

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Krebs, Peter; Rauch, Wolfgang

Von der Abflusssteuerung zur immissionsorientierten Steuerung

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/20.500.11970/103989>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Krebs, Peter; Rauch, Wolfgang (2002): Von der Abflusssteuerung zur immissionsorientierten Steuerung. 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. 87-109.

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.



Von der Abflusssteuerung zur immissionsorientierten Steuerung

Peter Krebs¹ und Wolfgang Rauch²

¹ Institut für Siedlungs- und Industrierewasserwirtschaft, TU Dresden

² Institut für Umwelttechnik, Universität Innsbruck

Kurzfassung: Abflusssteuerung in der Kanalisation und die Regelung von Größen wie Sauerstoffgehalt im Belebungsbecken und Rücklaufvolumenstrom gehören zum Alltag der Abwasserentsorgung. Es wird schrittweise aufgezeigt, dass durch die Verwendung zusätzlicher Information über den Systemzustand die Effektivität von Steuerungsmaßnahmen verbessert werden kann. Durch das Einbeziehen von Stoffkonzentrationen ist es möglich, die Entlastung nicht ausschließlich auf eine Minimierung der entlasteten Mischwasservolumina auszurichten, sondern die Entscheidung, ob Mischwasser entlastet oder zur Kläranlage geleitet wird, aufgrund dessen Stofffrachten zu fällen. Bei sensitiven Fließgewässern sollte auch die Charakteristik und die Dynamik des Fließgewässers miteinbezogen werden. Die Sauerstoff- oder die Ammoniakkonzentration im Fließgewässer wird in diesem Fall zur Zielgröße der Steuerung. Eine weitere Verbesserung kann erzielt werden, wenn durch prädiktive Simulation der Verlauf des Ereignisses vorhergesagt werden kann.

Keywords: Abflusssteuerung, Immission, integriertes Entwässerungssystem, Online-Simulation, Online-Steuerung, prädiktive Simulation

1 Einleitung

Das Ziel von Mess-, Steuerungs- und Regelungsmaßnahmen (MSR), unabhängig davon, ob sie in der Kanalisation oder in der Kläranlage eingesetzt werden, ist stets, durch einen optimalen Betrieb das Potenzial der vorhandenen Bauwerke auszunutzen. Diese Maßnahmen stellen damit eine Alternative zur Dimensionierung mit Sicherheitsfaktor dar, an der sie sich auch messen lassen müssen. Im Vergleich zu einer mit mehr Sicherheit ausgestatteten Dimensionierung verlangen MSR-Maßnahmen nach geringeren Investitionskosten, aber nach höheren Betriebskosten. Sollte sich die Steuerung als interessante Lösung darstellen, ist dies im Hinblick auf eine Flexibilisierung der Systementwicklung bei der Entscheidung über den Systemausbau durchaus ein Kriterium, das es zu beachten gilt.

Eignet sich ein Einzugsgebiet bzw. eine Kläranlage für die Steuerung, so stehen mit Steuerung und Regelung flexible Instrumente zur Verfügung, die über die verbesserte Nutzung der bestehenden Substanz hinaus durch die installierten Sensoren auch laufend Informationen über den Systemzustand liefern.

Steuerung in der Kanalisationstechnik heißt heute Abflusssteuerung. Das Ziel besteht in der Minimierung der Entlastungsvolumina oder der Entlastungshäufigkeit. Um die Gewässer effizient zu schützen, müssten jedoch entweder die Summe der Frachten aus den Kanalisationsentlastungen und aus dem Kläranlagenablauf oder die im Fließgewässer entstehenden Konzentrationen die Zielgrößen darstellen. Des weiteren ist die Information des Jahres-Entlastungsvolumens bzw. der Jahresfracht aus Entlastung und Kläranlage nicht zielführend, wenn die maßgebende Belastungsgröße für ein Fließgewässer ein akut wirkender Stoff ist (Rauch und Harremoës, 1996; Krebs *et al.*, 1996; Schilling *et al.*, 1997). Hier müssten die im Fließgewässer entstehenden Spitzenkonzentrationen bei Extremereignissen identifiziert und entschärft werden.

Im Zuge der Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie, die sich unabhängig vom Entwässerungssystem an der Gewässerqualität orientiert, wird bei relativ leistungsschwachen Fließgewässern das Immissionskonzept umgesetzt. Entsprechend wird es nötig sein, zwischen Steuerungsoptionen des Abwassersystems und den Auswirkungen im Fließgewässer einen kausalen Zusammenhang nachzuweisen. Da verschiedene Steuerungsoptionen und verschiedene Ausbauoptionen nicht experimentell oder aufgrund von Erfahrung beurteilt werden können, wird die Bedeutung von numerischen Modellen, mit denen sich das integrierte System, bestehend aus Kanalisation, Kläranlage und Fließgewässer, abbilden lässt, zunehmen.

Die Offline-Simulation unterstützt dabei die Wahl von Varianten und Strategien während die Online-Simulation dazu dient, im laufenden Ereignis den Ablauf bei verschiedenen Steuerungsoptionen vorherzusagen und flexibel das beste Konzept auszuwählen.

Diese Ansätze lassen sich heute in numerischen Simulationen – unter Annahme zuverlässig funktionierender Online-Messungen – durchspielen (Schütze, 1998; Erbe *et al.*, 2001; Seggelke und Rosenwinkel, 2002). Für die Umsetzung der Stofffracht-basierten und prädiktiven Steuerung in die Praxis müssen allerdings die Online-Messgeräte zuverlässiger und wartungsärmer werden.

2 Herkömmliche Steuerung

Gesteuerte Systeme gehören heute zum Alltag der Abwassertechnik. In der Kanalisation werden Abflüsse so eingestaut bzw. geregelt oder gesteuert, dass der Rückhalteraum des Entwässerungsnetzes möglichst weitgehend genutzt und das entlastete Mischwasservolumen minimiert wird. Im Kläranlagenbetrieb werden häufig die Sauerstoffzufuhr, die Dosierung von Fällmitteln, der Rücklaufvolumenstrom aus der Nachklärung in das Belebungsbecken, die interne Nitratrückführung und der Überschussschlammabzug gesteuert bzw. geregelt. Die Steuer- und Regelstrategien für den Kläranlagenbetrieb basieren häufig auf Konzentrationsmessungen, basieren also nicht bloß auf Informationen zum Durchfluss.

2.1 Abflusssteuerung

Zur Abflusssteuerung gibt es diverse Erfahrungsberichte aus dem In- und Ausland, die hier nicht näher erläutert werden sollen. Informationen dazu finden sich in diversen Artikeln in diesem Berichtsband (Dresdner Bericht, Band 19), in der thematischen Sonderausgabe der *KA* (2001, Juniausgabe) oder, stellvertretend für Erfahrungsberichte aus dem Ausland, in Pleau *et al.* (2001).

Die ATV-DVWK Arbeitsgruppe ES 2.4 (1995) hat eine Übersicht über günstige Voraussetzungen zur effektiven Abflusssteuerung erstellt. Ein besonders wichtiges Kriterium ist dabei das gesamte Rückhaltevolumen (Mischwasserbecken und Kanalstauraum), das sich mit wirtschaftlichem Aufwand aktivieren lässt. Lange Aufenthaltszeiten, Entlastungen in unterschiedlich leistungsfähige Vorflutgewässer und eine Vermaschung des Kanalsystems erhöhen die Flexibilität bei den Steuerungsoptionen. Bei kleinen Einzugsgebieten können an neuralgischen Punkten lokale Steuerungen wirksam sein, bei größeren kann das Potenzial aber nur durch Verbundsteuerung ausgeschöpft werden. Grundsätzlich wirkt Abflusssteuerung ähnlich wie Retentionsbauwerke (Mischwasserspeicher), mit dem Unterschied, dass der Kanalstauraum durch die Steuerung ereignisabhängig da aktiviert wird, wo die Wirkung am effektivsten ist.

