

Messtechnische Charakterisierung einer halbtechnischen Brauchwasserbereitungsanlage zur Etablierung einer adaptiven Prozessführung

Analytical characterization of a pilot scale service water production plant for the implementation of an adaptive process control strategy

Laura Fröba, Marisela Vega, Frauke Groß, Antonio Delgado

Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Cauerstraße 4, D-91058 Erlangen;

Brauchwasser, häusliches Abwasser, anaerober Abbau, dezentral, Prozessautomatisierung
service water, domestic wastewater, anaerobic degradation, decentral, process automation

Zusammenfassung

Im Fokus der vorgestellten Forschungsarbeiten stehen die messtechnische Charakterisierung und Automatisierung einer anaeroben Anlage zur Aufbereitung häuslichen Abwassers zu Brauchwasser. Zusätzlich zum klassischen Organikabbau umfasst die Prozessierung eine auf dem Anammox-Prozess basierende Stufe zur Eliminierung von Stickstoffkomponenten, sowie eine Nachklärungsstufe. Erst die aus Sandfilter und Aktivkohlesäulen bestehende Nachklärungsstufe ermöglicht eine Aufbereitung des Abwassers auf Brauchwasserqualität. Dieses Brauchwasser kann im Sinne der nachhaltigen Kreislaufführung in Haushalten beispielsweise zur Gartenbewässerung oder als Toilettenspülwasser genutzt werden. Die Gewährleistung eines funktionierenden aber insbesondere auch effizienten Prozessablaufes stellt die Herausforderung des Systems dar. Die Komplexität resultiert aus den nichtlinearen und multifunktionalen zeitvarianten Zusammenhängen, die sich zum einen durch den Einsatz von Mikroorganismen und zum anderen der wechselseitigen Abhängigkeit verschiedenster Parameter ergeben. Neben den klassischen Betriebsparametern, Betriebstemperatur und pH-Wert, sowie der Zusammensetzung und Konzentration der Eingangs- und Ausgangsstoffe, ist die Leitfähigkeit ein online leicht zugänglicher Parameter zur Beobachtung des Prozessfortschritts.

Um ein hohes Maß sowohl an Stabilität als auch Flexibilität der Prozessierung zu gewährleisten, verknüpft die hier vorgestellte Automatisierungsstrategie modellbasierte Ansätze mit klassischer Basisautomatisierung. So wird übergeordnet ein wissensbasiertes Expertensystem zur Zustandserkennung entscheidender Prozessgrößen implementiert und mit einem Fernwartungssystem gekoppelt.

Einleitung

Die ansteigende Weltbevölkerung und der demographische Wandel mit anwachsender Ungleichmäßigkeit der räumlichen Bevölkerungsdichten erfordern angepasste Infrastrukturen. Vor dem Hintergrund der weltweit zunehmenden Wasserknappheit ist in diesem Zusammenhang insbesondere ein nachhaltiges Wasser- und Abwassermanagement von zentraler Bedeutung. So ist Abwasser weniger als Abfallprodukt, sondern vielmehr als Ressource anzusehen, aus der Energie und Wertstoffe rückgewonnen werden können

(Suriyachan, et al., 2012; Verstraete, et al., 2009; Batstone, 2015). Die Nutzung von wiederaufbereitetem Abwasser in Form von Brauchwasser ermöglicht dabei das Einsparen von Trinkwasser. So können in Haushalten durch den Einsatz von Brauchwasser in Toilettenspülungen, Wasch- und Reinigungsvorgängen bis zu 60 % Frischwasser ersetzt werden (Herbst, 2008). Ein nachhaltiges Abwassermanagement erfordert folglich den Einsatz dezentraler Aufbereitungsanlagen, die zum einen mittels flexibler Prozessführung das Abwasser individuell entsprechend seiner Herkunft (z.B. Haushalte, Altenheime, Krankenhäuser) aufbereiten und zum anderen die Wiederverwendung von Wertstoffen ermöglichen. Eine wesentliche Anforderung der dezentralen Fahrweise ist dabei, neben platzeffizienter und geruchsneutraler Anlagengestaltung, eine möglichst einfache Bedienbarkeit der Anlage, damit sie von einfach geschultem Personal betrieben werden kann und somit auch gesellschaftlich Akzeptanz findet (Massoud, et al., 2009; Herbst, 2008). Dies setzt wiederum eine automatisierte Prozessgestaltung mit der Möglichkeit der Fernwartung voraus.

