

Optimierung von Kläranlagen mit Advanced Process Control

Wie kann der Betrieb von Kläranlagen, insbesondere die Belüftung der biologischen Reinigungsstufen, mithilfe der Advanced Process Control Funktionen von SIMATIC PCS 7 optimiert werden?

White Paper | 27. März 2015

Sie wollen den Betrieb ihrer Kläranlage optimieren, beispielsweise im Hinblick auf Prozess-Stabilität, Energieverbrauch und Einhaltung von Ablaufwerten?

Sie wollen eine Automatisierung, die einheitlich, übersichtlich und einfach anzupassen ist?

Das vorliegende White Paper bietet einen Überblick, welche regelungstechnischen Ansätze hierfür in Frage kommen und wie Sie mithilfe der SIMATIC PCS 7 Advanced Process Library transparent und aufwandsarm realisiert werden können.

Inhalt

| | |
|---|-----------|
| Einführung | 3 |
| Grundlagen zum Belebtschlammverfahren | 3 |
| Herausforderungen bei der Automatisierung von Kläranlagen | 4 |
| Advanced Process Control für Kläranlagen | 4 |
| Optimierung einer kleineren Kläranlage mit intermittierendem Betrieb | 6 |
| Anlagenbeschreibung | 6 |
| Simulationsmodell | 6 |
| Herausforderungen bei der Automatisierung | 6 |
| Lösungskonzept | 7 |
| Simulationsergebnisse | 7 |
| Ausblick | 8 |
| Optimierung einer Groß-Kläranlage im kontinuierlichen Betrieb | 9 |
| Anlagenbeschreibung | 9 |
| Simulationsmodell | 9 |
| Herausforderungen bei der Automatisierung | 9 |
| Lösungskonzept | 10 |
| Simulationsergebnisse | 10 |
| Ausblick | 11 |
| Fazit | 12 |
| Literatur | 12 |



“Weil der Ablauf der Kläranlage direkt in öffentliche Fließgewässer gelangt, haftet der Kläranlagenbetreiber für die Einhaltung der gesetzlich zulässigen Grenzwerte im gereinigten Abwasser.”

Einführung

Grundlagen zum Belebtschlammverfahren

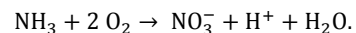
Zur Reinigung von Abwasser kommen überwiegend Kläranlagen nach dem Belebtschlammverfahren zum Einsatz, deren typischer Aufbau in Bild 1 dargestellt ist [9.]. Die mechanische Vorreinigung bestehend aus Rechen, Sandfang und Vorklärbecken entfernt zunächst grobe Verschmutzungen und Inhaltsstoffe, die sich am Boden absetzen.

Anschließend gelangt das vorgereinigte Abwasser in das Belebungsbecken, wo es biologisch nach dem Belebtschlammverfahren gereinigt wird. Das Nachklärbecken trennt den Belebtschlamm durch Absetzen vom gereinigten Wasser, wobei der Belebtschlamm größtenteils ins

Belebungsbecken zurückgeführt wird. Das gereinigte Wasser wird in der Regel in öffentliche Fließgewässer eingeleitet.

Für die Automatisierung einer Kläranlage stellt die Regelung der biologischen Vorgänge im Belebungsbecken die größte Herausforderung dar.

In den Belebungsbecken einer Kläranlage werden die Inhaltsstoffe des Abwassers mittels Belebtschlamm biologisch abgebaut. Aerobe Bakterien, die Sauerstoff benötigen, bauen die Kohlenstoffverbindungen überwiegend zu Kohlenstoffdioxid und Biomasse ab. Im Rahmen der Nitrifikation wird der Stickstoff aus den organischen Verbindungen, der überwiegend in Form von anorganischem Ammonium NH_4 vorliegt, durch andere Bakterien zunächst als Ammoniak (NH_3) abgespalten, und dann mit Sauerstoff über die Zwischenstufe Nitrit zu Nitrat oxidiert:



Die an der Nitrifikation beteiligten Bakterien Nitrosomas

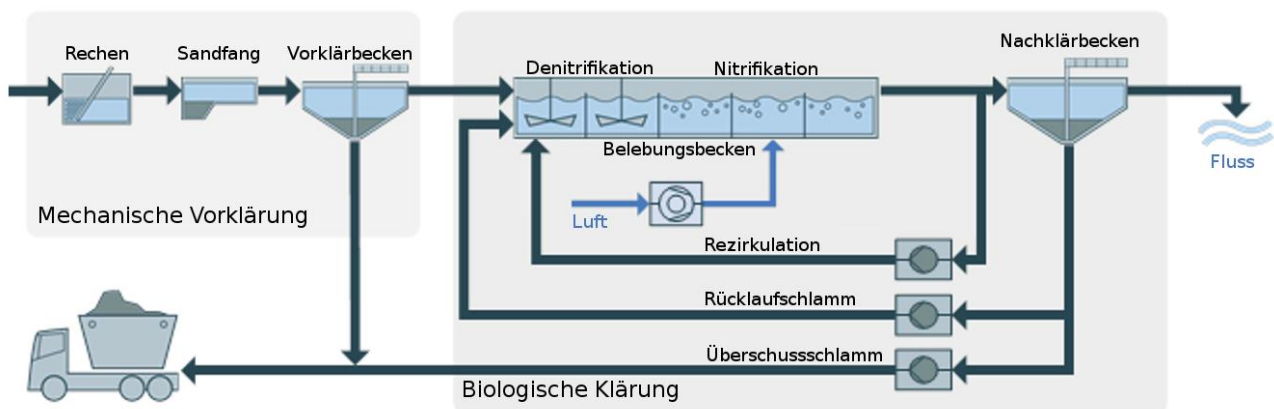
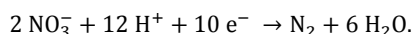


Bild 1: Typisches Verfahrensschema einer mittelgroßen Kläranlage

und Nitrobacter wachsen sehr viel langsamer als die an der Kohlenstoffelimination beteiligten heterotrophen Bakterien. Da sie außerdem mehr Sauerstoff benötigen und empfindlicher gegen Temperaturschwankungen sind, müssen sie gezielt gefördert werden.