Die Wirksamkeit von Steuerungseingriffen hängt aber nicht nur vom System sondern auch vom Verlauf des aktuellen Ereignisses ab. Das Steuerungspotenzial wird durch das systembedingte, maximal aktivierbare Retentionsvolumen beschränkt. Ist das Regenwasser-Abflussvolumen groß im Vergleich zu diesem Retentionspotenzial, wird die relative Verminderung des Entlastungsvolumens automatisch geringer.

2.2 Grenzen der herkömmlichen Steuerung

Die Grenzen der Abflusssteuerung ergeben sich daraus, dass Stoffkonzentrationen und -frachten im Ereignisverlauf stark variieren und daher eine Minimierung z.B. der Entlastungsvolumina nicht zwangsläufig eine Minimierung der Entlastungsfrachten bedeutet. Zudem spielt die Dynamik der Abflussganglinie im Fließgewässer eine wichtige Rolle, da zu verschiedenen Zeitpunkten des Ereignisses eine unterschiedliche Verdünnungskapazität vorhanden ist.

In Abbildung 1 ist ein Fallbeispiel dargestellt, in dem mit Messungen und Simulationen ein interessantes Ereignis bezüglich Ammonium-Emissionen ins Fließgewässer nachvollzogen wurde (Grundlagen in Krebs *et al.*, 1996). Die zweite Frachtspitze aus der Entlastung (s. obere Grafik von Abbildung 1) kommt nicht etwa als Folge eines wieder ansteigenden Abflusses zustande, sondern ausschließlich aufgrund der ausgeprägten Morgenspitze des Ammoniums und einer damit verbundenen Konzentrationszunahme (s. auch Abbildung 3). Durch Steuerungsmaßnahmen ist es möglich, die Entlastung zu einem früheren Zeitpunkt zu beenden, weil zusätzliches Rückhaltevolumen zur Verfügung gestellt wurde (s. untere Grafik von Abbildung 1). Allerdings wird dann die Morgenspitze vollständig zur Kläranlage geleitet und verschlechtert dort die Ablaufqualität. Die Entleerung von zusätzlichem Kanalstauraum führt zu einer weiteren Erhöhung der Kläranlagenbelastung. Die ohnehin hohe Ammoniumspitze im Kläranlagenablauf kommt dadurch zustande, dass das Mischwasser durch das eingeleitete Regenwasser niedrige Temperaturen aufweist und somit die Umsatzleistung der Nitrifikanten verringert, dass durch die Schlammverlagerung ins Nachklärbecken im Belebungsbecken Schlammmasse fehlt und diese infolge der vermehrten Flockung partikulärer Stoffe während des Mischwasserereignisses spezifisch erst noch eine verminderte Aktivität aufweist. Alles in allem wurde in diesem Beispiel aufgrund des volumenstrom-basierten Steuerungseingriffes die Spitzenbelastung des Fließgewässers am zweiten Tag erhöht.

Für ein Einzugsgebiet mit fünf Teilgebieten und je einem zugeordneten Mischwasserspeicher in Dänemark haben Rauch und Harremoës (1998) eine zweimonatige Periode mit 11 Regenereignissen in einem Gesamtmodell, das Kanalisation, Kläranlage und Fließgewässer abbildet, simuliert. Entlastungsvolumina und Sauerstoffminima im Fließgewässer werden ohne und mit Steuerung errechnet und verglichen. Die Auswertungen beinhalteten den Versuch, die Reduktion der Entlastungsvolumina infolge der Steuerung mit der Erhöhung des Sauerstoffgehaltes im Fließgewässer zu korrelieren. Abbildung 2 zeigt, dass diese beiden Größen nur schlecht korrelieren. Die Punkte im oberen linken Quadranten der Diagramme deuten Ereignisse an, bei denen die Abflusssteuerung bezüglich der

Reduktion von Entlastungsvolumina erfolgreich war, hingegen der Effekt für das Fließgewässer trotzdem nur von untergeordneter Bedeutung blieb. Die schlechte Korrelation lässt sich erklären durch die höhere Belastung der Kläranlage und damit verbunden durch höhere Ablauffrachten sowie durch die geringere Sauerstoffzufuhr ins Fließgewässer, wenn zwar der Entlastungsvolumenstrom vermindert wurde, die Entlastungsfracht aber durchaus ähnlich bleibt.

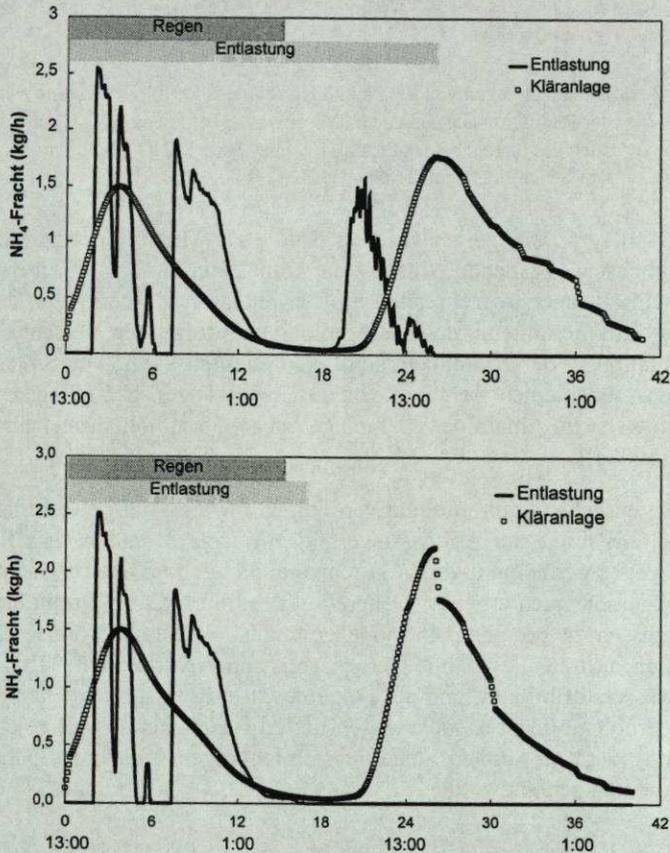


Abbildung 1 Ammoniumfrachten in der Mischwasserentlastung und im Kläranlagenablauf für den ungesteuerten Fall (oben) und für den gesteuerten Fall mit höherer Kläranlagenbelastung.

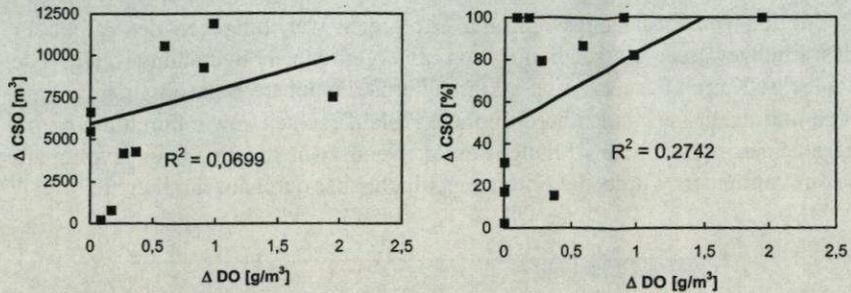


Abbildung 2 Untersuchungen von Rauch und Harremoës (1998). Korrelation zwischen der Reduktion des entlasteten Mischwasservolumens (ΔCSO) und dem Anstieg des Sauerstoffgehaltes im Fließgewässer (ΔDO), beides durch dieselben Steuerungseingriffe bewirkt.

Jack und Ashley (2002) zeigen in einer Studie zur Gesamtemission auf, dass durch möglichst weitgehende Nutzung der Kanalstauräume zwar einerseits die Gesamtfracht an sauerstoffzehrenden Stoffen reduziert werden kann, dass aber andererseits die Gesamtemission an Ammonium infolge der Verschlechterung der Nitrifikation in der Kläranlage signifikant steigen kann. Die Simulationen ergaben, dass über einen Zeitraum von fast zwei Tagen nach Regenende die Ammoniumwerte im Ablauf der Kläranlage um ca. 50 % höher lagen als für den ungesteuerten Fall.