Die Anaerobtechnik bietet durch den Einsatz geschlossener Reaktoren die Vorteile einer geruchsneutralen und platzeffizienten Bauweise, sowie einer im Vergleich zu aeroben Prozessen verringerten Menge an anfallendem Überschussschlamm. Ein weiterer Vorteil hierbei ist der Wegfall der energieintensiven Belüftung. Der anaerobe Organikabbau erlaubt außerdem durch die Wiederverwertung des entstehenden Biogases eine zusätzliche Energierückgewinnung (Aiyuk, et al., 2004; Foresti, et al., 2006; Frijins, et al., 2013; Batstone, 2015; Mei, et al., 2016). Nachdem im häuslichen Abwasser eine hohe Ammoniumkonzentration durch den Harnstoff im Urin vorliegt, ist eine weitere Aufbereitungsstufe notwendig. Die Anaerobe Ammoniumoxidation (Anammox) stellt in diesem Zusammenhang eine innovative Möglichkeit dar, Ammonium anaerob mittels Nitrit zu elementarem Stickstoff zu oxidieren. Ein Vorteil gegenüber herkömmlichen Stickstoffeliminierungsverfahren ist, dass der Anammox-Prozess keiner zusätzlichen Kohlenstoffquellen bedarf (Strous, et al., 1998; Ali, et al., 2015; Ma, et al., 2016).

Nachdem die Anaerobtechnik bislang überwiegend für mit Organik hoch belastete Abwässer eingesetzt wird, ist die Umstellung auf niedrige Organikkonzentrationen wie sie in häuslichem Abwasser zu finden sind eine Herausforderung. Mithilfe geeigneter Prozessregelung und Automatisierung kann jedoch ein stabiler und kosteneffizienter Anlagenbetrieb realisiert werden. So können mittels gezielter messdatenbasierter Charakterisierung und mathematischer Modellierung adaptive Prozessführungsstrategien entwickelt werden (Vega de Lille, 2015).

Erweiterung des dreistufigen anaeroben Anlagenkonzepts zur dezentralen Brauchwasserbereitung

Im Gegensatz zu dem Begriff „Trinkwasser“, ist „Brauchwasser“ nicht eindeutig definiert. Im Rahmen der hier vorgestellten Projektarbeiten entspricht das aufbereitete Brauchwasser den Anforderungen der Abwasserverordnung (deutsches Recht), sowie der Bayerischen Badegewässerverordnung und soll sowohl olfaktorisch als auch ästhetisch ansprechend sein. Die erlaubten Maximalkonzentrationen von Ammonium, Gesamtstickstoff (*total nitrogen*, TN) und Phosphor betragen dabei 10 mg/l, 13 mg/l und 1 mg/l. Die organische Belastung ist durch einen chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) von 75 mg/l und einen biologischen Sauerstoffbedarf (BSB₅) von 15 mg/l begrenzt. Als Indikatorkeime für die Verunreinigung des Wassers durch Fäkalien dienen E. coli und Enterokokken, welche maximal in Konzentrationen von 900 KBE (koloniebildende Einheiten)/100 ml und 330 KBE/100 ml im Wasser vorkommen dürfen (BayBadeGewV 1993; Horn et al. 2009).

Die hier vorgestellte dezentrale Brauchwasserbereitungsanlage wurde im halbtechnischen Maßstab mit einer Kapazität von 730 m³/a (Einwohnerwert 20) ausgelegt. Im Sinne der flexiblen und modularen Gestaltung wurde die Pilotanlage in zwei zu einer Raumzelle verbundenen Bürocontainern aufgestellt. Mit einer Fläche von 28 m² wurde die Anlage so konzipiert, dass beispielsweise eine Aufstellung in Kellern von Wohnhäusern möglich ist (s. Abbildung 1)



Abbildung 1: Dezentrale Brauchwasserbereitungsanlage im halbtechnischen Maßstab. Die Aufstellung erfolgte auf dem Gelände der kommunalen Kläranlage in Erlangen (Bayreutherstraße 105, 91054 Erlangen)

Um der Zielsetzung Brauchwasser aus häuslichem Abwasser zu gewinnen gerecht zu werden, wurde der dreistufige biologische Abbau (Fröba, et al., 2014) mit einer aus zwei Langsamsandfiltern und einem Aktivkohleabsorbermodul bestehenden Nachklärung erweitert. Diese dient insbesondere der Entfernung von residualen Bakterien, Schwebstoffen, sowie Farbpigmenten und Hormonen.