Das in der Nitrifikation entstandene Nitrat wird unter anoxischen Bedingungen, also unter Abwesenheit von molekularem Sauerstoff, zu elementarem Stickstoff reduziert:



Dazu müssen die Bakterien ihren Stoffwechsel von Sauerstoffatmung auf Nitratatmung umstellen, was durch Sauerstoffmangel erzwungen werden muss und als Denitrifikation bezeichnet wird. Außerdem sind dafür ausreichend leicht abbaubare Kohlenstoffverbindungen als Elektronendonatoren erforderlich.

Es gibt verschiedene technische Ausführungsvarianten des Belebtschlammverfahrens, zum Beispiel vorgeschaltete, simultane oder intermittierende Denitrifikation. Bei der vorgeschalteten Denitrifikation wird ein erstes Belebungsbecken anoxisch betrieben und aus den sauerstoffreichen weiteren Becken das Schlamm/Abwassergemisch zurückgepumpt, was auch in Bild 1 dargestellt ist. Somit ist ausreichend Kohlenstoff aus dem Zulauf zum ersten Becken und Nitrat aus dem Rücklauf vorhanden. Bei der intermittierenden Denitrifikation werden durch phasenweises Abschalten der Belüftung temporär anoxische Bedingungen in einem einzigen Becken erzeugt.

Als Beispielanlagen werden sowohl eine intermittierend betriebene Kläranlage vorgestellt, als auch eine mit vorgeschalteter Denitrifikation.

Herausforderungen bei der Automatisierung von Kläranlagen

Der weitgehend automatisierte Betrieb von Kläranlagen gilt als Stand der Technik. Im Vergleich zu verfahrenstechnischen Anlagen anderer Branchen, beispielsweise der Chemie, ist die Anzahl der Sensoren und Regelkreise in einer Kläranlage geringer. Dennoch bringt die Automatisierung von Kläranlagen einige besondere Herausforderungen mit sich:

- Der Ablauf der Kläranlage gelangt direkt in öffentliche Fließgewässer. Daher haftet der Kläranlagenbetreiber für die Einhaltung der gesetzlich zulässigen Grenzwerte im gereinigten Abwasser, zum Beispiel in Hinblick auf Ammoniumstickstoff $\text{NH}_4\text{-N}$, Gesamtstickstoff, chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) und Phosphat.
- Die biologischen Prozesse zur Reinigung des Abwassers mithilfe verschiedener Bakterien in den Teilschritten Nitrifikation und Denitrifikation sind komplex und nicht leicht zu modellieren [1.]. Es ist sorgfältig darauf zu achten, den Bakterien als Lebewesen die passenden Umgebungsbedingungen

bereitzustellen, damit sie mit ihren Stoffwechselprozessen genau die gewünschte Aufgabe erfüllen.

- Viele für die Regelung wichtige Größen, insbesondere Konzentrationen, werden nicht online gemessen, sondern stehen nur in größeren zeitlichen Abständen als Laborproben zur Verfügung.
- Der Zulauf in eine Kläranlage unterliegt starken Schwankungen sowohl im Hinblick auf die Menge, als auch auf Inhaltsstoffe. Gründe hierfür sind zum einen witterungsbedingte und saisonale Schwankungen, aber auch das Verhalten der zahlreichen Privatpersonen und Industriebetriebe, die Abwässer in das Kanalnetz einleiten.
- Kläranlagen und insbesondere die Belüftung der biologischen Reinigungsstufen stellen in vielen Städten und Gemeinden die größten kommunalen Energieverbraucher dar. Maßnahmen, die den Energieverbrauch reduzieren, können sich daher schon nach kurzer Zeit amortisieren.
- Aufgrund der typischen Betriebsgröße vor allem kommunaler Kläranlagen sind Know-how-Träger im Hinblick auf abwasserspezifische bioverfahrenstechnische Themen meist vor Ort verfügbar, aber keine speziellen Regelungstechnik-Experten. Jede regelungstechnische Lösung muss darum so transparent und klar strukturiert sein, dass sie vom vorhandenen Personal betrieben und gepflegt werden kann.

Advanced Process Control für Kläranlagen

Grundsätzlich werden mit dem Einsatz von MSR-Technik (Mess-, Steuer- und Regelungstechnik) auf Kläranlagen folgende Ziele verfolgt:

- Verbesserung der Reinigungsleistung zur Einhaltung von Ablaufgrenzwerten.
- Minimierung der Betriebskosten, insbesondere Energiekosten.
- Einsparung von Investitionskosten durch optimale Nutzung bestehender baulicher Infrastrukturen.

Methoden der gehobenen Regelungstechnik, die unter dem Stichwort Advanced Process Control (APC) in anderen Branchen wie zum Beispiel in der Chemie oder in Raffinerien bekannt geworden sind, bieten Potential zur Optimierung der Prozessführung auch in der Wasser-/Abwasserbranche. Seit solche Methoden in modernen Prozessleitsystemen wie SIMATIC PCS 7 [2.] nahtlos integriert und preiswert als Standard-Software-Bausteine verfügbar sind [3.], steht einem erfolgreichen Einsatz auf Kläranlagen nichts mehr im Wege.

