

# Fuzzybasierte Regelung des Mischwasserzuflusses

## Großtechnische Untersuchung zur Integration von Kanalnetz und Kläranlage

Katja Seggelke, Jens Tränckner (Dresden), Lothar Fuchs (Hannover) und Peter Krebs (Dresden)

### Zusammenfassung

Die Regelung des maximalen Mischwasserzuflusses zur Kläranlage ist eine effiziente Methode, um die verfügbaren Kapazitäten des Gesamtsystems „Kanalnetz und Kläranlage“ bestmöglich auszunutzen. Neben der dynamischen Einstellung dieser Schnittstelle der Systeme können zusätzlich aufeinander abgestimmte Steuerungen in Kanalnetz oder Kläranlage eine vollständig integrierte Steuerung ermöglichen. Im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Forschungsprojekts wurde nach diversen Voruntersuchungen eine erste großtechnische Erprobung am Beispiel des Einzugsgebiets Chemnitz durchgeführt. Mittels einer fuzzybasierten Regelung konnte die gesamte Entlastungsfracht ins Gewässer, analog zu vorangegangenen Simulationsergebnissen, ereignisabhängig bis zu ca. 25 Prozent reduziert werden, ohne den Betrieb der Kläranlage zu gefährden. Durch die Mitnutzung der freien Behandlungskapazitäten der Kläranlage besteht andererseits ein noch näher zu quantifizierendes Einsparpotenzial an noch fehlenden Kanalnetzbauwerken.

**Schlagwörter:** Entwässerungssysteme, Kläranlage, Integration, Mischwasser, Zufluss, Behandlung, Emission, Fuzzy Logic, Steuerung, integriert, Untersuchung, großtechnisch

DOI: 10.3242.kae2009.02.004

### Abstract

#### Fuzzy-Based Control of Combined Water Flow Large-Scale Study on the Integration of Sewer System and Wastewater Treatment Plant

The control of maximum combined water flow into wastewater treatment plants constitutes an efficient method to make the best possible use of the existing capacities of the overall system “sewer network and wastewater treatment plant”. In addition to a dynamic setting of this interface between the two systems, well-aligned and coordinated control systems in the sewer network or at the wastewater treatment plant can facilitate a complete integrated control system. Within the framework of a research project sponsored by the Federal Environmental Foundation (DBU), after various preliminary investigations, a first large-scale implementation was tested, using the Chemnitz catchment area as an example. Thanks to a fuzzy-based control, and in keeping with prior simulation outcomes, the total load discharged into the water body could be reduced up to 25 percent, depending on the event, without jeopardising the operation of the wastewater treatment plant. Furthermore, relying on the free treatment capacities of the wastewater treatment plant could lead to a considerable savings potential, which still has to be quantified, in terms of the construction of still missing sewer network structures.

**Key words:** drainage systems, wastewater treatment plant, integration, combined sewage, flow, treatment, emission, fuzzy, logic, control, integrated, study, large-scale

## 1 Einführung

Die dynamische Einstellung des maximalen Mischwasserzuflusses zur Kläranlage kann unter ständiger Kontrolle der vorliegenden Randbedingungen das System Kanalnetz und Kläranlage optimal ausnutzen. Simulative Untersuchungen haben mehrfach den Nutzen einer integrierten Steuerung von Kanalnetz und Kläranlage optimal ausnutzen. Simulative Untersuchungen haben mehrfach den Nutzen einer integrierten Steuerung von Kanalnetz und Kläranlage nachgewiesen (zum Beispiel [1–5]). Auf den in den letzten Jahren gebauten oder erweiterten Kläranlagen sind teilweise freie Kapazitäten bei

Mischwasserbelastungen unbestritten. Online-Messungen liegen auf vielen der großen Kläranlagen routinemäßig vor und können bekannte Schwachstellen [5–7] zeitnah aufdecken.

Auch die formale Randbedingung für die Bewirtschaftung des Kläranlagenzuflusses ist durch das Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 198 [8] seit einigen Jahren gegeben. Der bislang bei der Bemessung festzusetzende Mischwasserzufluss ist nunmehr als Bandbreite vorgegeben, die eine Berücksichtigung der jeweiligen Einzugsgebiets- und Kläranlagencharakteristika zulässt [9]. Eine dynamische Ausnutzung dieses Bereichs könnte die

Nutzung freier Kapazitäten ermöglichen oder drohende Grenzwertüberschreitungen, zum Beispiel infolge von Schlammabtrieb aus der Nachklärung, vom Gewässer abwenden.

Noch ist die Regelung des Mischwasserzuflusses jedoch Stand der Wissenschaft und muss durch Praxisanwendungen Nutzen und Tauglichkeit unter Beweis stellen. Vor diesem Hintergrund wurde vom Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH (itwh) als Antragsteller und dem Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft der TU Dresden als Kooperationspartner ein von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördertes Forschungsprojekt bearbeitet. Gesamtziel war die Entwicklung und Erprobung eines Regelungskonzepts für den Mischwasserzufluss. Nachdem in der Projektphase 1 im Jahr 2005 [10] zunächst Voruntersuchungen durchgeführt worden waren, erfolgte in der zweiten Phase die großtechnische Umsetzung in Zusammenarbeit mit den Stadtwerken Chemnitz und der zuständigen Überwachungsbehörde.

Im vorliegenden Beitrag werden neben einer Zusammenstellung wesentlicher Ziele und Anforderungen an die Regelung des Mischwasserzuflusses das entworfene Fuzzy-Regelungskonzept und die Ergebnisse aus der Praxiserprobung vorgestellt.

