

G. Kampmann

Regelung der Stickstoffelimination einer kommunalen Kläranlage und Aspekte der Sensorüberwachung

1 Einleitung

Auf einer kleineren kommunalen Kläranlage (12000 Einwohnerwerte EW), die repräsentativ für andere Anlagen vergleichbarer Größe ist, sind in den letzten 10 Jahren vom Zentrum für Sensorsysteme (ZESS) verschiedene F&E-Projekte durchgeführt worden, siehe z.B. [1]. Aufgrund der mehrmaligen Senkung der vorgeschriebenen Überwachungswerte war es nötig, die Reinigungsleistung dieser 1988 in Betrieb genommenen Kläranlage zu steigern und insbesondere die Stickstoffelimination zu verbessern. Dabei sollte ein (bereits geplanter) kostenintensiver Neubau oder eine erhebliche bauliche Erweiterung vermieden werden. Deshalb erhielt das ZESS die seltene Gelegenheit zu zeigen, dass die notwendige Steigerung der Reinigungsleistung auch allein durch die Kombination geeigneter verfahrens- und regelungstechnischer Maßnahmen mit relativ geringen Kosten möglich ist.

Das verfahrenstechnische Konzept sah eine deutliche Steigerung des Feststoffgehaltes und somit eine Erhöhung der Masse der Mikroorganismen im Belebungsbecken vor. Weil durch diese Maßnahme die Nachklärung überlastet worden wäre, wurden erstmals Lamellenabscheider im Belebungsbecken eingesetzt. Sie halten einen Teil der Biomasse im Belebungsbecken zurück, so dass nur ein Teil des Belebtschlammes zur Nachklärung fließt. Auf diese verfahrenstechnische Methode soll hier nicht vertiefend eingegangen werden, sie wird in [2, 3] beschrieben.

Das regelungstechnische Konzept sah eine Kaskadenregelung mit unterlagerter Sauerstoffregelung vor, weil der Sauerstoffeintrag durch Oberflächenbelüfter (Kreisel) die einzige Stellgröße ist, die zur Beeinflussung der Stickstoffelimination zur Verfügung steht. Zur Generierung der Sauerstoff-Führungsgröße aus kontinuierlich gemessenen Ammonium- und Nitratkonzentrationen wurde ein Fuzzy-Logik-Verfahren gewählt.

Um die Auswirkung von Störungen oder Ausfällen der Messungen zu reduzieren, sind im Regelungskonzept Rückfallebenen implementiert, die allerdings zu einer Steuerung des Prozesses führen. Die Einhaltung der Überwachungswerte kann dann nicht in allen Betriebssituationen garantiert werden. Außerdem kann nur erkannt werden, ob die Datenübertragung ausfällt oder eines der Messgeräte selbst eine Störung oder einen Wartungszyklus meldet. Damit sind natürlich nicht alle Fehlfunktionen erfasst und es bleibt ein gewisses Risiko. Deshalb muss eine umfassendere Sensorüberwachung und Prozessdatenvvalidierung angestrebt werden. Für frühere Untersuchungen zu diesem Thema siehe z.B. [4].

2 Abwasserreinigungsprozess und wichtige Messgrößen

Aufgabe der Abwasserreinigung ist, neben der Entfernung von Grobstoffen, Sedimenten und Fetten (mechanische Reinigung), vor allem die Elimination von Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorverbindungen (biologische Reinigung). Hier wird lediglich die Stickstoffelimination näher betrachtet. Eine umfassendere Darstellung des Themas enthält der Übersichtsbeitrag [5].