Die dem Prozess zugrunde liegenden mesophilen Mikroorganismen weisen ein Temperaturoptimum im Bereich zwischen 30 C und 40 C auf. Folglich wird das bereits mechanisch vorgeklärte Abwasser zunächst in einem Vorlagebehälter aufgeheizt. In den zwei nachfolgenden Stufen (Reaktor 1 und 2) wird anschließend die Organik und in Reaktor 3 die Stickstoffkomponenten reduziert. Damit die in Suspension gehaltenen Mikroorganismen in den als diskontinuierliche Rührkessel ausgelegten Reaktoren 1 und 3 zurückgehalten werden, wird vor dem Weitertransport des behandelten Abwassers in die nächsten Prozessstufen eine Sedimentationszeit von ca. 20 Min eingehalten. Nach der biologischen Aufbereitung gelangt das qualitativ noch minderwertige Brauchwasser in den Zwischenbehälter für die Nachklärung. Die beiden Langsamsandfilter sind offene zylindrische Stahlbehälter mit einer Höhe von 1700 mm und einem Durchmesser von 800 mm. Unterhalb einer 800 mm hohen Filterschicht, die aus Quarzsand mit einer Körnung von 0 mm bis 2 mm besteht, folgt eine 150 mm hohe Stüttschicht aus Kies mit einer Körnung von 2 mm bis 8 mm. Die unterste Schicht der Langsamsandfilter bildet eine 50 mm hohe Drainageschicht (Kieskörnung 8 - 16 mm). Das Aktivkohleabsorbermodul besteht aus zwei PVC-Röhren mit je 1850 mm Höhe und 75 mm Durchmesser. Als Füllmaterial wird granuläre Aktivkohle der Firma Donau Carbon GmbH eingesetzt. Um eine unabhängige Inbetriebnahme der Nachklärungseinheiten realisieren zu können, wurde ein den Sandfiltern baugleicher Zwischenbehälter eingebaut. Über zwei parallel geschaltete Langsamsandfilter wird das Wasser drucklos gefiltert und so von Mikroorganismen, Schwebstoffen und Phosphat befreit. In der letzten Prozessstufe, den Aktivkohleabsorbersäulen wird das Brauchwasser qualitativ weiter aufgewertet, indem verbliebene Farbpigmente, Geruchsstoffe, sowie mögliche verbliebene Rückstände von Organik, Phosphat und Bakterien weiter reduziert werden.

Zur Veranschaulichung ist das Verfahrensfliessbild der Anlage in Abbildung 2 dargestellt.

