

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Ahnert, Markus; Klinsmann, Lutz; Billerbeck, Gerhard; Böhm, Erhard; Hillenbrand, Thomas**

## **Modelladaptive Mehrgrößenregler zur Effizienzsteigerung der Abwasserreinigung**

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

**Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103992>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Ahnert, Markus; Klinsmann, Lutz; Billerbeck, Gerhard; Böhm, Erhard; Hillenbrand, Thomas (2002): Modelladaptive Mehrgrößenregler zur Effizienzsteigerung der Abwasserreinigung. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Innovationen in der Abwasserableitung und Abwassersteuerung. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 21. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 151-178.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



## Modelladaptive Mehrgrößenregler zur Effizienzsteigerung der Abwasserreinigung

Markus Ahnert<sup>1</sup>,  
Lutz Klinsmann<sup>2</sup>, Gerhard Billerbeck<sup>2</sup>,  
Eberhard Böhm<sup>3</sup> und Thomas Hillenbrand<sup>3</sup>

<sup>1</sup> TU Dresden, Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft

<sup>2</sup> Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme, Dresden

<sup>3</sup> Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe

**Kurzfassung:** Die auf einer Abwasserreinigungsanlage ablaufenden biologischen Prozesse weisen eine hohe Dynamik verbunden mit starker Nichtlinearität auf. Diese Eigenschaften führen zu Problemen bei der Realisierung von Regelungsaufgaben unter Verwendung von Standardreglern. Abhilfe kann ein adaptives Mehrgrößenregelsystem schaffen. Dieses ist in seiner Struktur an die ablaufenden Prozesse sowie deren innere Kopplung angepasst. Durch die Selbstparametrierung wird der Regler immer an einem optimalen Arbeitspunkt gefahren. Damit ist es möglich, komplexe Regelkreise zur Steigerung der Anlageneffizienz bei gleichbleibender bzw. verbesserter Leistungsfähigkeit aufzubauen. Besondere Vorteile bietet dabei die Erweiterung des eigentlichen prozessnahen Reglers um ein Beratungs- und Diagnosesystem.

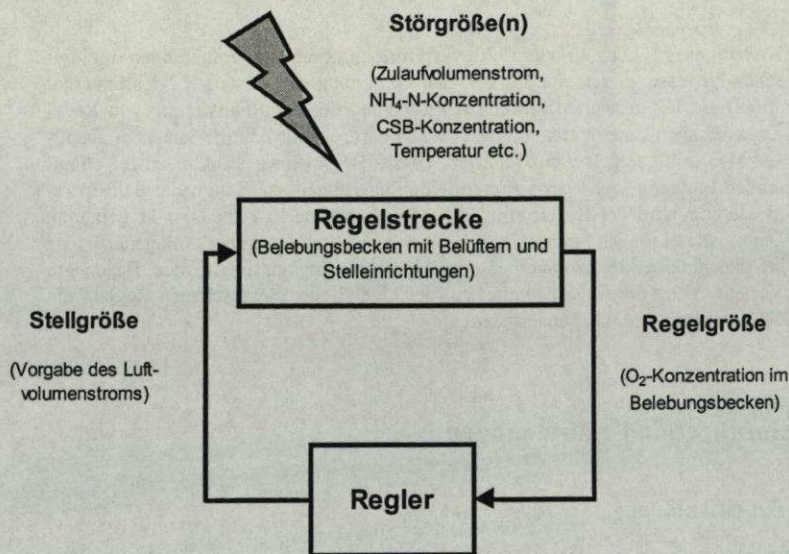
### 1 Einführende Erläuterungen

#### 1.1 Begriffsklärung

Bei der Zusammenarbeit von Ingenieuren verschiedener Fachdisziplinen kommt es immer wieder zu begrifflichen Missverständnissen und Unklarheiten beim jeweils anderen Partner. Dies ist in der Abwassertechnik gerade beim Umgang mit Fachleuten der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik der Fall. Schon die exakte Trennung der Begriffe "Steuern" und "Regeln" bereitet Schwierigkeiten. Deshalb soll an dieser Stelle eine kurze Begriffserklärung von in dieser Veröffentlichung verwendeten bzw. in der Regelungstechnik häufig auftretenden Schlagwörtern erfolgen. Für den Nicht-Regelungstechniker empfiehlt sich generell ein Studium von einführender Literatur (z.B. Oppelt, 1972; Samal und Becker, 1996).

Die wichtigsten Begriffe der Regelungstechnik sind zusammengefasst in der DIN 19226 (1994). Bei den folgenden Erläuterungen beziehen sich die Beispiele speziell auf den Abwassersektor.

Eine **Regelung** ist ein Vorgang, bei dem die zu regelnde Größe (z.B. Sauerstoff, Rücklaufschlammstrom) ständig mit einer gleichartigen Größe (Führungsgröße, bei konstanter Führungsgröße auch als Sollwert bezeichnet) verglichen wird. Aus dem Ergebnis des Vergleichs zwischen Führungsgröße und Regelgröße werden Maßnahmen zur Beeinflussung des Gesamtsystems abgeleitet mit dem Ziel, auch bei unbekanntenen Anfangsbedingungen dem System ein gewünschtes, möglichst optimales Verhalten aufzuprägen.



**Abbildung 1:** Schema eines Regelkreises mit Signalbezeichnungen am Beispiel der O<sub>2</sub>-Regelung in einer Kläranlage

Eine **Steuerung** stellt dagegen einen Vorgang dar, bei dem die Eingangsgröße durch einen gesetzmäßigen (funktionalen) Zusammenhang die Ausgangsgröße beeinflusst (z.B. Durchfluss in Abhängigkeit von der Schieberöffnung). Im Gegensatz zur Regelung erfolgt keine Rückführung der Ausgangsgröße zum Vergleich mit der Eingangsgröße, der Wirkkreis ist offen. (Anmerkung: Der Begriff „Steuerung“ (eng.: control) wird auch als Oberbegriff für Regeln und Steuern im Sinne der Prozess- bzw. Systembeeinflussung verwendet).

Bei einer Regelung handelt es sich also um einen geschlossenen **Regelkreis** mit den Komponenten Regelstrecke (auch Prozess genannt) und Regler. In Abbildung 1 ist diese als Schema dargestellt.

im Rahmen der Bearbeitung jeder Regelungsaufgabe ist zu klären, was letztendlich Regel-, Stell- und Störgrößen sind. Die Regelgröße ist i.A. das messbare Ausgangssignal der Regelstrecke. Sind mehrere Messsignale verfügbar, ist dem Regelungsziel gemäß eine Auswahl zu treffen oder es wird eine abgeleitete Regelgröße gebildet. Als Stellgröße bezeichnet man jenes Eingangssignal, mit der die Regelgröße gezielt beeinflusst werden kann. Diese manipulierbare Variable unterliegt in praktischen Anwendungen immer oberen und unteren Beschränkungen. Alle weiteren äußeren Einflussgrößen auf das System „Regelkreis“ stellen die i.A. nicht messbaren Störgrößen dar. Charakter und Größe dieser Signale sind weitgehend unbekannt und oft zufälliger Natur. Messbare Störungen wie z.B. der zeitabhängige Zufluss einer Kläranlage können effektiv zur Kompensation der Störungen genutzt werden. Diese Maßnahmen bezeichnet man als Störgrößenaufschaltung. Grundsätzlich sollten beim Aufbau eines Regelungssystems alle verfügbaren Messgrößen und Stelleingriffe einbezogen werden. Bei komplexen Systemen ist es mitunter aus regelungstechnischen Gründen erforderlich, die Anordnung von Stell- und Messgliedern zu ändern bzw. zusätzliche bereitzustellen.

Damit ergibt sich folgende Zielstellung: Eine Regelung soll trotz unbekannter Anfangsbedingungen und Störungen die Abweichung zwischen Führungsgröße und Regelgröße, also die **Regeldifferenz**, selbsttätig verringern bzw. eliminieren. Speziell bei konstanter Führungsgröße (Sollwert) und gewünschter, konstant gehaltener Regelgröße (Istwert) handelt es sich um eine Festwertregelung; bei zeitabhängigem Führungssignal spricht man von einer Folgeregelung. Wird darüber hinaus dieses Ziel in optimaler Weise erreicht, so handelt es sich um eine optimale Regelung (hier überwiegend als optimale Steuerung bezeichnet; z.B. energieoptimal, zeitoptimal).

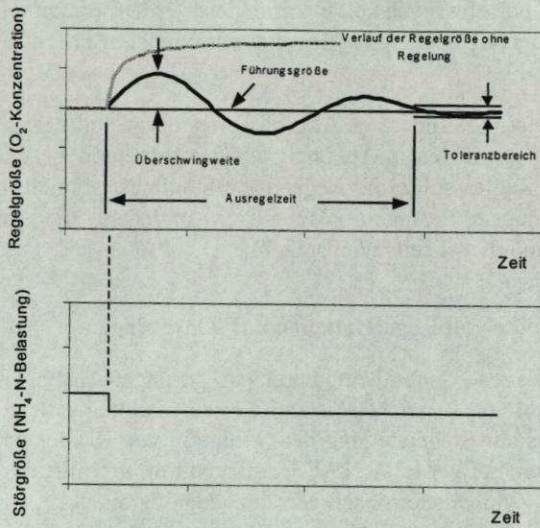
Die bisherigen Erläuterungen bezogen sich auf einen einschleifigen Regelkreis, d.h. die Regelstrecke hat einem Eingang (Stellgröße) und einem Ausgang (Regelgröße). Synonyme Bezeichnungen für diesen Sachverhalt sind: Eingrößen-, einvariable Regelung bzw. System, single input / single output system, SISO-System. Das gesamte Konzept der Regelung lässt sich auf Systeme mit mehreren Ein- und Ausgangsgrößen erweitern. Alle genannten Signale haben nun vektoriellen Charakter. Das System „Regelstrecke“, hier die Kläranlage, weist - oft technologisch bedingt - eine Anzahl von Teilsystemen auf, deren Zusammenwirken durch eine bestimmte Struktur beschrieben wird. Je nach Gestalt dieser

Struktur beeinflusst eine Stellgröße nicht nur eine Regelgröße, sondern mehrere oder sogar alle Regelgrößen (siehe dazu auch Abbildung 6). In diesem Falle spricht man von Mehrgrößen-, mehrvariablen, gekoppelten oder auch vermaschten Systemen, mehrschleifigen Regelungen, multi input / multi output systems, abgekürzt MIMO-Systemen (der Spezialfall mehrerer einschleifiger Regelungen stellt ein nichtgekoppeltes Mehrgrößensystem dar). Wie die mehrvariable Regelstrecke ist der Regler i.A. ebenfalls ein Mehrgrößensystem mit wählbarer Struktur.