Insbesondere das Verfahren der modellbasierten Prädiktivregelung (MPC, Model Predictive Control) erscheint in

diesem Zusammenhang attraktiv. Ein MPC erlaubt eine „vorausschauende Fahrweise“ der Anlage, da er sowohl physikalische/chemische/biologische Quereinflüsse zwischen verschiedenen Variablen als auch messbare Störeinflüsse, beispielsweise aus dem Zulauf, berücksichtigt. Unter der Bezeichnung ModPreCon ist der MPC als Funktionsbaustein standardmäßig in SIMATIC PCS 7 in der Advanced Process Library integriert.

Der vorliegende Beitrag zeigt anhand von konkreten realen Fallbeispielen, wie dieses Optimierungspotential erschlossen werden kann. Bei den Fallbeispielen handelt es sich um Pilotprojekte, die mit einer einheitlichen Vorgehensweise durchgeführt werden:

- Konfiguration und Parametrierung eines Simulationsmodells der konkreten Kläranlage, aufbauend auf einer branchenspezifischen Bibliothek von Anlagenkomponenten [4.].
- Simulationsstudie zum bisherigen Ist-Zustand der Automatisierung.
- Erfassung der Anforderungen zur Optimierung der Prozessführung.
- Konzeption und Konfiguration einer APC-Lösung für den vorliegenden Anlagentyp durch Kombination von Standard-Funktionsbausteinen und Nutzung der zugehörigen Software-Tools zur rechnergestützten Inbetriebnahme der Regelungsfunktionen.
- Benchmarking-Simulationen, um das Verbesserungspotential durch die APC-Lösung zu quantifizieren.

Ziel der Pilotprojekte ist es, für häufig genutzte Anlagentypen eine verallgemeinerbare APC-Lösung zu entwickeln. Die dabei notwendigen Studien können nur mithilfe eines detaillierten Simulationsmodells durchgeführt werden. Mittlerweile liegen umfangreiche Erfahrungen vor, sodass APC-Lösungen für vergleichbare Kläranlagentypen ohne neue Simulationsstudien erstellt werden können. Dass der aufwendige Schritt der Modellierung wegfällt, spart nicht nur Kosten, sondern auch wertvolle Zeit bis zur Inbetriebnahme des neuen Regelungskonzepts auf einer neuen Kläranlage.



“Kläranlagen und insbesondere die Belüftung der biologischen Reinigungsstufen stellen in vielen Städten die größten kommunalen Energieverbraucher dar.”

Optimierung einer kleineren Kläranlage mit intermittierendem Betrieb

Anlagenbeschreibung

Betrachtet wird eine kleine Kläranlage, die im intermittierenden Betrieb arbeitet. Bild 2 zeigt die Struktur der Kläranlage. Das Belebungsbecken wird im zeitlichen Wechsel nitrifizierend und denitrifizierend betrieben, indem die Belüftung ein- bzw. ausgeschaltet wird.

Der Umschaltzeitpunkt basiert auf einer Messung der Ammonium- und Nitrat-Konzentrationen (nachfolgend immer als Ammonium- bzw. Nitratstickstoff-Konzentration angegeben) im Belebungsbecken. Die Denitrifikationsphase wird beendet, wenn die Nitrat-Konzentration unter einen vorgegebenen Wert sinkt. Es wird dann die Belüftung eingeschaltet, um das in der Denitrifikationsphase nicht behandelte Ammonium in der Nitrifikationsphase wieder abzubauen. Diese wird beendet, wenn eine vorgegebene Ammonium-Konzentration unterschritten wird.

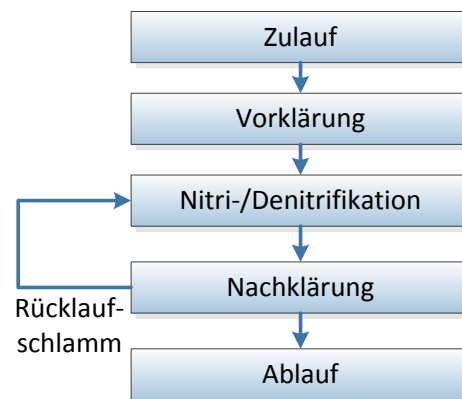


Bild 2: Fließschema der Kläranlage

Simulationsmodell

Für die Kläranlage wird ein Modell in einem Siemens-internem Tool zur Simulation biologischer und chemischer Verfahrenstechnik erstellt. Für die Modellierung der biologischen Vorgänge im Belebungsbecken wird das „Activated Sludge Model No. 1“ (ASM1) verwendet [5.]. Die Modellierung des Nachklärbeckens basiert auf dem „Secondary settler“-Modell aus dem „Benchmark Simulation Model No. 1“ (BSM1) [6.].

Die Simulation, die mit Messdaten der realen Kläranlage abgeglichen wird, beschreibt gut die wesentlichen dynamischen Vorgänge der Kläranlage.

Herausforderungen bei der Automatisierung

Die derzeitige Regelung, die im weiteren Verlauf als klassische Regelung bezeichnet wird, besteht zum einen aus der Umschaltung der beiden Phasen des Belebungsbeckens.