## 2 Ziele und Anforderungen der Regelung des Mischwasserzuflusses

Folgende Zielsetzungen können je nach vorliegenden Randbedingungen mit einer integrierten Bewirtschaftung von Kanalnetz und Kläranlage an der Schnittstelle, dem Zufluss zur Kläranlage, verfolgt werden:

- Reduktion der Gesamtemissionen aus Kanalnetz und Kläranlage zum effizienten Gewässerschutz,
- Einsparung von Investitionskosten in Kanalnetz oder Kläranlage durch optimierte Nutzung vorhandener Kapazitäten im jeweils anderen Systemteil,
- eventuell: Reduzierung der Betriebskosten (zum Beispiel Energie) durch Drosselung auf den Minimalwert nach ATV-

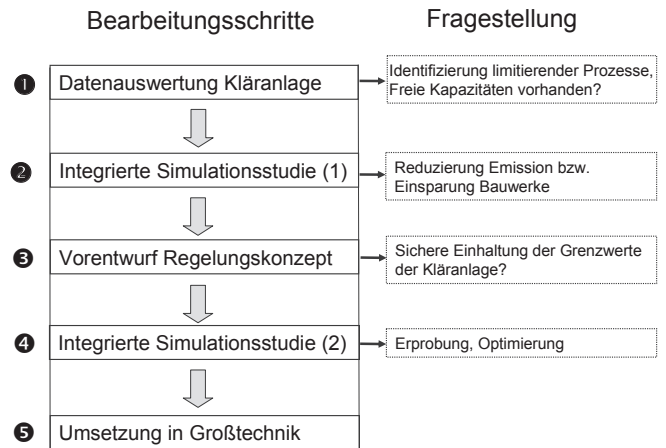


Abb. 1: Erforderliches Bearbeitungskonzept

DVWK-A 198 im Verlauf eines Starkregenereignisses. Dadurch wird verhindert, dass Mischwasser zusätzlich behandelt wird, obwohl im Zulauf zur Kläranlage wegen starker Verdünnung niedrigere Konzentrationen vorhanden sind als im Ablauf.

Das erforderliche Bearbeitungskonzept ist in Abbildung 1 dargestellt. Zunächst müssen Voruntersuchungen bezüglich Anlagenkonfiguration und dem jeweiligen Einzugsgebiet erfolgen. Mittels einer Datenauswertung (Schritt 1) können limitierende Prozesse oder freie Kapazitäten identifiziert werden. Im zweiten Schritt sollte mittels einer integrierten Simulationsstudie der potenzielle Nutzen ermittelt werden: Ist eine Reduzierung der Emission oder eine Einsparung von geplantem Beckenvolumen erforderlich bzw. möglich? Heute verfügbare Modelle sind, nach entsprechend detaillierter Kalibrierung und Verifizierung an Messdaten, hierfür gute Werkzeuge und wurden bereits vielfach für integrierte Betrachtungen eingesetzt [2, 11]. Das entworfene Regelungskonzept (Schritt 3) sollte mittels weiterer Simulationsstudien optimiert werden (Schritt 4), bevor die großtechnische Umsetzung folgt (Schritt 5).

	Messwerte	Kontrollziel	Kommentar
<b>Einfache Störgrößen</b>			
gesetzliche Grenzwerte, Ablauf Nachklärbecken	$\text{NH}_4\text{-N}$ , $\text{NO}_3\text{-N}$ ( $= N_{\text{ges, anorg}}$ ) $P_{\text{ges, AN}}$ $\text{CSB}_{\text{AN}}$	Nitrifikation, Denitrifikation P-Eliminierung, Absetzleistung Absetzleistung	grundlegende Randbedingung
sonstige	Trübung Ablauf NK	Absetzleistung	
Anstieg $\Delta Q_z$ pro Zeitschritt	$Q_z$	Absetzleistung	
<b>Störgrößen mit Prognosehorizont</b>			
Betriebswerte	$\text{TS}_{\text{BB}}$ je Straße $\text{TS}_{\text{RS}}$ $\text{O}_2$	biologischer Umsatz, Absetzen Absetzleistung, Eindicken Nitrifikation	übliche Bandbreiten ok? Wenn nicht: Hinweis auf Problem
via Nitrifikationskapazität	$f(\text{NH}_4\text{-N}_z, Q_z, \text{TS}_{\text{BB}}, T_{\text{BB}})^{1)}$	Nitrifikation	Nutzung einfacher, bekannter Modellansätze
via Denitrifikationskapazität	$f(\text{CSB}_z, Q_z, \text{NO}_3\text{-N}_{\text{DN}}, Q_{\text{Rezi}})$	Denitrifikation	
zulässige $q_{\text{sv}}$	$f(\text{ISV}, A_{\text{NK}}, \text{max. } Q_{\text{zu}}, \text{TS}_{\text{BB}})$	Absetzleistung	
sonstige	$\text{NH}_4\text{-N}$ , Ablauf Belebungsbecken $\text{NO}_3\text{-N}$ , Ablauf Belebungsbecken $\text{PO}_4\text{-P}$ , Ablauf Belebungsbecken VSV (online, Labor), ISV Schlammspiegelhöhe NKB Prognose Schlammspiegel <sup>2)</sup> $\text{NH}_4\text{-N}$ -Fracht im Zulauf BB CSB/ $\text{NH}_4\text{-N}$ -Verhältnis	Nitrifikation Denitrifikation P-Elimination Absetzleistung Absetzleistung Absetzleistung Nitrifikation Denitrifikation	können Hinweise liefern, dass Probleme bevorstehen
	$\text{NO}_3\text{-N}$ , $\text{PO}_4\text{-P}$ , Ablauf DN	Bio-P, Denitrifikation	
Abflussmodell	Regenmesser	Dauer und Intensität $\Rightarrow$ Prognose der Belastung	Modell

<sup>1)</sup> vgl. [7], <sup>2)</sup> vgl. [13]

Tabelle 1: Übersicht über potenzielle Störgrößen mit und ohne Prognosehorizont

Für die Entwicklung des Regelungskonzeptes ist es zum Beispiel sinnvoll, gemäß Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 198 einen zulässigen Regelbereich zu ermitteln. In das Regelungskonzept müssen folgende Randbedingungen einbezogen werden:

- Einhaltung der Überwachungswerte der Kläranlage sowie der maximalen spezifischen Schmutzfracht aus Mischwasserentlastungen, entsprechend den gesetzlichen Vorschriften,
- Sicherstellung der Betriebsstabilität der Kläranlage.

