

## Modellierung des Energieverbrauchs für Belüftungssysteme auf Kläranlagen mittels Künstlicher Neuronaler Netze

Auf Kläranlagen wird ein großer Anteil der eingesetzten Energie für das Belüftungssystem in der biologischen Behandlungsstufe eingesetzt. Die Modellierung des Energieeinsatzes bietet die Möglichkeit, vertiefte Kenntnisse über die komplexen Mechanismen bei der Belüftung zu gewinnen. Ansätze hierzu sind z. B. in den rigorosen Modellen der ASM-Familie zu finden. Alternativ können auch Künstliche Neuronale Netze als datengetriebener Modellansatz eingesetzt werden.

Künstliche Neuronale Netze unterscheiden sich von rigorosen Modellen dadurch, dass die den betrachteten Mechanismen zu Grunde liegenden Gesetzmäßigkeiten nicht vorab in Form von mathematischen Gleichungen formuliert werden müssen. Bei der Modellierung mit Künstlichen Neuronalen Netzen werden diese Gesetzmäßigkeiten durch Verwendung von im Anlagenbetrieb gewonnenen Messergebnissen erlernt. Künstliche Neuronale Netze sind dabei auf Grund ihrer Eigenschaften insbesondere dazu geeignet, mehrdimensionale und nichtlineare Prozesse abzubilden. Durch Verwendung geeigneter Software ist es anschließend möglich, die neuronalen Modelle zu analysieren.

Im Rahmen der Dissertation wurden mit Daten dreier Kläranlagen (Hauptkläranlage Münster, Kläranlage Düsseldorf-Nord, Großklärwerk Köln-Stammheim) neuronale Modelle erstellt und analysiert. Dazu wurde zunächst eine Methodik zur Datenvorverarbeitung der im großtechnischen Betrieb gewonnenen Messdaten erarbeitet. Die Datenvorverarbeitung umfasst zunächst die Auswahl der Modellgrenzen. Für die Hauptkläranlage Münster und die Kläranlage Düsseldorf-Nord ist dies jeweils die komplette biologische Behandlungsstufe; bei dem Großklärwerk Köln-Stammheim blieb die Hochlastbelegung unberücksichtigt. Anschließend wurden die Messstellen festgelegt, die in der Modellierung zu berücksichtigen sind. Hier ist u. a. der Energieverbrauch für das Belüftungssystem, chemische und physikalische Parameter sowie Schlammparameter in die Modellierung eingegangen. Die Auswahl der Betriebszustände erfolgte an Hand verschiedener Testmodelle. Es hat sich gezeigt, dass eine ausschließliche Modellierung mit Daten von Trockenwettertage sinnvoll ist. Über Verweilzeitmodelle wurde Daten von Zu- und Ablauf der betrachteten Becken im nächsten Schritt zeitlich entzerrt und kausal einander zugeordnet. Anschließend wurde nicht plausible und fehlerhafte Datensätze eliminiert. Die Daten wurden zu Tagessummen und -medianen verdichtet und Kennzahlen gebildet. Die Zielkennzahl der unterschiedlichen Modelle war jeweils der auf die CSB-, TOC- oder  $\text{NH}_4\text{-H}$ -Zulaufkonzentration bezogene Energieverbrauch (spezifischer Energieverbrauch).

Die Validierung der neuronalen Modelle erfolgte an Hand statistischer Größen, die den Zusammenhang zwischen Eingangsdaten und Prognosen der neuronalen Modelle beschreiben. Maßgeblich waren hier die minimale, mittlere und maximale Abweichung sowie der Korrelationskoeffizient von Messdaten und Vorhersagen. Zur Modellanalyse wurde nur Modelle herangezogen, die eine mittlere Abweichung kleiner 10% und einen Korrelationskoeffizienten größer 0,8 aufwiesen. Die Validierung der Ergebnisse der Analysen der neuronalen Modelle erfolgte durch die Erstellung von Modellen einer Anlage mit voneinander unabhängigen Daten aus unterschiedlichen Zeiträumen, den Vergleich von unterschiedlichen Anlagengruppen einer Anlage, den Vergleich der Ergebnisse der drei untersuchten Anlagen und die Erstellung von Modellen mit unterschiedlichen Kennzahlen (z. B. durch Ersetzen des Energieverbrauchs durch das Luftvolumen). Die Ergebnisse

wurden dann auf Basis der abwassertechnischen Grundlagen und den herrschenden Randbedingungen auf der jeweiligen Anlage auf Plausibilität geprüft.

