

MODELLGESTÜTZTE DOSIERUNG EXTERNER C-QUELLEN ALS FUNKTION DER MASSENBILANZIERTEN DENITRIFIKATIONS- UND NITRIFIKATIONSGESCHWINDIGKEITEN SIMULTAN ZUR STEUERUNG/REGELUNG DER STICKSTOFFELIMINATION AM BEISPIEL DER VORGESCHALTETEN DENITRIFIKATION

J. Strunkheide, G. Bahre, Bochum

1. EINLEITUNG

Durch die Rahmen-Abwasserbehandlungsvorschrift in Deutschland ist die zulässige Stickstoff-Ablaufkonzentration aus kommunalen Klärwerken in die Gewässer limitiert. Danach sind im Ablauf der kommunalen Klärwerke ab der Größenklasse 3 bzw. ab 5000 Einwohnergleichwerten in der 2-Std.-Mischprobe bzw. in der qualifizierten Stichprobe eine Ammonium-Stickstoffkonzentration ≤ 10 mg/l und eine gesamte anorganische Stickstoffkonzentration ≤ 18 mg/l einzuhalten. Für die kommunalen Klärwerke besteht somit aufgrund der rechtlichen Anforderungen ein notwendiger Handlungsbedarf zur weitergehenden Abwasserreinigung mit einer gezielten biologischen Stickstoff-Elimination.

Einige Klärwerke sind trotz Auslegung für die weitergehende Stickstoffelimination aufgrund eines ungünstigen TKN/BSB₅-Verhältnisses nicht in der Lage, die Einhaltung der o. g. Überwachungswerte stets zu gewährleisten, so daß der Einsatz zusätzlicher Kohlenstoffquellen immer häufiger notwendig wird. Der aktuelle tatsächlich erforderliche C-Bedarf sollte aus wirtschaftlichen Gründen so exakt wie möglich ermittelt werden. Insbesondere eine Überdosierung externer C-Quellen bewirkt eine unnötig erhöhte Überschußschlammproduktion und führt somit zwangsläufig bei der Schlammbehandlung zu Mehrkosten. Eine bedarfsorientierte geregelte bzw. gesteuerte Dosierung ist daher anzustreben.

Durch den betriebsbegleitenden Einsatz dynamischer Modelle in Verbindung mit einer geeigneten MSR-Technik auf kommunalen Klärwerken mit der Zielsetzung, die jeweils optimale Betriebseinstellung zu ermitteln, ist eine Möglichkeit gegeben, die bedarfsorientierte Dosierung externer C-Quellen modellgestützt als Funktion der massenbilanzierten Denitrifikations- und Nitrifikationsgeschwindigkeit *simultan* zur Steuerung/Regelung der Stickstoffelimination zu realisieren, um die Stickstoff-Überwachungswerte mit einem deutlichen Sicherheitsabstand einzuhalten. Speziell für das Verfahren der vorgeschalteten Denitrifikation wird ein Konzept für die Dosierung externer C-Quellen vorgestellt, das auf der On-line-Ermittlung der *Stickstoff-Umsatzgeschwindigkeiten* basiert. Die Stickstoff-Umsatzgeschwindigkeiten werden auf der Basis von on-line durchgeführten Stickstoff-Massenbilanzen ermittelt (Strunkheide, 1994).

Prinzipiell möglich im Hinblick auf die Reduktion der Stickstofffracht im Zulauf zur biologischen Stufe ist die separate Behandlung der Prozeßwässer aus der anaeroben Schlammbehandlung, wodurch eine Verringerung der Stickstofffracht um bis zu 20 % erreicht werden kann. Zu diesen Verfahren zählen z.B. die Ammoniumstrippung und die MAP-Fällung, die jedoch in der Betriebsführung nicht unproblematisch und dazu noch relativ kostenintensiv sind. Diese separaten Behandlungsverfahren werden in diesem Beitrag nicht weiter verfolgt.

2. EXTERNE C-QUELLEN

Die externen C-Quellen können prinzipiell differenziert werden in

- speziell hergestellte industrielle Substrate (Industriesubstrate) und
- industrielle Reststoffe

2.1 Speziell hergestellte industrielle Substrate (Industriesubstrate)

In Tabelle 2.1 sind einige der in der Abwasserreinigung häufig eingesetzten Industriesubstrate sowie ihre spezifischen Kennwerte vergleichend zusammengestellt.

Tabelle 2.1: Kennwerte häufig eingesetzter Industriesubstrate (Baumann, 1993)

Substrat	Struktur	Dichte [kg/l]	g Substrat/ g $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{DN}}$ **	Schlammanfall g TS/g $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{DN}}$	CSB g CSB/g Substrat
Methanol	CH_3OH	0,79	2,5	0,53	1,5
Essigsäure	CH_3COOH	1,00	3,5	0,55	1,067
Ethanol***	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	0,78	2,0	0,82	2,1
Acetol-20	*	1,02	≈3,5	≈0,73	≈0,8
Acetol-100	*	0,82	≈2,1	≈0,82	≈1,5

* modifizierte alkoholische acetathaltige Lösung bzw. Gärungsalkohol auf Ethanolbasis

** unter Berücksichtigung der Biomassenproduktion; in der Regel muß überstöchiometrisch dosiert werden

*** mit Aceton vergällt

2.1.1 Methanol

Methanol dient überwiegend zur Herstellung von Formaldehyd und wird nicht zuletzt wegen des relativ günstigen Preises in der Abwasserreinigung häufig eingesetzt. Beim Einsatz von Methanol als externe C-Quelle ist im Gegensatz zu anderen C-Quellen in der Regel eine Adaptionszeit, die bei ca. einem Monat liegt, zu berücksichtigen. Die Ursache für die Adaptionszeit liegt in der Generationszeit derjenigen Mikroorganismen, die befähigt sind, Methanol als C-Quelle zu nutzen. Methanol ist folglich für eine diskontinuierliche Dosierung nicht als besonders geeignet anzusehen.

2.1.2 Essigsäure

Essigsäure ist ebenso wie Methanol eine farblose, klare Flüssigkeit, jedoch mit einem stark stechenden Geruch. Hergestellt wird Essigsäure aus Methanol und Kohlendioxid. Essigsäure wird aufgrund des relativ hohen spezifischen Preises seltener in der Abwasserreinigung eingesetzt. Im Gegensatz zu Methanol ist Essigsäure für die Mikroorganismen in der Regel verfügbar und besitzt daher keine Adaptionszeit.

2.1.3 Ethanol

Ethanol weist im Gegensatz zu Methanol und Essigsäure einen wesentlich höheren Biomassen-aufbau auf. Der Flammpunkt liegt ebenso wie bei Methanol sehr niedrig, so daß aufgrund der leichten Entzündbarkeit geeignete Vorsichtsmaßnahmen zu treffen sind.

2.1.4 Acetol-Produkte

Die Acetol-Produkte sind in Deutschland relativ neu auf dem Markt. Die Herstellung folgt auf der Basis von Ethanol und Acetaten.

2.2 Industrielle Reststoffe

Aus ökologischen und wirtschaftlichen Aspekten im Hinblick auf die Minimierung der Gesamt-Umweltbelastung ist der Einsatz industrieller Reststoffe anstelle der speziell industriell hergestellten Substrate anzustreben. Auf diese Weise kann sowohl eine Reduzierung der Betriebskosten kommunaler Klärwerke als auch eine Reduzierung der Entsorgungskosten der Industriebetriebe realisiert werden. Das jeweilige Industrieabwasser ist jedoch vor der Verwendung auf seine Eignung (Qualitätssicherung) zu überprüfen. Als geeignet haben sich in

der Vergangenheit besonders Abwässer der Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie erwiesen. Eine stöchiometrische Berechnung der erforderlichen Dosiermenge ist in der Regel nicht möglich, so daß man auf die Durchführung von Versuchsreihen (z.B. Durchlauf- oder Standversuche im Labor- oder halbertechnischen Maßstab) angewiesen ist.