Neben gelegentlichen kontraproduktiven Folgen für die Fließgewässerbelastung können sich als Folge der Abflusssteuerung in flachen Kanälen auch Betriebsprobleme wegen geringeren Abflussgeschwindigkeiten und entsprechend erhöhten Sedimentationsraten ergeben. Generell gilt es, die Interaktion mit biochemischen Prozessen zu beachten. In lange gestautem Abwasser können anaerobe Bedingungen auftreten, was mit Geruchsemissionen verbunden ist sowie mit Schwefelwasserstoffbildung und als Folge davon mit verstärkter Betonkorrosion. Diese Probleme müssen nicht gegen die Abflusssteuerung als solche sprechen. Richtig geplant, können Steuerungseinrichtungen sogar zur Spülung von Kanalsedimenten genutzt werden.

3 Konzentrations- und frachtbasierte Steuerung

Die Stofffrachten unterliegen bei Trockenwetter im Tagesgang ausgeprägten Schwankungen (Abbildung 3). Zwischen dem Tagesminimum und dem Tagesmaximum liegen bei der Ammoniumfracht ein bis zwei Größenordnungen. Eine

abflussbasierte Steuerung nimmt auf diese Variationen keine Rücksicht. Es ist aber unmittelbar einzusehen, dass eine Mischwasserentlastung bei ansonsten gleich verlaufendem Regenereignis während der Nachtstunden oder während der Morgenstunden ungleich zu bewerten ist und dass sich aus dieser Gegebenheit ein Steuerungspotenzial ableiten lässt.

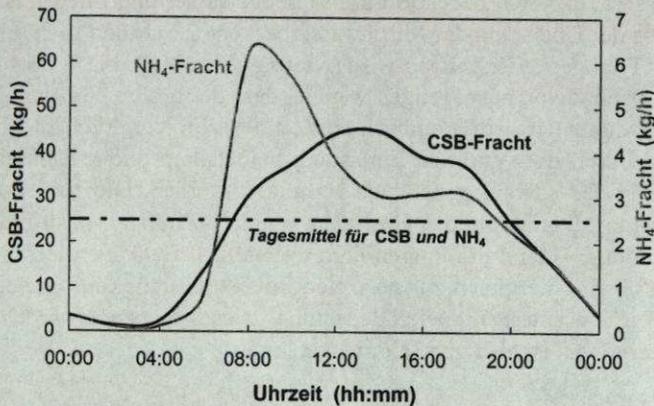


Abbildung 3 Mit dem Tagesmittelwert genormte Ganglinien der NH_4 - und der CSB-Frachten im Schmutzwasser.

3.1 Frachtbasierte Priorisierung von Mischwasserentlastungen

Aus den Aussagen in Kap. 2.2 und der Darstellung in Abbildung 3 kann gefolgert werden, dass eine Steuerung aufgrund von fracht- oder konzentrationsbasierten Messungen wünschenswert wäre. Das Steuerungsziel besteht nicht mehr darin, das Entlastungsvolumen grundsätzlich zu minimieren sondern darin, stark verschmutztes Mischwasser zur Kläranlage zu leiten und schwächer verschmutztes Mischwasser zu entlasten.

Risholt *et al.* (2002) haben eine derartige Steuerstrategie untersucht. Mittels numerischer Simulationen (mit SIMBA[®] sewer und SIMBA[®]) wurden für drei verschiedene Einzugsgebiete und diverse Ereignisse unterschiedlicher Intensität für diese qualitätsbasierte Steuerstrategie Reduktionen der CSB-Entlastungsfrachten von 23 bis 71 % ermittelt. Die Steuerung war am effektivsten, wenn der Niederschlag räumlich variabel war sowie wenn die Regenintensität und die Regenhöhe geringe Werte aufwiesen. Aber auch für intensive Ereignisse konnten signifikante Reduktionen nachgewiesen werden.

Ausgehend von der nicht zufriedenstellenden Verbesserung der Situation durch die Verkürzung der Entlastungsdauer für das in Abbildung 1 dargestellte Beispiel wurde ein einfaches, konzentrationsbasiertes Steuerungskonzept getestet. Durch das Regenereignis wird nicht nur eine Mischwasserentlastung ausgelöst, sondern – mit einiger zeitlicher Verzögerung – auch ein erhöhter Abfluss im Fließgewässer. Nachdem der Abfluss im Fließgewässer angestiegen ist, wurde erlaubt, dass der Überstand des Mischwasserbeckens 2 Stunden nach seiner Füllung in das Fließgewässer entleert wird (Krebs *et al.*, 1996). Nach zwei Stunden Absetzzeit kann davon ausgegangen werden, dass der größte Teil der partikulären Stoffe sedimentiert ist (Brombach *et al.*, 1993). Im Vergleich zu Abbildung 1 konnte dadurch die verkürzte Entlastung beibehalten und zudem eine Verschlechterung des Kläranlagenablaufs verhindert werden. Die beiden zusätzlichen Entlastungsfrachten in den Bereichen 6 und 14 Stunden nach Ereignisbeginn (Abbildung 4) sind die Folgen der zweimaligen Beckenentleerung in das Fließgewässer. Im Vergleich zur normalen Entlastungstätigkeit sind diese beiden Frachten von untergeordneter Bedeutung. Dieses Konzept würde die Freiheitsgrade erhöhen, ist aber zur Zeit nicht zulässig.

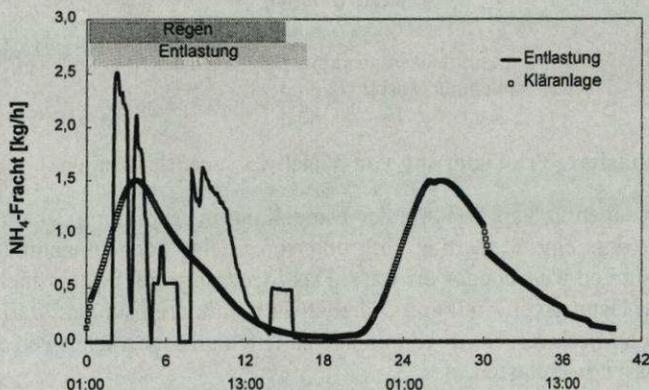


Abbildung 4 Ereignis wie in Abbildung 1, jedoch wird der Mischwasserspeicher zum großen Teil in das Fließgewässer entleert.

Das Beispiel zeigt einerseits, dass mittels Steuerung die Frachten und einzelne Frachtspitzen, die in das Fließgewässer eingeleitet werden, reduziert werden können. Es zeigt aber andererseits die Grenzen von messungsbasierten Steuerungsansätzen. Neben der Tatsache, dass im dargestellten Beispiel die Leistungsfähigkeit der Kläranlage verbessert werden müsste, zeigt sich, dass die erste Spitze, die für die Fließgewässerbelastung maßgebend ist, nicht reduziert

werden kann. Dazu wären Voraussagen nötig, aufgrund derer sich vorbeugende Maßnahmen einleiten ließen.

3.2 Ausschöpfen des Kläranlagenpotenzials durch frachtbasierte Steuerung

Zwei mögliche Ziele werden mit dem Ansatz, das Zusammenspiel von Kanalisation und Kläranlage unter Regenwetterbedingungen zu optimieren, verfolgt: zum einen soll der Kläranlagenbetrieb möglichst effizient der Mischwasserbelastung angepasst werden und zum anderen soll anstelle einer fest vorgegebenen Belastung der Kläranlage ($2 \cdot Q_s + Q_f$; ATV-DVWK A131, 2000) deren Potenzial entsprechend ausgeschöpft werden.

Interne Steuer- und Regelmechanismen in der Kläranlage werden häufig vorgesehen, um die Prozesse bei einer gegebenen äußeren Belastung, wie z.B. Mischwasserzufluss, zu optimieren. Beispiele hierfür sind etwa die „Step-feed-control“ oder die Veränderung des Belüftungsvolumens bei der Belebungsanlage. Dabei werden aber derzeit keine Informationen aus dem Kanalbetrieb genutzt, sondern die Stellgröße aufgrund prozessinterner Messgrößen geregelt.