Der zu entfernende Stickstoff gelangt fast ausschließlich in Form von Ammonium (NH_4) in die Kläranlage und wird durch die Mikroorganismen im Belebtschlamm in der biologischen Reinigungsstufe (Belebungsbecken) in zwei Schritten umgewandelt. Im ersten Schritt (Nitrifikation) erzeugen die Mikroorganismen aus Ammonium Nitrat (NO_3). Hierzu ist gelöster Sauerstoff nötig, der mit Hilfe von Belüftungsaggregaten in den Belebtschlamm eingetragen werden muss. Für den zweiten Schritt (Denitrifikation), in dem die Reduktion des Nitrats zu molekularem Stickstoff erfolgt, darf kein gelöster Sauerstoff im Belebtschlamm vorhanden sein. Weil bei der betrachteten Anlage für beide Prozesse nur ein Becken zur Verfügung steht, muss durch die Regelung eine zeitliche oder räumliche Trennung der Verfahrensschritte erzielt werden.

Aus der Aufgabenstellung ergeben sich als notwendige Messgrößen die Ammonium-, die Nitrat- und die Sauerstoffkonzentration. Diese Größen werden im Belebungsbecken gemessen, weil für die Regelung die dort ablaufenden Prozesse möglichst verzögerungsfrei erfasst werden müssen. Weitere Messorte befinden sich im Zulauf und im Ablauf einer Kläranlage (Abbildung 1). Messgrößen, die im normalen Betrieb der Anlage erfasst werden, sind grau

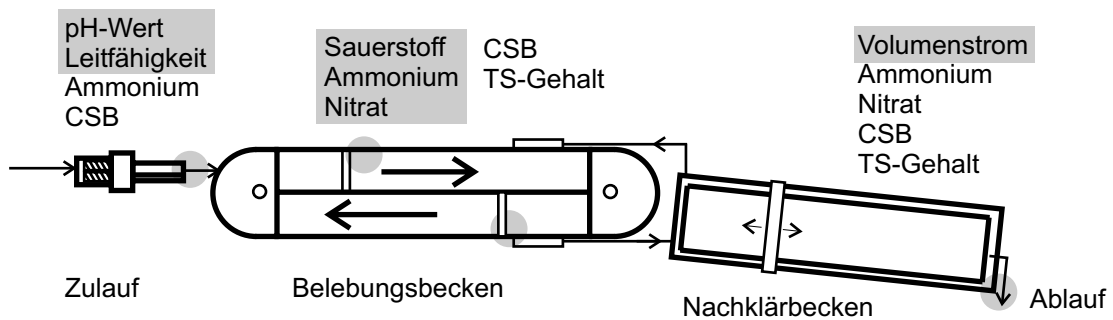


Abbildung 1: Messgrößen und Messorte auf der Kläranlage Netphen

unterlegt. Die kontinuierliche Messung des pH-Wertes und der Leitfähigkeit im Zulauf sowie des Volumenstroms im Ablauf ist bei allen Anlagen ab einer bestimmten Größe (> 5000 EW) vorgeschrieben.

Weitere interessante Messgrößen sind der Chemische Sauerstoffbedarf (CSB), der ein Maß für die Konzentration organischer Kohlenstoffverbindungen darstellt und der Trockensubstanzgehalt (TS) des Belebtschlammes. Diese Messgrößen wurden aber nur in einigen Phasen unserer Forschungsprojekte kontinuierlich erfasst, weil man aus Kostengründen bemüht ist, im normalen Betrieb mit der geringstmöglichen Anzahl von Messgeräten auszukommen. Aus Sicht der Prozessführung wären aber zusätzliche Messungen wünschenswert. Die Messung der Ammoniumkonzentration im Zulauf würde eine Störgrößenaufschaltung oder einen Frachtausgleich ermöglichen [6]. Die Messung von Ammonium und Nitrat im Kläranlagenablauf wäre sinnvoll, weil dort die Überwachungswerte gelten.