Dies bedingt eine ständige Kontrolle der kritischen Reinigungsprozesse, um zum Beispiel zu hohe Zulauffrachten zu vermeiden. Idealerweise muss eine auslastungsabhängige Zuflussregelung in der Lage sein, das Anlagenverhalten vorausschauend bewerten zu können. Aufgrund des Verweilzeitverhaltens ist eine ausschließlich reaktive Regelung zu träge und wird die vorhandene Kapazität nicht nutzen oder Gefahr laufen, die Anlage zu überlasten.

Übliche Messwerte auf Kläranlagen wurden im Hinblick auf die Nutzungsmöglichkeit als Störgröße im Regelungskonzept überprüft. Ideal ist ein Prognosehorizont vom Auftreten der Auffälligkeit bis zum erhöhten Wert im Ablauf der Kläranlage, da nur so ein gewisser zeitlicher Handlungsspielraum zur Reduzierung des Zuflusses zur Verfügung steht. Sind die Ablauf-

werte erst einmal kritisch, wirkt eine Zuflussdrosselung zu spät.

In Tabelle 1 sind verfügbare Messwerte als mögliche Störgrößen (15-min-Messwerte, unter Umständen reichen Laborwerte) und ihr potenzielles Kontrollziel zusammengestellt. Es wird unterschieden nach Störgrößen mit und ohne Prognosehorizont [12].

### 3 Voruntersuchungen im Einzugsgebiet Chemnitz

#### 3.1 Informationen über das Einzugsgebiet

Die Stadt Chemnitz wird im Wesentlichen im Mischsystem entwässert ( $A_{\text{red}}$  ca. 2000 ha) und das Abwasser in der 1998 in Betrieb genommenen Kläranlage Chemnitz-Heinersdorf gereinigt (vorgeschaltete Denitrifikation, biologische und chemische P-

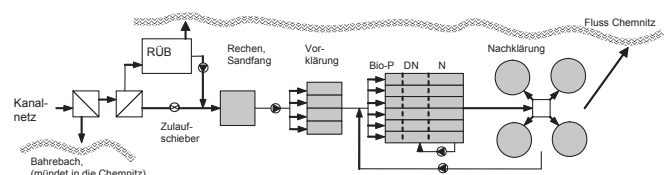


Abb. 2: Fließschema der Kläranlage Chemnitz-Heinersdorf



Abb. 3: Kopplung von Hystem-Extran-Güte und Simba via itwh Control

Elimination; Abbildung 2). Derzeit sind ca. 240 000 E, inklusive industriellen Großeinleitern 360 000 EW, an die Kläranlage angeschlossen. Im Kanalnetz stehen 13 600 m<sup>3</sup> (Stand 2006) Speichervolumen zur Verfügung, davon ca. 6000 m<sup>3</sup> in einem Durchlaufbecken im Nebenschluss unmittelbar vor der Kläranlage. Der Ausbau des Kanalnetzes hinsichtlich Speichervolumen ist noch nicht abgeschlossen. Die Anlage wird bei Mischwasser mit 9450 m<sup>3</sup>/h bereits hoch beschickt (Bandbreite gemäß ATV-DVWK-A 198: 5000 bis 8580 m<sup>3</sup>/h).

Die Voraussetzungen in Chemnitz waren im Hinblick auf die Untersuchungen sehr günstig:

- Auf der Kläranlage sind zahlreiche Online-Messstellen (15-min-Wert) im Zu-, Ablauf- und im Prozess vorhanden. Die Datenablage erfolgt im Assistenzsystem UMOS (Fa. Optum Systemtechnik, Chemnitz), durch das Messdaten in offenen Datenbanken über lange Zeiträume, in unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen und auch im aktuellen Zeitschritt zur Verfügung stehen.
- Es gibt hinsichtlich Bautechnik und Ausrüstung keine Limitierungen bis 11 000 m<sup>3</sup>/h (max. Kapazität 12 200 m<sup>3</sup>/h).
- Der Zufluss zur Kläranlage kann via Regelschütz und magnetisch-induktiver Durchflussmessung (MID) geregelt werden.
- Sowohl für das Kanalnetz [Informationen des Kanalnetzes aus der Bearbeitung des Generalentwässerungsplans (Stand 1997), im Format des hydrodynamischen Modells HYSTEM-EXTRAN] als auch für die Kläranlage (ASM1-SIMBA, Fa. Optum Systemtechnik, derzeit Online als Assistenzsystem in Betrieb) lagen Modelle bei den Stadtwerken Chemnitz vor, die eine gute Grundlage für die Entwicklung eines aktuellen Gesamtmodells waren.

### 3.2 Analyse der Messdaten

Trotz des Betriebs von nur fünf der sechs vorhandenen Straßen ist die Kläranlage im Mittel eher gering belastet (hohes Schlammalter, niedrige Schlammvolumen- und Oberflächenbeschickungen) und hat sehr gute Ablaufwerte. Die Auswertung der Messdaten der Jahre 2004 bis 2006 zeigte folgende Reaktionen der Reinigungsprozesse bei Mischwasserbelastungen:

- Die Nitrifikation ist bei Regenereignissen auch unter ungünstigen Randbedingungen (Winter, fünf von sechs Straßen) nicht als kritisch einzustufen (NH<sub>4</sub>-N<sub>AN</sub> von max. ca. 4 mg/L). Notfalls könnte der NH<sub>4</sub>-N-Messwert im Ablauf der Belebung bereits mit einem Prognosehorizont von mindestens 45 min auf Probleme hinweisen.
- Beim Nitrat (NO<sub>3</sub>-N<sub>AN</sub>) ist die bei Mischwasser in der Literatur beschriebene Verdünnung feststellbar, so dass Konzentrationen unter 4 mg/L auftreten können. Auffällig sind die

teilweise bei Trockenwetter auftretenden hohen NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen zwischen 9 und 14 mg/L. Bei diesen Zuständen ist eine Überlagerung mit einer NH<sub>4</sub>-N-Konzentration bis 4 mg/L im Hinblick auf die behördlichen Grenzwerte bereits problematisch. Bei vier Ereignissen traten Ablaufkonzentrationen von 14 bis 16 mg/L auf, so dass der Grenzwert in Chemnitz von 16,5 mg/L eingehalten werden kann.