3. ÜBERSICHT ÜBER STEUERUNGS- UND REGULINGS-KONZEPTE FÜR DIE DOSIERUNG EXTERNER KOHLENSTOFFQUELLEN FÜR DAS VERFAHREN DER VORGESCHALTETEN DENITRIFIKATION

3.1 Regelung der Substratdosierung als Funktion der Nitratkonzentrationen im Ablauf der Denitrifikationszone und im Ablauf der Nitrifikationszone

Bei dieser relativ einfachen konventionellen Regelungsstrategie erfolgt die Substratdosierung simultan zur Nitratregelung im Denitrifikationsbecken, bei der der Interne Rezirkulationsvolumenstrom als Stellgröße fungiert. Ziel ist die volle Ausnutzung der durch die Dosierung der externen C-Quelle im Hinblick auf die Einhaltung einer vorgegebenen Nitratlaufkonzentration der Belebungsanlage zu erhöhenden Denitrifikationskapazität bei gleichzeitiger Minimierung der Rezirkulationsenergie. Voraussetzung hierfür ist zum einen die Messung des Nitratgehaltes im Ablauf der Denitrifikationszone, der als Regelgröße für die Nitratrückführung benutzt wird, zum anderen die Messung des Nitratgehaltes im Ablauf der Nitrifikationszone. Die Messung des Nitratgehaltes im unteren Meßbereich ($< 0,5 \text{ mg/l}$) ist im Ablauf der Denitrifikationszone inzwischen problemlos möglich. Der Interne Rezirkulationsvolumenstrom kann bei dieser konventionellen Regelungsstrategie beispielsweise über einen PID-Regler in Abhängigkeit von der Abweichung der Nitratstickstoff-Konzentration vom Sollwert geregelt werden.

3.2 Regelung der Substratdosierung als Funktion der dem anoxischen Reaktor zugeführten BSB-Fracht und der rezirkulierten Nitratfracht

Die Nitratreduktion in der Denitrifikationszone ist in hohem Maße von der Verfügbarkeit von leicht abbaubarem organischem Substrat (Kohlenstoffquelle) abhängig. Londong (1993) versuchte, durch den Einsatz eines BSB-M3-Gerätes im Zulauf zum Denitrifikationsbecken, eine Abschätzung des zufließenden leicht abbaubaren Substrates vorzunehmen. Die Messung der BSB-M3-Zulauf- und der Nitratlaufkonzentration (Bild 3.1) bildete die Basis für die Steuerung der in die Denitrifikationszone zurückzuführenden Nitratfracht.

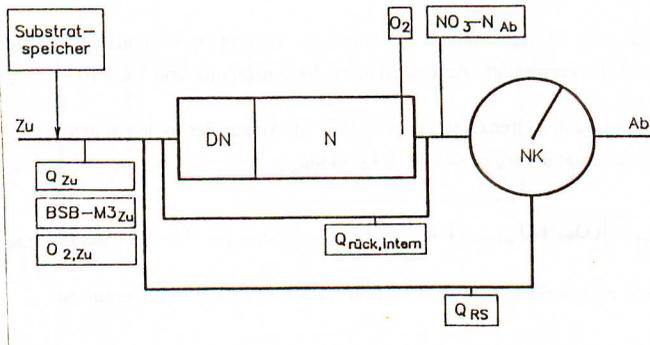


Bild 3.1: Verfahrensschema zur Steuerung der Substratdosierung bei der vorgeschalteten Denitrifikation mit erforderlichen Meßstellen, Parametern und Stellgliedern nach Londong (1993)

Für den Fall, daß infolge mangelnden Substratangebotes die Nitratreduktion im Hinblick auf die Einhaltung eines vorgegebenen Nitratstickstoffablauf-Grenzwertes ($\text{NO}_3\text{-N}_{\text{Grenz}}$) nicht über eine Erhöhung der rezirkulierten Nitratfracht gesteigert werden kann, ist die Dosierung eines leicht abbaubaren Substrates (C-Quelle) in den Zulauf der anoxischen Zone erforderlich. Unter Berücksichtigung des über den Zulauf und den Rücklauf eingetragenen Sauerstoffs ergibt sich mit den Bezeichnungen von Londong (1993) folgende Beziehung :

$$\left[(Q_{\text{rück,intern}} + Q_{\text{RS}}) \cdot (\text{NO}_3 - \text{N}_{\text{Ab}}) \right] / \left[Q_{\text{Zu}} \cdot ((\text{BSB} - \text{M3}_{\text{Zu}}) - \text{O}_{2,\text{Zu}}) - (Q_{\text{rück,intern}} \cdot \text{O}_{2,\text{rück}}) \right] = 1/n \quad (3.1)$$

mit:

- $Q_{\text{rück,intern}}$ = Interner Rezirkulationsvolumenstrom [m^3/h]
- Q_{Zu} = Zulaufvolumenstrom [m^3/h]
- Q_{RS} = Rücklaufschlammvolumenstrom [m^3/h]
- $\text{BSB} - \text{M3}_{\text{Zu}}$ = Kurzzeit-BSB im Zulauf zum anoxischen Reaktor [mg/l]
- $\text{NO}_3 - \text{N}_{\text{Ab}}$ = Nitratablaufkonzentration [mg/l]
- n = Verhältnis des zu denitrifizierenden Nitratstickstoffs zur zufließenden leicht abbaubaren BSB-M3-Konzentration (Theoretischer Wert = 2,9)

$$\begin{aligned} O_{2,\text{rück}} &= \text{Sauerstoffkonzentration im Rücklauf [mg/l]} \\ O_{2,\text{Zu}} &= \text{Sauerstoffkonzentration im Zulauf zum anoxischen Reaktor [mg/l]} \end{aligned}$$

Der Wert für n ist für jede Anlage individuell zu bestimmen. Er muß nach Londong deutlich über 3 liegen. Die verwendete Anlage erlaubte die Einstellung von 1 bis 10.

Die zur Einhaltung des Grenzwertes für $\text{NO}_3\text{-N}$ im Ablauf der biologischen Stufe erforderliche BSB-M3-Konzentration ergibt sich nach Londong zu:

$$\text{BSB-M3}_{\text{erf}} = \left[(Q_{\text{RS}} + Q_{\text{rück, intern}}) \cdot n \cdot \text{NO}_3\text{-N}_{\text{Grenz}} + (Q_{\text{rück, intern}} \cdot O_{2,\text{rück}}) / Q_{\text{Zu}} \right] + O_{2,\text{Zu}} \quad (3.2)$$

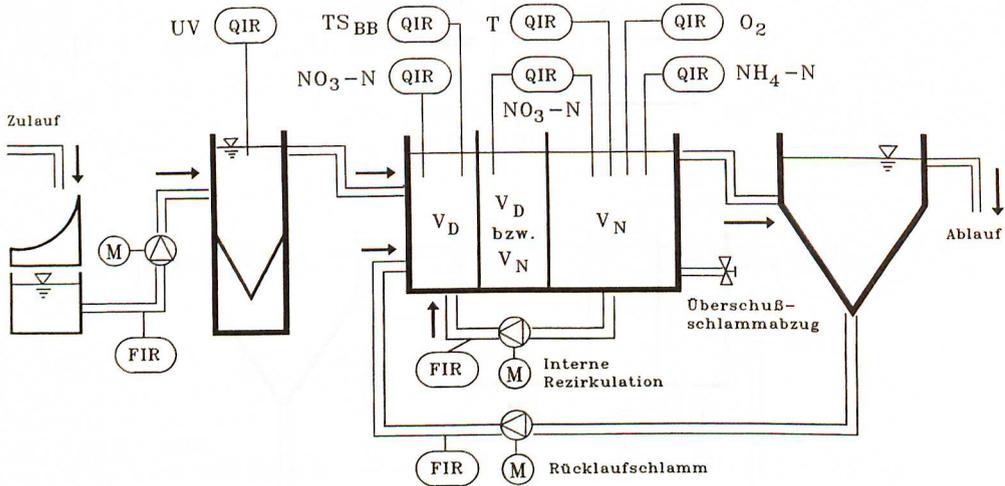
Die zusätzlich erforderliche BSB-M3-Konzentration errechnet sich hieraus zu:

$$\text{BSB-M3}_{\text{Zugabe}} = \text{BSB-M3}_{\text{erf}} - \text{BSB-M3}_{\text{Zulauf}} \quad (3.3)$$

Diese zusätzlich erforderliche BSB-M3-Konzentration ist durch die Dosierung einer externen C-Quelle zu realisieren.

4. MASSENBILANZEN ALS INSTRUMENT FÜR DIE ON-LINE-ERMITTLUNG DER STICKSTOFF-UMSATZGESCHWINDIGKEITEN

Die nachfolgenden Ableitungen erfolgen anhand der in Bild 4.1 dargestellten Modellkläranlage. Die biologische Stufe dieser Modellkläranlage nach dem Prinzip der vorgeschalteten Denitrifikation wird aus einer Kaskadenbelebung und einem Nachklärbecken gebildet. Die Kaskadenbelebung ist durch Trennwände in drei Kassetten unterteilt. Die erste Kassette dient als vorgeschaltetes Denitrifikationsbecken. Die darauffolgende Kassette kann alternativ aerob bzw. anoxisch betrieben werden. Die dritte Kassette stellt das permanent belüftete Nitrifikationsbecken dar.