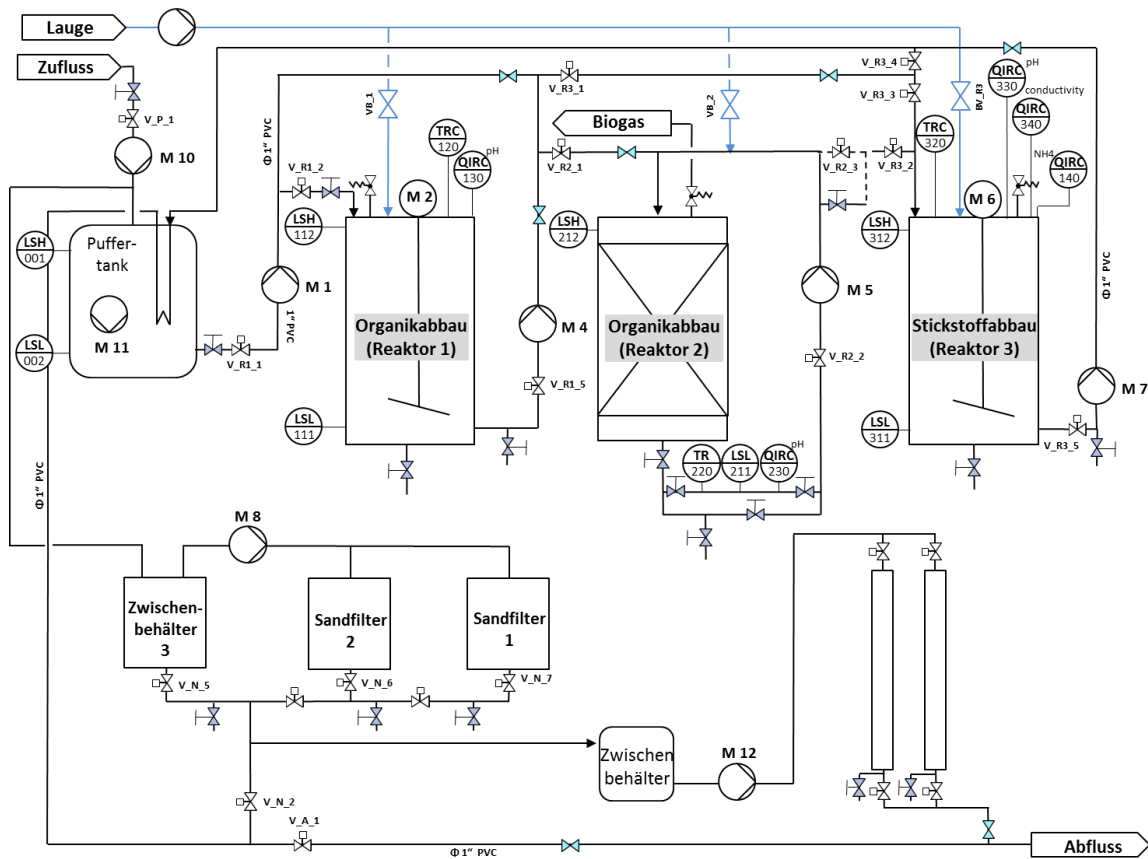


Abbildung 2: RI- Fließbild der anaeroben Brauchwasserbereitungsanlage im halbtechnischen Maßstab inklusive der Einbringung von Messstellen und Aktoren zur Regelung und Automatisierung

Automatisierungskonzept

Das vorgestellte Steuerungs- und Regelungskonzept der dezentralen Abwasseranlage sieht eine Gestaltung in drei Hierarchieebenen vor, wobei wie üblich die übergeordneten Ebenen Anweisungen an die untergeordneten Ebenen geben, welche wiederum ihrerseits Rückmeldung über ihren Ist-Zustand an die übergeordneten Ebenen geben. Im Einzelnen ist in der untersten Ebene die Basisautomatisierung implementiert, in welcher die Regelung der pH-Werte und der Temperatur, sowie die Ansteuerung von Pumpen, Ventilen etc. hinterlegt ist. Auf der Ebene der Ablaufsteuerung werden Prozessabläufe in Form von Schrittketten umgesetzt. Aufgrund der Tatsache, dass die finale Abwasseranlage auch von unerfahrenem Personal betrieben werden soll, ist eines der Hauptziele die Implementierung von geeigneten Prozessführungsstrategien in das vorhandene Automatisierungssystem. So soll als übergeordnete Ebene ein hybrides Fuzzy-Neuro-Expertensystem eingesetzt werden, welches aufgrund der Komplexität des anaeroben Abbauprozesses von essentieller Bedeutung für einen funktionierenden aber insbesondere auch effizienten Prozessablauf ist (s. Abbildung 3).

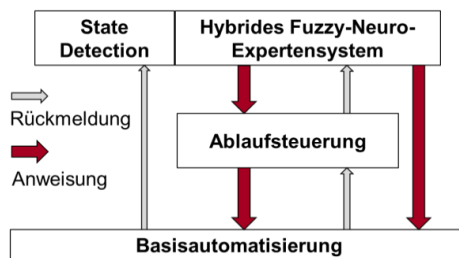


Abbildung 3: Steuerungs- und Regelungskonzept der dezentralen Brauchwasserbereitungsanlage

Fuzzy-Systeme arbeiten auf Basis linguistisch codierter Regelzusammenhänge. Dabei wird mit Hilfe der rückgemeldeten Daten aus der Basisautomatisierung eine Statusdetektion, als *State Detection* bezeichnet, durchgeführt. Anhand vordefinierter Anlagenzustände die auf Erfahrungswerten basieren, erkennt das Fuzzy-System bei der Datenauswertung die aktuellen Anlagenzustände. Anschließend erfolgt die regelungstechnische Bearbeitung und Ausgabe von Anweisungen an untergeordnete Ebenen. Fuzzy Logik stellt hinsichtlich Adaptivität und der Lernfähigkeit eine statische Methode der Prozessführung dar. Aus diesem Grunde soll eine weitere Komponente für eine flexible Anpassung an Randbedingungen sorgen und zudem innerhalb gewisser Grenze das aktive „Mitlernen“ der Prozessführung ermöglichen. Hierzu eignen sich künstliche neuronale Netze auf hervorragende Weise. Diese können über Optimierungsalgorithmen eine Anpassung der Anlagensteuerung vornehmen und das Expertenwissen der Fuzzy-Ebene adaptiv erweitern. Im Betriebsalltag bedeutet dies beispielsweise eine Adaption an Sommer- bzw. Winterbedingungen, unterschiedliche Abwasserzusammensetzungen im Laufe des Jahres oder Veränderungen in den Biozönosen.