- Es kann zu Problemen beim Absetzverhalten kommen. Diese resultierten aus einer Überlagerung mehrerer ungünstiger Faktoren wie schlechten Schlammabsetzeigenschaften, bei langen Ereignissen mit einer insgesamt großen Schlammmasse in der Nachklärung und hohen Gradienten von Zufluss und Rücklaufschlammstrom.
- Die Phosphorelimination war im untersuchten Zeitraum häufiger problematisch, das heißt, der P<sub>ges</sub>-Grenzwert (1 mg/L) wurde auch ohne Störungen der Absetzleistung erreicht. Ursache hierfür ist eine bisher konzentrationsbasierte Fällmitteldosierung, die bei starken hydraulischen Belastungen träge reagiert. Zur Problemlösung wurde eine Umstellung auf frachtbasierte Regelung vorgeschlagen.

### 3.3 Simulative Voruntersuchungen am Gesamtsystem

Das Kanalnetz wurde mit dem hydrodynamischen Schmutzfrachtmodell Hystem-Extran-Güte vom itwh abgebildet und an realen Messdaten kalibriert [12]. Auch am Kläranlagenmodell in SIMBA (ifak, Magdeburg) wurde eine aufwendige Kalibrie-

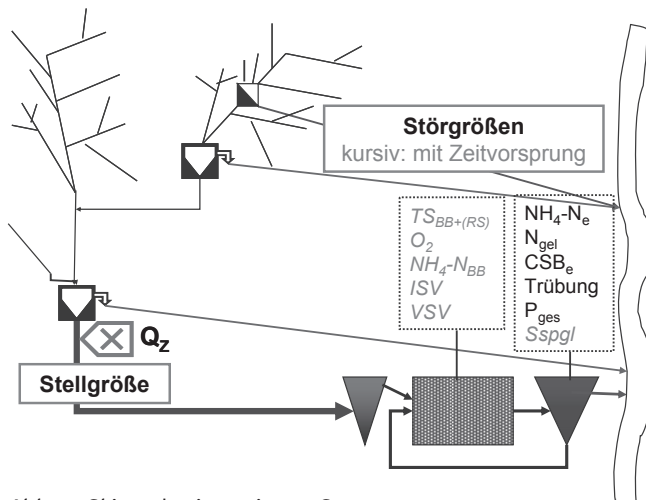


Abb. 4: Skizze des integrierten Steuerungssystems

rung durchgeführt [10]. Die Modelle werden parallel durch die Steuerungssoftware itwh.CONTROL gekoppelt. Beliebige Daten fließen dort zusammen und werden entsprechend verarbeitet, zum Beispiel mit Regeln belegt, und weitergereicht. In Abbildung 3 ist das Zusammenspiel zwischen den Programmen dargestellt.

Mit dem gekoppelten Modell wurden in der ersten Projektphase die Emissionen von Kanalnetz und Kläranlage in das Gewässer für fünf Regenereignisse unterschiedlicher Intensität und Dauer ermittelt [14]. Drei verschiedene Zuflüsseinstellungen wurden simuliert und die Ergebnisse verglichen [gesteuerte Variante, 9450 m<sup>3</sup>/h (Ist-Zustand) und 11 000 m<sup>3</sup>/h als maximaler Zufluss). Bei keinem Lastfall traten Überschreitungen der Ablauf-Grenzwerte auf.

Der Vergleich der Regen untereinander verdeutlicht das wesentliche Steuerungspotenzial vor allem für mittlere und schwache Ereignisse. Bei Starkregen resultiert der wesentliche Frachtanteil aus Entlastungen im Kanalnetz, weit oberhalb des Regenüberlaufbeckens vor der Kläranlage. Bei lang anhaltenden, schwachen Regenereignissen hingegen wird ein Großteil der Fracht bis zur Kläranlage oder bis zum Regenüberlaufbecken vor der Kläranlage geleitet, das heißt, dies sind die wesentlichen Quellen der Frachten ins Gewässer. Durch die Erhöhung des Zuflusses zur Kläranlage besteht die unmittelbare Möglichkeit der Verringerung der Entlastungsfracht.

Besonders bezüglich des für Gewässer unter Umständen toxisch wirkenden Ammoniums/Ammoniaks sind die Möglichkeiten zur Frachtreduktion sehr gut. Die über den gesamten Ereignisverlauf akkumulierten Frachten können um bis zu 23 % reduziert werden.

#### 4 Entwurf des Regelungskonzepts

Die Umsetzung der zuvor verbal formulierten Zusammenhänge erfolgt mithilfe des auf Fuzzy-Logik basierten Regelinterpreters in itwh.CONTROL. Die Eingangsgrößen werden fuzzifiziert, das heißt, der Messwert wird über die verbale Formulierung (zum Beispiel „niedrig“) in Zugehörigkeitsgrade eingeteilt. Mit diesen wird die Regelbasis ausgewertet und nach der Defuzzifizierung ein zahlenmäßiger Sollwert als Ausgangsgröße geliefert.

Für das Einzugsgebiet Chemnitz wurde das in Abbildung 4 skizzierte Steuerungssystem entworfen, das im Fall von Regen-

ereignissen den Zufluss zur Kläranlage dynamisch an die vorhandenen Randbedingungen anpasst. Die Stellgröße ist dabei der Schieber im Zulauf zur Kläranlage, dessen Regelbereich zwischen 8100 und 11 000 m<sup>3</sup>/h (Ist 9450 m<sup>3</sup>/h) gewählt wurde.