3 Messgeräte

Beim Einsatz von Messgeräten im Regelkreis ist deren Zuverlässigkeit von großer Bedeutung. Die in der Abwassertechnik verwendeten Messgeräte lassen sich grob in die Kategorien Inline-Sensoren, Inline-Analysatoren und Online-Analysatoren unterteilen (Abbildung 2). Die Inline-Sensoren weisen die höchste Zuverlässigkeit und den geringsten Wartungsaufwand auf. Sie werden direkt, ohne Probenaufbereitung, im Messmedium betrieben, basieren auf einfachen physikalischen Verfahren (optisch oder potentiometrisch) und müssen lediglich regelmäßig äußerlich gereinigt werden. Mit Inline-Sensoren ist z.B. die Messung der Nitrat-



Inline-Sensoren	Inline-Analysatoren	Online-Analysatoren
<ul style="list-style-type: none"> - keine Proben-aufbereitung - Messung im Medium - einfache physikalische Verfahren (optisch, potentiometrisch) - nicht für alle Messgrößen verfügbar 	<ul style="list-style-type: none"> - integrierte Probenaufbereitung (Membran) - Messung im Medium - Reagenzien notwendig - einfache Wartung - modularer Aufbau 	<ul style="list-style-type: none"> - externe Probenaufbereitung (Filter) - Reagenzien nötig - aufwändiger mechan. Aufbau (Pumpen, Ventile) 

Abbildung 2: Klassifizierung der Messgeräte

und der Sauerstoffkonzentration, sowie des CSB- und des TS-Gehalts möglich. Für die Ermittlung der Ammonium- und Phosphatkonzentrationen ist zur Zeit jedoch die Zugabe von Reagenzien nötig. Sie erfordern deshalb nasschemische Analyseverfahren. Analysatoren sind auf Grund ihres komplizierteren Aufbaus wartungs- und störanfälliger. Dies gilt insbesondere für die Online-Analysatoren, die nicht direkt im Medium betrieben werden, sondern durch einen extern aufbereiteten Abwasserprobenstrom versorgt werden müssen. Etwas zuverlässiger und wartungsärmer sind die Inline-Analysatoren. Diese Analysatoren können direkt im Medium betrieben werden, weil die Probenaufbereitung z.B. durch eingebaute Membranfilter erfolgt.

Obwohl sich gezeigt hat, dass die Zuverlässigkeit der verwendeten Messgeräte mittlerweile recht hoch ist, gibt es insbesondere bei Analysatoren noch Potential für Verbesserungen der Selbstüberwachung der Geräte. Außerdem sind die geräteinternen automatischen Reinigungs- und Kalibrierzyklen für regelungstechnische Anwendungen oft länger als erwünscht.

4 Regelung der Stickstoffelimination

Bei der betrachteten Kläranlage besteht die Regelungsaufgabe darin, die Überwachungswerte im Ablauf für die Ammoniumstickstoffkonzentration ($\text{NH}_4\text{-N}$, von 8 auf 4 mg/l reduziert) und die Gesamtstickstoffkonzentration (N_{ges} , 18 mg/l) einzuhalten. Letztere kann näherungsweise als Summe von Ammonium- und Nitratstickstoff ($\text{NO}_3\text{-N}$) angesehen werden (Abbildung 3). Im Belebungsbecken dürfen diese Überwachungswerte in der Regel kurz-

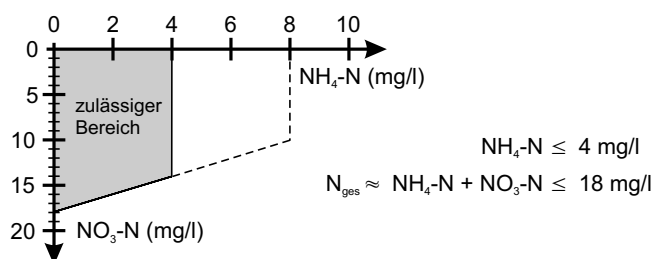


Abbildung 3: Überwachungswerte und zulässiger Bereich (grau)

zeitig überschritten werden, weil die Konzentrationen im Ablauf wegen der ausgleichenden Wirkung des Nachklärbeckens niedriger sind.