Neben einem stabilen Prozessbetrieb ist für die dezentrale Aufstellung auch eine einfache Bedienbarkeit der Anlage sicherzustellen. Die Minimierung von wartungsintensiven Sensoren und Aktoren, sowie eine dem Anwender leicht verständliche Visualisierung der Anlage auf Basis von Prozessbildern ist von entscheidender Bedeutung. Mithilfe der von Han et al. (2007) vorgestellten Richtlinien zur Gestaltung von graphischen Benutzerschnittstellen wurde im Rahmen der Forschungsarbeit eine benutzerfreundliche Bedienoberfläche entwickelt. In Abbildung 4 ist exemplarisch für die erarbeitete graphische Benutzeroberfläche das übergeordnete Prozessbild der Gesamtanlage zur dezentralen Brauchwasserbehandlung dargestellt.

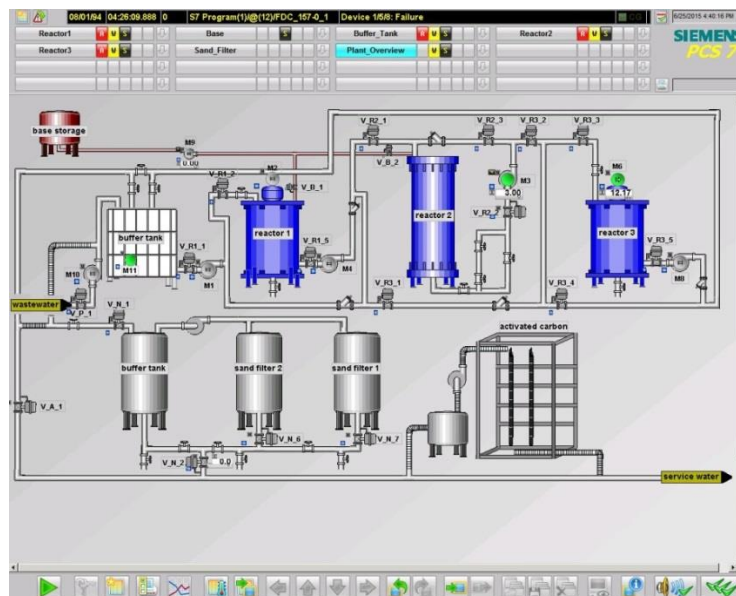


Abbildung 4: Graphische Benutzeroberfläche des Gesamtprozesses der Pilotanlage des Lehrstuhls für Strömungsmechanik zur dezentralen Brauchwasserbehandlung.

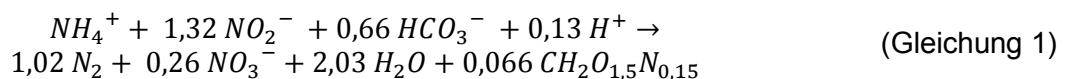
Messtechnische Charakterisierung zur Etablierung einer adaptiven Prozessführung

Zur Etablierung der adaptiven Prozessführung mittels Fuzzy-Neuro-Expertensystem ist die messtechnische Charakterisierung des Prozesses essentiell. Für eine dezentrale Aufstellung ist außerdem neben der Aufrechterhaltung der Prozessstabilität insbesondere auch eine kosteneffiziente Anlagengestaltung von Bedeutung. Als Konsequenz wurde bei der vorliegenden Brauchwasserbereitungsanlage die Anzahl an Sensoren minimiert und bei der Auswahl auf einfache Zugänglichkeit und Robustheit geachtet. So werden Temperatur und pH-Wert in allen drei Reaktoren online erfasst. Als charakteristische Messgröße für den

Anammox-Prozess wird zusätzlich die Leitfähigkeit im Reaktor 3 gemessen. Häufig werden in der Abwasseraufbereitung kostenintensive Sensorsysteme zur online Erfassung der Qualitätsparameter chemischer Sauerstoffbedarf sowie Ammonium-, Gesamtstickstoff- und Phosphorkonzentration verwendet, die bei einer dezentralen Aufbereitung wirtschaftlich unrentabel sind. Da das vorliegende Anlagenkonzept für die Aufstellung in größeren Häuserblocks und kleineren Wohnsiedlungen ausgelegt ist, muss der Aufwand der zeitintensiven offline Messungen für Qualitätsparameter minimal gehalten werden.