Als Störgrößen werden die gemessenen Ablaufwerte sowie Betriebsgrößen hinzugezogen, die mit einem gewissen Zeitvorsprung kritische Zustände der einzelnen Reinigungsprozesse prognostizieren. Dabei ist das Wissen über potenzielle Störungen einbezogen worden. Zum Beispiel wurde die maximale NH<sub>4</sub>-N-Konzentration im Zulauf zur Nachklärung im Zeitraum 2004 bis 2006 durch die Vermischung mit dem Nachklärbeckeninhalt um mindestens 28 % reduziert, der Zeitvorsprung betrug mindestens 45 Minuten. Um das Absetzen in der Nachklärung zu überwachen, wurde zum Beispiel die gemessene Schlammspiegelhöhe in der Nachklärung herangezogen. Hintergrund ist, dass ein hoher Schlammspiegel zu Schlammtrieb führen kann, wenn weiterhin hohe Zuflüsse oder Zuflussschwankungen auftreten. Mittels zusätzlicher Messgrößen, wie zum Beispiel das Schlammvolumen und der TS-Gehalt in der Belebung, können die aktuelle Schlammabsetzfähigkeit berücksichtigt und eine Grenze für den maximalen Zufluss definiert werden.

Zusätzlich zum direkten Bezug auf Messdaten wurde die Verwendung von Vorhersagen mittels vereinfachter kinetischer Prozessmodelle als Störgrößen geprüft. Der Vorteil würde in einem Vorhersagehorizont von mehreren Stunden bestehen, was frühzeitige Regelungseingriffe ermöglichen würde. Durch die Modellvereinfachungen ließen sich die für die zuverlässige Regelung maßgebenden Spitzen nicht zufriedenstellend voraussagen. Nach Auswertung simulativer Vorstudien wurde dieser Weg deshalb nicht weiter verfolgt [15].

Während Tabelle 2 eine Übersicht über die Regelbasis und die definierten Regelgruppennummern zeigt, ist in Tabelle 3 die konkretisierte Regelmatrix in leicht gekürzter Form dargestellt.

Der Zustand „Zufluss sehr niedrig“ wird zum Beispiel eingenommen, wenn eine Überschreitung der Ablaufgrenzwerte droht, so dass eine akute Gewässerbelastung vermieden wird. Dieser Zustand hat oberste Priorität, das heißt, andere Regeln können zu dieser Zeit nicht gelten. Liegt einer der Überwachungswerte bereits im hohen Bereich, nimmt der Zufluss den Zustand „niedrig“ an. Sind hingegen alle Kontrollparameter und Störgrößen in unbedenklichen Wertebereichen, kann der Zufluss einen „sehr hohen“ Wert annehmen. Die Regel 41 besagt zum Beispiel, dass der Zufluss zur Kläranlage „sehr hoch“ (11 000 m<sup>3</sup>/h) sein darf, wenn alle Randbedingungen im normalen Bereich liegen oder die Überwachungswerte kleiner oder gleich „niedrig“ sind.

Als von der Regelbasis unabhängige Randbedingung wurde zur Vermeidung von starken Schwankungen des Zuflusses weiterhin definiert, dass nach einer Reduzierung des Sollwerts dieser kleinere Wert mindestens 60 Minuten gehalten wird, bevor ein erneuter Anstieg zulässig ist. In Tabelle 4 sind exemplarisch

Parameter	niedrig	mittel	hoch
Schlamm Spiegel [m]	1	1,5–2,2	2,5
NH <sub>4</sub> -N <sub>AN</sub> [mg/L]	2	3	4
NH <sub>4</sub> -N <sub>BB</sub> [mg/L]	4	5	7

Tabelle 4: Exemplarische Bereichsdefinition der Mess- und Störgrößen

Regel-Gruppe	Ziele	Stellgröße $Q_{zu}$ im Regler	Umsetzung Mai/Juni08 $Q_{Max}$
Regeln OXX	Verhinderung der unmittelbar bevorstehenden Überschreitung behördlicher Überwachungswerte. Greift zu 100%, wenn bereits ein <b>Überwachungswert &gt; hoch</b> ist!	Sehr niedrig 8.100 m <sup>3</sup> /h	IST-Wert 9.450 m <sup>3</sup> /h
Regeln 1XX	Verhinderung der Überschreitung Überwachungswerte. <ul style="list-style-type: none"> <li>wenn mind. ein <b>Überwachungswert = hoch</b> ist.</li> </ul> <b>und/oder</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Absetzen NK rechnerisch sehr kritisch:</b> Schlamm Spiegel &gt; hoch, qsv bzw. VSV &gt; hoch</li> <li>NH<sub>4</sub>-N im Belebungsbecken <math>\geq</math> hoch</li> </ul>	Niedrig 8.775 m <sup>3</sup> /h	
Regeln 2XX	<ul style="list-style-type: none"> <li>mindestens <b>2 Überwachungswerte sind zeitgleich „nur“ = Mittel</b></li> </ul> <b>und/oder</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Betriebsgrößen (TS, RS, O<sub>2</sub>) in Randbereich</b> (&lt; niedrig, &gt; hoch)</li> <li>Absetzen NK rechnerisch behindert: ISV &gt; 130 mL/g, VSV &gt; 400 mL/L, Schlamm Spiegel = hoch</li> <li>NH<sub>4</sub>-N im Belebungsbecken = hoch</li> </ul>	Mittel = $Q_{z,MW}$ IST 9.450 m <sup>3</sup> /h	
Regeln 3XX	Alle maßgebenden Störgrößen weisen auf <b>problemfreien Betrieb der KA</b> hin. Gefährdung der Überwachungswerte steht nicht an. <ul style="list-style-type: none"> <li>Überwachungswerte: max. einer ist = Mittel, Sonstige <math>\leq</math> niedrig</li> </ul> <b>und/oder</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>NH<sub>4</sub>-N im Belebungsbecken = mittel</li> </ul> <b>und</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Betriebsgrößen (TS, O<sub>2</sub>) in normalem Bereich (= Mittel)</li> <li>Absetzen NK rechnerisch problemfrei (ISV <math>\leq</math> 130 mL/g, VSV <math>\leq</math> 400 mL/L, SSp<sub>g</sub> &lt; hoch)</li> </ul>	Hoch 10.000 m <sup>3</sup> /h	Hoch 10.000 m <sup>3</sup> /h
Regeln 4XX	Alle maßgebenden Störgrößen weisen auf <b>problemfreien Betrieb der KA</b> hin. Gefährdung der Überwachungswerte steht nicht an. <ul style="list-style-type: none"> <li>Alle Überwachungswerte <math>\leq</math> niedrig</li> </ul> <b>und</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Betriebsgrößen (TS, O<sub>2</sub>) in normalem Bereich</li> <li>Absetzen NK rechnerisch problemfrei (wie unter 3XX)</li> <li>NH<sub>4</sub>-N im Belebungsbecken <math>\leq</math> 5 mg/L</li> </ul>	Sehr hoch 11.000 m <sup>3</sup> /h	

