

Untersuchungen zur optimalen Bewirtschaftung von Kläranlagen mit Hilfe der Modelica- Bibliothek *Waste Water*

T. Ziehn*, G. Reichl*, E. Arnold**, S. Hopfgarten*

*Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Informatik und Automatisierung

Postfach 10 05 65, 98684 Ilmenau, Germany

email: {tilo.ziehn, gerald.reichl, siegbert.hopfgarten}@tu-ilmenau.de

**Fraunhofer-IITB, Anwendungszentrum Systemtechnik, Am Vogelherd 50

98693 Ilmenau, Germany

email: eckhard.arnold@ast.iitb.fraunhofer.de

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird die kostenoptimale Bewirtschaftung von kommunalen Abwasserreinigungsanlagen untersucht. Die Kläranlage (KA) Jena dient dabei als Referenzobjekt. Die Modellierung der Anlage erfolgt mit Hilfe der objektorientierten Sprache *Modelica* und der Bibliothek *WasteWater*. Über die Lösung eines Optimalsteuerungsproblems lassen sich optimale Trajektorien für die steuerbaren Eingangsgrößen bestimmen. Mit Hilfe der Methode der modell-prädiktiven Regelung (MPR) können diese Trajektorien für einen fortlaufenden Betrieb in einen geschlossenen Kreis eingebunden werden. Aufgrund der Komplexität des verwendeten Modells der KA Jena wird die Anwendung der MPR zunächst nur unter Nominalbedingungen betrachtet.

1 Einleitung

Die Abwasserreinigung stellt einen entscheidenden Schritt zur Verbesserung der Umweltbedingungen und insbesondere der Gewässerqualität dar. Durch den steigenden Kostendruck auf die Betreiber von Kläranlagen gewinnt aber auch ein wirtschaftlicher Betrieb immer mehr an Bedeutung. Damit ergibt sich neben der Modellierung und der Simulation von Abwasserreinigungsprozessen auch die Notwendigkeit für die Anwendung von Optimierungsstrategien mit dem Ziel einer kostenoptimalen Bewirtschaftung. Gleichzeitig soll die Belastung für die Umwelt (Vorfluter) durch niedrige Ablaufwerte der KA gering gehalten werden.

Simulationsuntersuchungen haben ergeben, dass die Verwendung optimierter Sollwerttrajektorien als Eingangsgrößen der Regelkreise anstelle konstanter Sollwerte zu erheblichen Einsparungen bei den Betriebskosten führen kann. Ziel dieses Beitrages ist es, mit Hilfe der Methode der modell-prädiktiven Regelung die optimalen Trajektorien für einen fortlaufenden Betrieb in einen geschlossenen Kreis einzubinden.

Die Untersuchungen in [1] haben gezeigt, dass mit Hilfe der Sprache *Modelica* [2] und der Bibliothek *WasteWater* [3] das komplexe Modell der KA Jena implementiert und das dynamische Verhalten sehr gut abgebildet werden kann. Weiterhin konnte auch die Eignung des Modells für Optimierungszwecke herausgestellt werden. Eine wichtige Voraussetzung für die Anwendung der modell-prädiktiven Regelung ist somit gegeben.

2 Modell der KA Jena

Die Kläranlage Jena ist eine moderne Abwasserreinigungsanlage. Sie wurde in den Jahren 1998–2001 umgebaut und auf 145 000 Einwohnerwerte (EW) erweitert. Die KA arbeitet nach dem Belebtschlammverfahren und ist zweistraßig ausgelegt mit kaskadenförmiger Denitrifikation-Nitrifikation, biologischer und chemischer Phosphorelimination und einer Nachklärung. Ein vereinfachtes Flussbild der KA ist in Abbildung 1 dargestellt.