Das Regelungskonzept basiert auf der Ermittlung eines zeitveränderlichen Sollwertes für die Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken in Abhängigkeit der Ammonium- und Nitrat-

konzentrationen sowie der Uhrzeit, siehe auch [7]. Zur Regelung der Sauerstoffkonzentration wird ein PID-Regler verwendet, dessen Parameter uhrzeitabhängig geändert werden. Die Berücksichtigung der Uhrzeit ist nötig, weil sich die Belastung der Anlage im Tagesverlauf stark ändert. Nachts fließen nur geringe Mengen relativ unbelasteten Abwassers in die Anlage. Der niedrige Stoffwechsel der Mikroorganismen bedingt, dass geringe Änderungen der Stellgröße (Drehzahl der Belüfter) große Änderungen der Sauerstoffkonzentration bewirken. Morgens ab etwa 7 Uhr steigt die Belastung bis zur Mittagszeit stark an, die Mikroorganismen haben dann einen sehr hohen Sauerstoffbedarf und Stellgrößenänderungen wirken sich nur wenig aus. In diesem Zeitraum muss rechtzeitig durch Vorgabe eines hohen Sauerstoffsollwertes stark belüftet werden, um die zufließende Ammoniummenge in Nitrat umzuwandeln. Dies ist gefahrlos möglich, weil die Nitratkonzentration noch sehr niedrig ist. Mit zunehmender Nitratkonzentration wird der Sauerstoffsollwert reduziert. Bei sehr hohen Nitratkonzentrationen wird der Sollwert sehr niedrig gehalten bis die Ammoniumkonzentration fasst schon den Grenzwert erreicht hat. Im Laufe des Nachmittags und der Nacht ist es dadurch in der Regel möglich, die Nitratkonzentration bis zum nächsten Morgen wieder fast auf Null zu senken.

Wenn man die oben beschriebenen Überlegungen in Fuzzy-Regeln umsetzt, ergeben sich die in Abbildung 4 dargestellten Kennfelder. Das Kennfeld A wird morgens während der starken Belastung der Anlage verwendet, das Kennfeld B in der übrigen Zeit. Beim Entwurf

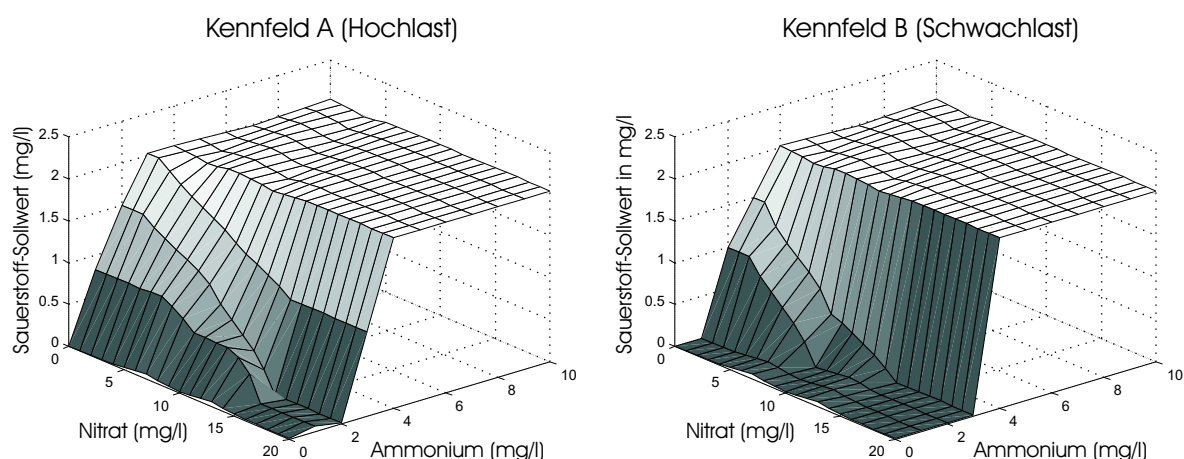


Abbildung 4: Kennfelder der Fuzzy-Regelung für Hoch- und Schwachlast

des Fuzzy-Konzeptes wurde Wert darauf gelegt, dem Kläranlagenpersonal die Möglichkeit zu bieten, durch Verstellen weniger Parameter die Regelung an veränderliche Prozesssituationen anzupassen, ohne die Regeln oder Zugehörigkeitsfunktionen ändern zu müssen. Es kann z.B. ein Skalierungsfaktor für die Kennfelder verändert werden.