Entwurf und Auslegung einer Regelung setzt i.A. die Kenntnis der Regelstrecke in Form eines Modells voraus (im Mehrgrößenfall Struktur, Ordnung der Teilsysteme, Parameter), wobei die Lösung der Regelungsaufgabe überwiegend einer Rechnerstützung bedarf. Liegt jedoch z.B. der Fall unbekannter und/oder veränderlicher Parameter vor, muss diese fehlende A-priori-Information während der Prozesssteuerung erworben und unmittelbar in den Reglerentwurf eingebracht werden, d.h. im On-Line-/Echtzeitbetrieb. Regler mit diesen Fähigkeiten nennt man **Adaptive Regler** (selbstanpassende, selbsteinstellende, lernende Regler, self-tuning regulator). Es ist offensichtlich, dass diese Regler auch das schwierige und zeitaufwendige Problem der Inbetriebnahme von Regelungssystemen maßgeblich unterstützen. Eine Klasse adaptiver Systeme sind **Modell-adaptive Systeme**, bei denen das gewünschte Systemverhalten in Form eines Referenzmodells spezifiziert wird.

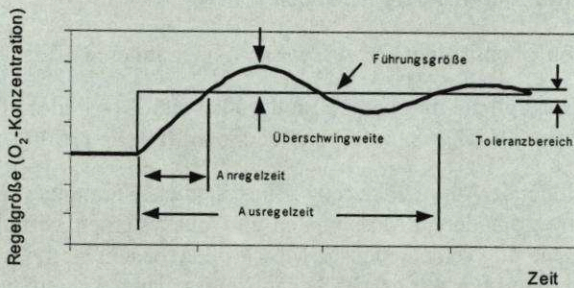
## 1.2 Anforderungen an einen Regler

Die Qualität eines Reglers bzw. einer gelösten Regelungsaufgabe lässt sich nach verschiedenen Kriterien einschätzen. Aus praktischer Sicht ist das sog. Stör- und Führungsverhalten eines Regelungssystems von großer Bedeutung. Das Störverhalten erfasst den dynamischen Ausgleichsvorgang nach Auftreten bzw. Änderung einer Störung bis zum Wiedererreichen des Sollwertes. Dieser Vorgang soll zeitlich schnell und möglichst ohne Überschwingen erfolgen. Das Führungsverhalten ist durch das Übergangsverhalten des geregelten Prozesses bei Sollwert- oder Arbeitspunktänderungen gekennzeichnet. Die Anpassung an neue Sollwerte soll in einer vorgegeben Einschwingzeit und wenn erforderlich, ebenfalls überschwingfrei erfolgen. Die beschriebenen Charakterisierungsmerkmale sind in Abbildung 2 und Abbildung 3 schematisch dargestellt.



**Abbildung 2:** Verlauf der Regelgröße bei einer sprungweisen Änderung einer Störgröße (Störverhalten)

Durch die sprunghafte Verringerung der Ammoniumkonzentration (z.B. Ende Prozesswasserdosierung) würde die O<sub>2</sub>-Konzentration ohne Regelung ansteigen, da der Sauerstoffverbrauch zurückgeht. Durch die Regelung erfolgt eine Angleichung der Luftmenge resp. O<sub>2</sub>-Konzentration an die neuen Belastungsverhältnisse innerhalb der Ausregelzeit.



**Abbildung 3:** Verlauf der Regelgröße bei einer sprungweisen Änderung der Führungsgröße (Führungsverhalten)

Ein zu starkes Überschwingen sollte vermieden werden, um zum einen die Versorgung mit Sauerstoff sicherzustellen und zum anderen energieeffizient zu arbeiten.

In Abbildung 3 ist die Änderung des Sollwertes dargestellt. Dies wird z.B. bei Kaskadenbelebungsanlagen in Abhängigkeit der zulaufenden Ammoniumfracht praktiziert. Der Regler sollte die Regelgröße möglichst schnell in den Bereich der neuen Führungsgröße regeln (Anregelzeit) und dann die Abweichung zur Führungsgröße möglichst schnell ausregeln.

### 1.3 Einsatzgebiete von Regelsystemen auf Kläranlagen

Moderne Kläranlagen können heute bereits ab geringen Ausbaugrößen eine beträchtliche Anzahl von Regelsystemen aufweisen. Haupteinsatz ist die Regelung des Lufteintrages zur Sicherstellung der Oxidation von Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen (ATV-M 268, 1997). Anlagen mit intermittierender Betriebsweise regeln die Zyklendauern nach verschiedenen Parametern, z.B. Nitrat- oder Ammoniummessung im Ablauf, Redoxpotenzial etc.

Daneben ergeben sich vielfältige Anwendungsgebiete für Regelsysteme hinsichtlich:

- Rücklaufschlammführung,
- interne Recycleführung,
- Substratdosierung zur Denitrifikation,
- Zuflussaufteilung auf mehrere Kaskaden
- Dosierung von Chemikalien, Prozesswässern oder anderen Hilfsstoffen uvm.

Aufstellungen bezüglich möglicher Stellgrößen und -glieder finden sich beispielsweise im ATV-M 268 (1997) und bei Schmitz *et al.* (2000).

Durch die zunehmende Automatisierung selbst kleiner Kläranlagen ist es relativ einfach, mit den vorhandenen Messsignalen und Bussystemen komplexe Regelkreise aufzubauen, die verschiedenste Messgrößen beachten. Dies wird nach dem derzeitigen Stand nur auf ca. 30 % der von Tschepetzki und Jumar (2000) betrachteten Anlagen realisiert. Damit besteht noch ein großes Potenzial zur Steigerung der Effizienz und gleichzeitig zur Einsparung von Energie.

## 1.4 Übersicht über die Hauptreglerarten

Für die Ausführung von Regelungsaufgaben stehen eine Vielzahl von Methoden und daraus abgeleiteten, zum Teil standardisierten Reglertypen zur Verfügung. Heutzutage kommen sie überwiegend als Kompaktregler oder als Softwarekomponenten in Prozessleitsystemen (PLS) zur Anwendung. Generell kann unterschieden werden in stetige und unstetige Regler. In die erste Gruppe fallen die meist bekannten Typen wie Proportional-, Integral- oder Differenzialregler sowie deren Kombinationen (PI, PD, PID). Merkmal dieser Reglergruppe ist die Fähigkeit, die Stellgröße auf jeden Wert zwischen den Stellgrößenbegrenzungen einzustellen. Damit kann die Führungsgröße im ausgeregelten Zustand immer eingehalten werden. Auf eine nähere Erläuterung der stetigen Reglerarten wird an dieser Stelle verzichtet, da dies entweder bereits bekannt ist oder in der vielfältigen Fachliteratur nachgelesen werden kann. Für einführende Informationen haben sich die Ausführungen von Samal und Becker (1996) sowie Oppelt (1972) gerade bei Nicht-Regelungstechnikern bewährt.

Typische Vertreter der unstetigen Regler sind Zwei-, Drei- oder allgemein Mehrpunktregler. Bei diesen kann die Stellgröße nur  $k$  diskrete Werte ( $k \geq 2$ ) annehmen. Damit ist die Führungsgröße natürlicherweise auch im ausgeregelten Zustand nur selten zu erreichen. Durch die Variabilität des Verhältnisses zwischen Einschaltdauer und Dauer des Schaltspieles (Tastverhältnis) ist es dennoch möglich, mit diesen Reglertypen gute Ergebnisse zu erzielen, wobei der Realisierungsaufwand für diese Regler vergleichsweise gering ist. Beispiele sind Dosierregelungen oder Regelung der Zyklendauer der Belüftung bei intermittierend betriebenen Anlagen.

Den genannten Standardreglern ist gemeinsam, dass sie in Eingrößenregelungen universell einsetzbar sind, umfangreiche Erfahrungen vorliegen und meistens manuell, ohne mathematische Modellbildung in Betrieb genommen werden können. Voraussetzung für ihren Einsatz ist jedoch, dass die regelungstechnische Zielstellung mit diesen Reglern überhaupt bzw. zufriedenstellend gelöst werden kann.

Neben diesen technischen Lösungen steht natürlich immer noch der "einfachste" Regler, der Mensch, für Handregelungsaufgaben zur Verfügung. In vielen Fällen wird diese Art der Regelung angewendet, aber nicht als solche angesehen (z.B. Einstellung der TS-Konzentration in den Belebungsbecken, Variation von Flockungshilfsmitteln für die maschinelle Entwässerung etc.). Diese Regelungen könnten auch durch einen technischen Regler ersetzt werden, doch in den meisten dieser Fälle steht der Aufwand in keinem Verhältnis zum Nutzen.



