

DISS. ETH NO. 25893

Soft-Sensing, Automation, and Diagnosis for Nitrification

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

presented by

CHRISTIAN MARC THÜRLIMANN

MSc ETH in Environmental Engineering

born January 24th 1987

citizen of Häggenschwil (SG) and Wuppenau (TG)

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Eberhard Morgenroth, examiner
Prof. Dr. Bengt Carlsson, co-examiner
Prof. Dr. Kai Udert, co-examiner
Dr. Kris Villez, co-examiner

2019

Abstract

Nitrification of wastewater requires control for the purposes of efficiency and of stability. However, first, the highly complex microbial community in wastewater treatment plants and very different compositions of wastewaters impede a complete understanding of nitrification. Second, the determination of the states of the process is seldom exact because sensors are subject to a high level of wear and tear. Consequently, instrumentation, control, and automation (ICA) of nitrification processes are a challenge. I hypothesize that soft-sensors - based on the signals of robust, physical sensors - and specially designed control loops, which do not need redundant information to correct for drift, can reduce the maintenance needs for the control of nitrification. Consequently, the economical application range for ICA of nitrification processes can be extended.

A large part of this thesis is dedicated to the stabilisation of urine nitrification as a pre-treatment for nutrient recovery. To this end, an online nitrite detection and an according control of the process are required. Furthermore, the thesis comprises an ammonia aeration controller, which is based on pH signals, to be used in municipal wastewater. The four chapters of the thesis focus on the following topics.

The first chapter investigates calibration experiments for in-line UV-Vis sensors. Such sensors can serve as soft-sensors for numerous substances. With differently designed experiments, data for the calibration of UV-Vis based nitrite models in high strength wastewater was recorded. Online experiments executed in-situ allow calibrating similarly exact models like experiments which are conducted by spiking additional nitrite. The good performance of the models being based on online experiments is explained by the correlation of other light-absorbing substances in the process with nitrite.

The second chapter evaluates the potential of a stoichiometry-based soft-sensor for nitrite. The stoichiometry of nitrification theoretically allows distinguishing the ammonia and the nitrite oxidation rates by means of the derivatives of the dissolved oxygen and of the pH signal and in turn detecting nitrite accumulations. We show that under relatively ideal conditions the dynamics in the ratio of the two derivatives show similarities with the dynamics in the nitrite concentration. Factors that deteriorate this information quality are identified.

The third part of this thesis investigates how drifting sensor signals can be used as an input for a feedback controller without relying on redundant information to correct this

drift. The controller shall prevent uncontrolled nitrite accumulation in a urine nitrification system. To this end, the controller does not use the absolute value of the nitrite signal, but its 1st and 2nd derivative as inputs. By controlled accumulation and degradation of nitrite, the controller can keep the derivatives continuously informative. The switch from substrate inhibition to substrate limitation of the nitrite oxidising bacteria can be identified by means of the inflection point in the signal. The developed controller is tested successfully on a lab-scale reactor.

The fourth chapter of this thesis describes an ammonia based aeration controller. These controllers usually require maintenance intensive instrumentation. Therefore a new ammonia soft sensor for continuously operated municipal wastewater treatment plants is developed. It relies on the 1st derivative of a pH difference measured over the aerated zone. This soft sensor is successfully tested in a controller deployed on various municipal wastewater treatment plants. The controller was designed to increase its robustness towards drift in the pH signals.

Zusammenfassung

Für die Nitrifikation von Abwässern ist aus Effizienz- und Stabilitätsgründen eine automatisierte Regelung notwendig. Jedoch erschweren erstens die hohe Komplexität des Nitrifikations-Prozesses und die verschiedensten Abwassertypen das Prozessverständnis. Zweitens ist die Erhebung des Prozesszustands mittels Sensoren wegen deren hohen Verschleiss im Abwasser selten exakt. Folglich ist die Anwendung von Regelungs- und Messtechnik in Nitrifikationsreaktoren erschwert. Die Hypothese dieser Dissertation ist, dass virtuelle Sensoren basierend auf Signalen von robusten physischen Sensoren und speziell ausgelegte Regler, welche keine redundanten Informationen zur Korrektur von Drift in den Signalen benötigen, den Wartungsaufwand für die Messtechnik im Regelkreis reduzieren können. Dies erweitert den ökonomischen Anwendungsbereich von Regelungstechnik.

Der Fokus meiner Dissertation liegt auf der Stabilisierung der Urinnitrifikation als vorbehandelnder Schritt für die Nährstoffrückgewinnung. Zu diesem Zweck wird eine online Detektion des Nitrits benötigt, welche dann als Eingangssignal für einen Regler dient. Des Weiteren wird ein Ammoniumregler für kommunales Abwasser basierend auf pH Signalen präsentiert.

Im ersten Teil der Arbeit werden Kalibrationsexperimente für In-Line UV-Vis Sonden untersucht. Solche Sensoren können als virtuelle Sensoren (Softsensoren) für unzählige Substanzen dienen. Mit verschiedenen Versuchsanordnungen wurden Daten für ein UV-Vis basierendes Nitritmodell in hochbelastetem Abwasser (nitrifizierter Urin) erhoben. Direkt im Prozess durchgeführte Online-Experimente erlauben es ähnlich exakte Modelle zu kalibrieren, wie dies bei Experimenten mit künstlicher Zugabe von Nitrit möglich ist. Die gute Leistung, der auf Online-Experimenten basierenden Modellen kann unter anderem durch die Korrelation von Nitrit mit anderen absorbierenden Substanzen in den Online-Experimenten erklärt werden.

Im zweiten Teil der Arbeit wird das Potential eines stöchiometrischen Softsensors für Nitrit untersucht. Die Stöchiometrie der Nitrifikation erlaubt es theoretisch mittels Ableitungen des Sauerstoffkonzentrations-Signals und des pH-Signals die Ammonium- und die Nitritoxidationsraten zu trennen und somit Nitrit zu detektieren. Wir zeigen, dass unter einer relativ idealen Versuchsanordnungen die Dynamik des Verhältnisses der beiden Ableitungen Ähnlichkeit mit der Nitritkonzentrations-Dynamik aufweist. Faktoren welche die Informationsqualität verringern, werden identifiziert.

Der dritte Teil der Arbeit untersucht wie man driftende Signale als Eingangssignal für Regler verwenden kann, ohne redundante Informationen für dessen Korrektur zu verwenden. Der Regler soll unkontrollierte Nitritakkumulationen in der Urinnitrifikation verhindern. Der Regler nutzt statt des absoluten Werts des Nitritsignals als Eingangssignal dessen 1. und 2. Ableitungen. Durch die gezielte Akkumulation und den Abbau von Nitrit durch den Regler bleiben die Ableitungen des Signals informativ. Der Übergang der nitritoxidierenden Bakterien von Substrathemmung zu Substratlimitierung kann auf Grund von Wendepunkten im Signal identifiziert werden. Der Regler wurde erfolgreich auf einem Laborreaktor getestet.

Das vierte Kapitel der Arbeit beschreibt einen Ammoniumregler, welcher die Belüftungsintensität anhand der Ammoniumkonzentration optimiert. Solche Regler benötigen normalerweise wartungsintensive Sensoren. Deshalb wird ein neuer virtueller Ammoniumsensor für kontinuierlich bewirtschaftete Reaktoren entwickelt. Der Regler basiert auf der 1. Ableitung einer pH-Differenz, welche in der belüfteten Zone gemessen wird. Der Regler ist so konzipiert, dass er Drift in den pH-Signalen toleriert. Er ist auf mehreren kommunalen Kläranlagen erfolgreich getestet.