In Abbildung 5 ist beispielhaft der Verlauf der Ammonium- und Nitratkonzentrationen sowie der daraus berechnete Sauerstoffsollwert für zwei Tage dargestellt. Links ist ein Tag abgebildet, an dem die Anlage stark belastet wird. Daraus ergeben sich sehr hohe Sauerstoffsollwerte am Morgen und eine entsprechend hohe Nitratkonzentration von maximal 15 mg/l. Der Grenzwert für die Ammoniumkonzentration wird zwischen 10 und 11 Uhr leicht überschritten. Gut zu erkennen ist, dass um 11 Uhr, wenn die Ammoniumkonzentration unter den Grenzwert fällt, der Sauerstoffsollwert wegen der hohen Nitratkonzentration sofort stark zurück genommen wird, woraufhin die Nitratkonzentration abnimmt. Das rechte Diagramm zeigt einen Tag mit geringerer Belastung der Anlage.

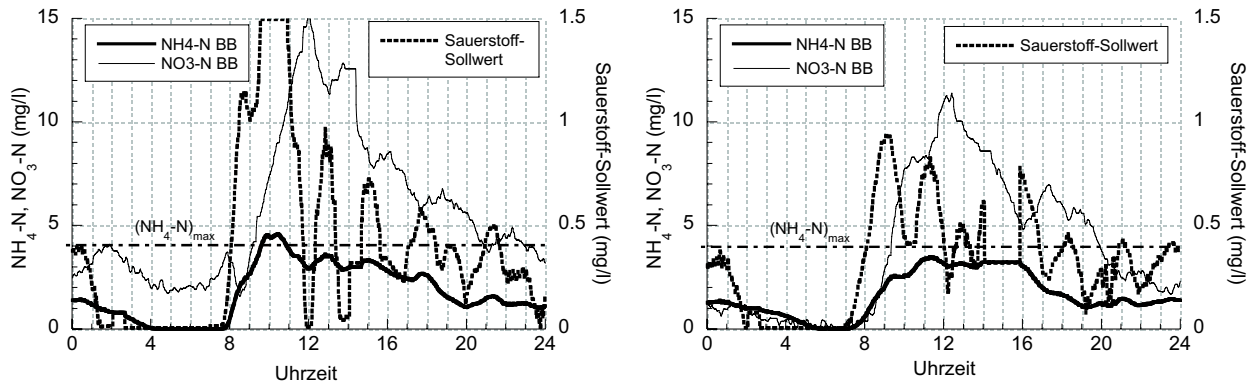


Abbildung 5: Verlauf der Regelgrößen und des Sollwertes an zwei verschiedenen Tagen

5 Aspekte der Sensorüberwachung

Nicht nur Ausfälle der Messgeräte, sondern auch Spül- und Kalibrierzyklen können zu Problemen für die Regelung führen, wenn sie zu ungünstigen Zeitpunkten auftreten. Sobald ein solcher Betriebszustand eintritt, wird auf einen vorgegebenen uhrzeitabhängigen Sollwertverlauf umgeschaltet. In Abbildung 5 rechts ist z.B. die Ammoniumkonzentration zwischen 14 und 16 Uhr wegen Wartungsarbeiten für etwa zwei Stunden nicht verfügbar, deshalb wird ersatzweise ein Sollwert von 0,3 mg/l vorgegeben. Dies ist zu diesem Zeitpunkt unproblematisch, weil die Belastung der Anlage relativ gering ist. In Abbildung 6 links ist jedoch zu sehen, wie es zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Regelung kommt, weil der erste der zwei automatischen Spülzyklen, die das Ammoniummessgerät täglich ausführt, in der kritischen Phase gegen 8 Uhr stattfindet und unglücklicherweise die Sollwertvorgabe für diese Uhrzeit zu niedrig ist (grau unterlegter Bereich). Durch den später sehr hohen