Die Modellierungsergebnisse wurden in Sensitivitäts- sowie Kausalitätsdiagrammen dargestellt. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag hier auf der Untersuchung des Einflusses der Parameter Schlammbelastung, Trockensubstanzkonzentration, Temperatur, Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnis und Ammoniumkonzentration im biologischen Reaktor auf den spezifischen Energieverbrauch.

Die Analysen zeigen, dass die Temperatur in der Summe einen geringen Einfluss auf den spezifischen Energieverbrauch ausübt. Grund hierfür ist, dass sich verschiedene Effekte beim Sauerstoffzufuhr, -verbrauch und -löslichkeit gegenseitig aufheben. Die Ammoniumkonzentration im Reaktor zeigt nur für die Hauptkläranlage Münster einen größeren Einfluss auf den spezifischen Energieverbrauch. Dies ist dadurch zu erklären, dass hier die Ammoniumkonzentration gleichzeitig Mess- und Regelgröße ist, wodurch eine Anhebung des Konzentrationsniveaus unmittelbar entsprechend der Michaelis-Menten-Kinetik zu einer Verringerung des spezifischen Energieverbrauchs führt. Das Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnis beeinflusst die Berechnung des spezifischen Energieverbrauchs in Abhängigkeit über die Definition der Kennzahl, was sich in den Modellen widerspiegelt. Für alle Anlagen ist zu beobachten, dass der spezifische Energieverbrauch mit steigenden Trockensubstanzkonzentrationen sinkt. Ein Erklärungsansatz hierzu ist, dass mit steigender Trockensubstanzkonzentration das Schlammalter steigt und so vermehrt oberflächenaktive Substanzen abgebaut werden. Dadurch sind positive Effekte auf den spezifischen Energieverbrauch zu erwarten. Gleichzeitig führen steigende Schlammbelastungen zu sinkendem spezifischen Energieverbrauch. Dieses Ergebnis kann durch die Berechnung des Sauerstoffverbrauchs als Funktion der Schlammbelastung bestätigt werden.

Aus den Ergebnissen wurden Betriebshinweise für die jeweiligen Kläranlagen abgeleitet. Für die Hauptkläranlage Münster empfiehlt es sich in einem ersten Schritt, die Schlammbelastung mit Hilfe eine CSB- oder TOC-Messung online zu ermitteln. Bei der KA Düsseldorf-Nord kann eine gezielte Bewirtschaftung von Tagesausgleichsbecken und Mischwasserbecken zu einer energetischen Optimierung führen. Für das Großklärwerk Köln-Stammheim bietet sich die Optimierung der Hochlastbelebung an, um so positive Effekte auf den spezifischen Energieverbrauch in der Schwachlastbelebung zu erzielen. Insgesamt sind durch die Implementierung eines Frachtmanagements positive Effekte auf den Energieverbrauch auf Kläranlagen zu erwarten.

Die Dissertation wurde von Ulrich Robecke unter der Betreuung von Prof. Dr.-Ing. Peter Cornel an der Technischen Universität Darmstadt im Institut IWAR im Fachgebiet Abwassertechnik erstellt.

Die Dissertation ist zu beziehen über die Technische Universität Darmstadt, Institut IWAR, Franziska-Braun-Straße 7, D-64287 Darmstadt, E-Mail: [raumplanung@iwar.tu-darmstadt.de](mailto:raumplanung@iwar.tu-darmstadt.de), Telefon: +49 (0)6151/163648, Fax: +49 (0)6151/163739