Anmerkung: Bei der Umsetzung in Chemnitz wurde letztlich im Rahmen der Versuche in Absprache mit Betreiber und Behörde keine Reduzierung des Zuflusses vorgenommen.

Tabelle 2: Übersicht über die Regelbasis: Beschreibung der definierten Regelgruppen

Regel	Eingangsgrößen							Ausgangsgröße		
	Betriebsgrößen			„Prognose“ Absatzkapazität Nachklärung			Behördliche Überwachungswerte Ablauf Nachklärung			Regelinterpretier
	O <sub>2</sub> [mg/L]	TSBB [g/L]	NH <sub>4</sub> -N <sub>BB</sub> [mg/L]	ISV [ml/g]	VSV [ml/L]	max. und Ø Schlamm-spiegel [m]	NH <sub>4</sub> -N <sub>AN</sub> [mg/L]	P <sub>ges,AN</sub> [mg/L]	weitere	
01							> hoch			sehr Niedrig (8100 m <sup>3</sup> /h)
04								> hoch		
OXX	weitere drei Regeln									
11							hoch	≤ hoch		
14							≤ hoch	hoch		niedrig (8775 m <sup>3</sup> /h)
17			> hoch				≤ hoch			
18					> hoch					
19						> hoch				
1XX	weitere vier Regeln									
21	< niedrig						< hoch			„normal“ (9450 m <sup>3</sup> /h)
22			hoch							
23				≥ hoch						
24		> hoch								
2XX	weitere 13 Regeln									
31							≤ niedrig	≤ niedrig		hoch (10000 m <sup>3</sup> /h)
32							mittel	≤ niedrig		
33							≤ niedrig	≤ niedrig		
34							≤ niedrig	mittel		
35							≤ niedrig	≤ niedrig		
36							≤ niedrig	≤ niedrig		
41							≤ niedrig (≤ 2)	≤ niedrig (≤ 0,5)		

Tabelle 3: Auszug aus der Regelmatrix zur Anpassung von Q<sub>M</sub>

die zugehörigen Bereichsdefinitionen von drei Störgrößen dargestellt [12].

Die Funktionsweise des Reglers wurde mit dem Gesamtmodell anhand von sechs unterschiedlichen Regenereignissen aus dem Jahr 2006 getestet. Die Regenereignisse waren so ausgewählt, dass auch tatsächlich aufgetretene, kritische Ereignisse nachgebildet wurden. Die Transparenz des Fuzzy-Reglers mit einer automatisierten Regelauswertung erlaubte eine ausgezeichnete Kontrolle der Wirkungsweise der einzelnen Regeln sowie der Überlagerung in der Regelbasis (Abbildung 6).

### 5 Ergebnisse der großtechnischen Untersuchungen

Insgesamt fanden in dem Untersuchungszeitraum 18 Regenereignisse mit einem Reglereingriff statt (Abbildung 5). Die Funktionsweise des Reglers war plausibel und zuverlässig, so dass der Zufluss bis zu 11000 m<sup>3</sup>/h ohne weitere Störungen des Prozesses erhöht werden konnte.

Mit Ausnahme der P<sub>ges</sub>-Konzentration im Ablauf der Nachklärung waren alle anderen Störgrößen im normalen Bereich

(„niedrig“ bzw. „mittel“). Die chemische Fällung reagierte im Zeitraum der Versuche nicht auf die Fracht sondern auf die Konzentration, so dass die Ablaufwerte vereinzelt im Bereich „hoch“ lagen.