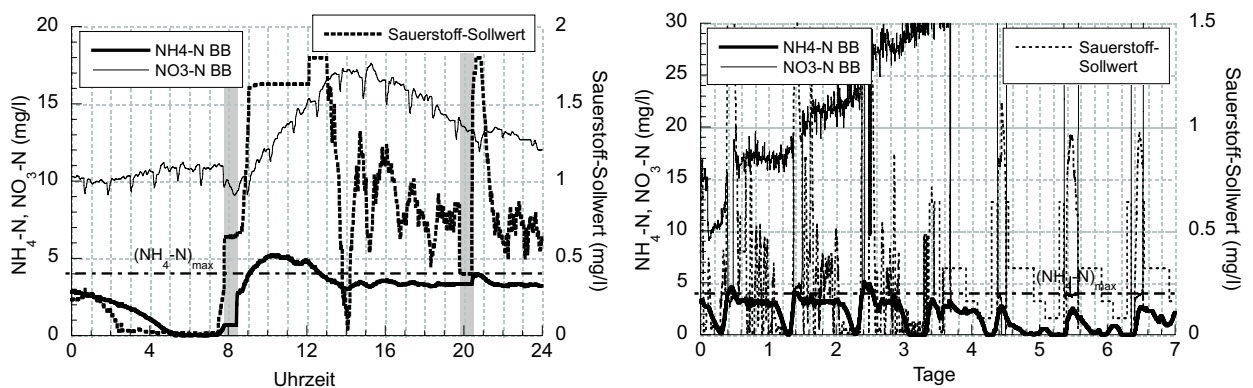


Abbildung 6: Einfluss von Spülvorgängen und Messfehlern

Sollwertverlauf (um etwa 12 Uhr wird sogar der Skalierungsfaktor des Kennfeldes durch das Bedienpersonal erhöht) ist ein Ausgleich nicht mehr möglich. Es kommt zur Überschreitung des Ammoniumgrenzwertes und die Nitratkonzentration allein erreicht schon den Grenzwert für den Gesamtstickstoff. Um die Nitratkonzentration zu senken, führt die Regelung die Ammoniumkonzentration den Rest des Tages knapp unter dem Grenzwert entlang. Dies verursacht während des zweiten Spülzyklus gegen 20 Uhr fast eine erneute Grenzwertüberschreitung. Die Spülung ist jedoch rechtzeitig beendet und die Regelung kann dies durch einen starken Stelleingriff verhindern.

Eine Störung der Nitratmessung ist in Abbildung 6 rechts dargestellt. Wegen eines Geräte-defekts driftet das Messsignal über eine Woche. In der ersten Wochenhälfte führt die zu hohe Nitratmessung dazu, dass die Ammoniumkonzentration durch die Regelung immer knapp am Grenzwert entlang geführt wird, mit der Gefahr der Überschreitung. In der zweiten Wochenhälfte erreicht die Messung ihren Messbereichsendwert, dadurch wird ein Fehlersignal erzeugt und der vorgegebene Sollwertverlauf aktiviert. Der wichtigere Ammoniumgrenzwert wird dann zwar trotzdem eingehalten, allerdings wird stärker belüftet als nötig, was vermutlich zu relativ hohen Gesamtstickstoffkonzentrationen führt.

Eine sehr zuverlässige Messung ist die Sauerstoffmessung, doch auch hier sind Fehler möglich, wie Abbildung 7 links zeigt. In der ersten Wochenhälfte ist die gemessene Sauerstoffkonzentration durch Verschmutzung des Sensors zu niedrig. Dies verursacht geringe Ammonium- und hohe Nitratkonzentrationen. Abbildung 7 rechts zeigt, wie diese Störung erkannt werden kann, wenn die Sauerstoffkonzentration über der Stellgröße aufgetragen wird. Es ergeben sich zwei deutlich abgetrennte Bereiche für den Zeitraum vor und nach der Reinigung des Sensors. Der Zusammenhang zwischen beiden Größen kann näherungsweise mit Hilfe einer einfachen Kennlinie modelliert werden. Durch die Ermittlung der Abweichung aktueller Messungen von dieser Kennlinie ist eine Überwachung des Sauerstoffsensors möglich.