Über die Standardregler hinausgehend sind mittlerweile weitergehende Reglerarten entwickelt wurden, sog. höherwertige Regler. Diese gehen i.A. von einer modellmäßigen Prozessbeschreibung als Grundlage für einen systematischen Reglerentwurf aus, wobei auch eine quantitative Formulierung der Güteanforderungen erfolgt (z.B. Zustandsregler). Derartige Regler werden oftmals durch eine mitlaufende Zustands- und/oder Parameterschätzung ergänzt.

Weitere, auf die gesamte Prozessführung ausgerichtete Regelungskonzepte führen zu hierarchisch strukturierten Systemen mit mehreren Regelungsebenen. Die Aufteilung in prozessnahe Regelungen und Regelungen auf Leitebene wird maßgeblich durch die Hard- und Software-Strukturierung der Prozessleittechnik unterstützt. In komplexen Anlagen der Abwasserbehandlung mit starker Gliederung (z.B. Belebungsbeckenkaskaden, intermittierende Anlagen) können in einem langsamen Zeitregime auf der Leitebene implementierte Regler untergeordnete Regler mit hoher Abtastrate auf prozessnaher Ebene führen (z.B. Vorgabe von Sollwerten für die Regelung der  $O_2$ -Konzentrationen, der internen Rezirkulation etc.). Einige Typen dieser Systeme werden in Kapitel 2 näher erläutert. Daneben wird auf die vielfältige Spezialliteratur verwiesen, die bei den zitierten Autoren zu finden ist.

## 2 Höherwertige Regelsysteme

### 2.1 Allgemeines

Höherwertige Regelsysteme sind für komplexe Prozessregelungen unter Einbeziehung verschiedenster Einflussgrößen sinnvoll. Es ist möglich, mehrschleifige Regelkreise aufzubauen, die dem Mehrgrößencharakter der Regelstrecken gerecht werden. Innerhalb des Gesamtregelsystems können die einzelnen Stellengriffe aufeinander abgestimmt werden und gegensätzliche Reaktionen einzelner Stellglieder vermieden werden. Dies trägt zur Sicherung der Stabilität des gesamten Prozesses bei. Eine mögliche Anwendung wäre die Sollwertvorgabe für Teilregler und damit verbunden die Führung dieser Regler. So lassen sich z.B. Reglerkaskaden aufbauen, wo die Sollwerte der  $O_2$ -Regelungen durch eine Ammoniumführung vorgegeben werden. Dieser Ammonium-Regler führt also die unterlagerten  $O_2$ -Regelungen.

## 2.2 Prädiktive Steuerungs- und Regelungsverfahren

Bei den meisten Regelsystemen dienen Ablaufkonzentrationen als Messgrößen zur Änderung der Stellgrößen. Bei Kaskadenbelebungsanlagen oder generell bei großen Kläranlagen sind die Belebungsbecken in mehrere Segmente unterteilt, um eine variable Betriebsführung zu ermöglichen und je nach Belastungssituation z.B. die belüftete Zone zu vergrößern oder zu verkleinern. Dies ist in vielen Fällen aber auf Grund der hohen Aufenthaltszeiten im System Belebungsbecken zu spät, um auf kurzfristige Stossbelastungen bereits kurz nach deren Eintreffen zu reagieren. Wenn eine  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Stossbelastung im Ablauf messtechnisch erfasst wird, ist es kaum noch möglich, z.B. durch Zuschalten einer Belüftungsmatte das Nitrifikationsvolumen zu vergrößern. Durch eine Konzentrationsmessung im Zulauf bzw. unmittelbar vor der variablen Zone kann der Regelungseingriff zeitnäher erfolgen. Für eine Vorhersage der Ablaufkonzentration bei einer bestimmten Zulaufkonzentration ist ein Prädiktionsmodell des betrachteten Prozesses notwendig, welches für das Regelsystem zur Ermittlung der notwendigen Sollwerte benötigt wird. Ein Beispiel findet sich z.B. bei Alex (2001).

## 2.3 Regelungen auf Basis der Fuzzy Logic

Die Anwendung der Fuzzy-Technologie ist in den letzten Jahren verstärkt vorgenommen worden. Diese Art der Regelung erlaubt es, quantitative Zusammenhänge mit umgangssprachlichen Begriffen auszudrücken und damit die menschliche Entscheidungsfindung zu algorithmisieren. Durch die Ausformulierung der sog. Regelbasis ist die Fuzzy Logic für den Anwender sehr transparent. Es ist damit ohne weiteres möglich, dass der Anlagenbetreiber die Regelbasis relativ einfach erweitern kann.

Als Einsatzgebiete in der Abwasserbehandlung bietet sich z.B. die intermittierende Nitrifikation / Denitrifikation an, wo durch die Fuzzy-Regelung die Schaltphasen vorgegeben und / oder die  $\text{O}_2$ -Sollwerte variiert werden. Eine Anwendung findet sich z.B. bei Hansen (1997).

## 2.4 Adaptiver Mehrgrößenregler

Dieser Reglertyp ist Gegenstand dieser Ausführungen und wird ab Kapitel 3 in seinem Aufbau und einer praktischen Anwendung beschrieben.

## 2.5 Notwendigkeit höherwertiger Regelungssysteme

Die Inbetriebnahme der oben beschriebenen Standardregler erfordert je nach Reglertyp die Einstellung eines oder mehrerer Reglerparameter. Diese können durch entsprechende Vorschriften aus der Regelaufgabe sowie Analyse der Regelstrecke ermittelt werden. Die in einer biologischen Reinigungsstufe einer Kläranlage ablaufenden Prozesse weisen eine hohe Nichtlinearität auf. Durch die vielen beteiligten Stoff- und Organismengruppen sowie die parallel ablaufenden und sich teilweise gegenseitig beeinflussenden Reaktionen gibt es vielfältige Verknüpfungen untereinander. Damit ist eine gleichbleibende Parametrierung von Reglern, deren Störgrößen durch die ablaufenden Prozesse erzeugt werden, nur in einem begrenzten Arbeitsbereich zufriedenstellend. Das soll am Beispiel des Sauerstoffs erläutert werden:

Es werden die Modellvorstellungen zu den biologischen Reaktionen gemäß Activated Sludge Model No. 1 (Henze *et al.*, 1987) sowie die dort beschriebene Notation verwendet, um die Nichtlinearität der Prozesse darzulegen. Der Sauerstoffverbrauch in einem Belebungsbecken wird im wesentlichen durch zwei biologische Reaktionen verursacht:

1. Wachstum von heterotropher Biomasse unter Verwendung von Sauerstoff und organischen Kohlenstoffverbindungen (C-Abbau)
2. Wachstum von autotropher Biomasse unter Verwendung von Sauerstoff, Ammonium und Kohlendioxid (Nitrifikation)

Ausgehend von der allgemeinen Massenbilanz für Sauerstoff um das Belebungsbecken als Summe aus Stofffluss  $J_{SO}$  und Umwandlung  $r_{SO}$

$$\frac{dM_{SO}}{dt} = J_{SO} + r_{SO} * V$$

ergibt sich die Prozessgeschwindigkeit  $r_{SO}$  für den Sauerstoffumsatz zu

$$r_{SO} = r_{het} + r_{aut} = -\frac{1 - Y_H}{Y_H} \cdot \mu_H \cdot \left( \frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \cdot \left( \frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) \cdot X_{B,H}$$

$$-\frac{4,57 - Y_A}{Y_A} \cdot \mu_A \cdot \left( \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \cdot \left( \frac{S_O}{K_{OA} + S_O} \right) \cdot X_{B,A}$$

Die Ausdrücke in der Form  $S/(K+S)$  stellen dabei Schalterterme in Monod-Form dar. Dies hat sich bei der Modellierung von Belebtschlammprozessen bewährt. Weiterführende Erläuterungen dazu finden sich z.B. bei Henze *et al.* (1987), Nowak (1997) und Gujer (1990).

Die temperaturabhängigen Wachstumsraten  $\mu_H$  und  $\mu_A$  sind entsprechend der vorherrschenden Abwassertemperatur aus den maximalen Wachstumsraten  $\mu_{H,max}$  und  $\mu_{A,max}$  berechnet worden. Wenn vorausgesetzt wird, dass Substrat- ( $S_S$ ) und Ammoniumkonzentration ( $S_{NH}$ ) konstant sind, ist die Prozessgeschwindigkeit von der Temperatur und der Sauerstoffkonzentration  $S_O$  abhängig. Abbildung 4 zeigt ein Berechnungsbeispiel für den Temperaturbereich von 8 – 25 °C und eine Sauerstoffkonzentration von 0 – 7 mg/l. Aufgetragen ist die aktuelle Prozessgeschwindigkeit im Verhältnis zur maximalen Prozessgeschwindigkeit. Es ist zu erkennen, dass gerade im Bereich niedriger Sauerstoffkonzentrationen eine starke Nichtlinearität für die Prozessgeschwindigkeit vorliegt.