Für die Bestimmung der aktuellen Kläranlagenkapazität sind die beiden Prozesse der Nitrifikation und der Schlammabtrennung bzw. des Schlammrückhaltes in der Nachklärung maßgebend. Die höchsten Ammoniumfrachten fließen dem Belebungsbecken mit dem Ereignisbeginn durch den Ausstoß konzentrierten Schmutzwassers aus der Kanalisation und dem Vorklärbecken zu (s. Abbildung 5, Krebs, 2000). Ausgehend von einem Nachklärbecken, dessen Speicherzone ausreichend groß dimensioniert ist, ist die Gefahr der Abschwemmung höherer Konzentrationen aus dem Nachklärbecken dann am größten, wenn die Veränderung des Zuflusses (sowohl die Zu- als auch die Abnahme!) ausgeprägt ist (Armbruster *et al.*, 2001) – also ebenfalls zu Beginn und gegen Ende des Mischwasserereignisses.

Davon ausgehend entwickelte Bruns (1999) ein einfaches Konzept zur verbesserten Nutzung der Kläranlagenkapazität. Er nimmt den Füllstand des Mischwasserspeichers als Gradmesser für den Fortgang des Ereignisses. Bis zu einem Füllstand des Mischwasserbeckens von 75 % soll die Kläranlage wie üblich mit $2 \cdot Q_s + Q_f$ beschickt werden, danach soll die Beschickung allmählich um 50 % gesteigert werden. Wenn durch die Entleerung des Mischwasserbeckens der Füllstand wieder auf 75 % reduziert ist, wird auch die zulässige Beschickung der Kläranlage wieder auf $2 \cdot Q_s + Q_f$ reduziert (s. Abbildung 6). Sollte die Kläranlage mehr oder weniger Reserven aufweisen, kann die Bezugsgröße von 100 %,

die normalerweise $2 \cdot Q_s + Q_f$ entsprechen soll, größer oder kleiner gewählt werden. Mit dem Ansatz von Bruns (1999) liegt ein sehr einfaches Steuerungskonzept vor, das auf Überlegungen zu Frachten aus der Kanalisation und einer Analyse der Prozesse in der Kläranlage beruht.

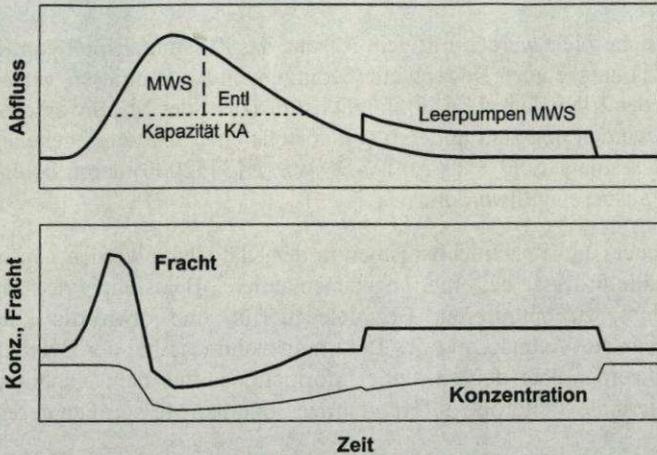


Abbildung 5 Schematische Darstellung der Auswirkung eines Regenereignisses auf die Belastung der Kläranlage (KA) mit Ammonium (Krebs, 2000). MWS = Mischwasserspeicher, Entl. = Entlastung

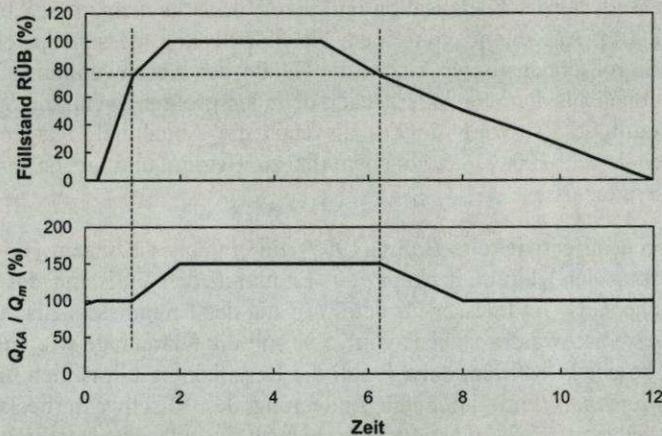


Abbildung 6 Steuerung des Zuflusses zur Kläranlage während Regenereignissen nach Bruns (1999).

Einen Spezialfall stellt die Arbeit von Koch *et al.* (1999) dar, in der im Nachklärbecken ein Schlammbett aufgebaut wird, um gezielt zusätzliches Dentrifikationsvolumen zu nutzen. Um bei Mischwasserzufluss im Nachklärbecken genügend Speichervolumen für den aus dem Belebungsbecken ins Nachklärbecken verlagerten Schlamm zur Verfügung zu haben, muss die Schlammбетhöhe rechtzeitig reduziert werden. Da dazu aber mindestens ein Räumzyklus benötigt wird, muss als Funktion von im Einzugsgebiet gemessenem Niederschlag oder aufgrund von Radarbildern über Niederschlagszonen über ein Frühwarnsystem die Räumung des zusätzlich aufgestauten Schlammes eingeleitet werden.

4 Modellbasierte, immissionsorientierte Steuerung

Um im gesamten Entwässerungssystem vorhandene Kapazitätsreserven zu nutzen, müssen die Kanalisation, die Kläranlage und wenn möglich das Fließgewässer als interagierende Teile eines Gesamtsystems verstanden werden. Maßgebend ist nicht die so genannte Gesamtemission, sondern die im Gewässer entstehenden Konzentrationen im Verlauf des Ereignisses. Um den Betrieb des Abwassersystems bezüglich der Zielgrößen im Fließgewässer optimieren zu können, müssen die Interaktionen zwischen den Subsystemen abgebildet und der Ereignisverlauf mit seiner Dynamik berücksichtigt werden. Der Vergleich von Jahresfrachten ist nicht zielführend. Für die Effekte im Fließgewässer ist es beispielsweise von entscheidender Bedeutung:

- ob eine Entlastung während einer frühen oder einer späten Phase des Ereignisses stattfindet, da der Niederschlag-Abfluss-Prozess im Einzugsgebiet des Fließgewässers langsamer vor sich geht als im Einzugsgebiet der Kanalisation und damit die Verdünnungskapazität des Gewässers erst im Verlauf des Ereignisses zunimmt,
- ob die CSB-Fracht aus der Mischwasserentlastung stammt oder aus dem Kläranlagenablauf, da der Anteil des leichtabbaubaren CSB im entlasteten Mischwasser wesentlich größer ist als im Kläranlagenablauf,
- dass die Behandlungskapazität der Kläranlage von deren Betriebszustand und von den Transportprozessen in der Kanalisation abhängt (Krebs, 2000).

Diese unvollständige Liste macht bereits deutlich, dass der Betrieb des Gesamtsystems nicht mit statischen Regeln optimiert werden kann. Neben der Aufgabe einer Steuerung, den Ist-Wert einem Soll-Wert anzupassen, kommt damit die weit anspruchsvollere Aufgabe hinzu, laufend den Soll-Wert aufgrund des aktu-

ellen Systemzustands und aufgrund von Vorhersagen über den weiteren Fortgang des Ereignisses zu optimieren.

4.1 Fließgewässercharakterisierung als Voraussetzung für die immissionsorientierte Steuerung

Um eine Steuerung immissionsorientiert betreiben zu können muss die Fließgewässerbelastung charakterisiert werden. Um relevante Belastungen zu identifizieren ist es unumgänglich, die unterschiedliche Wirkung verschiedener Stoffgruppen in Betracht zu ziehen. Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen akuten, verzögerten und akkumulativen Belastungen (Schilling *et al.*, 1997). Die am häufigsten untersuchten Belastungen der Sauerstoffzehrung und der Ammoniaktoxizität sind eindeutig den akuten Belastungen zuzuordnen. Der Vergleich von Jahresfrachten ist deshalb von untergeordneter Bedeutung; es sind die Sauerstoffminima bzw. die im Fließgewässer entstehenden Ammoniakspitzen einzelner Ereignisse, die für diese Stoffgruppen relevant sind.

