungen im Zusammenspiel mit den folgenden Verfahrensstufen (insbesondere Schönungsteich) jederzeit gewährleisten kann.

Aus wirtschaftlichen und auch aus reinigungstechnischen Gründen sollte zukünftig eine Verwendung des frei zur Verfügung stehenden Beckens angestrebt werden. Prinzipiell kommen folgende Einsatzgebiete in Frage:

a) Erhalten der derzeitigen Funktion als Belebungsbecken

Bei einem Ausfall der betriebenen Belebungsstufe durch z. B. Wartungsarbeiten oder bei einem zukünftigen Anstieg der Anlagenauslastung kann auf die freistehenden Kapazitäten direkt zurückgegriffen werden.

b) Unterteilen in mehrere Becken für:

- eine Vorklärung zur Entlastung der Belebungsstufe (mit ca. ½-h Aufenthaltszeit ergibt sich ein Volumen = 200 m³)
- ein Zulaufspeicherbecken zur Abpufferung der Zulaufspitzen (ca. 5.000 m³)
- ein Schlammwasserspeicherbecken für eine gezielte Schlammwasserzugabe während belastungsschwacher Phasen (ca. 500 m³)

Der Einsatz eines Teilvolumens als ein Anaerobbecken für eine vermehrte biologische Phosphorelimination im Hauptstromverfahren (ca. 2.400 m³) ist gegenwärtig nicht erforderlich, da die betriebene Simultanfällung und Flockungsfiltration den geforderten Ablaufwert von 1 mg/l einhalten können. Aufgrund allgemeiner Tendenzen im Abwasserbereich [JARDIN, 1998] ist ein Anstieg der gegenwärtigen Phosphorkonzentrationen (ca. 10 mg/l) bzw. -frachten (ca. 1,7 g/(E · a)) im Anlagenzulauf der ARA Emsdetten-Austum nicht zu erwarten. Zudem haben Praxiserfahrungen gezeigt, dass bei der biologischen Phosphorelimination eine exakte Vorhersage der minimalerzielbaren Phosphorkonzentration nicht möglich ist. Diese Variabilität führt i. d. R. dazu, dass zum Einhalten des Überwachungswertes eine unterstützende chemisch-physikalische Phos-

phorelimination – meistens ausgeführt als Simultanfällung – weiterhin erfolgen muss. Des Weiteren sind negative Auswirkungen, wie z. B. das Auftreten von Schaumproblemen im Bereich der Belebungsstufe und anaeroben Stabilisierung, nicht auszuschließen [JARDIN, 1998].

Ein Umbau des freien Beckens in mehrere Teilbecken ist aufgrund der erarbeiteten Regelung (s. Kapitel 3) derzeit nicht zwingend erforderlich und zudem mit einem finanziellen Aufwand verbunden. Aufgrund auffälliger steigender Tendenzen bei der Anlagenauslastung seit 1997 bis April 2000 sollte zunächst die Funktion des freien Beckens als Belebungsbecken beibehalten werden (s. o.). Dazu ist die Bereitstellung einer entsprechenden Messeinrichtung ($\text{NH}_4\text{-N}$ - und $\text{NO}_3\text{-N}$ -Messgeräte) für das freistehende Belebungsbecken erforderlich.

Parallel dazu sollten Optimierungsmaßnahmen im Zulaufbereich der ARA (z. B. Verringerung des Fremdwassereintrags oder gezielte Nutzung des Stauraums als Zulaufzwischenpeicher) durchgeführt werden, die ebenfalls zu einer Entlastung der ARA Emsdetten-Austum führen. Maßnahmen dieser Art sind einem Umbau des freien Beckens zunächst vorzuziehen.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen eines vom Landesumweltamt NRW geförderten Forschungsprojektes der „Initiative ökologische und nachhaltige Wasserwirtschaft NRW“ wurden auf der ARA Emsdetten-Austum Untersuchungen zur Verringerung des Energiebedarfs der Belebungsstufe durchgeführt. Zudem erfolgten Betrachtungen zu Optimierungen innerhalb der Schlammlinie und zur Nutzung freier Beckenvolumina.

Der Schwerpunkt der Untersuchung lag in der großtechnischen Umsetzung einer **neuen Regelung im Bereich der Belebungsstufe auf der Basis von Fuzzy-Logik** für eine bedarfsorientierte Sauerstoffzufuhr und angepasste Nitratrückführung. Durch die Ausnutzung der erhöhten Prozesstransparenz (permanente Erfassung der Zustände im Belebungsbecken) mit Hilfe einer auf Fuzzy-Logik basierenden Regelung konnte eine:

- Umstellung vom zweitstraßigen zum einstraßigen Betrieb, eine
- Verringerung der maximalen Ablaufwerte, eine
- Energieeinsparung von ca. 40 % und eine
- Unterschreitung bzw. Einhaltung der vom MURL verfassten Richt- und Idealwerte für die energetischen Beurteilungskriterien „ e_{ges} “ und „ e_{BB} “ (beides in $kWh/(E \cdot a)$)

erreicht werden. Aufgrund der Ergebnisse der großtechnischen Versuche wird eine **Umsetzung** dieser auf Fuzzy-Logik basierenden Regelung **empfohlen**.