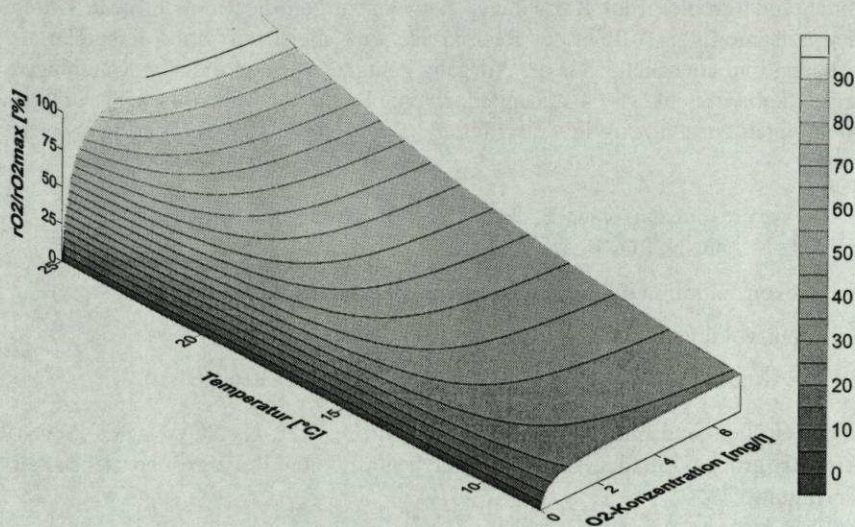


Abbildung 4: Abhängigkeit der Umwandlungsgeschwindigkeit  $r_{O_2}$  für Sauerstoff

Zusammen mit den vielfältigen Störgrößen (Schwankungen in Zuflussmenge und -konzentration, Hemmeinflüsse, Temperatureinbrüche z.B. durch Schmelzwasser etc.), die sich dynamisch ändern können, bringt die Verwendung von Standardreglern eine unbefriedigende Regelgüte in vielen Betriebsituationen mit sich. An diesem Punkt setzen höherwertige Regelsysteme an.

### 3 Beschreibung und Aufbau eines adaptiven Mehrgrößenreglers

#### 3.1 Theorie

##### 3.1.1 Mehrgrößenregelungskonzept – Anpassung an die Prozessstruktur

Die ablaufenden Prozesse in einer biologischen Abwasserreinigungsanlage beruhen auf den Wechselwirkungen verschiedener Gruppen von Mikroorganismen mit verschiedenen Stoffgruppen bzw. Einzelstoffen. Strukturelles Merkmal dieser Prozesse sind also mehrere Ein- und Ausgänge, die infolge einer prozessbedingten Abhängigkeit miteinander gekoppelt sind. Herkömmliche Regelungen mit Standardreglern auf Kläranlagen berücksichtigen dies jedoch nicht. Durch den einschleifigen Aufbau der Regelkreise wird meist nur eine Messgröße als Eingang und eine Stellgröße als Ausgang genutzt. Auf den meisten Kläranlagen speziell ab Größenklasse 4 stehen jedoch eine Reihe von Messwerten als Online-Messungen zur Nutzung in weiterführenden Regelsystemen zur Verfügung. Die sind:

- Messwerte aus einzelnen Becken bzw. Ablaufwerte der Anlage:  
NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P, TS
- O<sub>2</sub>-Konzentration in den belüfteten bzw. belüftbaren Becken
- Zulaufvolumenstrom Q
- ggf. Konzentrationsmessungen im Zulauf (NH<sub>4</sub>-N, selten CSB)

Diese Größen sind oft auch die Regelgrößen (O<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P, TS). Als Stellgrößen mit den hauptsächlich beeinflussten Regelgrößen stehen zur Verfügung:

- Luftvolumenstrom in die Belebungsbecken → O<sub>2</sub>-Konzentration
- Rezirkulationsvolumenstrom → NO<sub>3</sub>-N (NH<sub>4</sub>-N)
- Rücklaufschlammvolumenstrom → NO<sub>3</sub>-N (NH<sub>4</sub>-N)
- Überschussschlammabzug → TS
- evtl. Dosierung externer Kohlenstoffquellen → PO<sub>4</sub>-P bzw. NO<sub>3</sub>-N

Aus den geschilderten Sachverhalten wird klar, dass diese Mehrgrößenprozesse nur durch ein an die Struktur der Prozesse angepasstes Regelsystem zufriedenstellend geregelt werden können. In diesem Falle wird jede einzelne Regelgröße (z.B. O<sub>2</sub>-Konzentration) nicht nur durch die jeweils zugeordnete Stellgröße (z.B. Luftvolumenstrom) beeinflusst, sondern es finden auch andere Regel- bzw. Störgrößen (z.B. NH<sub>4</sub>-N, Q) Beachtung.

### 3.1.2 Vergleich mit Standardreglern

Die meist auf Kläranlagen eingesetzten Eingrößenregler sind vor allem Zweipunktregler (für diskontinuierliche Regelungen – Dosierung etc.) oder kontinuierliche Regler vom PID-Typ (für  $O_2$ -Konzentration, Rezirkulation etc.). Sie berücksichtigen nicht die bekannte oder ermittelbare Struktur des mehrvariablen Prozesses. Durch die "Fixiertheit" dieser festparametrierten Regler auf ihre Regelgröße ist das vermaschte nichtlineare Prozessverhalten unzureichend zu beherrschen. Die Regelgüte (Einschwingzeit, Überschwingweite) stellt einen Kompromiss für alle auftretenden Prozesszustände dar.

Strukturangepasste Regelsysteme werden nach der Struktur bzw. Ordnung der Regelstrecke erstellt. Damit werden so viele Parameter eingeführt, wie zur Erreichung des Regelungszieles erforderlich sind. Diese Vorgehensweise bewirkt einen erhöhten Entwurfs- und Realisierungsaufwand.

Der oft eingesetzte PID-Regler besitzt trotz der beschriebenen Beschränkungen durch die manuelle Parametrierbarkeit eine hohe Transparenz und damit verbunden eine hohe Verbreitung und gute Akzeptanz. Strukturangepasste Regler dagegen erscheinen dem Anwender sehr komplex und schwer verständlich. Außerdem ist eine nachträgliche Um-Parametrierung nur bei genauer Kenntnis des Aufbaus möglich. Dieser Nachteil kann durch selbsteinstellende (adaptive) Regelungskonzepte aufgehoben werden. Damit wird ein wesentlicher Teil des Reglerentwurfs, die Parametrierung, direkt vor Ort und immer aktuell vorgenommen.

### 3.1.3 Adaptive Verfahren zur automatischen Parametrierung

Adaptive Verfahren passen sich selbständig an unbekannte und/oder veränderliche Prozesscharakteristiken an. Ihr Einsatz erfolgt in der chemischen Verfahrenstechnik bereits länger. Sie eignen sich besonders zur Regelung komplexer nichtlinearer, arbeitspunktabhängiger Prozesse und weisen eine hohe Robustheit und Stabilität in einem großen Arbeitsbereich auf. Das gewünschte statische und dynamische Verhalten des geregelten Prozesses bezüglich eines Referenzsignals wird durch ein Referenzmodell vorgegeben (s.a. Billerbeck, 1977). Bei der Wahl des Referenzmodells ist zu berücksichtigen, dass der geregelte Prozess potenziell in der Lage ist, mit der verfügbaren Stelleistung dem Modell zu folgen. Das Adaptionsgesetz berechnet aus dem Modellfehler

$$\varepsilon = y_M - y$$

und allen im Regelkreis verfügbaren Signalen bei hinreichender Erregung des Systems die Änderung des Reglerparameter, um dem geschlossenen Regelkreis schließlich das dynamische Verhalten des Referenzmodells aufzuprägen. Ein Schema der Reglerstruktur ist in Abbildung 5 dargestellt. Dieses Regelungsprinzip, das zur Regelung linearer Prozesse mit unbekanntem Parametern entwickelt wurde, wird zur suboptimalen Regelung nichtlinearer Vorgänge herangezogen.

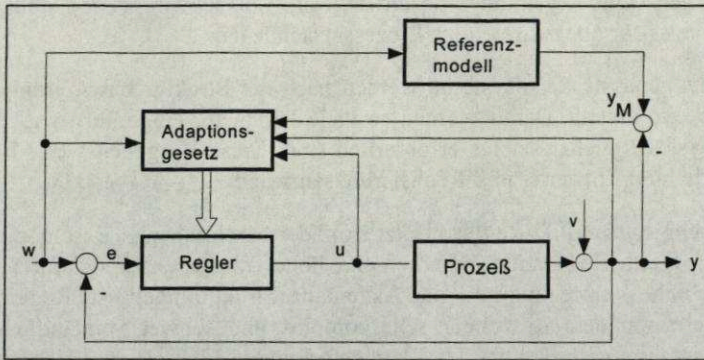
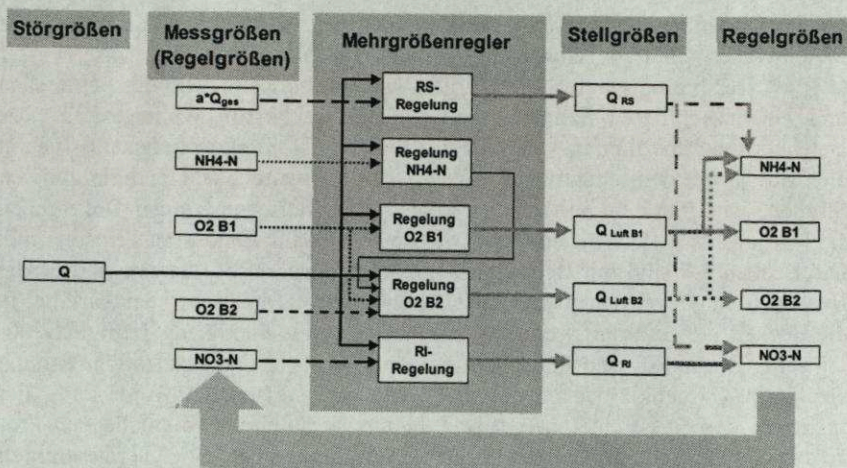


Abbildung 5: Grundstruktur des modelladaptiven Reglers

Voraussetzungen für den Entwurf adaptiver Mehrgrößenregler sind im wesentlichen:

- bekannte oder angenommene Prozessstruktur,
- Prozesscharakter (minimalphasig, allpasshaltig, dominierende Totzeiten),
- Stell- und Regelgrößenzuordnung,
- Stellgrößenbeschränkungen,
- grobe Kenntnis des Zeitverhaltens.