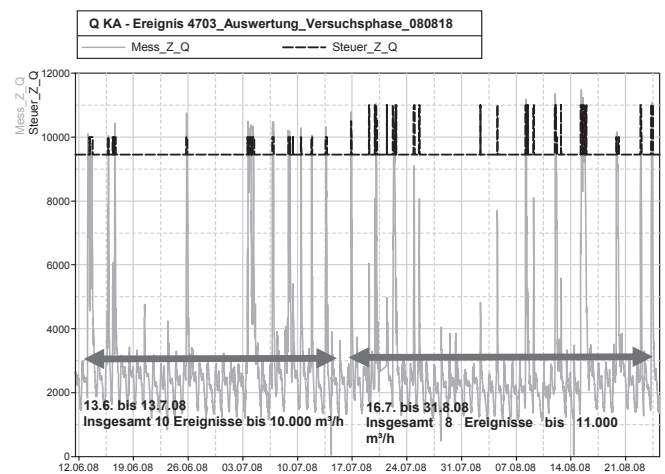


Abb. 5: Messwerte und Sollwerte aus dem Regler im Untersuchungszeitraum

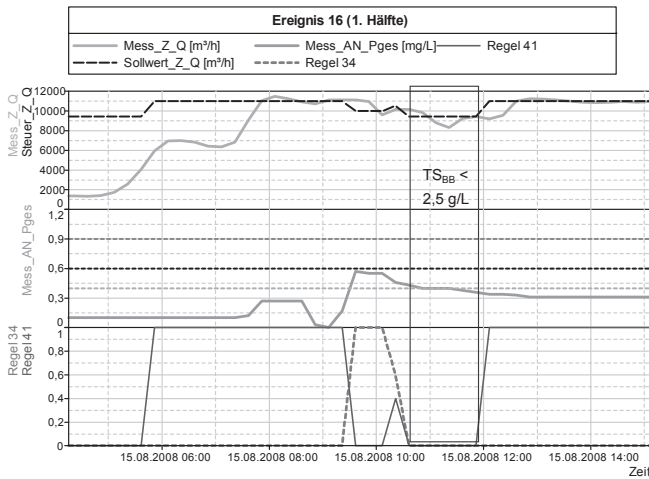


Abb. 6: Ereignis mit Reglereingriff

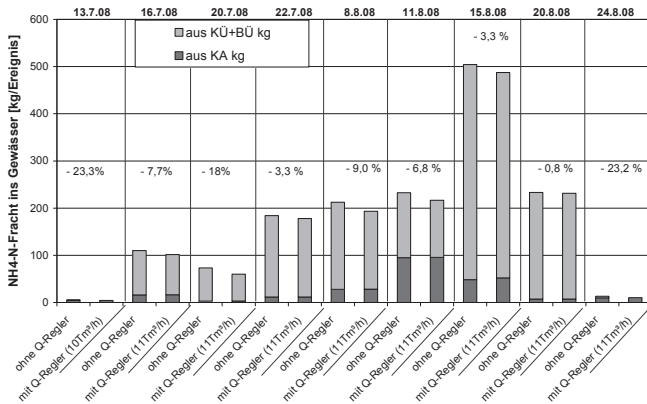


Abb. 7: NH<sub>4</sub>-N-Frachtbilanzen für Ereignisse ab Mitte Juli

In Abbildung 6 ist beispielhaft ein Ereignis mit Reglereingriff dargestellt. Nach Anstieg des Zuflusses wird der vom Regler vorgeschlagene Sollwert von 11000 m<sup>3</sup>/h erreicht. Alle Störgrößen sind in unkritischen Bereichen, so dass die Regel 41 (vgl. Regelmatrix, Tabelle 3) zu 100 % erfüllt ist. Der Anstieg des P<sub>ges</sub> im Ablauf der Nachklärung auf den Wert „mittel“ führt zu einer Ablösung durch Regel 34, die eine sofortige Reduktion des Zuflusses auf 10000 m<sup>3</sup>/h zur Folge hat (Anmerkung: Bereichsgrenzen P<sub>ges</sub>: „niedrig“ grüne Linie, „mittel“ schwarz, „hoch“ rot gestrichelte Linie).

Nach dem Absinken des P<sub>ges</sub> steigt der Zufluss leicht an, bevor dann eine Reduktion auf den Ist-Wert von 9450 m<sup>3</sup>/h infolge niedriger TS-Gehalts in der Belebung stattfindet. Nachdem der TS-Gehalt durch die Schlammrückführung ausgeglichen worden war, konnte der Zufluss wieder auf 11000 m<sup>3</sup>/h erhöht werden.

Mithilfe einer vereinfachten Bilanz aus den Messungen wurden die NH<sub>4</sub>-N-Frachten ins Gewässer ermittelt, die aus dem Ablauf der Kläranlage und aus dem Klär- und Beckenüberlauf des Regenüberlaufbeckens unmittelbar vor der Kläranlage resultieren (Abbildung 7). Die Reduzierung der Fracht wird durch die angegebenen Prozentzahlen ausgedrückt. Bei schwächeren Ereignissen kann mit der integrierten Steuerung ein Überlaufen des Beckens vermieden werden, was zu Reduktionen von bis zu 23 % geführt hat. Bezüglich der stofflichen Fließgewässerbelastung sind häufig genau diese „schwächeren“ Regenereignisse in den Sommermonaten kritisch, da hohe Konzentrationen und relativ hohe Frachten im Entlas-

tungsabfluss bei niedrigen Abflüssen im Gewässer zu hohen Immissionen oder zu toxischen Zuständen führen können [16].

Da die Kläranlage Chemnitz bereits heute höher als nach ATV-DVWK-A 198 beschickt wird (Ist in Chemnitz: 9450 m<sup>3</sup>/h, ATV-DVWK-A 198 Q<sub>Z,max</sub>: 5000 bis 8580 m<sup>3</sup>/h), ist zu erwarten, dass die Reduktion der Gesamtemission durch die dynamische Zuflussregelung sogar höher ausfallen würde, wenn eine gemäß ATV-DVWK-A 198 betriebene Kläranlage als Referenz dient. Die NH<sub>4</sub>-N-Frachtreduktionen würde in diesem Fall je nach Ereignis bis zu 50 % und im Mittel über alle Ereignisse ca. 14 % betragen.

Insgesamt wurden durch die Steuerung des Zuflusses zur Kläranlage von Mitte Juni bis Ende August 2008 ca. 2800 kg CSB, 130 kg NH<sub>4</sub>-N und 35 kg P<sub>ges</sub> weniger ins Gewässer eingetragen.

## 6 Ausblick

Die großtechnischen Untersuchungen haben gezeigt, dass die dynamische Regelung des maximalen Mischwasserzuflusses bei günstigen Randbedingungen zu einer Reduzierung der Gesamtemission führen kann. Bei manchen Einzugsgebieten könnten sich infolge erhöhter Drosselabflüsse interessante Kosteneinsparungen durch nicht benötigte Beckenvolumina im Kanalnetz ergeben. Da im Jahresverlauf auch ungünstige

Randbedingungen (zum Beispiel drohende Überschreitung der Ablaufgrenzwerte der Kläranlage) auftreten können, muss zum Nachweis der Emission, zum Beispiel gemäß ATV-A 128, diese Dynamik bei der Einstellung des zulässigen Drosselabflusses zur Kläranlage berücksichtigt werden. Dies wäre zum Beispiel durch den Nachweis der modellspezifischen Entlastungsfracht mit dem integrierten Modell „Kläranlage und Kanalnetz inklusive Regelungskonzept“ (vgl. Kapitel 3.3) möglich. Für Chemnitz wurde diese Vorgehensweise empfohlen.