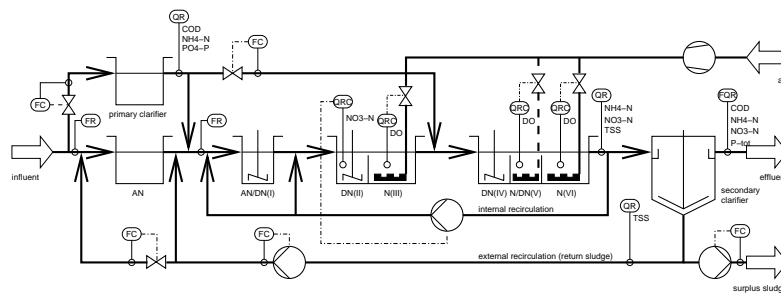


Abbildung 1: Flussbild der KA Jena (145 000 EW)

Das Modell der KA Jena wurde mit Hilfe der Software Dymola [4] in der Sprache *Modelica* hinterlegt. Die frei verfügbare Bibliothek *WasteWater* enthält die wesentlichen Komponenten, die zur Simulation von kommunalen Kläranlagen notwendig sind. Die Bibliothek beruht auf den Belebtschlammmodellen (Activated Sludge Model) ASM No. 1, ASM No. 2d und ASM No. 3 der International Water Association (IWA) [5].

Die Software Dymola generiert aus dem in dieser Arbeit implementierten ASM2d-Modell einen effektiven Simulationscode in Form eines differential-algebraischen Gesamtsystems mit ca. 2 200 Gleichungen und 142 differentiellen Zustandsgrößen. Der automatisch erzeugte C-Code ist gleichzeitig die Grundlage für die Untersuchungen zur optimalen Bewirtschaftung.

3 Modell-prädiktive Regelung

Die modell-prädiktive Regelung gehört mittlerweile zum Stand der Technik und wird weitverbreitet eingesetzt. Der wesentliche Vorteil der MPR gegenüber einfachen Regelungsstrategien liegt in der Einbeziehung nichtlinearer Modelle und in der expliziten Berücksichtigung von Beschränkungen. Allerdings ist der rechentechnische Aufwand viel höher als bei einfachen Reglern und es wird ein genaues Prozessmodell benötigt.

3.1 Konzept der MPR

Der Grundgedanke der MPR lässt sich wie folgt formulieren: Zu jedem Abtastzeitpunkt wird ein Stellsignal, welches Lösung eines Open-loop-Optimalsteuerungsproblems ist, auf den Prozess angewendet. Für die Lösung des Optimalsteuerungsproblems wird ein dynamisches Modell des Prozesses verwendet. Anhand dieses Modells kann auch das zukünftige Prozessverhalten für einen endlichen Zeithorizont (Vorhersagehorizont) prognostiziert werden. Die Rückführung (Closed-loop-Verhalten der MPR) wird in Form einer Zustandsschätzung zu jedem Abtastzeitpunkt realisiert. Damit dienen die aktuellen Prozesszustände als Anfangszustände für die Vorhersage und Optimierung. Die Zustandsschätzung findet auf Grundlage zurückliegender gespeicherter Messwerte statt. Einen prinzipiellen MPR-Algorithmus kann man in den folgenden Schritten zusammenfassen:

1. Setze: $\hat{k} = 0$ (Startzeitpunkt).
2. Bestimme die aktuellen Zustände $\mathbf{x}^{\hat{k}|\hat{k}}$ auf Grundlage zurückliegender Messwerte z.B. mit Hilfe der Zustandsschätzung auf bewegtem Horizont.
3. Bestimme eine Vorhersage für die nicht steuerbaren Eingänge $\mathbf{z}^{k|\hat{k}}$ (Bezeichnung: Eingänge für den Zeitpunkt k berechnet zum Zeitpunkt \hat{k}), $k \in [\hat{k}, \hat{k} + K - 1]$.
4. Berechne das zukünftige Stellsignal $\mathbf{u}^{k|\hat{k}}$, $k \in [\hat{k}, \hat{k} + K - 1]$ durch die Lösung eines Optimalsteuerungsproblems unter Beachtung des Prozessmodells und der Beschränkungen.
5. Gib das Stellsignal $\mathbf{u}^{\hat{k}|\hat{k}}$ auf den Prozess.
6. Verschiebe: $\hat{k} = \hat{k} + 1$ und gehe zurück zu Schritt 2.