Letztere Information wird zur geeigneten Wahl des Referenzmodells und zur Festlegung der Tastperioden für die Teilprozesse benötigt (Die Regler sind digitale Abtastregler, d.h. sie verarbeiten zeit- und amplitudenquantisierte Signale). Die Entwurfsmethodik basiert auf Stabilitätstheorien und führt bei Gültigkeit der Voraussetzungen zu global asymptotisch stabilen Systemen. In Abbildung 6 ist der prinzipielle Aufbau eines Mehrgrößenreglers skizziert.



**Abbildung 6:** Schematischer Aufbau eines Mehrgrößenreglers am Beispiel einer Regelung für eine Kläranlage

Es ist dargestellt, wie einige Messgrößen mehreren Teilreglern als Eingangswerte dienen. Außerdem ist allen Teilreglern die Zuflussmenge als Störgröße aufgeschaltet. Die  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Regelung ist als übergeordneter Regler für die Belüftungsregelung des zweiten Beckens dargestellt. An den Stellgrößen ist gekennzeichnet, auf welche Regelgrößen direkt oder indirekt Einfluss genommen wird. Dies ist durch die Struktur des jeweiligen Prozesses bedingt.

### 3.2 Beispiel einer praktischen Umsetzung zur Luftregelung

In einem mehrphasigen Projekt (Kennzeichen 02WA0076) mit Förderung durch das BMBF, an dem die Fraunhofer-Institute für Systemtechnik und Innovationsforschung Karlsruhe sowie für Verkehrs- und Infrastruktursysteme Dresden und das Institut für Siedlungs- und Industriewasserwirtschaft der TU Dresden beteiligt sind (Fraunhofer *et al.*, 1999), ist der adaptive Regler in Phase 1 zuerst nach Simulationsuntersuchungen an dem Modell einer nitrifizierenden Anlage als Abtastregler in der SPS einer halbtechnischen Versuchsanlage implementiert und zur  $\text{O}_2$ -Regelung von drei belüfteten Belebungsbecken einer Reinigungsstraße eingesetzt worden. Ziel der Projektphase 2 ist die großtechnische Umsetzung an zwei Kläranlagen der Größenklasse 5. Dazu erfolgte bereits die Installation des Reglers zur Sauerstoffversorgung an einer Kläranlage mit einer Ausbaugröße von ca. 300.000 EW.



Die zufließenden Abwassermengen können im Verhältnis Trockenwetter : Mischwasser von 1 : 4 schwanken (Verhältnis Nachtzufluss TW : Mischwasser = 1 : 8). Der biologischen Stufe ist die mechanische Reinigung mit Feinrechen und einem belüfteten Sandfang sowie eine Vorklärstufe vorangestellt. Das Belebungsbeckenvolumen von 70.000 m<sup>3</sup> ist auf 4 Straßen aufgeteilt, wovon eine Straße mit dem adaptiven Regler ausgerüstet wurde, während die anderen Straßen weiter mit dem bestehenden Regelsystem betrieben werden. Die Straßen sind in jeweils 7 Becken unterteilt, wovon 6 mit Rührwerken ausgerüstet sind. Die Becken 5-7 sind mit Belüftungsaggregaten ausgerüstet. Derzeit werden die Becken 6 und 7 permanent belüftet. Die interne Rezirkulation kann variabel in die Becken 1-5 gefördert werden, womit weitgehende Flexibilität bezüglich biologischer Stickstoff- und Phosphorelimination besteht. Die Feststoffabtrennung erfolgt in 4 Nachklärbecken mit je 50 m Durchmesser. Zur Abdeckung der Prozesssicherheit ist eine chemische P-Fällung installiert. Die anfallenden Prozesswässer der Schlammbehandlungsstufe werden in einem Speicher gesammelt und der Belebungsstufe derzeit noch ungeregt zugeführt.

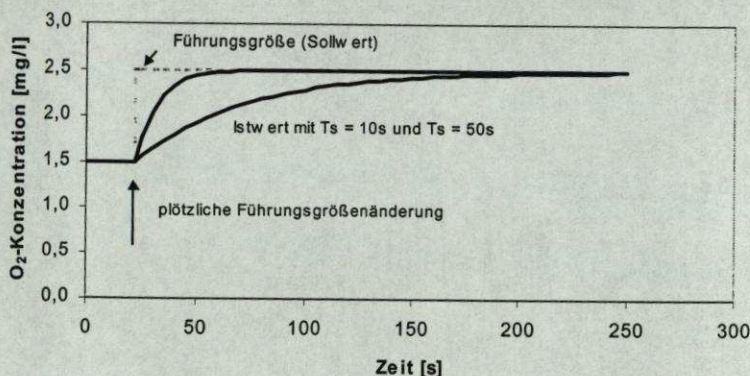
Der belüftete Teil des Belebungsbeckens (B 6+7) ist mit 3 O<sub>2</sub>-Meßstellen ausgerüstet und einmal unterteilt. Die Luft wird über 4 Ringkolbenschieber den Belüftungsgittern zugeführt. Das Becken besitzt nährerungsweise Plug-flow-Charakter und ist damit gut für eine Umsetzung eines Mehrgrößenregelkonzepts geeignet.

Innerhalb der belüfteten Becken ist durch das installierte konventionelle Regelungssystem eine Sollwertabstufung vorgesehen. Der Sollwert des ersten belüfteten Teils wird ammoniumgeführt nach dem Ablauf festgelegt (liegt meist bei 1,9 mg/l O<sub>2</sub>). Die Sollwerte der beiden nachfolgenden Beckenteile ergeben sich durch Verringerung des ersten Sollwerts um 0,2 bzw. 0,4 mg/l. Das Sollwertprofil wird also komplett nach unten bzw. oben verschoben (s. a. linke Darstellung in Abbildung 12). Auf Grund der fehlenden Umwälzung in den belüfteten Becken muss durch die Belüftungseinrichtung die Mindestenergie zur Umwälzung eingebracht werden. Deshalb besteht eine Beschränkung der minimalen Öffnungsweite der Ringkolbenschieber auf 22 %.

Die Umsetzung der Stellsignale auf die Ringkolbenschieber erfolgt durch Impulsbreitenmodulation. Die minimalen und maximalen Impulsbreiten betragen 0,5 - 4,8 s (1,2 - 4,8 s für den konventionellen Regler). Technologisch bedingt darf das Regelsystem im Intervall von 5 min Stelleingriffe ausführen. Diese Restriktionen sind beim Reglerentwurf sehr entscheidend. Für eine befriedigende Umsetzung des Mehrgrößenregelkonzepts wäre eine schnellere Taktung sinnvoller. In der Zeit zwischen den Stelleingriffen ist der gesamte

Regelkreis offen. Das ist beim Reglerentwurf durch Sicherstellung der Stabilität zu berücksichtigen.

Ziel der Regelung soll es werden, in Abhängigkeit vom  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Wert am Auslauf der Belebung das  $\text{O}_2$ -Profil über der belüfteten Zone der Belebung zu variieren. Im ersten Stadium wurden jedoch die von der konventionellen Regelung vorgegebenen Sollwerte als Eingangsgrößen verwendet. Ein Mehrgrößenregler mit 3 Teilreglern für die Einstellung der  $\text{O}_2$ -Konzentration wurde installiert. Für die Ammoniumführung ist bereits ein weiterer Regler vorgesehen, der nach seiner Aktivierung in einer Reglerkaskade die Sollwerte in Abhängigkeit der  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufkonzentration dynamisch variieren kann.



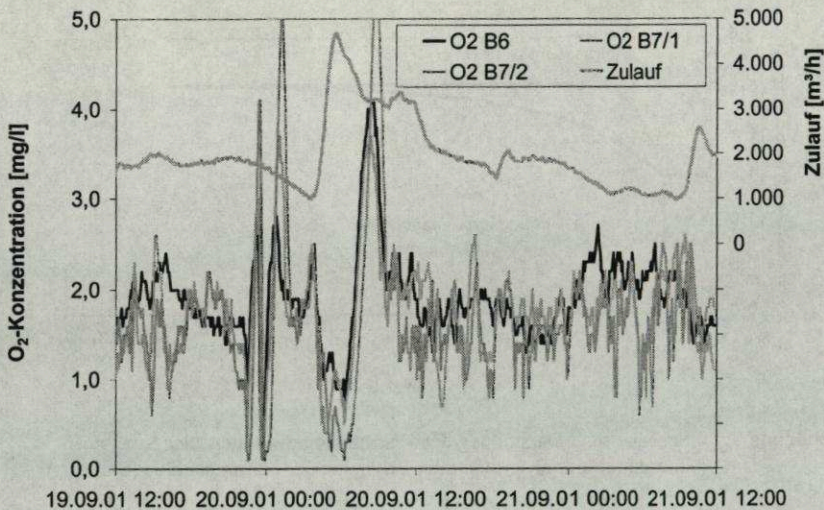
**Abbildung 7:** Schematische Darstellung des Übertragungsverhaltens der Sauerstoffkonzentration bei sprunghafter Erhöhung der Führungsgröße (Sollwert)

In mehreren Versuchen wurde zunächst durch Änderung des  $\text{O}_2$ -Sollwertes die Dynamik des Luftertrages ermittelt, um Richtwerte für die Vorgabe des Referenzverhaltens zu erhalten. Mit den gewonnenen Übergangsvorgängen wurde die Ordnung des Referenzmodells festgelegt und deren Parameter berechnet. Damit ist die Dynamik eines Umsteuervorganges vorgegeben und es kann erreicht werden, daß weder der Modellfehler über alle Grenzen wächst noch die Stellgrößen ihre Begrenzungen erreichen (Billerbeck *et al.*, 1996). Die Anzahl der Adaptionparameter ist durch das gewählte Referenzmodell festgelegt. Für den Sauerstoffeintrag ergibt sich ein Übertragungsverhalten mit einfacher Verzögerung. Dieses ist schematisch in Abbildung 7 dargestellt. Für das Referenzmodell ergibt sich aus mehreren Messungen die Zeitkonstante  $T_s$  für das Bezugsmodell aus der jeweiligen Anlagendynamik. Sie sollte nahezu konstant sein, da sich die physikalischen bzw. technischen Parameter des Luft-

eintragungssystem nur langfristig ändern können (z.B. Verblockung der Belüftermembranen). Generell ist festzuhalten, dass mit zunehmender Zeitkonstante weniger Stelleistung notwendig wird, um die gewünschten Führungsgrößenänderungen durchführen zu können.