Die Umschaltung zwischen Nitrifikation und Denitrifikation beim intermittierenden Betrieb erfolgt anhand einer Ammonium/Nitrat-Kombisonde. Die Belüftung wird abgeschaltet und damit die Nitrifikationsphase beendet, sobald genügend Ammonium abgebaut wurde. Dies ist der Fall, wenn die Ammonium-Konzentration unter einen Schwellwert von 0,5 mg/L gesunken ist. Die Denitrifikation wird beendet, sobald die Nitrat-Konzentration unter einen Schwellwert von 8 mg/L gesunken ist, sodass genügend Nitrat abgebaut worden ist.

Ergänzt wird die Umschaltlogik durch Minimal- und Maximalzeiten der Phasen, um sowohl ein zu schnelles Umschalten als auch ein zu langes Verweilen zu vermeiden.

Den zweiten Teil der Regelung stellt die Belüftungsregelung während der Nitrifikationsphase dar. Es wird ein konstanter Sauerstoffsollwert vorgegeben, der mittels PI-Regler über ein Gebläse eingestellt wird.

Die typische zeitliche Dauer der Nitrifikationsphase genügt dem Sauerstoffregler jedoch nicht immer, um durch Variation der Gebläsedrehzahl in eine stationäre Sauerstoffkonzentration einzuschwingen. Gleichzeitig ist die Gebläsedrehzahl zu Beginn der Nitrifikationsphase sehr hoch, was erheblich Energie kostet.

Einen großen Einfluss auf die dynamischen Vorgänge auf der Kläranlage hat die Zulaufmenge. Die bisherige Automatisierung kann jedoch nicht direkt auf eine Veränderung reagieren, da die Zulaufmenge nicht in der klassischen Regelung berücksichtigt wird. Erst wenn sich die Konzentrationen im Belebungsbecken verändern, ergeben sich andere Zeitdauern der Phasen und der Sauerstoffregler verändert gegebenenfalls die Gebläsedrehzahl.

Lösungskonzept

Die Sauerstoff-Konzentration in der Nitrifikationsphase ist nur eine Hilfsregelgröße zur Bereitstellung passender Umgebungsbedingungen für den aeroben Stoffwechsel der Bakterien. Eine über längere Zeit konstante Sauerstoffkonzentration ist nicht immer erreichbar, aber prozesstechnisch auch gar nicht erforderlich.

Das neue Konzept sieht daher vor, die Steuerung der Gebläsedrehzahl direkt an der primär interessierenden Prozessgröße auszurichten, also an der Ammonium-Konzentration. Diese soll von einem gemessenen Startwert zu Beginn der Nitrifikationsphase in einer vorgegebenen Zeit auf einen vorgegebenen Zielwert sinken, um die Nitrifikationsphase zu beenden.

Gleichzeitig wird die Zulaufmenge als messbare Störgröße interpretiert. Sind die Auswirkungen auf die Vorgänge in der Nitrifikationsphase bekannt, so kann der Regler die Belüftung frühzeitig anpassen und negative Auswirkungen einer Zulaufschwankung vermeiden oder zumindest dämpfen.

Der MPC-Funktionsbaustein ModPreCon ist hervorragend für die beschriebenen Aufgaben geeignet. Er besitzt standardmäßig ein Führungsgrößenfilter, das den gewünsch-

ten zeitlichen Verlauf der Ammonium-Konzentration vorgibt.

Der MPC wird aufgrund der oben beschriebenen Einschränkungen des PI-Reglers nicht mit dem bestehenden Sauerstoffregler kaskadiert. So verwendet der MPC direkt die Gebläsedrehzahl als Stellwert, um die Ammonium-Konzentration unter Berücksichtigung der messbaren Störgröße Zulauf zu regeln.

Der bisherige konventionelle PI-Sauerstoffregler bleibt als Backup-Lösung erhalten. Der jeweils passive Regler wird nachgeführt, um jederzeit eine stoßfreie Umschaltung sicherzustellen.

Zur Parametrierung des MPC-Bausteins kann der standardmäßig in SIMATIC PCS 7 bereitgestellte MPC-Konfigurator eingesetzt werden. Es müssen Messdaten der Stell-, Stör- und Regelgrößen aufgezeichnet werden, bei denen eine Anregung der Stell- und Störgrößen erfolgt. Da in diesem Beispiel nur eine Stellgröße, die Gebläsedrehzahl, und eine Störgröße, der Zulauf, vorhanden sind, kann die Datenaufzeichnung parallel zum normalen Betrieb erfolgen. Gegebenenfalls muss die Nitrifikationsphase verlängert werden, was jedoch keine negativen Auswirkungen auf die biologischen Vorgänge in der Kläranlage hat.

Anschließend parametriert der MPC-Konfigurator den MPC automatisch, wofür einige wenige transparente Parameter zur Anpassung des dynamischen Verhaltens genutzt werden können.

Simulationsergebnisse

Zur Simulation wird die in SIMATIC PCS 7 implementierte klassische Regelung und die Automatisierung mit MPC an den Simulator gekoppelt. Simuliert wird ein Zeitraum von 25 Stunden, der in Bild 3 dargestellt ist. Da keine realen Zulaufdaten für die Anlage vorliegen, wird ein synthetisches Zulaufprofil verwendet.

Dargestellt ist in rot die klassische Regelung und in blau die MPC-Lösung. Da sich die Zeitdauern der einzelnen Phasen in beiden Varianten unterscheiden können, verschieben sich die Phasen in der Darstellung.

Die Simulation beginnt in einer unbelüfteten Denitrifikationsphase. Nachdem genug Nitrat abgebaut wurde, beginnt die Belüftung. Nun unterscheiden sich die Verläufe, da die beiden Regler unterschiedliche Gebläsedrehzahlen vorgeben.

Die Reinigungsleistung ist in beiden Varianten vergleichbar, da die Ammonium- und Nitrat-Konzentrationen im Mittel gleich bleiben.