Vorlage- Vorklär- Kaskaden- Nachklär-
behälter becken belebung becken

Bild 4.1: Modellkläranlage als vorgeschaltete Denitrifikation mit Anordnung der Meßsensoren (Strunkheide, 1994)

4.1 Ermittlung der Nitratstickstoff-Umsatzgeschwindigkeit im Denitrifikationsbecken (Nitrat-Atmungsaktivität) auf der Basis der Nitratstickstoff-Massenbilanz

Die Ermittlung der Nitrat-Atmungsaktivität basiert auf der Massenbilanzierung des Nitratstickstoffs im Denitrifikationsbecken. Das Denitrifikationsbecken wird als volldurchmischter Durchflußreaktor idealisiert.

Für den instationären Fall ergibt sich für die Nitratstickstoff-Massenbilanz (Bild 4.2):

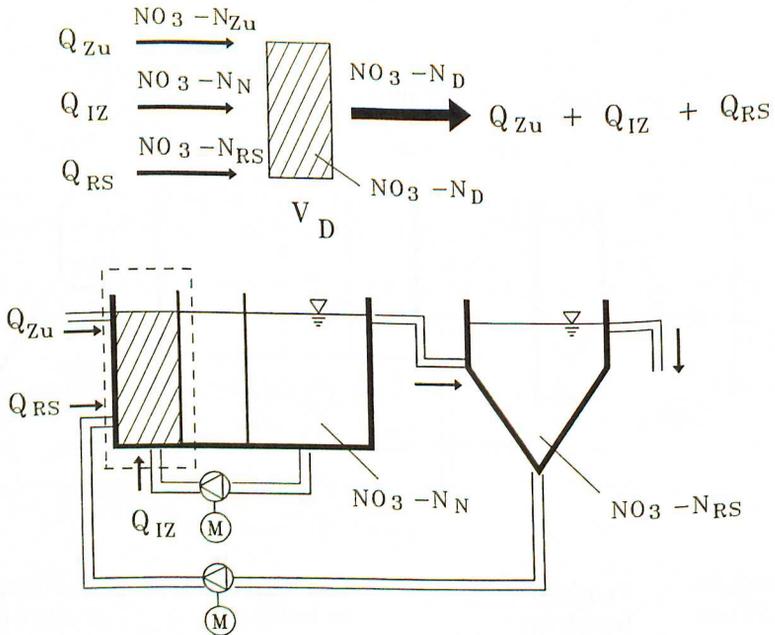


Bild 4.2: Illustration der Nitratstickstoff-Massenbilanz im Denitrifikationsbecken (Strunkheide, 1994)

$$\frac{d(\text{NO}_3 - \text{N}_D)}{dt} = \frac{Q_{Zu} \cdot (\text{NO}_3 - \text{N}_{Zu})}{V_D} + \frac{Q_{IZ} \cdot (\text{NO}_3 - \text{N}_N)}{V_D} + \frac{Q_{RS} \cdot (\text{NO}_3 - \text{N}_{RS})}{V_D} - \frac{(Q_{Zu} + Q_{IZ} + Q_{RS}) \cdot (\text{NO}_3 - \text{N}_D) - R_D}{V_D} \quad (4.1)$$

mit:

- $\text{NO}_3 - \text{N}_D$ = Nitratstickstoff-Konzentration im Denitrifikationsbecken [mg/l]
- $\text{NO}_3 - \text{N}_N$ = Nitratstickstoff-Konzentration im Nitrifikationsbecken [mg/l]
- $\text{NO}_3 - \text{N}_{Zu}$ = Nitratstickstoff-Konzentration im Zulauf zur Kaskadenbelebung [mg/l]
- $\text{NO}_3 - \text{N}_{RS}$ = Nitratstickstoff-Konzentration im Rücklaufschlammvolumenstrom [mg/l]
- Q_{IZ} = Interner Rezirkulationsvolumenstrom [l/h]
- Q_{Zu} = Zulaufvolumenstrom [l/h]
- Q_{RS} = Rücklaufschlammvolumenstrom [l/h]
- V_D = Denitrifikationsvolumen [l]
- R_D = Nitratstickstoff-Atmungsaktivität [mg/(l·h)]
- t = Zeit [h]

Gl. 4.1 nach der Nitrat-Atmungsaktivität R_D aufgelöst ergibt:

$$R_D = \frac{Q_{Zu} \cdot (\overline{NO_3 - N_{Zu}})}{V_D} + \frac{Q_{IZ} \cdot (\overline{NO_3 - N_N})}{V_D} + \frac{Q_{RS} \cdot (\overline{NO_3 - N_{RS}})}{V_D} - \frac{(\overline{Q_{Zu} + Q_{IZ} + Q_{RS}}) \cdot (\overline{NO_3 - N_D}) - \frac{d(\overline{NO_3 - N_D})}{dt}}{V_D} \quad (4.2)$$

Durch zeitliche Diskretisierung wird der Gradient $\frac{d(\overline{NO_3 - N_D})^{(n)}}{dt}$ aus Gl. 4.2 überführt in:

$$\frac{\Delta(\overline{NO_3 - N_D})^{(n)}}{\Delta t} = \frac{(\overline{NO_3 - N_D}(t^{(n)})) - (\overline{NO_3 - N_D}(t^{(n-1)}))}{t^{(n)} - t^{(n-1)}} \quad (4.3)$$

$\Delta(\overline{NO_3 - N_D})$ ist somit gleich der Differenz zwischen dem Nitratgehalt am Ende eines Zeitintervalls (Zeitpunkt $t^{(n)}$) und dem am Anfang eines Zeitintervalls (Zeitpunkt $t^{(n-1)}$). Die Volumenströme Q_{Zu} , Q_{IZ} und Q_{RS} und die Nitratstickstoffgehalte $\overline{NO_3 - N_N}$ und $\overline{NO_3 - N_D}$ gehen als Mittelwerte (Kennzeichnung mit Balken über der Meßgröße, z.B.: $\overline{Q_{Zu}^{(n)}}$) über das betrachtete Zeitintervall in die Massenbilanz ein.

Der Nitratgehalt des Zulaufvolumenstroms und des Rücklaufschlammvolumenstroms ist in der Praxis häufig vernachlässigbar klein und wird deshalb bei der Bilanzierung im folgenden nicht weiter betrachtet. Im Falle signifikanter Nitratkonzentrationen im Zulauf- bzw. Rücklaufschlammvolumenstrom können diese jedoch entsprechend Gl. 4.1 berücksichtigt werden.

Aus Gl. 4.2 und 4.3 folgt somit für ein betrachtetes Zeitintervall n:

$$\overline{R_D}^{(n)} = \frac{\overline{Q_{IZ}^{(n)}} \cdot (\overline{NO_3 - N_N})^{(n)}}{V_D} - \frac{(\overline{Q_{Zu}^{(n)}} + \overline{Q_{IZ}^{(n)}} + \overline{Q_{RS}^{(n)}})}{V_D} \cdot \overline{(NO_3 - N_D)}^{(n)} - \frac{\Delta(\overline{NO_3 - N_D})^{(n)}}{\Delta t} \quad (4.4)$$

4.2 Ermittlung der Nitratstickstoff-Umsatzgeschwindigkeit im Nitrifikationsbecken (Nitrifikationsgeschwindigkeit) auf der Basis der Nitratstickstoff-Massenbilanz

Die Ableitung der Gleichung für die Nitrifikationsgeschwindigkeit erfolgt analog zu der Ermittlung der Nitrat-Atmungsaktivität. Für das vollständig durchmischte Nitrifikationsvolumen und für instationäre Verhältnisse ergibt sich (Bild 4.3):