Beispielhaft soll im Folgenden die Verbesserung in der Einhaltung der  $O_2$ -Sollwerte dargestellt werden. Die Daten stellen einen Zeitraum im September 2001 dar.

In Abbildung 8 sind die hydraulische Belastung sowie die  $O_2$ -Konzentrationen für die Beckenteile einer konventionell geregelten Straße dargestellt.

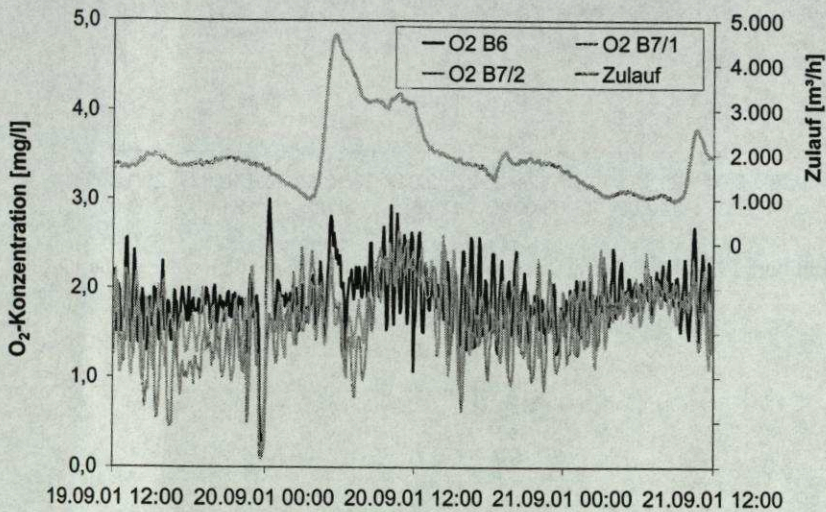


**Abbildung 8:** Hydraulische Belastung und Sauerstoffkonzentrationen der Straße mit konventionellem Regler

Es ist deutlich zu erkennen, dass sowohl im Trockenwetterfall bei ca.  $2.000 \text{ m}^3/\text{h}$  Zufluss als auch bei Stoßbelastungen durch Mischwasserereignisse die Sollwerte nur unzureichend durch das Regelsystem erreicht werden. Es kommt zu starken Überschwingweiten resp. erhöhtem Energieverbrauch bzw. Sauerstoffunterversorgung der aeroben Biomasse. Das Überschwingen am 20.09. um 23:00 Uhr ist auf einen plötzlichen Druckabfall auf der Sammelschiene des Belüftungssystems durch Ausfall von Belüftungsaggregaten zurückzuführen. Diese Störung ruft auch nach Beseitigung extreme Schwankungen in der Luftzufuhr hervor. Die Reaktion des Reglers ist sehr träge auf Grund einer geringen Kreisverstärkung.

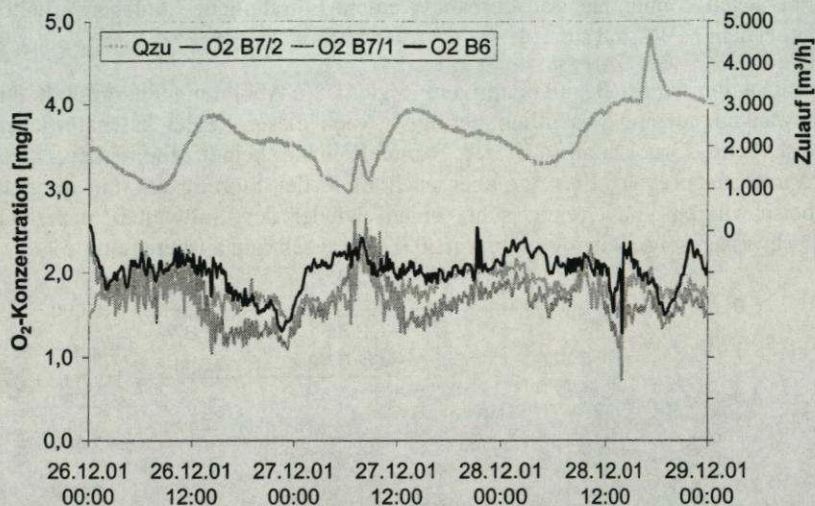
Änderungen können nicht ausgeregelt werden. Ein ähnliches Anlagenverhalten tritt bei dem MW-Stoß auf.

Die Reaktion der Straße mit adaptivem Regler ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Schwankungen sind wesentlich geringer. Auch dieser Regler hat natürlicherweise beim Druckabfall auf der Sammelschiene keine Möglichkeit, diese Störung auszuregeln. Er zeigt aber nach Ende der Störung nur ein geringes Überschwingen und erreicht sehr schnell wieder den Sollwertebereich. Das Mischwasserereignis ab 4:00 Uhr am 20.09. wird sehr gut ausgeregelt.

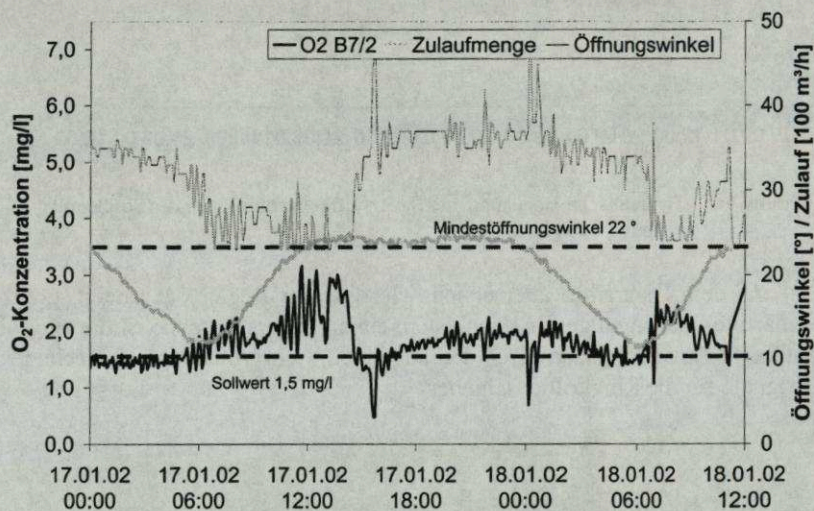


**Abbildung 9:** Hydraulische Belastung und Sauerstoffkonzentrationen der Straße mit adaptivem Regler

Es ist aus dem Diagramm aber ersichtlich, dass der Regler dazu neigt, grenzyklenartige Schwingungen in das System einzubringen. Ursache ist die zu grob quantisierte Umsetzung der durch den adaptiven Mehrgrößenregler berechneten Stellsignale für die Ringkolbenschieber.



**Abbildung 10:** Hydraulische Belastung und Sauerstoffkonzentrationen der Straße mit adaptivem Regler nach Implementierung eines separaten Stellregelkreises für den Ringkolbenschieber



**Abbildung 11:** Öffnungswinkel des Ringkolbenschiebers und Sauerstoffkonzentration im letzten Beckenteil

Deshalb wurde zusätzlich zum adaptiven Regelsystem ein separater Stellregelkreis für die Positionierung der Ringkolbenschieber implementiert, der die Impulsbreitenmodulation ersetzt. Damit ergibt sich jetzt die Regelgüte des modelladaptiven Reglers gemäß Abbildung 10. Die Schwingungen haben sich gegenüber Abbildung 9 deutlich verringert. Das Abtastintervall blieb jedoch unverändert, so dass die Regelgüte kaum noch zu verbessern und die noch vorhandenen Schwankungen durch Änderungen am Regler kaum noch zu verringern sind.

Durch die Abstufung des Sollwertprofils in Richtung der hinteren Beckenteile kommt es besonders in den Nacht- und Morgenstunden (bei geringer Frachtbelastung der Anlage) im letzten Beckenteil zum Erreichen der unteren Begrenzung der Öffnungsweite des Ringkolbenschiebers bei 22 % (siehe Abbildung 11). Dadurch stellt sich im letzten Beckenteil eine höhere  $O_2$ -Konzentration ein, als prozessbedingt notwendig wäre. Somit wird einmal zu viel Energie aufgewendet und zum anderen durch die Rezirkulation evtl. Sauerstoff in die unbelüfteten Beckenteile verfrachtet, der die dort ablaufenden Prozesse negativ beeinflusst. Dieses Phänomen kann durch verschiedene Maßnahmen beseitigt werden. Eine Lösung ist die andersartige Abstufung der  $O_2$ -Sollwerte über die Becken. Der Sollwert für den letzten Beckenteil sollte so festgesetzt werden, dass kein Sauerstoff verschleppt, aber soviel Luft eingetragen werden muss, um den Öffnungswinkel größer als 22 % zu halten. Im mittleren belüfteten Beckenteil sowie im ersten belüfteten Teil wird der Sollwert entsprechend der Belastung angepasst. Bei starken Belastungen der Anlage kann nach Anhebung der Sollwerte für die beiden ersten Teile natürlich jederzeit auch der Sollwert für den dritten Teil angehoben werden. Dies ist in der rechten Darstellung in Abbildung 12 zu sehen.