3.2 Optimalsteuerungsproblem

Für die Lösung der Optimalsteuerungsaufgaben wurde die Software Omuses (Optimization of multistage systems) [6] verwendet, welche den eigentlichen Optimierer HQP (Huge Quadratic Programming) mit einschließt. Dabei kommt eine Mehrstufen-Steuerungsparametrisierung zum Einsatz, bei der die die Eingangsgrößen beschreibenden Parameter in den Zeitstufen k konstant gehalten werden und die Zustandsdifferentialgleichungen numerisch integriert werden. Im Ergebnis simulativer Untersuchungen wurde ein Zeitintervall von 1h je Stufe festgelegt. Das Zielfunktional und die Beschränkungen werden in den Steuerparametern \mathbf{u}^k und den Anfangszuständen \mathbf{x}^k der Stufen formuliert:

$$J(\mathbf{x}) = F(\mathbf{x}^K) + \sum_{k=0}^K f_0^k(\mathbf{x}^k, \mathbf{u}^k, \mathbf{z}^k)$$

wobei

$$f_0^k(\mathbf{x}^k, \mathbf{u}^k, \mathbf{z}^k) = \rho_e f_{0,e}^k(\mathbf{x}^k, \mathbf{u}^k, \mathbf{z}^k) + \rho_s f_{0,s}^k(\mathbf{x}^k, \mathbf{u}^k, \mathbf{z}^k) + \rho_c f_{0,c}^k(\mathbf{x}^k, \mathbf{u}^k, \mathbf{z}^k) + f_{soft}^k$$

mit $f_{0,e}$ - Kosten für den Elektroenergiebezug in Abhängigkeit vom Energietarif, $f_{0,s}$ - Schlammkosten unter Beachtung der Biogasverwertung, $f_{0,c}$ - Kosten chemische Fällmittel (vernachlässigbar), f_{soft}^k - Strafterm bei Verletzung von verwendeten weichen Beschränkungen und ρ_e, ρ_s, ρ_c - Gewichtungsfaktoren.

Weiterhin müssen bei der Lösung des Optimalsteuerungsproblems verschiedene Beschränkungen der allgemeinen Form

$$\mathbf{c}^k(\mathbf{x}^k, \mathbf{u}^k, \mathbf{z}^k) \leq \mathbf{0}, \quad k \in [0, K - 1]$$

berücksichtigt werden.

Dabei handelt es sich um physikalische Beschränkungen für die steuerbaren Eingangsgrößen \mathbf{u}^k sowie um gesetzliche Grenzwerte für die Ablaufparameter \mathbf{y}^k .

Das betrachtete System der KA Jena wird nicht in einem Arbeitspunkt betrieben, da das Verhalten des Systems maßgeblich durch die Dynamik der nicht steuerbaren Eingangsgrößen \mathbf{z}^k bestimmt wird. Deshalb müssen die ökonomischen Ziele direkt in die Formulierung des Optimalsteuerungsproblems einbezogen werden. Dies bezeichnet man auch als „direct approach“. Es muss beachtet werden, dass es sich bei den ökonomischen Zielen um sogenannte Langzeitziele handelt. Bei der MPR wird aber nur ein kurzer Zeithorizont betrachtet. Daher ist es notwendig zusätzliche Beschränkungen einzuführen, um die Nachhaltigkeit sicher zu stellen. Für den Ablaufparameter Ammonium wurde z.B. aus diesem Grund eine Beschränkung von 1 mg NH_4^+ -N/l eingeführt.

Die Lösungsschritte für das soeben formulierte Problem kann man wie folgt zusammenfassen: Das Differentialgleichungssystem (dynamisches Modell der KA Jena) wird mit den Anfangswerten und der Anfangssteuerung simuliert. Danach muss es eine Entscheidung über die Güte des Zielfunktionalwertes geben. Anschließend wird eine neue Suchrichtung festgelegt und der Parametervektor der Steuerung aktualisiert.