Gut erkennbar ist, dass sich bei der MPC-Lösung eine kleinere Sauerstoff-Konzentration im Belebungsbecken einstellt als mit der klassischen Regelung. Da die Gebläse mit der klassischen Regelung oft bei maximaler Drehzahl laufen, bedeutet dies eine erhebliche Energieeinsparung, die sich im betrachteten Zeitraum auf 33 % summiert.

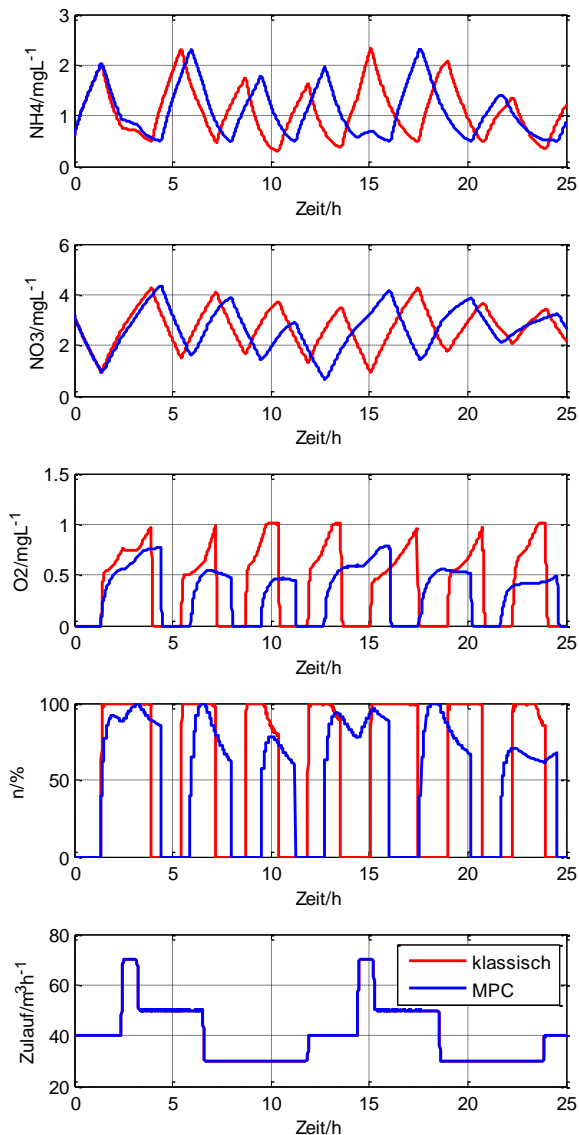


Bild 3: Simulation im intermittierenden Betrieb mit Zulaufschwankungen. Jeweils rot: klassische Regelung, blau: MPC; Ammonium-Konzentration (NH4), Nitrat-Konzentration (NO3), Sauerstoff-Konzentration (O2) in den Nitrifikationsbecken, Gebläsedrehzahl (n) und Zulaufmenge (Zulauf)

Die Anstiege der Zulaufmenge nach 2,5 und 14,5 Stunden führen über die Ammoniumregelung und Störgrößenaufschaltung des MPC zu einer Steigerung der Gebläsedrehzahl. Damit nähert sich das Verhalten der MPC-Regelung dem der konventionellen Sauerstoffregelung an, die ohnehin fast maximal einbläst. Interessant sind dagegen die Rückgänge des Zulaufs. Bei kleinen Zuläufen nimmt der MPC die Gebläsedrehzahl spürbar zurück, was die erhebliche Energieeinsparung erklärt.

Ausblick

Die Simulationsergebnisse sind vielversprechend. Obwohl die Ablaufwerte mit der neuen MPC-Lösung die gleiche Qualität wie unter Verwendung der klassischen Regelung aufweisen, kann erheblich Energie für die Belüftung eingespart werden.



“Jede regelungstechnische Lösung muss so transparent und klar strukturiert sein, dass sie vom vorhandenen Personal betrieben und gepflegt werden kann.”

Optimierung einer Groß-Kläranlage im kontinuierlichen Betrieb

Anlagenbeschreibung

Als zweites Beispiel wird eine Groß-Kläranlage im kontinuierlichen Betrieb betrachtet, wobei die grobe Struktur in Bild 4 dargestellt ist. Nach dem Zulauf und der Vorklärung gelangt das Abwasser zunächst in die vorgeschaltete Denitrifikation. Anschließend erfolgt die Nitrifikation in belüfteten Becken. Vor der Nachklärung wird ein Teil des Wassers als interne Rezirkulation wieder in die Denitrifikationsbecken gepumpt.

Simulationsmodell

Für die Kläranlage existiert ein Simulationsmodell basierend auf Matlab/Simulink und der SIMBA-Bibliothek [7.]. Es simuliert mit einer variablen Zykluszeit, die sich bis auf 5 s reduzieren lässt. Das Simulationsmodell arbeitet mit den real gemessenen Zulaufmengen und -konzentrationen sowie Temperaturen in einem Zeitraum von max. 1,5 Jahren und gibt den realen Anlagenverlauf in diesem Zeitraum sehr gut wieder. Dafür ist auch die bestehende Automatisierung in das Simulationsmodell integriert.