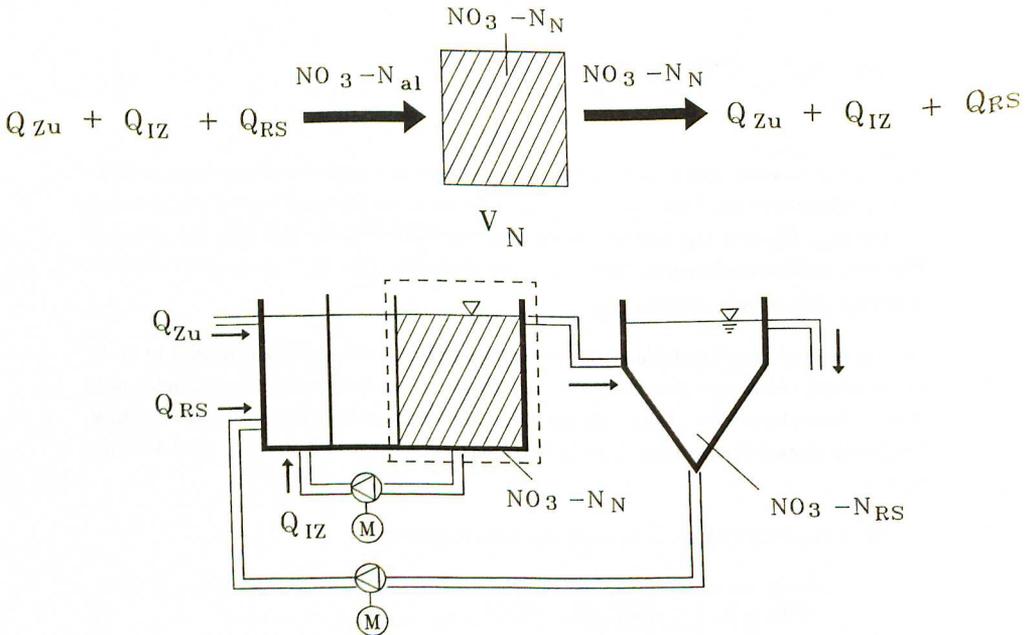


Bild 4.3: Illustration der Nitratstickstoff-Massenbilanz im Nitrifikationsbecken (Strunkheide, 1994)

$$\frac{d(\text{NO}_3 - \text{N}_N)}{dt} = \frac{(Q_{Zu} + Q_{IZ} + Q_{RS})}{V_N} \cdot ((\text{NO}_3 - \text{N}_{al}) - (\text{NO}_3 - \text{N}_N)) + R_N \quad (4.5)$$

mit:

$\text{NO}_3 - \text{N}_{al}$ = Nitratstickstoff-Konzentration im Zulauf zum Nitrifikationsbecken [mg/l]

V_N = Nitrifikationsvolumen [l]
 R_N = Nitrifikationsgeschwindigkeit [mg/(l·h)]

Analog zur Ermittlung der Nitrat-Atmungsaktivität geht der Gradient $\frac{d(\text{NO}_3 - \text{N}_N)^{(n)}}{dt}$ aus Gl. 4.5 aufgrund der zeitlichen Diskretisierung in die Differenzschreibweise über. Durch Auflösung der Gl. 4.5 nach der Nitrifikationsgeschwindigkeit R_N ergibt sich somit für das Zeitintervall n:

$$\bar{R}_N^{(n)} = \frac{\Delta(\text{NO}_3 - \text{N}_N)^{(n)}}{\Delta t} - \frac{(\bar{Q}_{Zu}^{(n)} + \bar{Q}_{IZ}^{(n)} + \bar{Q}_{RS}^{(n)})}{V_N} \cdot \left((\text{NO}_3 - \text{N}_{al})^{(n)} - (\text{NO}_3 - \text{N}_N)^{(n)} \right) \quad (4.6)$$

Die Volumenströme Q_{Zu} , Q_{IZ} und Q_{RS} und die Nitratstickstoffgehalte $\text{NO}_3\text{-N}_N$ und $\text{NO}_3\text{-N}_{al}$ gehen wiederum als Mittelwerte eines Zeitintervalls in die Massenbilanz ein.

4.3 Ermittlung der zu nitrifizierenden Ammoniumstickstoffkonzentration im Zulauf zum Nitrifikationsbecken auf der Basis der Ammoniumstickstoff- Massenbilanz im Nitrifikationsbecken

Der zu nitrifizierende Ammoniumstickstoff $\text{NH}_4\text{-N}_{\text{mit}}$ im unmittelbaren Zulauf zum Nitrifikationsvolumen ist die Summe aus Ammoniumstickstoff und gelöstem organischem Stickstoff. Er führt zur Bildung des Nitratstickstoffs im Nitrifikationsvolumen. Die Konzentration des gelösten organischen Stickstoffs im Nitrifikationsbecken wird als vernachlässigbar gering angesehen. Damit ergibt sich die zu nitrifizierende Ammoniumstickstoff-Konzentration aus der Massenbilanz der Ammoniumstickstoff-Konzentration im Nitrifikationsbecken (Bild 4.4):

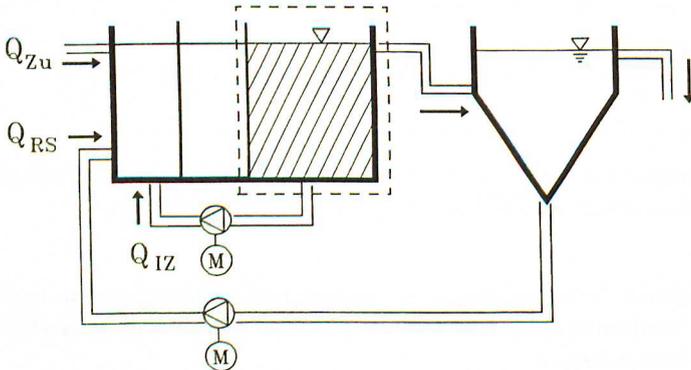
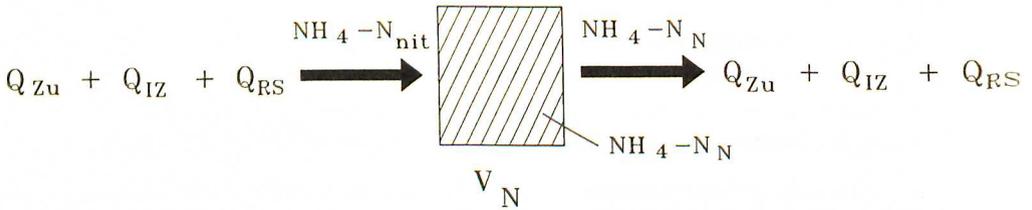


Bild 4.4: Illustration der Ammoniumstickstoff-Massenbilanz im Nitrifikationsbecken (Strunkheide, 1994)

$$\frac{d(\text{NH}_4 - \text{N}_N)}{dt} = \frac{(Q_{Zu} + Q_{IZ} + Q_{RS})}{V_N} \cdot (\text{NH}_4 - \text{N}_{nit}) - \frac{(Q_{Zu} + Q_{IZ} + Q_{RS})}{V_N} \cdot (\text{NH}_4 - \text{N}_N) - R_N \quad (4.7)$$

Gl. 4.7 nach $\text{NH}_4 - \text{N}_{nit}$ aufgelöst ergibt in diskretisierter Schreibweise für das Zeitintervall n :

$$\overline{\text{NH}_4 - \text{N}_{nit}}^{(n)} = \left(\frac{\Delta(\text{NH}_4 - \text{N}_N)^{(n)}}{\Delta t} + \overline{R}_N^{(n)} \right) \cdot \frac{V_N}{(\overline{Q}_{Zu}^{(n)} + \overline{Q}_{IZ}^{(n)} + \overline{Q}_{RS}^{(n)})} + (\overline{\text{NH}_4 - \text{N}_N})^{(n)} \quad (4.8)$$

5. INTEGRATION DER ON-LINE ERMITTELTEN STICKSTOFF-UMSATZGESCHWINDIGKEITEN IN EIN MSR-KONZEPT FÜR DAS VERFAHREN DER VORGESCHALTETEN DENITRIFIKATION

5.1 Regelung der Nitratkonzentration im Denitrifikationsbecken durch Steuerung der Internen Rezirkulation

Der Parameter Nitrat-Atmungsaktivität R_D im Denitrifikationsbecken ist als Summenparameter anzusehen, der verschiedenen Einflußfaktoren (Substrat-Atmung, endogene Atmung, evtl. Hemmstoffe im Zulauf, Temperatur, etc.) ausgesetzt ist. Damit ist die Nitrat-Atmungsaktivität für die Regelung des Nitratgehaltes im Denitrifikationsbecken als die geeignete zentrale Eingangsgröße anzusehen.