Zur Kosten-Nutzen-Analyse müssen die betrieblichen Mehrkosten der Kläranlage als Folge der Mehrbehandlung an Mischwasser quantifiziert werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die zusätzliche Fracht zeitversetzt ebenfalls in die Kläranlage gelangen würde, wenn zusätzliches Speichervolumen im Kanalnetz zur Mischwasserbehandlung realisiert würde.

Die parallele Verknüpfung mit einer Verbundsteuerung des Kanalnetzes ist ein weiterer Schritt im Hinblick auf eine vollständige integrierte Steuerung von Kanalnetz und Kläranlage. Die Verbundsteuerung verschiedener Steuereinrichtungen (Schieber, Wehre etc.) hat sich in den letzten Jahren in verschiedenen Kanalnetzen bewährt (zum Beispiel Dresden, Wien [17], Bamberg). Der Betrieb ist zuverlässig und besticht durch die Nutzung vorhandener Kanalnetzvolumina durch Stauraum anstelle von Speichervolumen in Form von zu bauenden Becken. Insbesondere besteht durch dieses flexible Konzept eine Möglichkeit, um auf den in den nächsten Jahren von Experten erwarteten Klimawandel sowie auch auf einen demografischen Wandel besser reagieren zu können.

## Dank

Die Arbeit wurde zu einem großen Teil mit Mitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU (Az. 21372) gefördert. Unser Dank gilt weiterhin den Stadtwerken Chemnitz, besonders der Leiterin der Kläranlage, Frau *Sundheim*, und dem Regierungspräsidium Chemnitz für die sehr konstruktive Unterstützung des Forschungsvorhabens.

## Literatur

- [1] J. Alex, L. P. Risholt, W. Schilling: Integrated modelling system for simulation and optimization of wastewater systems, *Proc. Vol. 3*, 1553–1561, 8<sup>th</sup> Int. Conf. Urban Storm Drainage, Sydney, 1999
- [2] V. Erbe, T. Frehmann, W. F. Geiger, P. Krebs, J. Londong, K.-H. Rosenwinkel, K. Seggelke: Integrated Modelling as an analysing and optimisation tool for urban watershed management, *Water Science and Technology*, 2002, 46 (6–7), 141–150
- [3] V. Erbe: *Entwicklung eines integralen Modellansatzes zur immissionsorientierten Bewirtschaftung von Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer*, Schriftenreihe des Lehrstuhls Siedlungswasserwirtschaft, Bauhaus-Universität Weimar, Band 13, Rhombos-Verlag, Berlin, 2004
- [4] J. Meirlaen, J. van Assel, P. Vanrolleghem: Real-time control of the integrated urban wastewater system using simultaneously simulating surrogate models, *Water Science and Technology*, 2002, 45 (3), 109–116
- [5] K. Seggelke: *Integrierte Bewirtschaftung von Kanalnetz und Kläranlage zur Reduzierung der Gewässerbelastung*, Dissertation, Veröffentlichungen des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik, Universität Hannover, Heft 124, 2002
- [6] Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 2.12.1: Auswirkungen der Mischwasserbehandlung auf den Betrieb von Kläranlagen, *Korrespondenz Abwasser*, 1997, 44 (8), 1419–1428
- [7] J. Bruns: *Dynamische Kopplung von Regenwasserbehandlung und Abwasserreinigung bei Mischwasserzufluss*, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Bd. 151, 1999
- [8] ATV-DVWK-A 198: *Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen*, Hennef, 2003
- [9] K. Seggelke, K.-H. Rosenwinkel: Integrierte Bewirtschaftung von Kanalnetz und Kläranlage – Möglichkeiten durch das neue Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 198, *KA*, 2004, 51 (8), 843–856
- [10] itwh, ISI: Abschlussbericht der ersten Phase des DBU-Forschungsprojekts „Entwicklung eines integrierten Steuerungs- und Betriebsverfahrens für die Teilsysteme Kanalnetz & Kläranlage zur deutlichen Reduzierung der Gewässerbelastung“ (Az. 21372), 2006
- [11] W. Rauch, J.-L. Bertrand-Krajewski, P. Krebs, O. Mark, W. Schilling, M. Schütze, P. Vanrolleghem: Mathematical modelling of integrated urban drainage systems, *Water Science and Technology*, 2002, 45 (3), 81–94
- [12] itwh, ISI: Abschlussbericht der zweiten Phase des DBU-Forschungsprojekts „Entwicklung eines integrierten Steuerungs- und Betriebsverfahrens für die Teilsysteme Kanalnetz & Kläranlage zur deutlichen Reduzierung der Gewässerbelastung“ (Az. 21372), 2008
- [13] U. Nyberg, B. Andersson, H. Aspegren: Real-time control for minimizing effluent concentrations during storm water events, *Water Science and Technology*, 1996, 34 (3–4), 127–134
- [14] K. Seggelke: Integrierte Bewirtschaftung von Kanalnetz und Kläranlage, Kolloquium am Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft der TU Dresden, *Dresdner Berichte*, Bd. 29, 2007, 75–95
- [15] J. Tränckner, T. Franz, K. Seggelke, P. Krebs: Dynamic optimisation of WWTP inflow to reduce total emission, *Water Science and Technology*, 2007, 56 (10), 11–18
- [16] N. Schindler, J. Tränckner, P. Krebs: Assessment of river water quality criteria with integrated models and extreme value statistics, 11<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage (ICUD), Edinburgh, 2008
- [17] L. Fuchs, T. Beenenken, R. Nowak, G. Pfannhauser: Entwicklung und Implementierung einer Abflusssteuerung für das Kanalnetz der Stadt Wien, *KA*, 2007, 54 (7), 680–689

## Autoren

Dr.-Ing. Katja Seggelke

Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH (itwh)  
Niederlassung Dresden  
Sudhausweg 1  
01099 Dresden

Dr.-Ing. Lothar Fuchs

Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH (itwh)  
Engelbosteler Damm 22  
30167 Hannover

Dr.-Ing. Jens Tränckner, Prof. Dr. Peter Krebs

TU Dresden  
Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft  
01062 Dresden

E-Mail: k.seggelke@itwh.de