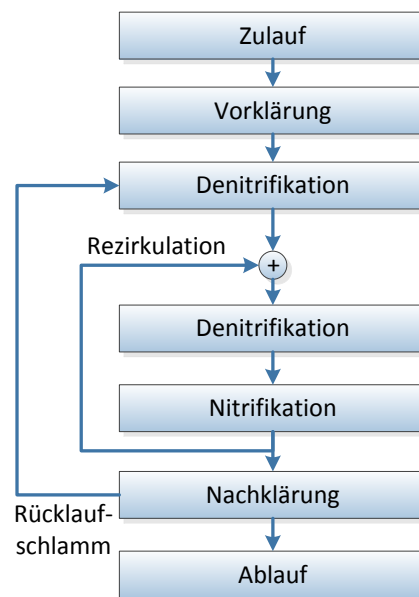


Bild 4: Fließschema der Kläranlage

Herausforderungen bei der Automatisierung

Auf dieser Kläranlage stehen zwei unabhängige Stellgrößen für die Regelung zur Verfügung: die Belüftung der Nitrifikationsbecken und die Rezirkulationsmenge. In der bisherigen Automatisierung, der klassischen Regelung, wird die Belüftung über einen PI-Regler vorgegeben, der eine Sauerstoffkonzentration entsprechend dem konstanten Sauerstoffsollwert in den Nitrifikationsbecken einstellt. Die Rezirkulation wird mittels Kennlinie basierend auf der Nitratkonzentration geregelt.

Die klassische Regelung kann die Ablaufkonzentrationen nicht direkt beeinflussen. Außerdem arbeiten die beiden

Regler unkoordiniert nebeneinander, obwohl die Regelstrecken prozesstechnisch stark verkoppelt sind.

Da die Abwasserzusammensetzung weitgehend konstant ist, hat vor allem die Zulaufmenge Einfluss auf das Anlagenverhalten. Die bestehende Regelung kann auf Veränderungen jedoch erst reagieren, wenn sich die Sauerstoffkonzentration oder die Nitratkonzentration in den belüfteten Becken verändern.

Lösungskonzept

Wichtigstes Kriterium bei der Automatisierung von Kläranlagen ist die Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte im Ablauf. Daher werden die Messwerte der Ammonium- und Nitratkonzentrationen im Ablauf der Nachklärbecken als Regelgrößen ausgewählt. Eine Regelung auf der Basis von Konzentrationsmessungen im Nitrifikationsbecken wäre auch möglich. Die notwendigen Stellgrößen des MPC sind die Sauerstoffkonzentration im Nitrifikationsbecken, die unterlagert mit einem PI-Sauerstoffregler geregelt wird, und die Rezykulationsmenge. Darüber hinaus erfolgt eine Messung der Zulaufmenge, die für eine dynamische Störgrößenaufschaltung genutzt wird.

Im Gegensatz zum ersten Anlagenbeispiel kann hier der Sauerstoffregler weiterhin verwendet und als Folgeregler einer Kaskadenregelung genutzt werden, da er die gewünschte Sauerstoffkonzentration schnell und zuverlässig einstellt.

Es ergibt sich für die Regelung ein Mehrgrößenproblem, bei dem beide Stellgrößen Auswirkungen auf beide Regelgrößen besitzen. Gleichzeitig wirkt auch die Störgröße auf beide Regelgrößen. Dieses Regelungsproblem lässt sich mit einschleifigen Reglern, wie zum Beispiel PI-Reglern, nicht zufriedenstellend lösen. Aus diesem Grund muss ein Mehrgrößenregler verwendet werden. Der MPC-Funktionsbaustein ModPreCon aus der Advanced Process Library in SIMATIC PCS 7 ist ideal für diese Aufgabe geeignet und wird daher mit der vorhandenen Matlab/Simulink-Simulation der Kläranlage gekoppelt.

Um den MPC zu parametrieren, ist, genau wie beim ersten Kläranlagenbeispiel, zuerst die Aufnahme geeigneter Lerndaten vorzunehmen. Dafür werden die Stell- und Störgrößen gezielt einzeln angeregt. Mit dem MPC-Konfigurator kann aus diesen Daten ein mathematisches Modell des Anlagenverhaltens gewonnen werden, um anschließend den MPC-Funktionsbaustein zu parametrieren.

Simulationsergebnisse

In einer idealisierten Simulation, bei der alle äußeren Einflussfaktoren konstant gehalten werden, lässt sich gut nachweisen, dass der MPC das vorgestellte Mehrgrößenproblem direkt regeln kann. In Bild 5 sind dafür gezielte Anregungen der Sollwerte und der Störgröße dargestellt. Nach einem Tag ändert sich der Sollwert der Ammoniumkonzentration, wobei alle Sollwerte willkürlich gewählt

sind. Der MPC reagiert mit einer Veränderung der Sauerstoffkonzentration sowie der Rezykulation, die zu einem schnellen Einregeln der Ammoniumkonzentration führt. Gleichzeitig wird die Nitratkonzentration kaum beeinflusst.

Nach drei Tagen ändert sich der Sollwert der Nitratkonzentration, woraufhin der MPC wieder die Sauerstoffkonzentration und die Rezykulation anpasst. Innerhalb von einem Tag ist die neue Nitratkonzentration stationär erreicht und eine Schwankung der Ammoniumkonzentration ausgeglichen.