So wurden im Rahmen von Vorarbeiten von Vega de Lille (2015) bereits erste übergeordnete Regelungsverfahren entwickelt, die Expertenwissen aus dem Prozess mit mathematischen Modellen zur Berechnung des zweistufigen anaeroben Abbaus und zur Schätzung des Stickstoffgehalts verknüpfen. Ersteres wurde mithilfe des *Anaerobic Digestion Model Nr 1*, einem auf Differentialgleichungen basierenden Modell, realisiert. So kann ausgehend von einmaligen Konzentrationsmessungen des CSB, Gesamtstickstoffs und anorganischen Kohlenstoffgehalts zu Beginn einer jeden Charge, der Fortschritt des Organikabbaus berechnet werden. Im Sinne der einfachen Bedienbarkeit wurde darauf aufbauend eine allein lauffähige Anwendung (*standalone-application*) für die Abschätzung des Organikabbaus entwickelt, die eine direkte Implementierung in einer großtechnischen Anlage ohne zusätzliche Software ermöglicht. Mithilfe künstlicher neuronaler Netze entwickelte Vega de Lille (2015) ebenfalls einen Ammoniumschätzer für den Anammox-Reaktor der die Korrelation zwischen fortschreitendem Ammoniumabbau und dem damit verbundenen Anstieg des pH-Werts aufgreift (Wesoly, 2009; Vega de Lille, 2015).

Ein weiterer einfach zugänglicher Parameter mit dessen Hilfe der Fortschritt des Ammoniumabbaus im Anammox-Reaktor bestimmt werden kann ist die Leitfähigkeit. Aufgrund der Oxidation der Ammoniumionen (NH_4^+) mithilfe von Nitriten fällt der Leitfähigkeitswert während des Ammoniumabbaus ab. Die genaue Reaktionsgleichung wurde durch Van De Graaf et al. (1996) aufgestellt (s. Gleichung 1).



In Abbildung 5 ist ein exemplarischer Verlauf der Ammonium-Stickstoffkonzentration ($\text{NH}_4\text{-N}$) und der Leitfähigkeitswerte eines *Batches* über eine Reaktionszeit von 6 h in der Anammox-Stufe der dezentralen Brauchwasserbereitungsanlage aufgezeigt. Durchschnittlich fällt der Leitfähigkeitswert während der Ammoniumabbauphase um $55 \mu\text{S} / \text{cm}^*\text{h}$. Sobald der Abbauprozess aufgrund von Substratlimitierung durch Mangel an Nitrit zum Erliegen kommt, sinkt der Leitfähigkeitswert auf durchschnittlichen $3,74 \mu\text{S} / \text{cm}^*\text{h}$ nur noch schwach ab.

Wesoly (2009) leitete eine lineare Korrelation zwischen der Leitfähigkeitsabnahme y in $\mu\text{S} / \text{cm}$ und dem Gesamtstickstoffabbau x in mg / l mit einem Faktor von 3,3 und einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,962$ her (s. Gleichung 2). Der Stickstoffabbau wurde dabei als Summe aus dem Ammonium- und Nitritabbau definiert.

$$y = 3,3x + 25 \quad (\text{Gleichung 2})$$

Im Falle der hier vorgestellten dezentralen Brauchwasserbereitungsanlage wurde für den linearen Zusammenhang ein Korrelationsfaktor von 4,14 mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,950 ermittelt (s. Abbildung 6). So lässt sich ohne eine kostenintensive online Ammoniummessung der Fortschritt und die Qualität des Stickstoffabbaus anhand der Änderung der Leitfähigkeit bestimmen.

Weiterhin hat die Leitfähigkeit das Potential Anlagenstörungen, darunter Strom- und Rührwerksausfälle eindeutig identifizieren zu können. Bei Stromausfällen tritt ein Sprung im

zeitlichen Verlauf der Leitfähigkeit auf, der eine weitere Fehleranalyse durch Detektion von Zeitpunkt und Dauer des Vorfalls zulässt (s. Abbildung 7 (A)). Im Falle eines Rührwerksausfalls erfolgt nach einem langsamen Anstieg ein intervallweiser sprunghafter Abfall der Leitfähigkeit (s. Abbildung 7 (B)). Im betrachteten Reaktor ist die Sonde in der Sedimentationszone der Bakterien installiert, damit sie kontinuierlich mit Flüssigkeit benetzt ist. Durch einen Rührwerksausfall setzen sich die Mikroorganismen ab, sodass eine Zone mit erhöhter Dichte und Substratlimitierung entsteht. Potentiell könnte sich durch den Verbrauch des in der Sedimentationszone verbliebenen Substrats Stickstoffgas bilden und ansammeln. Sobald eine kritische Volumenmenge erreicht ist, entsteht eine Auftriebsbewegung des Gases. Daraufhin könnte eine geringe Durchmischung einen Anstieg der Substratmenge und somit Leitfähigkeit nach sich ziehen. Der Kontakt des Gases mit der Sonde ändert in Folge dessen die Wertigkeit. Insbesondere für eine Fernwartung, ist eine eindeutige Zuordnung und Interpretation von Anlagenstörungen essentiell.