Das englische „UPM procedure“ (Urban Pollution Management) trägt der Rechnung, indem die Qualitätsziele für das Fließgewässer mit Hilfe von Wiederkehrintervall und Über- bzw. Unterschreitungsdauer charakterisiert werden (FWR, 1998; aus Crabtree und Morris, 2002). So gelten beispielsweise für den Sauerstoffgehalt und die Ammoniakkonzentration in Salmonidengewässern die in Tabelle 1 angegebenen Grenzwerte. Für den Nachweis, dass diese Wiederkehrintervalle eingehalten werden, wird eine numerische Dauersimulation mit einer 10-jährigen Regenreihe verlangt.

Tabelle 1 O₂- und NH₃-N- Grenzwerte für Salmondengewässer in England für Unter- und Überschreitungsdauern als Funktion des Wiederkehrintervalls

Wiederkehrintervall	O ₂ (mg/l)			NH ₃ -N (mg/l)		
	1 Stunde	6 Stunden	24 Stunden	1 Stunde	6 Stunden	24 Stunden
1 Monat	5,0	5,5	6,0	0,065	0,025	0,018
3 Monate	4,5	5,0	5,5	0,095	0,035	0,025
1 Jahr	4,0	4,5	5,0	0,105	0,040	0,030

Die in Tabelle 1 angegebenen Werte müssen für spezielle Bedingungen korrigiert werden. Wenn der Ammoniakgehalt hoch ist, gelten höhere Werte für die einzuhaltenden Sauerstoffgrenzwerte und umgekehrt werden die Ammoniakgrenzwerte abgemindert, wenn der Sauerstoffgehalt gering ist. Zudem sind die

NH₃-Grenzwerte mit einem Korrekturfaktor zu versehen, wenn der pH-Wert kleiner ist als 7 und die Temperatur niedriger als 5°C.

Der Nachweis, der in England gefordert wird, ist immissionsorientiert und kann ohne numerische Simulationen nicht erbracht werden. Eine ähnliche Vorgehensweise wird letztlich als Folge der in der Wasserrahmenrichtlinie verankerten Forderungen zu erwarten sein.

Es gilt grundsätzlich zu beachten, dass bezüglich der Fließgewässerbelastung nicht zwangsläufig sehr intensive Entlastungsereignisse maßgebend sind. Mittelintensive Ereignisse weisen relativ hohe Frachten auf und wegen wesentlich geringerer Verdünnung relativ hohe Konzentrationen. Dies ist im Hinblick auf das bei schwachen und mittelintensiven größere Steuerungspotenzial positiv einzuschätzen (s. auch Kap. 2.1).

4.2 Integrierte Modellierung als Voraussetzung für die immissionsorientierte Steuerung

In der Forschung werden gegenwärtig Methoden entwickelt, die einerseits mittels integrierter Modellierung erlauben, die Interaktionen im gesamten Abwasserentsorgungssystem abzubilden, zu verstehen und zu optimieren, sowie mittels Online-Simulation die beste Steuerungsoption laufend vorhersagend zu ermitteln. Vor allem letzteres ist zur Zeit noch kaum in der Praxis erprobt. Es sind meistens Studien, die auf numerischer Simulation beruhen, die das Potenzial derartiger Ansätze evaluieren sollen.

Für die integrierte Simulation des Abwassersystems, bestehend aus der Kanalisation, der Kläranlage und dem Fließgewässer, stehen bis heute keine Standardmodelle zur Verfügung. Probleme ergeben sich bei der Konversion der Zustandsvariablen an den Schnittstellen zwischen den Subsystemen, da andere Größen maßgebend sind, die nur schwer ineinander übergeführt werden können. Dies ist zusätzlich darauf zurückzuführen, dass die Modellentwicklung in den drei Teilsystemen unabhängig voneinander erfolgte. In Rauch *et al.* (2002) wird ein Überblick über die Entwicklung der Modelle und den state-of-the-art gegeben. Es wird zudem aufgezeigt, dass die Komplexität der Modelle reduziert werden kann, wenn durch eine Problemidentifikation im Fließgewässer die abzubildenden Prozesse eingegrenzt werden können (s. Tabelle 2). Dabei gilt es allerdings zu beachten, dass maßgebende Prozesse nicht außer Acht gelassen werden dürfen.

Die Schnittstellen werden heute mittels Konversionsfaktoren zur Überführung der Parameter pragmatisch behandelt (s. z.B. Vanrolleghem *et al.*, 1996). Dieses

Problem kann nur dadurch überwunden werden, dass für die Subsysteme konsistente Parametersätze entwickelt werden. Ausgehend von der Entwicklung der Belebtschlammmodellierung (Henze *et al.*, 2000) sind derartige Bestrebungen für die Fließgewässermodellierung im Gang. Das IWA River Water Quality Model No. 1 (Shanahan *et al.*, 2001; Reichert *et al.*, 2001; Vanrolleghem *et al.*, 2001) ist – nicht wie die klassischen Fließgewässermodelle, die auf dem BSB₅ basieren – auf dem CSB aufgebaut.

Tabelle 2 Minimale Anforderungen an integrierte Modelle im Hinblick auf bestimmte Modellierungsziele

Zielgröße		Kanalisation	Kläranlage	Fließgewässer
NH ₃ -Toxizität	Prozesse	N-A, Hydrodynamik, Advektion/Dispersion	Transport, Mischung, Nitrifikat.	Mischung
	Zustandsgrößen	N _{tot} (= NH ₄ , „worst case“)	NH ₄ , X _{BA} (autotrophe Bakterien)	NH ₄ , pH (gemessen)
Hygienische Belastung (Fäkale Coliforme)	Prozesse	N-A, hydrologische Analogie, Mischung	-	Transport, Mischung, „Zerfall“
	Zustandsgrößen	FC	FC _{Ablauf} = konstant	FC
Sauerstoffzehrung	Prozesse	N-A, hydrol. Analogie, Mischung, Sedimentation in Regenbecken	Transport, Mischung, Umwandlung (ASM1), Sedimentation im NKB	Transport, Mischung, Umwandlung, Belüftung, Sauerstoffbedarf der Sedimente
	Zustandsgrößen	CSB/BSB	CSB-Fraktionen	BSB-Fraktionen, DO

N-A Niederschlag-Abfluss-Prozess

Trotzdem wird es nicht möglich sein, Modelle für die drei Subsysteme identisch zu strukturieren. Mitverantwortlich für diese Schwierigkeit ist die unterschiedliche Bedeutung der Transportprozesse. Für die Kläranlagenmodellierung ist eine stark vereinfachte Abbildung der Durchströmungscharakteristik mittels Rührkesselkaskaden ausreichend. Je nach interessierendem Phänomen sollten für die Kanalisations- und Fließgewässermodellierung die St. Venant Gleichungen für die Abbildung der Strömung sowie die Advektions-Dispersions-Gleichungen für den überlagerten Stofftransport verwendet werden.

Die integrierte Simulation wird nicht nur zur Verbesserung des Systemverständnisses verwendet, sondern auch zur Erarbeitung von Steuerungskonzepten. Voraussetzung hierzu ist die parallele Simulation der Prozesse in den Subsystemen (s. z.B. Erbe *et al.*, 2001). Sequentielle Simulationen, bei denen die Resultate des oberstromseitigen Subsystems als Input für die Simulation des unterstrom-

seitigen Subsystems verwendet werden, können nicht zur Abbildung von integrierter Steuerung – z.B. Steuerungseingriff in der Kanalisation aufgrund von Messungen in der Kläranlage – verwendet werden.

In der Arbeit von Schütze *et al.* (1999) werden Informationen aus der Kanalisation, der Kläranlage und dem Fließgewässer für Steuerungsoptionen im Hinblick auf eine Maximierung des Sauerstoffgehaltes im Fließgewässer verwendet. Es konnte gezeigt werden, dass die integrierte Steuerung insbesondere in Perioden minimaler Sauerstoffkonzentration im Fließgewässer (also bzgl. der Zielfunktion) effizienter ist als andere Steuerungsoptionen.