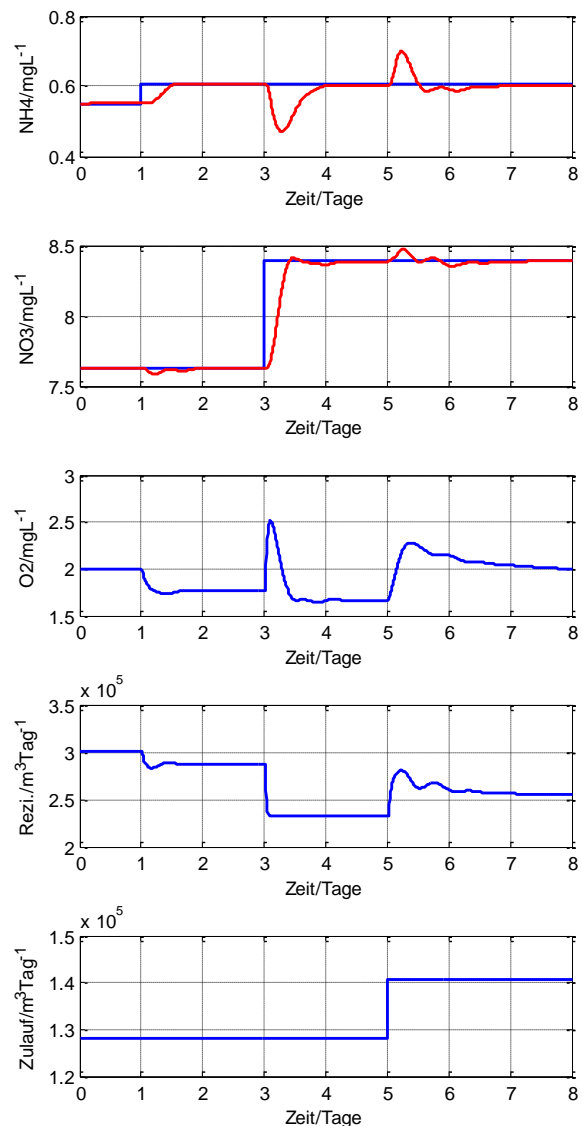


Bild 5: Idealisierte Simulation mit konstanten äußeren Einflussfaktoren. Ammoniumkonzentration (NH₄), Nitratkonzentration (NO₃) im Ablauf des Nachklärbeckens, jeweils blau: Sollwert, rot: Istwert; Sauerstoffkonzentrations-Sollwert in den Nitrifikationsbecken (O₂), Rezykulationsmenge (Rezi) und Zulaufmenge (Zulauf)

Die Änderung der Zulaufmenge erfolgt am fünften Tag. Der MPC nutzt seine Stellgrößen erneut, um die Abwei-

chungen der Ammonium- und Nitrat-Konzentrationen innerhalb von zwei Tagen stationär auszuregeln.

Die Tauglichkeit des MPC zur Regelung der Kläranlage unter realen Umgebungsbedingungen zeigt eine Langzeitsimulation über 240 Tage, die in Bild 6 zusammengefasst ist. Dabei ist der MPC so ausgelegt, dass er nur eingreift, wenn hohe Konzentrationen in den Regelgrößen die gesetzlichen Grenzwerte zu verletzen drohen. In der übrigen Zeit wird ein Sauerstoffsollwert von 1,3 mg/L angestrebt, der unterhalb des konstanten Sollwerts der klassischen Regelung von 1,5 mg/L liegt.

Insgesamt ist gut erkennbar, dass die Ammonium- und Nitrat-Konzentrationen weitgehend ähnlich verlaufen. Auf höhere Konzentrationen reagiert der MPC jedoch aktiv dämpfend, sodass die Maxima der Schadstoffbelastung reduziert werden.

Die besonders niedrige Zulaufmenge im Bereich von Tag 50 führt bei der klassischen Regelung zu einer hohen Nitrat-Konzentration. Hier wird die Wirkung der Störgrößenkompensation per MPC deutlich, der die Nitrat-Konzentration erheblich vermindert.

Da der MPC im Mittel einen kleineren Sauerstoffsollwert im Nitrifikationsbecken einstellt, ergibt sich im betrachteten Zeitraum über 240 Tage eine Energieeinsparung von 5,4 % bei der Belüftung des Nitrifikationsbeckens im Vergleich zur klassischen Regelung.

Ausblick

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass der MPC auch eine große und komplexe Kläranlage zuverlässig regeln kann. Dabei werden nicht nur die Ablaufkonzentrationen verbessert, sondern zusätzlich noch erheblich Energie bei der Belüftung eingespart. Insgesamt ermöglicht der MPC damit eine übersichtliche, transparente und einheitliche Automatisierung der Kläranlage.

Bisher wird nur die Zulaufmenge in das Automatisierungskonzept mittels MPC eingebunden. Da insbesondere die Temperatur einen großen aber identifizierbaren Einfluss auf das Anlagenverhalten besitzt, soll in weiteren Studien untersucht werden, wie die Temperatur in das Regelungskonzept integriert werden kann.