Das hier verwendete Softwarepaket Omuses/HQP benutzt den SQP-Algorithmus (Sequential Quadratic Programming). Dabei wird das Problem in jeder Iteration linear-quadratisch approximiert und man erhält somit eine quadratische Zielfunktion mit nur noch linearen Gleichungs- und Ungleichungsbeschränkungen zur Bestimmung der Suchrichtung.

3.3 Umsetzung der MPR

Bei den hier vorgestellten simulativen Untersuchungen wird von Nominalbedingungen ausgegangen. Dabei sind alle Zustandsgrößen des simulierten Prozesses verfügbar, so dass eine Zustandsschätzung nicht notwendig ist. Für eine spätere Realisierung am Prozess muss eine Zustandsschätzung implementiert werden, die aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit von Online-Messwerten nicht unproblematisch ist. Für ein einfacheres Modell (ASM1) der KA Jena wurde bereits die Zustandsschätzung auf bewegtem Horizont [7] untersucht.

Die Vorhersage der nicht steuerbaren Eingänge \mathbf{z}^k gestaltet sich schwierig, da sie eine hohe Dynamik besitzen und von Umwelteinflüssen (z.B. Niederschlag) sowie von der Zusammensetzung und der Spezifika der Abwassereinleiter im Einzugsgebiet abhängig sind. Deshalb wurden die Untersuchungen in einem Referenzzeitraum mit Hilfe der Online-Messwerte der KA Jena durchgeführt.

4 Ergebnisse

Für die Untersuchungen wurde ein Zeitraum von zehn Tagen mit unterschiedlichen Belastungssituationen auf Grundlage der Online-Messwerte der KA Jena gewählt. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse unter Anwendung der modell-prädiktiven Regelung auf das Modell der KA Jena. Dabei wurden nur die Elektroenergiekosten betrachtet. Für das im Algorithmus der MPR zu lösende Optimalsteuerungsproblem wurden folgende Steuergrößen berücksichtigt: die Steuereingänge der Gebläse für den Luftertrag in die Nitrifikationsbecken, der Steuereingang der Pumpe für die Rezirkulation, der Steuereingang der Pumpe für den Rücklaufschlamm sowie der Steuereingang des Ventils für die Zuflussaufteilung.