Neben der Festlegung von Steuerungsstrategien kann die so genannte Offline-Modellierung (ATV-DVWK AG KA 6.2, 2001) auch zur Identifikation von geeigneten Messstellen, Messfrequenzen und Orten für Steuerungseingriffe dienen bzw. zur Planung von Messkampagnen (Vanrolleghem *et al.*, 1999). Es ist beispielsweise nicht unmittelbar einsehbar, wo das Sauerstoffminimum im Fließgewässer nach einer Mischwasserentlastung auftritt. Simulationen des integrierten Systems, insbesondere auch des Fließgewässers liefern gute Schätzungen, wie sich das Längsprofil der Sauerstoffkonzentration im Fließgewässer als Funktion der Gewässercharakteristik und des Ereignisverlaufs gestaltet. Typischerweise liegt das Sauerstoffminimum einige km flussabwärts von einer Einleitstelle und somit kann der Nachweis für das Einhalten einer minimalen O_2 -Konzentration und einer maximalen NH_3 -Konzentration nicht mit der selben Messstelle erbracht werden.

Das Steuerungspotenzial, das mittels der integrierten Modellierung identifiziert wurde, muss kritisch interpretiert werden. In der Modellierung wird stets davon ausgegangen, dass die Messgeräte ideal funktionieren und alle Informationen über das gesamte System stets verfügbar sind sowie dass die Steuerungsent-scheide richtig umgesetzt werden. Insofern ist das, was aus den Offline-Simulationen als Verbesserung resultiert, als Potenzial zu verstehen, dem man mit einer guten Umsetzung nahe kommen kann, das aber nicht vollständig erreichbar sein wird.

4.3 Prädiktive Regelung mit Hilfe der Online-Simulation

Das gemeinsame Problem von Steuerungskonzepten, die auf Online-Messungen beruhen, ist der Zeitverzug. Werden Steuerungseingriffe erst aufgrund der Information über den aktuellen Zustand des Systems vorgenommen, unterliegen sie meist einem Wettlauf mit der Zeit. Gelingt es aber, den Ereignisverlauf vorher-

zusagen, so kann wichtige Zeit gewonnen werden und Steuerungsmaßnahmen lassen sich präventiv einleiten.

Die Vorhersagen müssen durch „prädiktive Simulation“ gewonnen werden, die entweder auf den frühesten Messungen beruhen, die zum Ereignis gewonnen werden (meist Regenmessungen) oder sogar aufgrund von Regenvorhersagen. Mit Steuerungskonzepten ohne Vorhersage lässt sich häufig die erste Entlastungsspitze, die im Hinblick auf akute Gewässerbelastungen meist maßgebend ist, nur wenig entschärfen (s. z.B. Kap. 3.1).

Da für die Zuverlässigkeit der prädiktiven Simulation eine laufende Überprüfung des simulierten Zustandes an Hand des aktuellen Systemzustandes nötig ist, wird die prädiktive Simulation häufig durch eine Online-Simulation gestützt. Die Online-Simulation ist das Bindeglied zwischen vereinzelt Messungen, die nur Stichprobencharakter haben können, und der prädiktiven Simulation. Das Online-Modell bildet laufende Prozesse ab und ergänzt Werte, die für die Vorhersage nötig sind, die aber nicht direkt gemessen werden können. Aufgrund der Differenz zwischen der Zustandsbeschreibung des Online-Modells und der Vorhersage kann die prädiktive Simulation angepasst werden.

Ist der Zeitvorsprung des prädiktiven Modells gegenüber dem Systemzustand groß genug und die Simulation schnell genug, können verschiedene Steuerungsoptionen durchgespielt und verglichen werden. Die hinsichtlich der Zielgröße effektivste Strategie kann dann im System umgesetzt werden.

Ein wesentliches Problem bei der prädiktiven Simulation ist die Rechenzeit, die für das Betreiben der komplexen Modelle zur Abbildung des integrierten Systems benötigt wird. Um möglichst viele potenziell vorteilhafte Steuerungsvarianten durchspielen und deren Folgen abschätzen zu können, ist man darauf angewiesen, dass die Simulationen äußerst rechenzeiteffizient ablaufen. Meirlaen *et al.* (2002) haben ein Konzept zur Beschleunigung der prädiktiven Simulation entwickelt. Die detaillierte Modellierung wurde mit den IWA Modellen für die Prozesse in der Kläranlage und im Fließgewässer sowie mit einer auf den St. Venant Gleichungen aufbauenden Niederschlag-Abfluss-Simulation zur Beschreibung der Vorgänge in der Kanalisation durchgeführt. Die aufwändigen Simulationen werden aber nur verwendet, um wesentlich vereinfachte Modellkomponenten („surrogate models“) anzulernen und zu kalibrieren, nachdem sie selbst an Hand von Messungen kalibriert und verifiziert wurden. Der Vorteil gegenüber der direkten Kalibrierung besteht darin, dass wesentlich weniger Messungen zur Verfügung stehen müssen und dass mit den detaillierten Modellen ein weit größerer Bandbereich abgedeckt werden kann.

Die Beispielrechnungen von Meirlaen *et al.* (2002), die eine Steuerung zur maximalen Auslastung der Kläranlage bei Regenwetter aufgrund von Ammonium-Messungen im Fließgewässer und Schlammspiegelmessungen im Nachklärbecken vorsehen, zeigen signifikante Verbesserungen erst nach der ersten Spitze, da keine Regenvorhersagen verwendet wurden.

Die vereinfachte Simulation beinhaltet aber gerade auch im Hinblick auf die zuverlässige Abschätzung der akuten Gewässerbelastung Probleme. So können Spitzenfrachten von gelösten Stoffen, die vorwiegend aus dem Schmutzwasser stammen, nicht richtig abgeschätzt werden, da der Ausstoßeffekt aufgrund der Wellenausbreitung nur mit hydrodynamischen Ansätzen auf Basis der St. Venant Gleichungen erfasst werden kann (Krebs *et al.*, 1999). Da Ammonium ein typischer Vertreter dieser Stoffgruppe ist, kann dieser Effekt durchaus für Fischersterben verantwortlich sein. Mittels einfacher hydrologischer Modellansätze lässt er sich aber nicht abbilden.

4.4 Fallbeispiele der integrierten, prädiktiven Steuerung

Schütze *et al.* (2002) entwickeln eine screening Prozedur, um mittels einfacher Kriterien das Steuerungspotenzial von Einzugsgebieten abzuschätzen. Als Zielgröße wurde die Dauer der Unterschreitung der einzuhaltenden Grenzkonzentration von 4 mg/l Sauerstoff im Fließgewässer definiert. Neben dem gesamten Rückhaltevolumen des Systems sind der Basisabfluss im Fließgewässer und die Distanz zwischen der Mischwasserentlastung und der Kläranlage von großer Bedeutung für das Steuerungspotenzial. Es konnte zudem gezeigt werden, dass mit integrierten Steuerungsstrategien im Vergleich zur klassischen, lokalen Steuerung signifikant bessere Resultate erzielt werden können. Während bei lokaler Steuerung in 30 % der semi-hypothetischen Systeme kaum eine Verbesserung in Bezug auf die Zielgröße möglich war und nur gerade bei 5 % eine Reduktion der Dauer der Unterschreitung von 4 mgO₂/l von mehr als 80 % resultierte, lagen die entsprechenden Werte für die integrierte Steuerung bei 3 % bzw. 33 %. Die Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen, die für die klassische Steuerung uninteressant erscheinen, könnte mit integrierter Steuerung also durchaus passabel gesteigert werden.