Die in Kapitel 3 dargestellten Stickstoffkonzentrationsganglinien im Belebungsbeckenablauf – insbesondere die NO_3 -N-Ablaufwerte – zeigen bzgl. der Prozessstabilität ein für Fuzzy-Logik Betrieb untypischen Verlauf auf. Zur Erhöhung der Prozessstabilität können die im folgenden aufgeführten Aspekte genannt werden:

- ⇒ NH_4 -N: Anpassen der Belüftungsaggregate für einen besser einstellbaren Sauerstoffgehalt in der Belebungsstufe
- ⇒ NO_3 -N: Strömungstechnische Umbaumaßnahmen für eine Erhöhung der Rückführungsrate in die Denitrifikationszone

Die Betrachtungen der möglichen Optimierungsmaßnahmen in der Schlammlinie haben gezeigt, dass

- eine Konditionierung mit Polymeren nur bei in Zukunft steigenden Entsorgungskosten sinnvoll sein kann. In diesem Zusammenhang sind weitere Untersuchungen zur Entwässerung des Schlammes bei polymerer Konditionierung erforderlich

- die Reduzierung des Schlammalters durch die Verringerung des TS-Gehaltes_{BB} auf 4 bis 5 g/l nur bei Temperaturen von > 18° C erfolgen kann. Eine signifikante Energieeinsparung ist aufgrund steigender Leistungsaufnahme der Belüftungsaggregate durch sinkende Sauerstofflöslichkeit auszuschließen.

Die Umstellung auf Einstraßigkeit hat ein **freistehendes Beckenvolumen** von 9.000 m³ zur Folge. Als Nutzungsmöglichkeiten bieten sich an:

- ⇒ Unterteilen in mehrere Becken für eine Vorklärung, ein Zulaufspeicherbecken und ein Schlammwasserspeicherbecken zur Entlastung der Belebungsstufe
- ⇒ Erhalten der derzeitigen Funktion als Belebungsbecken

Wie die Versuchsergebnisse der großtechnischen Untersuchung zur Entwicklung einer Fuzzy-Logik-gestützten Regelung der Belebungsstufe gezeigt haben, kann in der derzeitigen Belastungssituation durch die belastungsabhängige Regelung der Sauerstoffzufuhr und der angepassten Nitratrückführungsrate ein stabiler Prozess erzeugt werden, der die gesetzlichen Anforderungen im Zusammenspiel mit den folgenden Verfahrensstufen (insbesondere Schönungsteich) gewährleisten kann. Ein Umbau ist folglich aus regelungstechnischen Gründen nicht erforderlich.

Aufgrund der bei der Auswertung der Betriebstagebücher (Mai 1997 bis März 2000) festgestellten Tendenzen einer stetig ansteigenden Anlagenauslastung ist auch in den nächsten Jahren ein Belastungsanstieg nicht auszuschließen. Aufgrund dessen ist die **Erhaltung der Funktion des freien Beckens als Belebungsbecken zu empfehlen**. Zudem kann das freie Becken im Falle von Wartungsarbeiten als Ausweichbecken oder als Havariebecken eingesetzt werden. Dazu ist die Bereitstellung einer entsprechenden Messeinrichtung (NH₄-N- und NO₃-N-Messgeräte) für das freistehende Belebungsbecken erforderlich.

Ergänzend zu den Maßnahmen auf der ARA Emsdetten-Austum sind Optimierungsmaßnahmen im Zulaufbereich der ARA (z. B. Verringerung des Fremdwassereintrags oder gezielte Nutzung des Stauraums als Zulaufzwischenpeicher) für eine Entlastung der Anlage empfehlenswert. Maßnahmen dieser Art sind einem Umbau des freien Belebungsbeckens zunächst vorzuziehen.

7 Literaturverzeichnis

- ATV-A 131 Abwassertechnische Vereinigung e.V.
Arbeitsblatt ATV-A 131 (Entwurf) „Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen“, April 1999
- ATV-Handbuch „Klärschlamm“
4. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, 1996
- Jardin, N. „Möglichkeiten und Grenzen der Kosteneinsparung bei der biologischen Phosphorelimination“
in: „Einsparung von Kosten für Betriebsmittel, Energie und Personal auf Abwasserbehandlungsanlagen“, Institut WAR der TU Darmstadt, Schriftenreihe WAR Nr. 108, 1998
- MURL Handbuch: „Energie in Kläranlagen“
Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft NRW
September 1999
- Reckerzügl, Th. „Ammoniumelimination in Kläranlagen und die damit verbundenen
Brigezu, St. CO₂-Emissionen“
Otterpohl, R. 1999, Korrespondenz Abwasser 11, S. 1730ff
Lindert, M.
- Wagner, H. „Erfahrungen mit der organischen Konditionierung von kommunalem Klärschlamm in Kammerfilterpressen“
genannt in: „Betrieb von Schlammbehandlungsanlagen“, Kunz et al, 1990
- Schmitt, W. „Betriebserfahrungen mit der Polymerkonditionierung beim Betrieb von Entwässerungsmaschinen“
genannt in: „Betrieb von Schlammbehandlungsanlagen“, Kunz et al, 1990