Aufgrund des häufig vernachlässigbaren Nitratgehaltes des Zulauf- und des Rücklaufschlammvolumenstroms erfolgt die Nitratzufuhr in das vorgeschaltete Denitrifikationsvolumen praktisch ausschließlich über die Interne Rezirkulation aus dem Nitrifikationsvolumen. Die Interne Rezirkulation eignet sich deshalb als Stellgröße für die Regelung in der Denitrifikation. Ihr Wert ergibt sich durch Auflösung von Gl. 4.4 nach dem Internen Rezirkulationsvolumenstrom:

$$Q_{iz} = \frac{d(NO_3 - N_D)}{dt} \cdot \frac{V_D}{(NO_3 - N_N) - (NO_3 - N_D)} + \frac{(Q_{Zu} + Q_{RS}) \cdot (NO_3 - N_D)}{(NO_3 - N_N) - (NO_3 - N_D)} + \frac{R_D \cdot V_D}{(NO_3 - N_N) - (NO_3 - N_D)} \quad (5.1)$$

Diese Massenbilanz gilt für ein beliebiges Zeitintervall n . Zur Bestimmung des im Zeitintervall n erforderlichen konstant einzustellenden Internen Rezirkulationsvolumenstroms ($\overline{Q}_{iz}^{(n)}$) wird die mittlere Nitrat-Atmungsaktivität ($\overline{R}_D^{(n-1)}$) des Zeitintervalls $(n-1)$ als Schätzwert für das Zeitintervall n angenommen. Für die Nitratstickstoff-Konzentrationen und die Volumenströme werden die Werte zum Zeitpunkt $t^{(n-1)}$, d.h. zu Beginn des n -ten bzw. am Ende des $(n-1)$ -ten Zeitintervalls, eingesetzt.

Nach zeitlicher Diskretisierung ergibt sich somit der im Zeitintervall n einzustellende konstante Interne Rezirkulationsvolumenstrom $\overline{Q}_{iz}^{(n)}$ zu:

$$\overline{Q}_{iz}^{(n)} = \frac{\Delta(NO_3 - N_D)^{(n-1)}}{\Delta t} \cdot \frac{V_D}{(NO_3 - N_N)^{(n-1)} - (NO_3 - N_D)^{(n-1)}} + \frac{(Q_{Zu}^{(n-1)} + Q_{RS}^{(n-1)}) \cdot (NO_3 - N_D)^{(n-1)}}{(NO_3 - N_N)^{(n-1)} - (NO_3 - N_D)^{(n-1)}} + \frac{\overline{R}_D^{(n-1)} \cdot V_D}{(NO_3 - N_N)^{(n-1)} - (NO_3 - N_D)^{(n-1)}} \quad (5.2)$$

Der Wert von $\bar{R}_D^{(n-1)}$ ist am Ende eines Zeitintervalls bekannt. Damit fehlt zur Bestimmung von $\bar{Q}_{IZ}^{(n)}$ lediglich eine Angabe zu der Größe $\Delta(\text{NO}_3 - \text{N}_D)^{(n-1)}$, d.h. zu der im betrachteten Zeitintervall zu erzielenden Änderung der Nitratstickstoff-Konzentration. Sie ergibt sich aus der Forderung, daß eine gemessene Abweichung e des Nitratstickstoff-Wertes vom Sollwert $\text{NO}_3 - \text{N}_D^{\text{soll}}$ im betrachteten Zeitintervall ausgeglichen werden soll. Für die Regelung wird somit angesetzt:

$$\Delta(\text{NO}_3 - \text{N}_D)^{(n)} = e^{(n-1)} = (\text{NO}_3 - \text{N}_D^{\text{soll}}) - (\text{NO}_3 - \text{N}_D^{\text{ist}})^{(n-1)} \quad (5.3)$$

Aus Gl. 5.2 und Gl. 5.3 ergibt sich die Beziehung für die modellgestützte Ansteuerung des Internen Rezirkulationsvolumenstroms auf der Basis der Massenbilanz:

$$\bar{Q}_{IZ}^{(n)} = \frac{V_D \cdot e^{(n-1)}}{\Delta t \cdot \left((\text{NO}_3 - \text{N}_N)^{(n-1)} - (\text{NO}_3 - \text{N}_D)^{(n-1)} \right)} + \frac{(Q_{Zu}^{(n-1)} + Q_{RS}^{(n-1)}) \cdot (\text{NO}_3 - \text{N}_D)^{(n-1)}}{(\text{NO}_3 - \text{N}_N)^{(n-1)} - (\text{NO}_3 - \text{N}_D)^{(n-1)}} + \frac{\bar{R}_D^{(n-1)} \cdot V_D}{(\text{NO}_3 - \text{N}_N)^{(n-1)} - (\text{NO}_3 - \text{N}_D)^{(n-1)}} \quad (5.4)$$

mit:

- $\bar{Q}_{IZ}^{(n)}$ = mittlerer Interner Rezirkulationsvolumenstrom im Zeitintervall n [l/h]
- $\bar{R}_D^{(n-1)}$ = mittlere Nitrat-Atmungsaktivität im Zeitintervall (n-1) [mg/(l·h)]
- $Q_{Zu}^{(n-1)}$ = Zulaufvolumenstrom zu Beginn des Zeitintervalls n [l/h]
- $Q_{RS}^{(n-1)}$ = Rücklaufschlammvolumenstrom zu Beginn des Zeitintervalls n [l/h]
- $(\text{NO}_3 - \text{N}_N)^{(n-1)}$ = Nitratstickstoff-Konzentration im Nitrifikationsvolumen zu Beginn des Zeitintervalls n [mg/l]
- $(\text{NO}_3 - \text{N}_D)^{(n-1)}$ = Nitratstickstoff-Konzentration im Denitrifikationsvolumen zu Beginn des Zeitintervalls n [mg/l]

Zur Überprüfung der vorgestellten Regelungsstrategie wurden von Strunkheide (1994) Untersuchungen mit einer halbertechnischen Versuchsanlage, die als vorgeschaltete Denitrifikation mit kommunalem Abwasser entsprechend Bild 5.1 betrieben wurde und mit einer entsprechenden Meßtechnik ausgestattet war, durchgeführt.

Die Regelung des Nitratgehaltes im Denitrifikationsbecken wurde durch die Variation der rezirkulierten Nitratfracht mit dem Internen Rezirkulationsvolumenstrom als Stellgröße entsprechend Gl. 5.4 in Abhängigkeit von der Nitrat-Atmungsaktivität, den Nitratstickstoff-

Konzentrationen im Denitrifikations- und Nitrifikationsbecken und den Zulauf- und Rücklaufschlammvolumenströmen realisiert.

Die in den Bildern 5.1 und 5.2 dargestellten Ergebnisse resultierten aus einer 24-Std.-Meßreihe, bei der die Nitratstickstoff-Konzentration im Denitrifikationsbecken auf einen Sollwert von 0,2 mg/l eingestellt werden sollte. Das den Massenbilanzen zugrundeliegende Zeitintervall betrug 15 Minuten.

Bild 5.1 illustriert, daß die rezirkulierte Nitratfracht kontinuierlich der zeitlich variierenden Nitrat-Atmungsaktivität angepaßt wird.

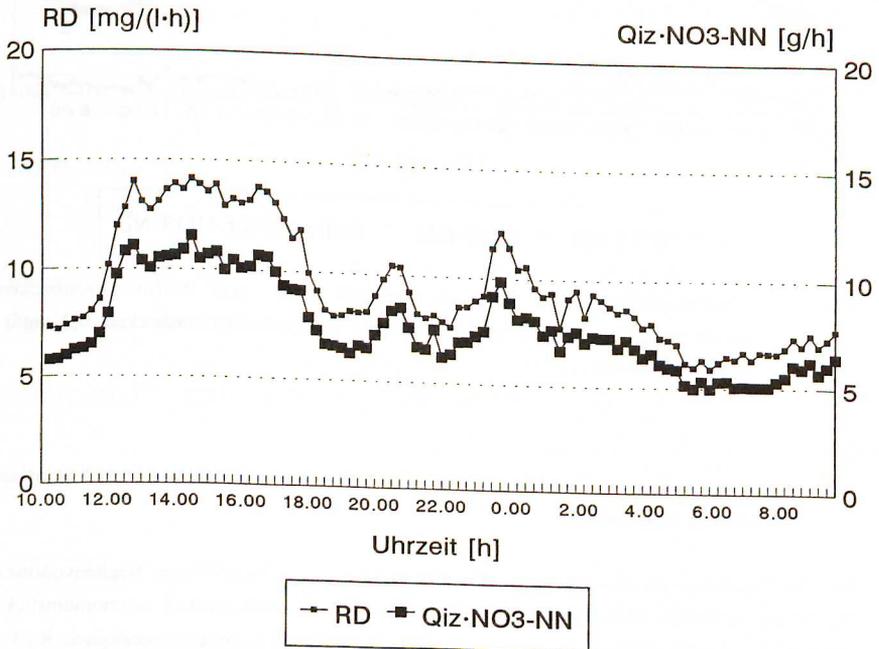


Bild 5.1: Nitrat-Atmungsaktivität und rezirkulierte Nitratfracht (Sollwert der Nitratstickstoff-Konzentration im Denitrifikationsbecken: 0,2 mg/l), nach Strunkheide (1994)

Bild 5.2 zeigt, daß der vorgegebene Sollwert durch die implementierte Regelung in einem engen Schwankungsbereich konstant gehalten werden kann und bestätigt damit das entwickelte Regelungskonzept.