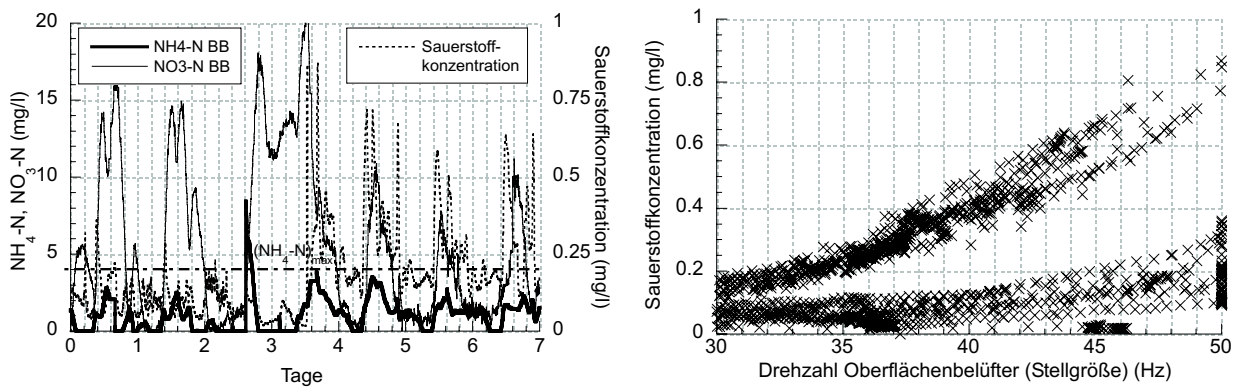


Abbildung 7: Verschmutzung des Sauerstoffsensors

Grundsätzlich lässt sich dieses Konzept der modellgestützten Sensorüberwachung auf den gesamten Reinigungsprozess ausdehnen. Ein Prozessmodell wird dabei parallel zum Prozess betrieben und z.B. ein geeigneter Modellfehler (Residuum) zur Fehlererkennung verwendet, siehe z.B. [8, 9]. Problematisch dabei ist, dass der Abwasserreinigungsprozess stark gestört, nichtlinear und zeitvariant ist. Es sind jedoch nur relativ einfache und damit ungenaue Modelle online identifizierbar. Reine Blackbox-Modelle sind ebenfalls problematisch, weil das nötige Anpassen der Modelle automatisiert und unüberwacht erfolgen müsste, denn für diese Aufgabe steht kein geeignetes Personal zur Verfügung. Außerdem wird für eine vollständige Modellierung eine umfangreiche Instrumentierung der Anlage im Zulauf, in der Belebung und im Ablauf benötigt.

Als Alternative bieten sich entweder Teilmodelle an, z.B. lässt sich der Zusammenhang zwischen Abwasserinhaltsstoffen in Belebung und Ablauf relativ gut durch ein rein hydraulisches Modell beschreiben, oder die Verwendung von Modellen die auf Erfahrungswissen über das typische Prozessverhalten in bestimmten Betriebssituationen aufbauen. Für einen solchen Ansatz stehen bei einer herkömmlich instrumentierten Anlage die Ammonium-, Nitrat- und Sauerstoffkonzentration, der TS-Gehalt und die Abwassertemperatur im Belebungsbecken zur Verfügung. Außerdem die Messung des Volumenstroms im Ablauf, sowie die Leitfähigkeit und der pH-Wert im Zulauf (siehe Abbildung 1). Auch die Stellgröße sollte berücksich-