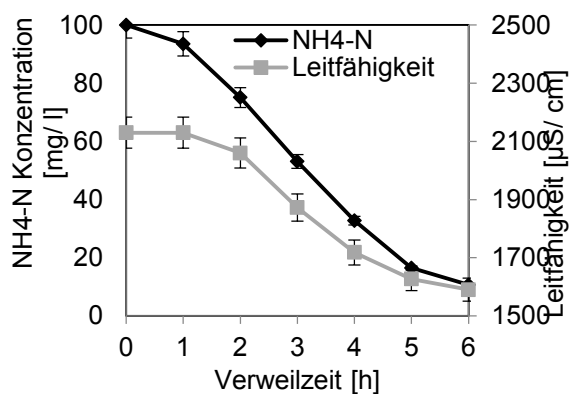


Abbildung 5: Exemplarischer Verlauf von NH₄-N und Leitfähigkeit über die Reaktionszeit von 6 h im Anammox-Reaktor der dezentralen Brauchwasserbereitungsanlage

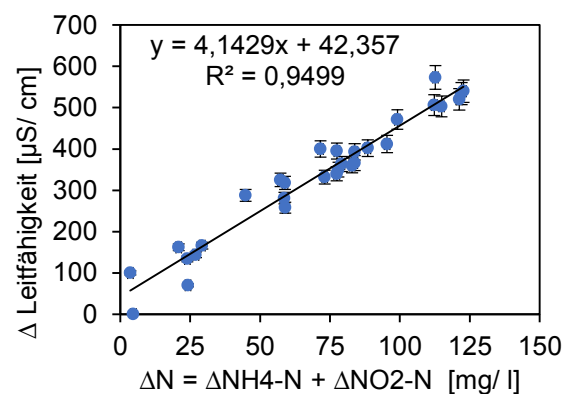


Abbildung 6: Korrelation zwischen der Änderung der Leitfähigkeit und dem Stickstoffabbau im Anammox-Reaktor der dezentralen Brauchwasserbereitungsanlage

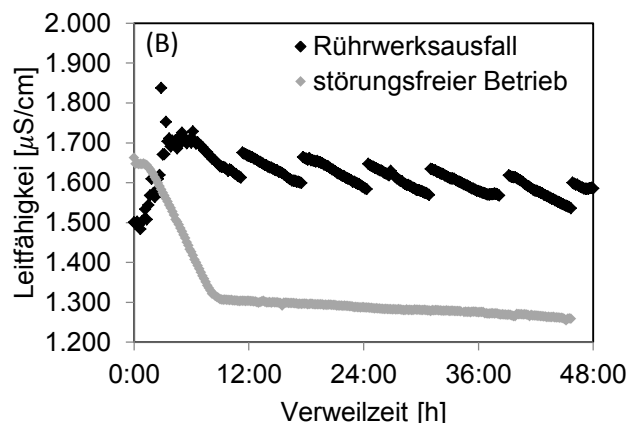
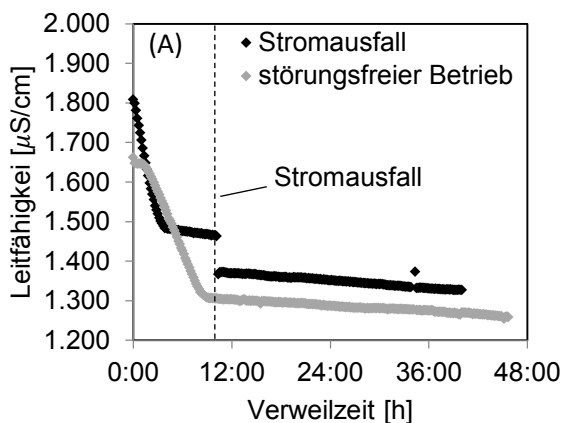


Abbildung 7: Leitfähigkeitsverlauf während des Ammoniumabbaus in der Anammox-Stufe mit Störfallszenarien des Anlagenbetriebs: (A) Stromausfall und (B) Rührwerksausfall

Dankesworte

Die Autoren bedanken sich bei der Hans Sauer Stiftung für die finanzielle Unterstützung, bei Klärwerk Erlangen (DE) für die Einrichtungen, sowie bei SIEMENS AG, Deutschland, Schraml GmbH, WEBFactory GmbH, ZWT Wasser- und Abwassertechnik GmbH und Maschinenbau Biermann GmbH für die Unterstützung und zur Verfügung gestellten Apparaturen.