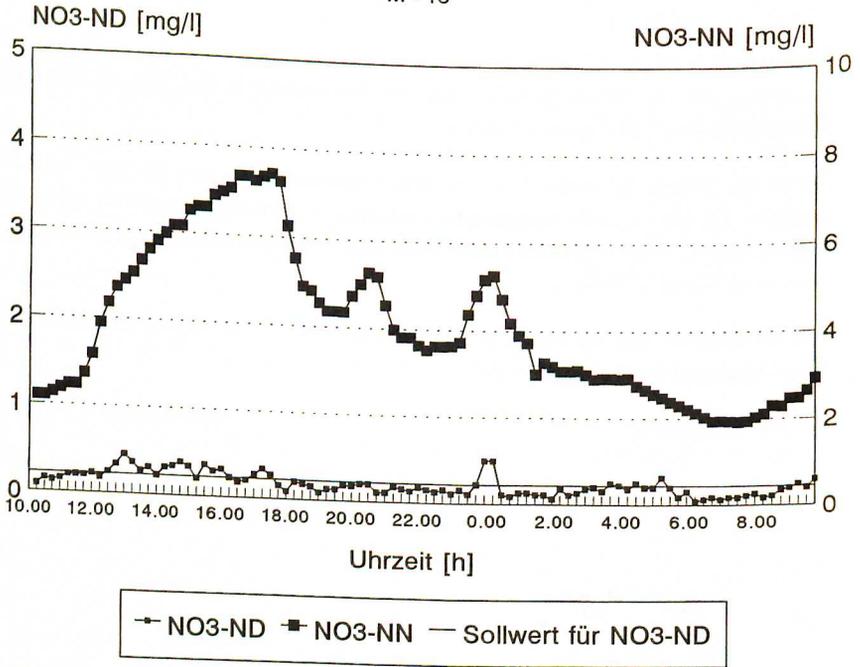


Bild 5.2: Nitratstickstoff-Konzentration im Denitrifikations- und Nitrifikationsbecken (Sollwert der Nitratstickstoff-Konzentration im Denitrifikationsbecken: 0,2 mg/l), nach Strunkheide (1994)

5.2 Regelung der Ammoniumkonzentration im Nitrifikationsbecken durch Variation des aeroben Volumens

Für das Zuschalten der Belüftung im alternativ aerob/anoxisch betreibbaren Beckenvolumen V_{a1} ist ein Kriterium festzulegen, welches zum einen die zu nitrifizierende Ammoniumstickstofffracht und zum anderen die tatsächlich vorhandene Nitrifikationsgeschwindigkeit R_N im durchgehend belüfteten Nitrifikationsvolumen berücksichtigt. Das alternativ aerob/anoxisch betreibbare Beckenvolumen V_{a1} ist zu belüften, sobald die Kapazität des kontinuierlich belüfteten Nitrifikationsvolumens nicht mehr ausreicht, um einen vorgegebenen Schwellenwert für die Ammoniumstickstoff-Konzentration $NH_4 - N$ $N_N^{\text{Schwellenwert}}$ zu unterschreiten.

Die Ableitung des Kriteriums für das Zuschalten der Belüftung im alternativ aerob/anoxisch betreibbaren Beckenvolumen erfolgt auf der Basis der Stickstoff-Massenbilanz im Nitrifikationsvolumen. Die Zusatz-Belüftung ist einzuschalten, wenn die zu nitrifizierende Ammoniumstickstofffracht die Nitrifikationskapazität übersteigt. Aus Gl. 4.7 und 4.8 ergibt sich somit:

$$\overline{\text{NH}_4 - \text{N}_{\text{nit}}}^{(n)} \geq \left(\frac{\Delta(\text{NH}_4 - \text{N}_N)^{(n)}}{\Delta t} + \overline{\text{R}_N}^{(n)} \right) \cdot \frac{V_N}{(Q_{\text{Zu}}^{(n)} + Q_{\text{IZ}}^{(n)} + Q_{\text{RS}}^{(n)})} + (\text{NH}_4 - \text{N}_N)^{(n)} \quad (5.5)$$

Dieses Kriterium gilt für ein beliebiges Zeitintervall n . Hierbei werden die zu nitrifizierende Ammoniumstickstoff-Konzentration $\overline{\text{NH}_4 - \text{N}_{\text{nit}}}^{(n)}$ und die Nitrifikationsgeschwindigkeit $\overline{\text{R}_N}^{(n)}$ als Schätzwerte für das Zeitintervall $(n+1)$ angenommen. Für die Ammoniumstickstoff-Konzentration und die Volumenströme werden die Werte zum Zeitpunkt $t^{(n)}$, d.h. zu Beginn des $(n+1)$ -ten bzw. am Ende des n -ten Zeitintervalls, eingesetzt.

Durch Umformung von Gl. 5.5 ergibt sich:

$$\begin{aligned} & \frac{(\overline{\text{NH}_4 - \text{N}_{\text{nit}}})^{(n)}}{V_N} \cdot (Q_{\text{Zu}}^{(n)} + Q_{\text{IZ}}^{(n)} + Q_{\text{RS}}^{(n)}) \cdot \Delta t - \Delta(\text{NH}_4 - \text{N}_N)^{(n)} - \overline{\text{R}_N}^{(n)} \cdot \Delta t - \\ & - \frac{(\text{NH}_4 - \text{N}_N)^{(n)}}{V_N} \cdot (Q_{\text{Zu}}^{(n)} + Q_{\text{IZ}}^{(n)} + Q_{\text{RS}}^{(n)}) \cdot \Delta t \geq 0 \end{aligned} \quad (5.6)$$

Hierin ist $\Delta(\text{NH}_4 - \text{N}_N)^{(n)}$ die Abweichung der Ammoniumstickstoff-Konzentration vom vorgegebenen Ammoniumstickstoff-Schwellenwert:

$$\Delta(\text{NH}_4 - \text{N}_N)^{(n)} = (\text{NH}_4 - \text{N}_N^{\text{Schwellenwert}}) - (\text{NH}_4 - \text{N}_N)^{(n)} \quad (5.7)$$

Aus Gl. 5.6 und 5.7 ergibt sich:

$$\begin{aligned} & \frac{(\overline{\text{NH}_4 - \text{N}_{\text{nit}}})^{(n)}}{V_N} \cdot (Q_{\text{Zu}}^{(n)} + Q_{\text{RS}}^{(n)} + Q_{\text{IZ}}^{(n)}) \cdot \Delta t - \frac{(\text{NH}_4 - \text{N}_N)^{(n)}}{V_N} \cdot (Q_{\text{Zu}}^{(n)} + Q_{\text{RS}}^{(n)} + Q_{\text{IZ}}^{(n)}) \cdot \Delta t \\ & - \overline{\text{R}_N}^{(n)} \cdot \Delta t + (\text{NH}_4 - \text{N}_N)^{(n)} \geq (\text{NH}_4 - \text{N}_N^{\text{Schwellenwert}}) \end{aligned} \quad (5.8)$$

Der Term $\frac{(\text{NH}_4 - \text{N}_N)^{(n)}}{V_N} \cdot (Q_{\text{Zu}}^{(n)} + Q_{\text{RS}}^{(n)} + Q_{\text{IZ}}^{(n)}) \cdot \Delta t$ kann häufig in der Praxis wegen der geringen abfließenden Ammoniumstickstoff-Fracht vernachlässigt werden. Hiermit geht Gl. 5.8 in die folgende Form über, d. h. die Belüftung in dem alternierend aerob/anoxisch betreibbaren Volumen ist im Zeitintervall $(n+1)$ einzuschalten, wenn gilt:

$$\frac{(Q_{Zu}^{(n)} + Q_{RS}^{(n)} + Q_{IZ}^{(n)}) \cdot (\overline{NH_4 - N_{nit}})^{(n)}}{V_N} \cdot \Delta t - \overline{R_N}^{(n)} \cdot \Delta t + (\overline{NH_4 - N_N})^{(n)} \geq (\overline{NH_4 - N_N}^{Schwellenwert}) \quad (5.9)$$

Diese Regelungsstrategie wurde von Strunkheide (1994) simultan zur Regelung der Denitrifikation an der o.g. halbtechnischen Versuchsanlage (Bild 5.1) erprobt. Das Nitrifikationsvolumen konnte hierbei durch Zuschalten der Zusatz-Belüftung von 1500 l um 50 % auf insgesamt 2250 l erhöht werden.