8 Anhang

A1 Bauwerke und Aggregate auf der ARA Emsdetten-Austum

A2 Anlagenauslegung mit den Daten während des Fuzzy-Logik Betriebes (02.03. – 16.04.2000) (ARA-BER, Version: 4/R039 Rev. 16)

A1 Bauwerke und Aggregate auf der ARA Emsdetten-Austum

Die wesentlichen Bauwerke und Aggregate der ARA sind:

- Zulauf-Schneckenpumpwerk
 - Schneckenanzahl: 4
 - Fördervolumenstrom: je 666 m³/h
 - Förderhöhe: ca. 9 m

- Rechenanlage
 - Typ: Gegenstromrechen (Fa. Schreiber)

- Belüfteter Sand-/Fettfang
 - Länge: 20 m

- Fällungsmittel-Dosierstation
 - Fällungsmittel: Eisen(II)-Sulfat, Eisenchloridsulfat

- Belebungsbecken
 - Anzahl: 2
 - Volumen (gesamt): je 9.000 m³
 - davon Denitrifikation: je 3.100 m³
 - Anzahl Rührwerke: je 8 (davon 2 in der Denitrifikationszone)

- Nachklärbecken
 - Anzahl: 2
 - Volumen: je 2.782 m³
 - Oberfläche: je 962 m²
 - Tiefe (2/3): 2,92 m

- Schönungsteich
 - Volumen: 6.300 m³
 - Oberfläche: 4.000 m²

- Flockungsfiltration
 - Oberfläche: 173,4 m²
 - Filteraufbau: 1,4 m Hydroanthrazit 1,6/2,5 mm
0,4 m Quarzsand 0,7/1,2 mm
 - zusätzliche Fällmittel: FeClSO₄

Filtrationsdruck:	1,81 - 2,14 m WS
max. Filtergeschwindigkeit:	15 m/h
Überstauhöhe:	2 m
Filterbettbeladung:	0,73 - 0,96 kg TS/(m ³ *d)
• Rücklaufschlammumpwerk	
Schneckenanzahl:	4
Fördervolumenstrom:	2.000 m ³ /h
• Turboverdichter	
Anzahl:	3
Durchsatz:	je 167 Nm ³ /min
Regelbereich:	bis auf 66 Nm ³ /min
• Schlammeindickung	
maximaler Durchsatz:	2.000 m ³ /d
• Faulbehälter	
Volumen:	3.000 m ³
• Gasbehälter:	
Speichervermögen:	1.000 m ³
• Kammerfilterpresse	
Anzahl:	2
Kammern:	je 80
Plattengröße:	1,20 m x 1,20 m
Pressschlammvolumen:	je 2,6 m ³

**A2 Anlagenauslegung mit den Daten während des Fuzzy-Logik Betriebes
(02.03. – 16.04.2000) (ARA-BER, Version: 4/R039 Rev. 16)**

Kenndaten:

Anlagentyp :	vorgeschaltete Denitrifikation
Gesamtes BB Volumen :	8.459 m ³
Volumen Nitrifikation :	6.094 m ³
Volumen Denitrifikation :	2.365 m ³
V Deni / V ges.	0,28 -
Bemessungstemperatur	13,2 °C
mittlere TS - Konzentration :	8,10 kg/m ³
aerobes Schlammalter	12,65 d
Schlammalter ges.	17,56 d
Benötigtes Rückführverhältnis	4,94 -

Ablaufwerte :

NH ₄ -N in der Spitze (Bemessungswert)	5,0	mg/l
NH ₄ -N im Mittel (Bemessungswert)	1,0	mg/l
NO ₃ -N im Mittel (Bemessungswert)	11,0	mg/l
Trockenwetterzufluss Qt	720	[m ³ /h]
Mischwasserzufluss Qm	1.800	[m ³ /h]
Tageszufluss Qd	10.025	[m ³ /d]

Zulauffrachten zum BB mit Rückbelastung (85 %-Werte):

BSB ₅	4.840	kg/d
TS ₀	3.300	kg/d
NH ₄ -N	570	kg/d
N _{org}	250	kg/d
TKN	820	kg/d
NO ₃ -N	12	kg/d
P _{ges}	100	kg/d
Säurekapazität	10,0	mmol/l
Schwankungsfaktor	2,7	

Phosphoreliminierung:

Fällung mit	Eisen(III) - Salz
Fällmitteldosis	16,05 g/m ³
Erreichbarer Ablaufwert P	1,00 mg/l