Im Projekt von Seggelke und Rosenwinkel (2002) wird angestrebt, die Kläranlage bei Mischwasseranfall im Hinblick auf die Minimierung der Gesamtemissionen entsprechend ihrer Kapazitätsgrenze möglichst hoch zu beschicken. In Pilotversuchen wurden Strategien zur Steuerung und Regelung der Kläranlage entwickelt. Die Schnittstelle wird von der Kanalisationsseite her mit einer Schmutzfrachtsimulation aufgrund von Regeninformationen angenähert, von der

Kläranlagenseite her mittels eines Online-Beobachtermodells, welches durch Messwerte gestützt wird. Mit Hilfe dieser Informationen wird ein Vorhersagemodell betrieben, das durch Simulation verschiedener Steuerungsoptionen die Variante ermittelt, die eine Höherbelastung der Kläranlage erlaubt. Es wurde ausgesagt, dass es mit dieser Methode möglich sein wird, die Kläranlage je nach Ereignis und Prozessentwicklung bis zum vierfachen Trockenwetteranfall zu beschicken.

Um die Sauerstoffproblematik im Fließgewässer beurteilen zu können ist es nötig, dieses über eine gewisse Fließstrecke abzubilden. Simulationen von Rauch und Harremoës (1999) ergeben, dass für das untersuchte Einzugsgebiet das Sauerstoffminimum im Fließgewässer in einer Distanz von ca. 10 km von der Mischwassereinleitung auftritt (Abbildung 7). Durch eine Steuerung, die auf prädiktiver Simulation beruht, konnte im dargestellten Fall verhindert werden, dass die Sauerstoffkonzentration unter 4 mg O₂/l absinkt.

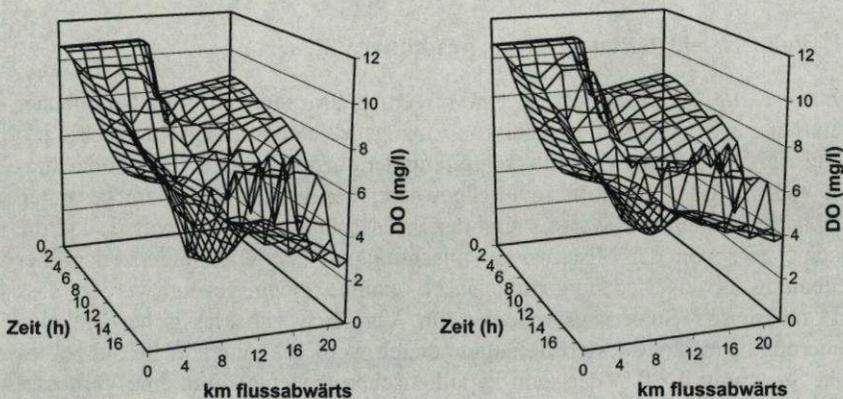


Abbildung 7 Sauerstoffgehalt im Längsprofil des Fließgewässers über die Zeit (Rauch und Harremoës, 1999) links ohne und rechts mit Steuerung

Im Projekt von Rauch und Harremoës (1999) wurde auch untersucht, wie sich die Vorhersage auf die Effektivität der Steuerung – d.h. in diesem Fall auf die Zielgröße der Sauerstoffkonzentration im Fließgewässer – auswirkt. Für einen Fall, bei dem das Sauerstoffminimum im Fließgewässer stark absinkt, ist der Einfluss des Prognosehorizontes, des Steuerungshorizontes und der Periode, mit der die Steuerungsstrategie überprüft und gegebenenfalls angepasst wird, in Abbildung 8 dargestellt. Der Prognosehorizont bezieht sich dabei auf die Vorhersage des Niederschlagsverlaufes! Es fällt auf, dass alle Kurven abflachen; ab einem gewissen Zeitraum nimmt die Qualität der Steuerung mit weiter reichen-

dem Prognose- und Steuerungshorizont nicht mehr zu, genauso wenig mit zunehmender Frequenz der Strategieanpassung. Dies hängt in erster Linie damit zusammen, dass eine weiter in die Zukunft reichende Niederschlagsprognose mit größer werdender Unsicherheit behaftet ist. Trotzdem konnte gezeigt werden, dass auch eine unsichere Regenprognose besser ist als gar keine.

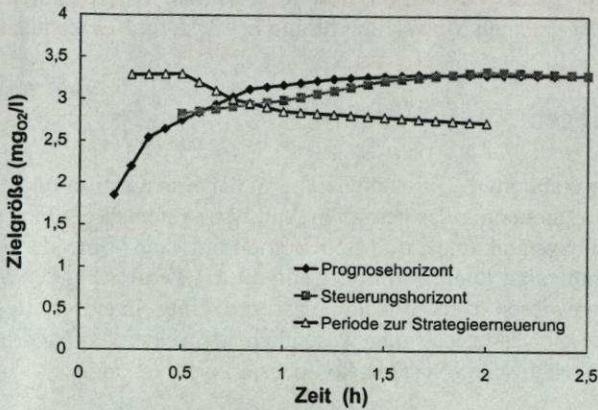


Abbildung 8 Einfluss von Prognosehorizont, Steuerungshorizont und Periode zur Strategieerneuerung auf das Steuerungsergebnis (Rauch und Harremoës, 1999).

4.5 Probleme bei der Umsetzung

Bis die komplexen, auf prädiktiver Simulation beruhenden Steuerungskonzepte in der Praxis weitverbreitet eingesetzt werden, wird noch einige Zeit vergehen. Die Simulationswerkzeuge selbst scheinen dabei das geringste Problem darzustellen. Sie werden durch fortschreitende Forschungsarbeiten auch laufend verbessert. Problembereiche sind:

- Die Online-Messung von Stoffgrößen. Die Messgrößen sind zur Zeit häufig noch mit zu großer Unsicherheit behaftet und der Wartungsaufwand für den Betrieb der Sonden ist – besonders im Bereich Kanalisation – hoch.
- Die Systeme sind sehr komplex und anspruchsvoll in der Handhabung. Dies erfordert eine gezielte Ausbildung des Personals, insbesondere auch um bei Fehlfunktionen von Messungen, Simulationen oder Steuerungseinrichtungen korrigierend eingreifen zu können.
- Die Komplexität der Systeme erschwert den Überblick. Vermeintliche Erfolge der Simulationen und die Möglichkeiten der zur Zeit erhältlichen Pro-

grammpakete dürfen nicht über die Frage hinwegtäuschen, ob z.B. die maßgebenden Parameter abgebildet werden (z.B. Spitzen von leichtabbaubarem CSB anstatt CSB-Jahresfrachten).

- Es ist äußerst schwierig, bei derart komplexen Systemen im realen System Erfolgskontrollen durchzuführen. Auch hier sollten die Möglichkeiten der Simulation genutzt werden, um besonders sensitiv reagierende Parameter an sensitiv reagierenden Messstellen für die Erfolgskontrolle zu identifizieren.

5 Folgerungen

Zwischen der etablierten Abflusssteuerung in der Kanalisation und der immissionsorientierten Steuerung des gesamten Abwassersystems liegt eine signifikante Steigerung an Systemkomplexität und Betriebsaufwand. Eine derartige Steigerung der Komplexität lohnt sich nur, wenn mittels vergleichenden Simulationsstudien nachgewiesen werden kann, dass mit einer integrierten, prädiktiven Steuerung die Gewässerbelastung wesentlich vermindert und die bauliche Erweiterung des technischen Systems kompensiert werden kann.

Es wurde dargestellt, dass sich eine konzentrations- oder frachtbasierte Steuerung im Vergleich zur Abflusssteuerung positiv auswirkt, wenn ausgeprägte Tagegänge von Stofffrachten sowie Teileinzugsgebiete mit unterschiedlichem Verschmutzungsgrad des Mischwassers vorhanden sind. Sowohl Abflusssteuerung als auch frachtbasierte Steuerungsentscheide sind meist erst nach der ersten Frachtspitze wirksam, also nach der für die akute Fließgewässerbelastung maßgebenden Phase.

Um auch bezüglich der Immission eine wirksame Verbesserung erzielen zu können ist es notwendig, mittels prädiktiver Simulation den Ereignisverlauf vorherzusagen und verschiedene Steuerungsstrategien vergleichend zu beurteilen. Aufgrund von Vergleichen der Vorhersage mit Messungen oder mittels Online-Simulation erzeugter Daten kann die Strategie mit einer vorzuziehenden Frequenz überprüft und angepasst werden. Verschiedene Studien haben dieser aufwändigen Form der Steuerung ein gutes Potenzial zugebilligt.