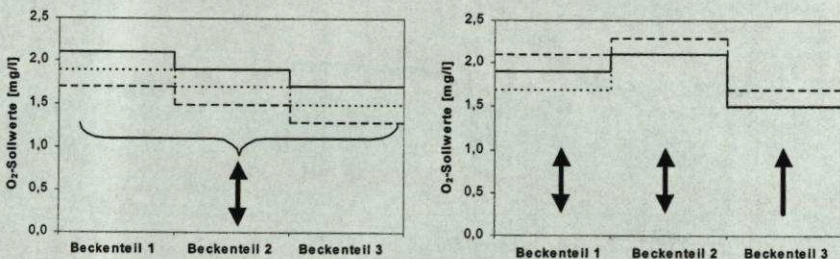


Abbildung 12: Sollwertvorgaben (links: konventionell, rechts: zur Vermeidung der Öffnungswinkelbeschränkung)

Neben dieser variablen Sollwertgestaltung, die zur Realisierung ein Regelsystem mit sehr gutem Führungsverhalten benötigt (wie es das adaptive Mehrgrößenregelsystem ist), gibt es andere technologische Ansätze. So wäre z.B. eine Frachtvergleichmäßigung durch gezielte Regelung der Prozesswasserzugabe in den belastungsarmen Tageszeiten eine Vorgehensweise.

### 3.3 Voraussetzungen für eine praktische Anwendung

Bei der Realisierung einer Regelungsaufgabe ist es wichtig, alle auftretenden Betriebs- und Störzustände zu erfassen bzw. abzufangen, um die Funktionsbedingungen des Regelungsalgorithmus nicht zu verletzen. Konventionelle PID-Regler können ohne weiteres auch ohne korrekte Messwerte betrieben werden. Es kann dann nur passieren, dass die Luftmenge stark erhöht oder verringert wird (z.B. bei Signalausfall der O<sub>2</sub>-Messung oder Sondenkalibrierung auf Sättigungskonzentration). Wenn das richtige Messsignal anliegt, kann der Regler wieder arbeiten. Bei einem adaptiven Regler führt das beschriebene Szenario aber zu einem Verstellen der veränderlichen Parameter. Ein Ausweg wäre in diesem Fall eine Vorgabe von Ersatzwerten für den Regler bzw. ein "Einfrieren" der Parameter bis zur Beseitigung der Störung.

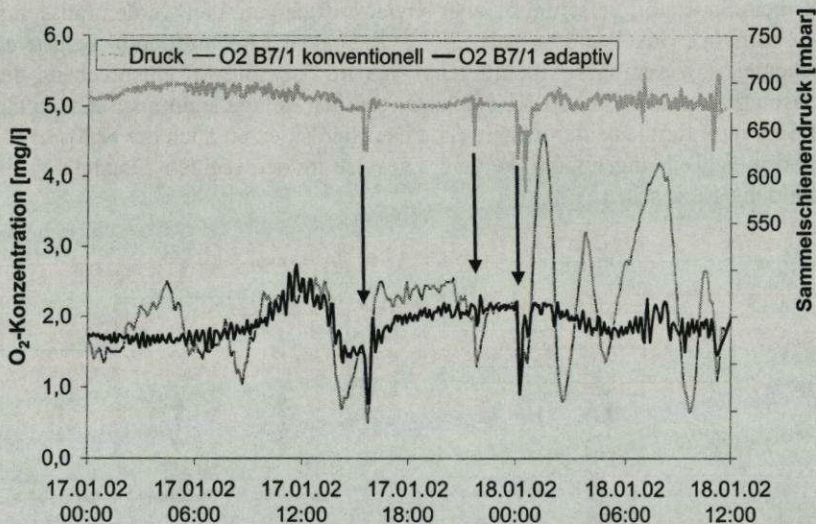
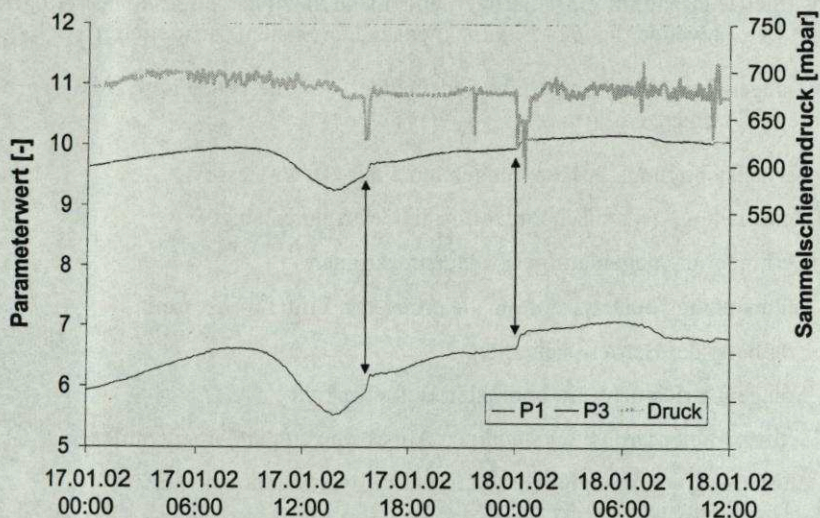


Abbildung 13: Druckschwankungen in der Sammelschiene der Luftzufuhr

Ebenso kann eine betriebliche Störung z.B. ein Abfall des Drucks innerhalb der Sammelschiene, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, zu unerwarteten Reaktionen des Regelsystems führen (siehe Abbildung 13). Die Konstantdruckregelung für die Luftzufuhr stellt einen separaten Regelkreis dar und ist dafür zuständig, dem Regelsystem für die O<sub>2</sub>-Konzentration (adaptiv oder konventionell) eine vom Öffnungswinkel abhängige Luftmenge zur Verfügung zu stellen. Durch Umschaltvorgänge an den Verdichteraggregaten oder Unzulänglichkeiten der Konstantdruckregelung kommt es zu kurzzeitigen starken Druckabfällen oder zu Schwingungen im Luftdruck. Während der adaptive Regler diese Störungen auf Grund der variierenden Kreisverstärkung relativ schnell ausregelt, wird die Regelung des konventionellen Reglers lang anhaltend gestört. Dies führt zu großen Überschwingweiten mit den damit verbundenen negativen Auswirkungen (Abbildung 8 und Abbildung 9).

Trotz des positiven Verhaltens des adaptiven Reglers bei dieser Betriebssituation kommt es zu einer eigentlich ungewollten Änderung der adaptiven Parameter (siehe Abbildung 14).



**Abbildung 14:** Ausgewählte Parameter des adaptiven Reglers bei Druckabfall auf der Sammelschiene

Es ist in diesem Fall z.B. möglich, den Regler anzuhalten, wenn der Druck einen vorgegebenen Sicherheitsbereich nach oben oder unten verlässt, um ein Verstellen der Parameter zu verhindern. Nach Rückkehr des Drucks in den



vorgegebenen Bereich kann der Regler seine Arbeit fortsetzen. Für den Zeitraum aus Abbildung 13 sind in Abbildung 14 zwei der vier adaptiven Parameter abgebildet. Es ist gut zu erkennen, dass sie nicht konstant verlaufen, sondern an belastungsabhängige Schwankungen innerhalb des Prozesses angepasst werden (hohe Dynamik bei maximaler TW-Tagesfracht am vormittag). Durch den Störfall "Druckabfall auf der Sammelschiene" wird eine kurzfristige Änderung innerhalb einiger Parameter hervorgerufen, während die sonst zu erkennenden Änderungen relativ langsam verlaufen. Diese kurzfristigen Änderungen beeinflussen die Regelgüte negativ, da sie den Regler abweichend seiner suboptimalen Einstellungen fahren.

### 3.4 Vor- und Nachteile beim Einsatz eines adaptiven Mehrgrößenreglers

Ein echter Nachteil eines solchen Mehrgrößenregelsystems ist der mit der Implementierung verbundene zeitliche und damit auch finanzielle Aufwand. Außerdem kann es bei zukünftigen Praxisanwendungen im Abwassersektor zu Akzeptanzproblemen seitens der Anwender kommen, da dieser Art der Regelung die Transparenz einschleifiger und manuell zu parametrierender Regler fehlt. Der Anwender hat den Eindruck, er sei dem System „ausgeliefert“.

Dem gegenüber stehen eine Reihe bedeutender Vorteile von adaptiven Mehrgrößenregelsystemen:

- Berücksichtigung der Kopplungen innerhalb der Prozesse
- Verarbeitung dynamischer nichtlinearer Zusammenhänge
- Verhinderung gegenläufiger Anlagenreaktionen
- Unterstützung bei bzw. Automatisierung von Einfahrprozessen
- Erhöhung der Betriebssicherheit
- Anlagenbetrieb nahe am optimalen Betriebspunkt
- Selbstparametrierung zur ständigen Anpassung an den Arbeitspunkt
- Einsparung von Energie (z.B. Luftzufuhr, Rezirkulationen etc.)
- Stabilisierung bzw. Senkung der Ablaufkonzentrationen und damit Verringerung der Abwasserabgabe

Diese Vorteile kommen um so mehr zum Tragen, je mehr Teilregelungen in das Mehrgrößenkonzept integriert werden.