In Bild 5.3 ist exemplarisch der Verlauf der Ammoniumstickstoff-Konzentration im Nitrifikationsbecken für eine 24-Std.-Meßreihe dargestellt, bei der der Ammoniumstickstoff-Schwellenwert auf 2,5 mg/l eingestellt wurde.

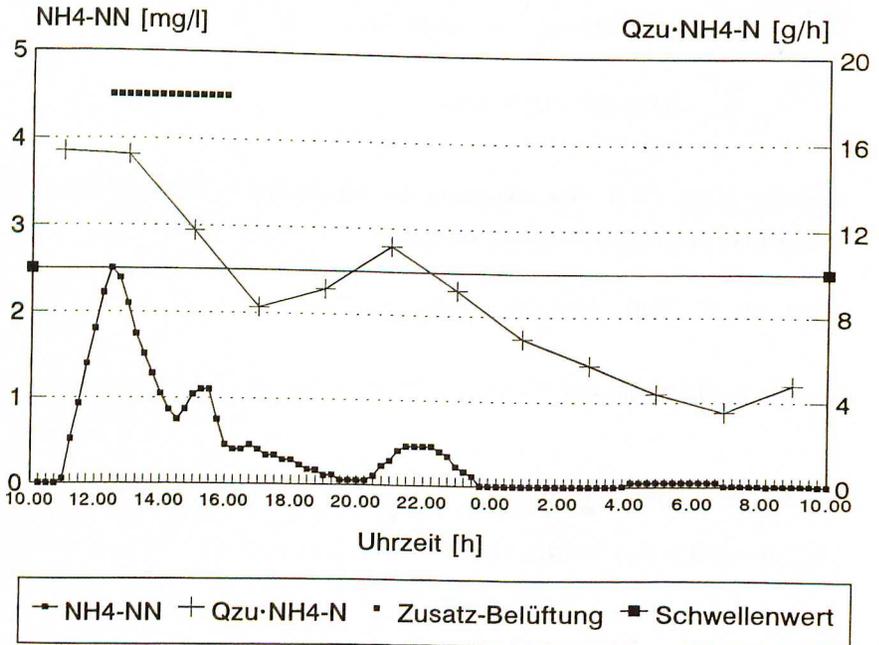


Bild 5.3: Beispiel zum Verlauf der Ammoniumstickstoff-Konzentration im Nitrifikationsbecken bei einer Schwellenwerteinstellung auf 2,5 mg/l, nach Strunkheide (1994)

Die Ammoniumstickstoff-Konzentration erreichte gegen 13.00 Uhr den eingestellten Schwellenwert und nahm anschließend stetig ab. Bei dieser Meßreihe konnte die Spitze der Ammoniumstickstoff-Konzentration durch Zuschalten der Belüftung im alternierend

aerob/anoxisch betreibbaren Becken vollständig unterhalb des eingestellten Schwellenwertes gehalten werden.

In Bild 5.4 ist das auf Stickstoff-Massenbilanzen basierende entwickelte MSR-Konzept schematisch und mit den zugehörigen Bezeichnungen zusammengefaßt.

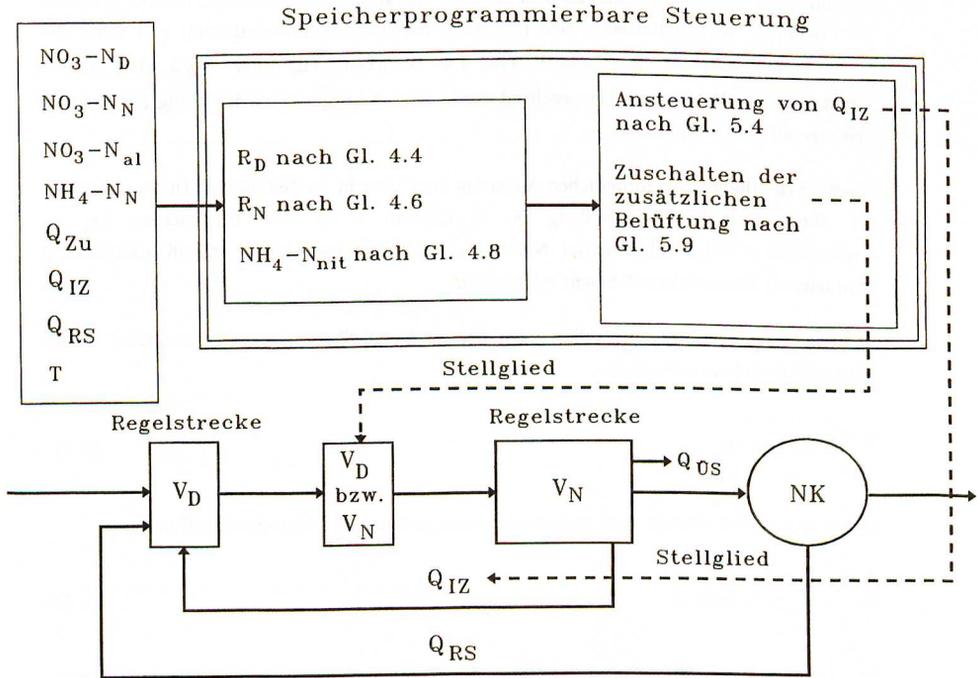


Bild 5.4: Schematische Darstellung des entwickelten MSR-Konzeptes zur Nitrifikation und Denitrifikation, nach Strunkheide (1994), modifiziert

6. ERMITTLUNG DER ZUSÄTZLICH ERFORDERLICHEN C-QUELLE ALS FUNKTION DER ON-LINE ERMITTELTEN DENITRIFIKATIONS- UND NITRIFIKATIONSGESCHWINDIGKEITEN

Die Dosierung externer C-Quellen erfolgt simultan zur Steuerung/Regelung der Stickstoffelimination als Funktion der on-line ermittelten Stickstoff-Umsatzgeschwindigkeiten (R_D und R_N). Die im Zeitintervall n in die Denitrifikationszone zudosierte externe C-Fracht $C - \text{Fracht}_{\text{extern}}^{(n)}$ wird unmittelbar eine Erhöhung der Denitrifikationskapazität und somit der Nitrat-Atmungsaktivität $\overline{R}_D^{(n)}$ nach Gl. 4.4 bewirken. Hierdurch wird der Interne Rezykulationsvolumenstrom entsprechend der in Kap. 5 vorgestellten Regelung (Gl. 5.4) im Zeitintervall $(n+1)$ erhöht.

Für die Ermittlung der erforderlichen Änderung der C-Fracht im Zeitintervall $(n+1)$ gegenüber der aktuellen C-Fracht-Einstellung im Zeitintervall n ist eine Bilanzierung der im Denitrifikationsbecken eliminierten Nitratstickstoff-Fracht und der im Nitrifikationsbecken produzierten Nitratstickstoff-Fracht erforderlich:

In dem betrachteten Zeitintervall n kann der im Denitrifikationsbecken eliminierte Nitratstickstoff berechnet werden zu:

$$\overline{R}_D^{(n)} \cdot V_D \text{ [g NO}_3\text{-N/h]} \quad (6.1)$$

Der in diesem Zeitintervall im Nitrifikationsbecken produzierte Nitrat-Stickstoff beträgt:

$$\overline{R}_N^{(n)} \cdot V_N \text{ [g NO}_3\text{-N/h]} \quad (6.2)$$

Im Hinblick auf die Einhaltung des festgelegten Nitratstickstoff-Ablaufgrenzwertes $\text{NO}_3 - N_N^{\text{Grenzwert}}$ im anschließenden Zeitintervall $(n+1)$ ist gegenüber dem Zeitintervall n eine Änderung der zudosierenden C-Fracht ($\Delta C - \text{Fracht}_{\text{extern}}$) erforderlich. Diese Änderung $\Delta C - \text{Fracht}_{\text{extern}}$ (vorzeichenbehaftet!) resultiert aus der folgenden im Denitrifikationsbecken zusätzlich zu eliminierenden Nitratstickstofffracht (ebenfalls vorzeichenbehaftet!) unter Berücksichtigung der im Ablauf des Nitrifikationsbeckens zulässigen Stickstoff-Fracht:

$$\Delta N - \text{Fracht}_{\text{elim}}^{(n+1)} = (\overline{R}_N^{(n)} \cdot V_N - (Q_{Zu}^{(n+1)} + Q_{RS}^{(n+1)} + Q_{IZ}^{(n+1)}) \cdot \text{NO}_3 - N_N^{\text{Grenzwert}}) - \overline{R}_D^{(n)} \cdot V_D \quad (6.3)$$