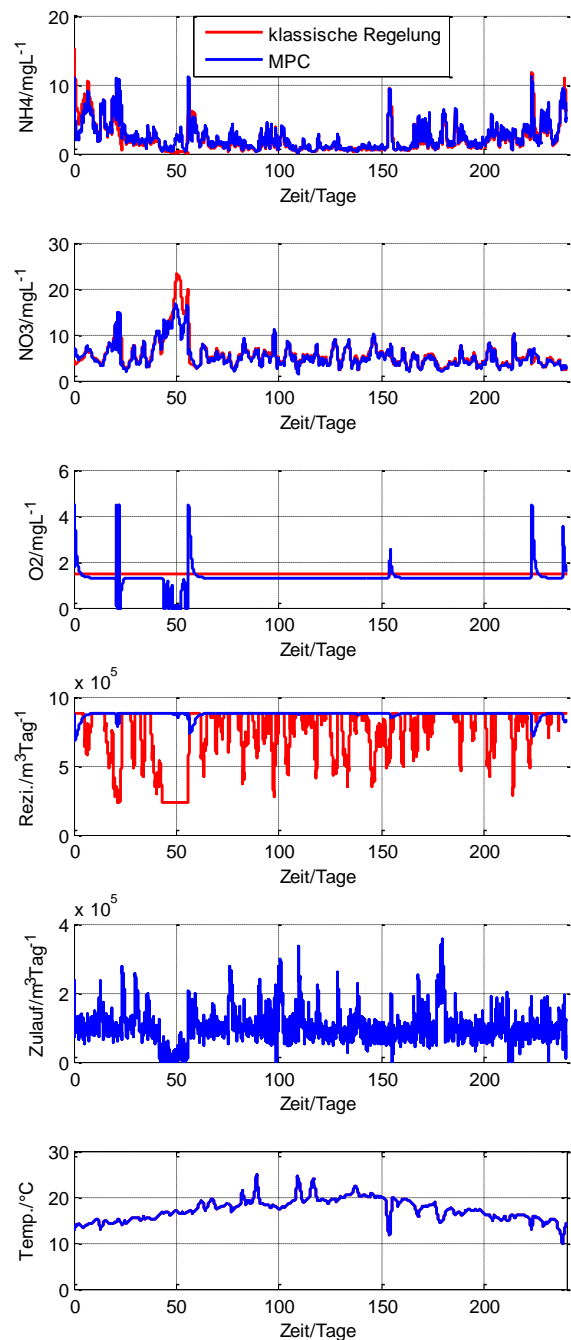


Bild 6: Langzeitsimulation. Jeweils rot: klassische Regelung, blau: MPC; Ammonium-Konzentration (NH₄), Nitrat-Konzentration (NO₃) im Ablauf des Nachklärbeckens, Sauerstoff-Konzentrations-Sollwert in den Nitrifikationsbecken (O₂), Rezirkulationsmenge (Rezi.), Zulaufmenge (Zulauf) und Temperatur (Temp.)

Fazit

Die Simulation zweier Kläranlagen – einer kleinen im intermittierenden Betrieb und einer großen im kontinuierlichen Betrieb – zeigen deutliche Vorteile der Automatisierung mit der Advanced Process Library von SIMATIC PCS 7. So wird nicht nur die Einhaltung von Ablaufgrenzwerten sichergestellt oder sogar verbessert, sondern darüber hinaus Potential für erhebliche Energieeinsparungen aufgedeckt. Zudem erlaubt der MPC-Baustein eine einheitliche und übersichtliche Automatisierungslösung, die ohne Benutzereingriffe auch auf Zulaufschwankungen reagieren kann. Die Implementierung und Parametrierung des MPC gelingt durch die Verwendung von Standard-Funktionsbausteinen und serienmäßigen Inbetriebnahme-Tools sehr einfach.

Damit trägt eine Automatisierung mit SIMATIC PCS 7 wesentlich zur „operational excellence“ [8.] bei und unterstützt den effizienten Betrieb wasser- und abwassertechnischer Anlagen durch leitsystemintegrierte Funktionen für Advanced Process Control.

Siemens AG
Process Industries and Drives
Water and Wastewater
PD PA AE W&W 3
Postfach 4848
90026 Nürnberg

www.siemens.com
All rights reserved. All trademarks used
are owned by Siemens or their respective owners.
© Siemens AG 2015

Literatur

- [1.] Hansen, J.: *Der Einsatz von Fuzzy Control für Regelungsaufgaben im Bereich der Nährstoffelimination in kommunalen Kläranlagen*. Dissertation Uni Kaiserslautern, Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft, 1997.
- [2.] Siemens AG, SIMATIC PCS 7.
www.siemens.com/simatic-pcs7
- [3.] Siemens AG, Sector Industry, Industrial Automation: *White Paper „Wie verbessern Sie die Performance Ihrer Anlage mit Hilfe der passenden Funktionen aus dem SIMATIC PCS 7 APC-Portfolio?“*.
http://www.automation.siemens.com/w2/efiles/pcs7/support/marktstudien/WP_PCS7_APC_DE.pdf, 2008.
- [4.] Siemens AG, Wasser-Bibliothek.
www.siemens.de/wasser/wasserbibliothek
- [5.] Jeppsson, U.: *A general description of the Activated Sludge Model No. 1 (ASM1)*, Lund Institute of Technology, Lund, 1996.
- [6.] Alex, J., L. Benedetti, J. Copp, K. Gernaey, U. Jeppsson, I. Nopens, M.-N. Pons, L. Rieger, C. Rosen, J. Steyer, P. Vanrolleghem und S. Winkler: *Benchmark Simulation Model no. 1 (BSM1)*, Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, 2008.
- [7.] ifak system GmbH, SIMBA, <http://www.ifak-system.com/umwelttechnik/simba/>
- [8.] Siemens AG, Sector Industry, Industrial Automation: *White Paper „Welche Beiträge leistet eine Automatisierung mit SIMATIC PCS 7 zur „Operational Excellence“, zum effizienten Betrieb verfahrenstechnischer Anlagen?“*.
http://w3.siemens.com/mcms/process-control-systems/SiteCollectionDocuments/efiles/pcs7/support/pdf/00/WP_Op-Eff-PCS7_DE.pdf, 2011.
- [9.] Pfeiffer, B.-M., Labisch, D., Grieb, H., Brandstetter, V., Wehrstedt, J.C., Pirsing, A.: *Optimierungspotentiale bei Kläranlagen durch den Einsatz modellbasierter prädiktiver Regelungen*. Automation 2015, Baden-Baden. Tagungs-CD, VDI-Verlag, Düsseldorf.