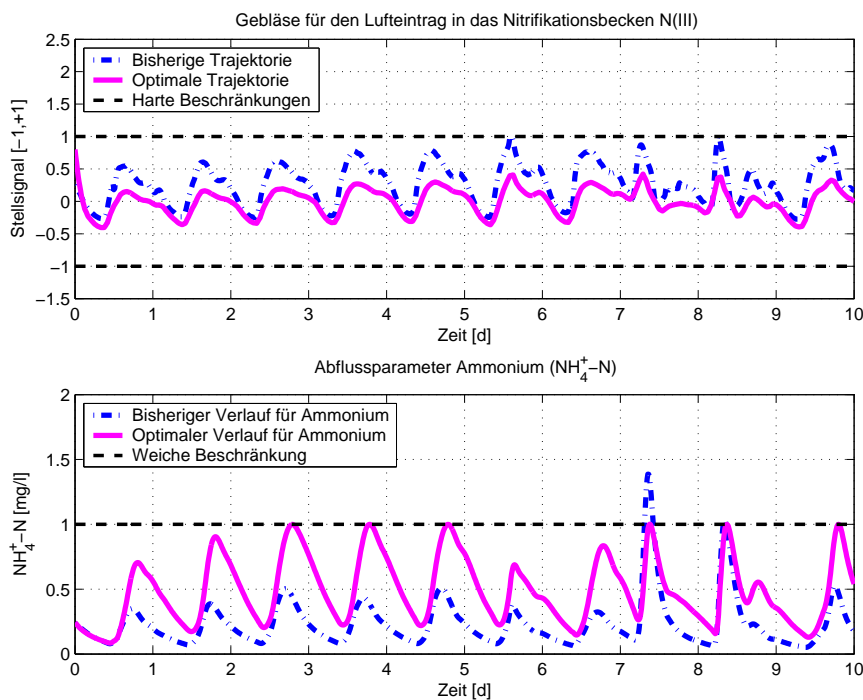


Abbildung 2: Stellsignal für eines der Gebläse und Abflusswerte für Ammonium

Das optimale Stellsignal in Abbildung 2 (beispielhaft dargestellt für eines der drei Gebläse) ist über dem gesamten Untersuchungszeitraum geringer als das herkömmliche Stellsignal unter Verwendung der Standardregler. Damit kann der Luftertrag reduziert werden, was gleichzeitig auch zu einer Einsparung bei den Elektroenergiekosten um mehr als 12 % führt. Die gewählte Beschränkung von $1 \text{ mg NH}_4^+ \text{-N/l}$ für den Ablaufparameter Ammonium wird unter Anwendung der MPR im gesamten Betrachtungszeitraum eingehalten. Mit der herkömmlichen Strategie (Standardregler) ist es nicht möglich, die gewählte Beschränkung für Ammonium einzuhalten, und es kommt zu einer kurzfristigen Überschreitung.

Bezieht man die Schlammkosten ebenfalls mit in die Betrachtungen ein, so ist auch hier ein großes Einsparungspotential aufgrund der Biogasverwertung erreichbar [8].

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde die optimale Bewirtschaftung von Abwasserreinigungsanlagen unter Anwendung der modell-prädiktiven Regelung untersucht. Als Referenzobjekt für die Betrachtungen diente die Kläranlage Jena. In der hier beschriebenen Bearbeitungsstufe wurde die Anwendung der MPR nur unter Nominalbedingungen betrachtet. Für das im Algorithmus der modell-prädiktiven Regelung zu lösende Optimalsteuerungsproblem wurde die Software Omuses/HQP verwendet. Anhand der simulativen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass eine nachhaltige Abwasserreinigung durchaus kostenoptimal erfolgen kann. Gleichzeitig wurde die Belastung für die Umwelt durch niedrige Ablaufwerte gering gehalten. Weiterführende Arbeiten beziehen sowohl die Unsicherheiten in den Lastprognosen als auch den Einfluss einer Zustandsermittlung aus den Online-Messdaten ein.

Literatur

- [1] *G. Reichl, E. Arnold, S. Dietze, S. Hopfgarten und H. Puta*: Optimisation-based Coordinated Operation of Wastewater Systems with Treatment Plant and Sewer. In: 49. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium IWK'04, Band 2, Seiten 17–22, Technische Universität Ilmenau, 2004.
- [2] *Modelica Association*: Modelica - A Unified Object-Oriented Language for Physical Systems Modeling. 2004. <http://www.modelica.org/documents/>.
- [3] *G. Reichl*: WasteWater - a Library for Modeling and Simulation of Wastewater Treatment Plants in Modelica. In: Proceedings of the 3rd International Modelica Conference, Seiten 171–176, 2003.
- [4] *H. Elmquist, D. Brück, S. E. Mattson, H. Olsson und M. Otter*: Dymola - Dynamic Modeling Laboratory. Technische Dokumentation, Dynasim AB, 2002.
- [5] *M. Henze, W. Gujer, T. Mino und M. v. Loosdrecht*: Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. Technischer Bericht, IWA Task Group, 2000.
- [6] *R. Franke und E. Arnold*: The solver Omuses/HQP for structured large-scale constrained optimization: algorithm, implementation, and example application, Sixth SIAM Conference on Optimization, Atlanta, 1999.
- [7] *E. Arnold und S. Dietze*: Nonlinear moving horizon state estimation of an activated sludge model. In: F. G. Filip, I. Dumitrache, and S. S. Iliescu, editors, Large Scale Systems: Theory and Applications. 9th IFAC/IFORS/IMACS/IFIP Symposium, Seiten 554–559, Bucharest, Romania, 2001.
- [8] *T. Ziehn*: Simulative Untersuchungen zur optimalen Bewirtschaftung von Kläranlagen mittels Modellprädiktiver Regelung. Diplomarbeit, Fakultät für Informatik und Automatisierung, Technische Universität Ilmenau, 2005.