Literatur

- Aiyuk, S., et al. 2004.** Aiyuk, Sunny, Joyce AmRemoval of carbon and nutrients from domestic wastewater using a low investment, inte-grated treatment concept. *Water Research*. 13, 2004, 38, S. 3031-3042.
- Ali, M. und Okabe, S. 2015.** Anammox-based technologies for nitrogen removal: Advances in process start-up und remaining issues. *Chemosphere*. 2015, 141, S. 144-153.
- Batstone, D. J., T. Hülsen, C. M. Mehta, und J. Keller. 2015.** Platforms for energy and nutrient recovery from domestic wastewater: A review. *Chemosphere*. Dezember 2015, S. 2-11.
- BayBadeGewV. 1993.** Verordnung über die Qualität und die Bewirtschaftung der Badegewässer (Bayerische Badegewässerverordnung - BayBadeGewV-1) Anlage 1. [book auth.] W. Bischof. *Abwassertechnik*. s.l. : B. G. Teuber Stuttgart, 1993, Vol. 10th.
- Foresti, E., Zaiat, M. and Vallero, M. 2006.** Anaerobic processes as teh core technology for sustainable domestic wastewater treatment: Consolidated applications, new trends, perspectives, and challenges. *Review in Environmental Science and Biotechnology*. 5, 2006, pp. 3-19.
- Frijins, J., Hofman, J. und Nederlof, M. 2013.** The potential of (waste)water as energy carrier. [Hrsg.] Global Conference on Renewable energy and Energy Efficiency for Desert Regions 2011 (GCREEDER 2011). *Energy Converion and Management*. 2013. Bd. 65, S. 357-363.
- Fröba, L., et al. 2014.** Messtechnische Datenerfassung und –analyse zur Prozessregelung einer dezentralen Abwasseraufbereitungsanlage. *Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik"*. Karlsruhe : s.n., 09.-11.. September 2014.
- Han, S. H., Yang, H. und Im, D.-G. 2007.** Designing a human computer interface for a process control room: A case study of a steel manufacturing company. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 5, 2007, 37, S. 383-393.
- Herbst, H. B. 2008.** Bewertung zentraler und dezentraler Abwasserinfrastruktursysteme. [Hrsg.] Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. [Dissertation]. 2008.
- Luo, W., et al. 2014.** Nowl two-stage vertical flow biofilter system for efficient treatment of decentralized domestic wastewater. *Ecological Engineering*. 2014, 64, S. 415-423.
- Ma, B., et al. 2016.** Biological nitrogen removal from sewage via anammox: Recent advances. *Bioresource Technology*. 2016, 200, S. 981-990.
- Massoud, M. A., Tarhini, A. und Nasr, J. A. 2009.** Decentralized approaches to wastewater treatment and management: applicability in developing countries. *Journal of Environmental Management*. 2009, Bd. 1, 90, S. 652-659.
- Mei, X., et al. 2016.** Mei, XRecover energy from domestic wastewater using anaerobic membrane bioreactor: Operating parameters optimization and energy balance analysis. *Energy*. 2016, 98, S. 146-154.
- Strous, M., Heijen, J. and Kuenen, J. 1998.** The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidising microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 50, 1998, pp. 589-596.
- Suriyachan, C., Vilas, N. und Amin, A. T. M. Nurul. 2012.** Suriyachan, Chamawong, VPotential of decentralized wastewater management for urban development: Case of Bangkok. *Habitat International*. Januar 2012, S. 85-92.
- Van De Graaf, A. A., et al. 1996.** Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms in a fluidized bed reactor. *Microbiology*. 1996, Vol. 142, pp. 2187-2196.
- Vega de Lille, M. I. 2015.** Modelling, Simulation and Control of Biotechnological Processes in Decentralized Anaerobic Treatment of Domestic Wastewater. [Hrsg.] Lehrstuhl für Strömungsmechanik Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen : s.n., 29. 05 2015.
- Verstraete, W., Van de Caveye, P. und Diamantis, V. 2009.** Maximum reuse of resources present in domestic "used water". *Bioresource Technology*. 2009, 100, S. 5537-5545.
- Wesoly, I. 2009.** Betriebsstrategien für den Anammox-Prozess in Sequencing Batch Reaktoren. [Hrsg.] Technische Universität Berlin Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt. [Dissertation]. Berlin : s.n., 2009.