Zur Überwindung der mit dem Einsatz eines adaptiven Mehrgrößenreglers verbundenen Nachteile wurde im Rahmen des o.g. Forschungsvorhabens eine hybride Struktur für das Gesamtregelungskonzept erarbeitet: Neben der prozessnahen, adaptiven Regelung zur dynamischen Prozessführung wurde ein Beratungs- und Diagnosesystem vorgesehen, über das übergeordnete Leitsystemaufgaben bearbeitet werden können. Hierzu zählen Überwachungsfunktionen (z.B. Meldung außergewöhnlicher Betriebszustände) und Entscheidungs- und Beratungsfunktionen zur Umschaltung des Betriebsregimes. Durch diesen Ansatz kann die Adaption des Regelungskonzeptes an spezifische Randbedingungen von Anlagen erleichtert und die Transparenz der ablaufenden Prozesse verbessert werden.

### 3.5 Weitere Einsatzmöglichkeiten

Ein Mehrgrößenregler ist zweckmäßigerweise modular aufzubauen. Dann kann ohne weiteres für eine neue Regelungsaufgabe ein Teilregler implementiert werden. Dieser kann auf die vorliegenden Mess- und Stellgrößen zugreifen und wird in den Regler integriert. Beispiele für weitere Anwendungsmöglichkeiten sind:

- Dosierung von externen C-Quellen
- Dosierung von Prozesswasser aus der anaeroben Schlammbehandlung
- Regelung der Vorversäuerung von Primärschlamm
- Beeinflussung der TS-Konzentration in den Belebungsbecken
- gezielte Umfahrung einer Vorklärung zur Unterstützung der biologischen Phosphor-Elimination bzw. Denitrifikation
- prozessabhängige Aufteilung des Zuflusses auf verschiedene Kaskaden

Es ist auch denkbar, mittels Mehrgrößenregelsystemen eine Kopplung von Kanalnetz und Kläranlage herzustellen, indem z.B. eine Mischwasserbeckenentleerung in Abhängigkeit des biologischen Reinigungsprozesses durchgeführt wird. Durch eine intelligente Arbeitsteilung zwischen Mehrgrößenregler und Beratungs- und Diagnosesystem entsprechend dem beschriebenen Ansatz können dabei die Vorteile beider Systeme genutzt werden.

## 4 Ausblick

Das vorgestellte adaptive Mehrgrößenregelsystem hat in ersten halb- und großtechnischen Einsätzen nachgewiesen, dass damit die komplexen nichtlinearen Prozesse einer biologischen Abwasserreinigungsanlage sehr gut geregelt werden können, um die geforderten Reinigungsziele unter einem minimalen Energieeinsatz zu erreichen. Die Umsetzung des Regelsystems in der Praxis ist mit anlagenbedingten Schwierigkeiten verbunden. Bei sorgfältiger Planung und entsprechender Umsetzung ist es auch unter erschwerten Einsatzbedingungen möglich, das Regelsystem auf einer Kläranlage zu implementieren.

Im Projektfortschritt erfolgt die Installation auf einer weiteren Großkläranlage zum Test an einer anderen Anlagenkonfiguration sowie zur Sammlung von Betriebserfahrungen mit dem Regler.

## 5 Literatur

- Alex J.; Tschepetzki R. (2001). Prädiktive Steuerung und Regelung der N-Elimination. Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen. VDI-Berichte 1619, VDI-Verlag Düsseldorf
- ATV-M 268 (1997). Steuern und Regeln der N-Elimination beim Belebungsverfahren. GFA, St. Augustin.
- Billerbeck, G. (1977). Synthese modelladaptiver Systeme mit minimalphasigen und allpaßhaltigen Prozessen. Dissertation A, TU Dresden.
- Billerbeck, G.; Klinsmann, L.; Richter, L. (1996). Untersuchungen zur steuerungstechnischen Einflußnahme auf den Prozeß der erweiterten biologischen Abwasserreinigung. GMA-Kongreß, Meß- und Automatisierungstechnik, Baden-Baden 9.-11.9.96, VDI-Bericht 1282, S. 279-287.
- DIN 19226-1, Ausgabe: 1994-02 Leittechnik; Regelungstechnik und Steuerungstechnik; Allgemeine Grundbegriffe. Deutsches Institut für Normung e.V.
- Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme Dresden; Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung Karlsruhe; TU Dresden, Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft (1999). Entwicklung eines hybriden Steuerungssystems zur rechnergestützten Prozeßführung von Abwasserreinigungsanlagen, Abschlußbericht.
- Gujer W. (1990). Mathematische Beschreibung technischer Systeme. Lehrmaterial ETH Zürich.
- Hansen, J. (1997). Der Einsatz von Fuzzy Control für Regelungsaufgaben im Bereich der Nährstoffelimination in Kommunalen Kläranlagen. Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft Kaiserslautern

- Henze M., Grady C. P. L., Gujer W., Marais G.v.R. and Matsuo T. (1987). A general model for single-sludge wastewater treatment systems. *Water Research*, **21** (5), 505-515.
- Nowak, O. 1997. Ziele, Grenzen und Vorbedingungen der dynamischen Simulation. Wiener Mitteilungen, Band 137, S. 35 – 82.
- Oppelt, W. (1972). Kleines Handbuch technischer Regelvorgänge. 5. Auflage Weinheim/Bergstraße: Verlag Chemie GmbH.
- Samal, E.; Becker, W. (1996). Grundriß der praktischen Regelungstechnik. R. Oldenbourg Verlag München, Wien, 19. überarbeitete und aktualisierte Auflage
- Schmitz, U.; Husmann, M.; Orth, H. (2000). MSR-Konzepte zur Verbesserung der Stickstoffelimination in Belebungsanlagen – Ein Überblick. *gwf Wasser Abwasser Sonderheft Messen/Steuern/Regeln* 141 (15), S. 16-23.
- Tschepetzki, R.; Jumar, U. (2000). MSR-Konzepte für Kläranlagen – eine Bestandsaufnahme am Beispiel der ATV-Landesgruppe Nord-Ost. *gwf Wasser Abwasser* 141 (11), S. 780 – 785.

## Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

e	Regeldifferenz
EW	Einwohnerwert
J	Stofffluss [kg/d]
$K_{NH}$	Halbsättigungskonstante für $S_{NH}$ [mg N/l]
$K_{O_A}$	heterotrophe Halbsättigungskonstante für $S_O$ [mg $O_2$ /l]
$K_{O_H}$	autotrophe Halbsättigungskonstante für $S_O$ [mg $O_2$ /l]
$K_{S_H}$	Halbsättigungskonstante für $S_S$ [mg CSB/l]
M	Masse [kg]
$NH_4-N$	Ammoniumkonzentration [mg N/l]
$NO_3-N$	Nitratkonzentration [mg N/l]
$O_2$	Sauerstoffkonzentration [mg $O_2$ /l]
$PO_4-P$	Phosphatkonzentration [mg P/l]
$r_{O_2}$	Umwandlungsgeschwindigkeit für Sauerstoff
$S_{NH}$	Ammoniumkonzentration (ASM – Notation) [mg N/l]
$S_O$	Sauerstoffkonzentration (ASM – Notation) [mg $O_2$ /l]
$S_S$	leicht abbaubares gelöstes Substrat (CSB) [mg CSB/l]
t	Zeit [d]
$T_s$	Zeitkonstante [s]
TS	Trockensubstanzgehalt [g/l]
$T_t$	Totzeit [s]
TW	Trockenwetter

V	Volumen [m <sup>3</sup> ]
x	Regelgröße
y	Stellgröße
z	Störgröße

## Autoren:

Dipl.-Ing. Markus Ahnert

Dr.-Ing. Lutz Klinsmann,  
Dr.-Ing. Gerhard BillerbeckDr.-Ing. Eberhard Böhm  
Dipl.-Ing. (FH) Thomas  
HillenbrandInstitut für Siedlungs- und  
Industriewasserwirtschaft  
TU DresdenFraunhofer-Institut für  
Verkehrs-  
und InfrastruktursystemeFraunhofer-Institut für  
Systemtechnik und Innova-  
tionsforschungMommsenstraße 13  
D 01069 DresdenZeunerstraße 38  
D 01069 DresdenBreslauer Straße 48  
D 76139 Karlsruhe

Tel.: 0351 - 463 3 7020

Tel.: 0351 - 464 0 638

Tel.: 0721 - 6809-126

Tel.: 0351 - 464 0 630

Tel.: 0721 - 6809-119

Fax: 0351 - 463 3 7204

Fax: 0351 - 464 0 613

Fax: 0721 - 689152

E-Mail:

[Markus.Ahnert@  
mailbox.tu-dresden.de](mailto:Markus.Ahnert@<br/>mailbox.tu-dresden.de)

E-Mail:

[Klinsmann@ivi.fhg.de](mailto:Klinsmann@ivi.fhg.de)

E-Mail:

[Billerbeck@ivi.fhg.de](mailto:Billerbeck@ivi.fhg.de)

E-Mail:

[Boe@isi.fhg.de](mailto:Boe@isi.fhg.de)

E-Mail:

[Hi@isi.fhg.de](mailto:Hi@isi.fhg.de)

URL:

[http://www.tu-  
dresden.de/fghhisi/isi.html](http://www.tu-<br/>dresden.de/fghhisi/isi.html)

URL:

<http://www.ivi.fhg.de>

URL:

<http://www.isi.fhg.de>