tigt werden. Aus diesen Größen muss der aktuelle Zustand der Anlage geschätzt werden. Der Verlauf des Volumenstroms lässt z.B. erkennen, ob Trocken-, Regenwetter oder ein kurzfristiges Regenereignis vorliegt. Diese Zulaufsituationen haben unterschiedlichen Einfluss auf die Reinigungsleistung. Mit Hilfe des TS-Gehalts kann abgeschätzt werden, wie viele Mikroorganismen im Belebungsbecken vorhanden sind. Ein geringer TS-Gehalt nach einem übermäßigen Schlammabzug kann unerwartet hohe Ammonium- und Nitratkonzentrationen erklären. Sehr wichtig ist auch der Vergleich von Sauerstoffeintrag (Stellgröße) und Sauerstoffkonzentration (Regelgröße). Hierdurch kann abgeschätzt werden, wie groß die Sauerstoffzehrung und damit die Aktivität der Mikroorganismen ist. Dazu können auch zwei räumlich getrennte Sauerstoffsensoren verwendet werden. Wenn die Sauerstoffzehrung z.B. sehr niedrig ist, die Abwassertemperatur und der TS-Gehalt nicht ungewöhnlich niedrig sind, dann deutet eine hohe Ammoniumkonzentration auf eine fehlerhafte Messung oder eine Prozessstörung hin. Auf diese Art und Weise kann ein Regelwerk aufgestellt werden, mit dessen Hilfe eine Erkennung zumindest größerer Messfehler und Prozessstörungen möglich ist. Zukünftige Arbeiten befassen sich intensiver mit diesem Thema.

Literatur

- [1] D. Schönberger, M. Schuhen, "MSR-Konzepte zur Betriebsführung einer kommunalen Kläranlage mit intermittierender Denitrifikation", *at-Automatisierungstechnik* Vol. 46 (1998) S. 485-491
- [2] D. Schönberger, *Regelungstechnische und verfahrenstechnische Maßnahmen zur Leistungssteigerung kommunaler Abwasserreinigungsanlagen*, Dissertation, Universität Siegen, 2003
- [3] D. Schönberger, M. Köhne, R. Plaß, I. Sekoulov, R. Schröder, M. Schieberr, "Einsatz von Lamellenpaketen im Belebungsbecken zur Erhöhung des Trockensubstanzgehaltes", *KA - Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall*, Vol. 48 (2001) S. 54-61
- [4] M. Häck, M. Köhne, "Lokale und globale Validierung der Meßsignale kontinuierlich arbeitender Prozeßanalytoren", *at-Automatisierungstechnik*, Vol. 46 (1998) S. 315-325
- [5] M. Köhne, "Analyse und Regelung biologischer Abwasserreinigungsprozesse in Kläranlagen", *at-Automatisierungstechnik*, Vol. 46 (1998) S. 215-234
- [6] M. Schuhen, "Prädiktive Regelung der Ammonium-Stickstoffkonzentration in Kläranlagen mit Ausgleichsbecken", *at-Automatisierungstechnik*, Vol. 46 (1998) S. 284-294
- [7] D. Schönberger, G. Kampmann, M. Köhne, "Fuzzy-Regelung einer kommunalen Kläranlage mit Umlaufgraben zur Realisierung der simultanen Nitrifikation und Denitrifikation", *KA - Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall*, Vol. 48 (2001) S. 802-811
- [8] R. Isermann (Hrsg.), *Überwachung und Fehlerdiagnose - Moderne Methoden und ihre Anwendung bei technischen Systemen*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994
- [9] S. Simani, C. Fantuzzi, R. J. Patton, *Model-based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification Techniques*, Springer Verlag, Berlin, 2003

Autorenangaben:

Dipl.-Ing. G. Kampmann

Universität Siegen, NRW-Zentrum für Sensorsysteme (ZESS)

Paul-Bonatz-Str. 9-11

D-57068 Siegen

Tel: +49(0)271/740-4665

Fax: +49(0)271/740-2365

E-mail: kampmann@zess.uni-siegen.de