Mit Hilfe des in Abhängigkeit von der eingesetzten C-Quelle (z.B. Methanol, Essigsäure, Ethanol, etc.) substratspezifischen stöchiometrischen Faktors (vgl. Tabelle 2.1), der im folgenden mit f_{stochiom} bezeichnet wird, kann die erforderliche Änderung der Substratmenge

im Zeitintervall (n+1) gegenüber der aktuellen Substratmengen-Einstellung im Zeitintervall n wie folgt ermittelt werden:

$$\Delta C\text{-Fracht}_{\text{extern}}^{(n+1)} = \Delta N - \text{Fracht}_{\text{elim.}}^{(n+1)} \cdot f_{\text{stochiom.}} [\text{g Substrat/h}] \quad (6.4)$$

Die im Zeitintervall (n+1) insgesamt erforderliche externe C-Fracht ermittelt sich somit zu (Bild 6.1):

$$C\text{-Fracht}_{\text{extern}}^{(n+1)} = C\text{-Fracht}_{\text{extern}}^{(n)} + \Delta C\text{-Fracht}_{\text{extern}}^{(n+1)} \quad (6.5)$$

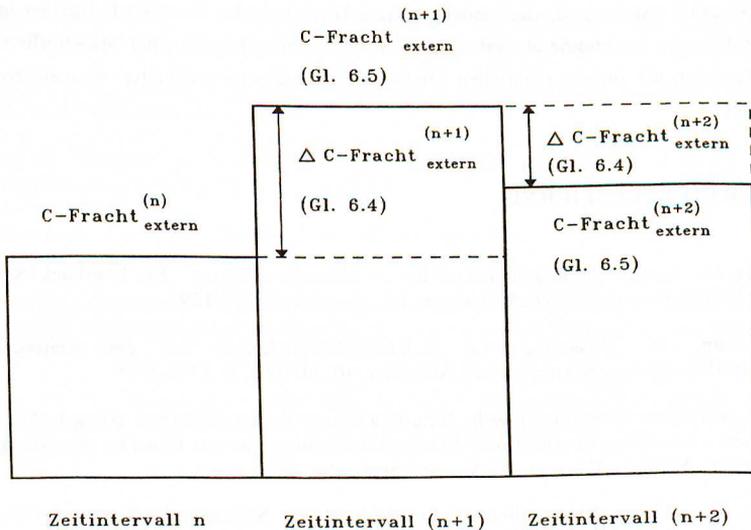


Bild 6.1: Schematische Darstellung des Konzeptes zur Dosierung der externen C-Quelle

Eine Erprobung im praktischen Betrieb steht noch aus, so daß bisher keine Betriebsdaten verfügbar sind.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Die Dosierung externer C-Quellen sollte bedarfsorientiert geregelt bzw. gesteuert werden. Zur Charakterisierung des Bedarfs sind die on-line ermittelten Stickstoff-Umsatzgeschwindigkeiten (R_D und R_N) als geeignet anzusehen, die bereits als zentrale Eingangsgrößen für das im Kapitel 5 beschriebene MSR-Konzept für die Stickstoff-Elimination bei der vorgeschalteten Denitrifikation fungierten. Die Stickstoff-Umsatzgeschwindigkeiten wurden hierbei durch Massenbilanzen on-line ermittelt (vgl. Kapitel 4). Hierbei wurde die Regelung des Nitratgehaltes im Denitrifikationsbecken im Rahmen des vorgestellten MSR-Konzeptes durch die Variation der rezirkulierten Nitratfracht mit dem Internen Rezirkulationsvolumenstrom als Stellgröße in Abhängigkeit von der Nitrat-Atmungsaktivität, den Nitratstickstoff-Konzentrationen im Denitrifikations- und Nitrifikationsbecken und den Zulauf- und Rücklaufschlammvolumenströmen realisiert.

Es ist daher naheliegend, die modellgestützte Dosierung der externen C-Quellen in dieses MSR-Konzept zu integrieren und simultan zur Steuerung/Regelung der Stickstoffelimination als Funktion der on-line ermittelten Stickstoff-Umsatzgeschwindigkeiten zu realisieren (vgl. Kapitel 6).

LITERATURVERZEICHNIS

Bahre, G.: Steuer- und Regelkonzepte für die Abwasserreinigung - Ein Überblick, Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft, Bochum, Bd. 22, 1991, S. 117-129

Baumann, P.: Dosierung von Kohlenstoffverbindungen bei der weitergehenden Stickstoffelimination, Korrespondenz Abwasser, 40, 11/1993, S. 1792-1799

BMU: Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.), Allgemeine Rahmen-Verwaltungsvorschrift über Mindestanforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer - Rahmen-Abwasser-VwV - vom September 1989

Bruns, J. und W. Bischofsberger: Entwicklung von Steuerungskonzepten bei der vorgeschalteten Denitrifikation, Berichte aus Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, Technische Universität München, Nr. 91, 1989, S. 175-203

Ermel, G.: Planung, Ausschreibung und Betrieb von Meß- und Regeltechnik - eine interdisziplinäre Herausforderung für Ingenieure, Schriftenreihe Wasser-Abwasser-Abfall des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft, Kassel, Bd. 8, S. 17-43

Hegemann, W. und H. Hofmann: Vorgeschaltete Denitrifikation: Bemessung, Steuerung und erste Betriebserfahrungen, Schriftenreihe Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung, Darmstadt, Bd. 31, 1987, S. 129-159

Isaacs, S. H., Henze, M., Sjøberg, H. and M. Kümmel: External Carbon Source Addition as a Means to Control an Activated Sludge Nutrient Removal Process, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 28, 1994, pp.511-520

Isaacs, S. H., Henze, M., Sjøberg, H. and M. Kümmel: Activated Sludge Nutrient Removal Process Control by Carbon Source Addition, *Proceedings of the 12th IFAC World Congress*, 19th-23rd July, 1993, Sydney Australia

Kayser, R.: Bemessung von Belebungsanlagen zur Stickstoffentfernung, *Veröffentlichungen des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, Technische Universität Braunschweig*, Heft 42, 1987, S. 67-83

Kayser, R.: Möglichkeiten und Grenzen der Flexibilisierung von Kläranlagen durch Prozeßregelung, *Veröffentlichungen des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, Technische Universität Braunschweig*, Heft 47, 1989b, S. 111-137

Kroiss, H.: Die Bedeutung der Massenbilanz für den Betrieb und die Bemessung von Kläranlagen zur Stickstoffentfernung, *Korrespondenz Abwasser*, 41, 3/1994, S. 416-424

Ladiges, G.: Modellansätze als Grundlage zukünftiger Betriebsführung auf Kläranlagen, *Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft, Bochum*, Bd. 22, 1991, S. 159-176

Londong, J.: Bedeutung von Modellversuchen für die Auslegung großer Kläranlagen, *Abwassertechnik (awt)*, Heft 2, 1993a, S. 63-66

Londong, J.: Strategien zur optimierten Nitratreduktion bei vorgeschalteter Denitrifikation, *Korrespondenz Abwasser*, 40, 4/1993b, S. 556-563

Strunkheide, J.: Betriebsbegleitende Stickstoff-Massenbilanzen als Basis künftiger Meß-, Steuer- und Regel-Konzepte, *Abwassertechnik (awt)*, Heft 2, 1995, S. 46-50

Strunkheide, J.: Ein Meß-, Steuer- und Regel-Konzept für die Stickstoffelimination in Belebungsanlagen mit vorgeschalteter Denitrifikation, *Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft, Bochum*, Bd. 30, 1994

Wolffson, C.: Denitrifikation von speziellen Abwässern mit externen Kohlenstoffquellen, *Veröffentlichungen des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, Technische Universität Braunschweig*, Heft 52, 1992

Anschrift der Verfasser:

Dr.-Ing. J. Strunkheide, Dr.-Ing. G. Bahre
c/o Ingenieurgesellschaft für Siedlungswasserwirtschaft
und Umwelttechnik Dr.-Ing. G. Bahre mbH
Elsa-Brandströmstr. 95 a
44795 Bochum
Tel.: 0234/451727
Fax: 0234/451881