Es ist zu erwarten, dass als Folge der in der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie neu formulierten Zielsetzung für die Abwasserentsorgung derartige Steuerungssysteme interessanter und entsprechend weiterentwickelt werden. Bis zur Umsetzungsreife muss die Robustheit von Online-Messungen und der numerischen Simulationen verbessert werden.

6 Literatur

- Armbruster M., Krebs P. und Rodi W. (2001). Numerical modelling of dynamic sludge blanket behaviour in secondary clarifiers. *Water Science and Technology*, **43** (11), 173-180.
- ATV-DVWK A131 (2000). Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen ab 5000 Einwohnerwerten. Arbeitsblatt A131, Abwassertechnische Vereinigung, Hennef.
- ATV-DVWK AG ES 2.4 (1995). Untersuchung zum Steuerungspotential von Kanalnetzen. Arbeitsbericht der Arbeitsgruppe „Abflusssteuerung in Kanalnetzen“, *Korrespondenz Abwasser*, **42** (1), 103-108.
- ATV-DVWK AG KA 6.2 (2001). Online-Simulation von Belebungsanlagen. *KA Wasserwirtschaft · Abwasser · Abfall*, **48** (12), 1777-1784.
- Brombach H., Michelbach S. und Wöhrle C. (1993). Feststoffe in der Mischwasserkanalisation. *Korrespondenz Abwasser*, **40** (12), 1910-1926.
- Bruns J. (1999). Dynamische Koppelung von Regenwasserbehandlung und Abwasserreinigung bei Mischwasserzufluss. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Band 151, R. Oldenburg, München.
- Crabtree B. und Morris G. (2002). Effective environmental regulation to maximise the benefits of integrated wastewater management. *Water Science and Technology*, **45** (3), 211-218.
- Erbe V., Frehmann T., Geiger W.F., Krebs P., Londong J., Rosenwinkel K.-H. und Seggelke K. (2001). Integrated Modelling as an analysing and optimisation tool for urban watershed management. IWA World Congress, Oktober 2001, Berlin.
- EU (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Brussels.
- FWR (1998). *Urban Pollution Management Manual*. FR/CL 0002. Foundation for Water Research, Marlow, UK.
- Henze M., Gujer W., Mino T. und van Loosdrecht M. (2000). Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. IWA Scientific and Technical Report No. 9. London, UK.
- Holzer P. und Krebs P. (1998). Modelling the total ammonia impact of CSO and WWTP effluent on the receiving water. *Water Science and Technology*, **38** (10), 31-39.
- Jack A.G. und Ashley R.M. (2002). The impact of the controlled emptying of in-sewer storage on wastewater treatment plant performance. *Water Science and Technology*, **45** (3), 247-253.
- KA (2001). Abflusssteuerung. Thematische Ausgabe der *KA, Wasserwirtschaft · Abwasser · Abfall*, **48** (6).
- Koch G., Pianta R., Krebs P. und Siegrist H. (1999). Improving denitrification in the secondary clarifier. *Water Research*, **33** (2), 309-318.
- Krebs P., Krejci V., Fankhauser R. und Siegrist H. (1996). Reducing the overall impact on a small receiving water. 7th Int. Conf. on Urban Storm Drainage, Proc. Vol.1, 365-370, Hannover.

- Krebs P., Holzer P., Huisman J.L. und Rauch W. (1999). First flush of dissolved compounds. *Water Science and Technology*, **39** (9), 55-62.
- Krebs P., Armbruster M. und Rodi W. (2000). Numerische Nachklärbecken-Modelle. *KA Wasserwirtschaft · Abwasser · Abfall*, **47** (7), 985-999.
- Krebs P. (2000). Stofftransport in der Siedlungsentwässerung. Dresdner Berichte, Band 16, pp. 85-108, Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft, TU Dresden. ISSN 1615-083X
- Meirlaen J., Van Assel J. und Vanrolleghem P.A. (2002). Real time control of the integrated urban wastewater system using simultaneous simulating surrogate models. *Water Science and Technology*, **45** (3), 109-116.
- Pleau M., Pelletier G., Colas H., Lavallée und Bonin R. (2001). Global predictive RTC of Quebec urban community's westerly sewer network. *Water Science and Technology*, **43** (7), 123-130.
- Rauch W. und Harremoës P. (1998). Correlation of combined sewer overflow reduction due to real-time control and resulting effect to the oxygen concentration in the river. *Water Science and Technology*, **37** (12), 69-76.
- Rauch W. und Harremoës P. (1999). Genetic algorithms in real time control applied to minimize transient pollution from urban wastewater systems. *Water Research*, **33** (5), 1265-1277.
- Rauch W., Bertrand-Krajewski J.-L., Krebs P., Mark O., Schilling W., Schütze M. und Vanrolleghem P.A. (2002). Mathematical modelling of integrated urban drainage systems. *Water Science and Technology*, **45** (3), 81-94.
- Reichert P., Borchardt D., Henze M., Rauch W., Shanahan P., Somlódy L. und Vanrolleghem P.A. (2000). River water quality model no. 1 (RWQM1). II. Biochemical process equations. *Water Science and Technology*, **43** (5), 11-30.
- Risholt L.P., Schilling W., Erbe V. und Alex J. (2002). Pollution based real time control of wastewater systems. *Water Science and Technology*, **45** (3), 219-228.
- Schilling W., Bauwens W., Borchardt D., Krebs P., Rauch W. und Vanrolleghem P. (1997). Receiving water objectives - scientific arguments versus urban wastewater management practice. *Proc. Vol. 1*, pp. 510-515, 27th IAHR Conference, San Francisco, USA.
- Schütze M., Butler D. und Beck M.B. (1999). Optimisation of control strategies for the urban wastewater system – an integrated approach. *Water Science and Technology*, **49** (9), 209-216.
- Schütze M., Butler D., Beck M.B. und Verworn H.-R. (2002). Criteria for assessment of the operational potential of the urban wastewater system. *Water Science and Technology*, **45** (3), 141-148.
- Seggelke K. und Rosenwinkel K.-H. (2002). Online-simulation of the WWTP to minimise the total emission of WWTP and sewer system. *Water Science and Technology*, **45** (3), 101-108.
- Shanahan P., Borchardt D., Henze M., Rauch W., Reichert P., Somlyódy L. und Vanrolleghem P.A. (2000). River water quality model No. 1 (RWQM1): I. Modelling approach. *Water Science and Technology*, **43** (5), 1-9.

- Vanrolleghem P.A., Fronteau C. und Bauwens W. (1996). Evaluation of design and operation of the sewage transport and treatment system by an EQO/EQS based analysis of the receiving water immission characteristics. *Proc.* pp. 14.35-14.46, WEF Conference Urban Wet Weather Pollution, Québec, Canada.
- Vanrolleghem P., Schilling W., Rauch W., Krebs K. und Aalderink H. (1999). Setting up measuring campaigns for integrated wastewater modelling. *Water Science and Technology*, **39** (4), 257-268.
- Vanrolleghem P.A., Borchardt D., Henze M., Rauch W., Reichert P. Shanahan P. und Somlyódy L. (2000). River water quality model No. 1 (RWQM1): III. Biochemical submodell selection. *Water Science and Technology*, **43** (5), 31-40.

Autoren:

Prof. Dr. Peter Krebs

Prof. Dr. Wolfgang Rauch

Institut für Siedlungs- und
Industriewasserwirtschaft
Technische Universität Dresden
D- 01062 Dresden

Institut für Umwelttechnik
Universität Innsbruck
Technikerstraße 13
A-6020 Innsbruck

Tel.: ++49 – 351 – 4633 5257

Tel.: ++43 – 512 – 507 6920

Fax: ++49 – 351 – 4633 7204

Fax: ++43 – 512 – 507 2911

E-Mail: PKrebs@rcs.urz.tu-dresden.deE-Mail: Wolfgang.Rauch@uibk.ac.at