Zusammenfassung der Promotionsschrift

„Modellierung und Simulation des Einsatzes von Mikroalgen zur Abwasserreinigung auf kommunalen Kläranlagen“

Vorgelegt von

Tatjana Lorenz, (geb. Wawilow)

(externe Doktorandin)

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Bauhaus-Universität Weimar

Mentor: Prof. Dr.-Ing. Jörg Londong

einverstanden, Weimar, den 31.3.2025

Bad Endbach, 05.03.2025

Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

1. Phosphor ist ein essenzieller, jedoch begrenzter Rohstoff, dessen Rückgewinnung aus Abwasser sowie Klärschlamm gemäß der Abfallklärschlammverordnung ab 2029 verpflichtend wird. Voraussetzung dafür ist eine gezielte Elimination des Phosphors aus dem Abwasserstrom. Trotz bewährter Reinigungstechnologien tragen kommunale Kläranlagen weiterhin erheblich zur Phosphor- und Stickstoffbelastung von Gewässern bei. Zur Erreichung der Ziele der EU-Wasserrahmenrichtlinie fordert das Maßnahmenprogramm des Landes Hessen daher eine verstärkte Phosphor- und Stickstoffelimination in Kläranlagen – sowohl zur Reduktion des Nährstoffeintrags in Gewässer als auch als Grundlage für eine effektive Rückgewinnung.

2. Das konventionelle Belebungsverfahren ermöglicht eine effektive Nährstoffelimination, erfordert jedoch insbesondere für die Stickstoffentfernung einen hohen Energieaufwand. Zur Phosphorreduktion werden häufig Metallsalze-basierte Fällmittel eingesetzt, die stoffliche Nachteile bei der P-Rückgewinnung aus Klärschlamm aufweisen. Die Mikroalgenbiotechnologie stellt eine vielversprechende Alternative dar, da Mikroalgen Nährstoffe aufnehmen und Biomasse bilden, die eine Rückgewinnung von Phosphor und eine potenzielle energetische Verwertung erlaubt. Dadurch können chemische Fällmittel vermieden und der Energiebedarf der Abwasserbehandlung reduziert werden.

3. Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines mathematischen Gesamtmodells, bei dem Algenprozesse in ein bestehendes Activated Sludge Modell integriert werden. Damit kann der Einsatz der Algenbiotechnologie als ein Erweiterungsschritt für biologische Verfahrensstufen anwendungsorientiert im Prozess der Modellierung einer kommunalen Kläranlage implementiert werden. Mithilfe der Simulation sollen Aussagen zu Betriebsbedingungen, erforderlichen Anlagenbaugrößen und erreichbaren Ablaufwerten gemacht werden, ohne dass großtechnische Versuchsphasen notwendig sind.

4. Um das Modell entsprechend zu kalibrieren und zu validieren sind experimentelle Untersuchungen unter realitätsnahen Bedingungen im Labor- und Pilotmaßstab erforderlich. Die Erkenntnisse aus den umfangreichen Messreihen sollen dazu beitragen, den Einsatz von Algenbiotechnologie unter mitteleuropäischen klimatischen Bedingungen und somit wechselnden Umwelteinflüssen besser zu verstehen und den Einfluss von Umweltfaktoren im Modell abzubilden.

Stand der Wissenschaft

5. Mikroalgen kommen in konventionellen Abwasserbehandlungsverfahren in geringer Zahl vor, ihre Vorteile werden jedoch meist nicht genutzt. Sie produzieren Sauerstoff für Bakterien, die CO_2 freisetzen, das wiederum den Algen für ihr Wachstum dient. Damit kann die Nährstoffelimination verbessert werden. In Regionen mit mediterranem Klima, wie etwa in Spanien, gibt es bereits Erfahrungen mit der Mikroalgenbiotechnologie in der Abwasserreinigung, während in Deutschland, aufgrund klimatischer Unterschiede noch keine praxisnahe Forschung und Erfahrung vorliegen.

6. Anhand einer umfassenden Literaturauswertung werden das Potenzial sowie die Grenzen des Einsatzes von Algenbiotechnologie in der Abwasserreinigung aufgezeigt. Dabei werden Umwelteinflüsse wie Licht, Temperatur und pH-Wert sowie der Einfluss anderer Organismen berücksichtigt. Zur Einbeziehung dieser Einflussfaktoren ist ein integriertes Mikroalgen-Bakterienmodell erforderlich, das die zusammenhängenden Reaktionsmechanismen von Bakterien und Mikroalgen in einer Biozönose abbildet.

7. Bei Auswertung der in der Literatur veröffentlichten integrierten Mikroalgen-Bakterienmodelle wird die unzureichende Kenntnis in der Wissenschaft über die Interaktionen zwischen Bakterien und Mikroalgen deutlich. Der Schwerpunkt der Analyse liegt auf den biologischen Prozessen und dem Einfluss von Umweltfaktoren auf die Prozesse. Für eine präzise Modellierung müssen hydraulische, biochemische und physikalische Prozesse berücksichtigt und die Schwankungen der Umweltfaktoren einbezogen werden.

Eingesetzten Methoden

8. Basierend auf dem Activated Sludge Model 3 (ASM3) und weiterer Modelle zu Mikroalgenprozessen wird ein integriertes Modell entwickelt, dass sowohl die Prozesse der Bakterien als auch der Mikroalgen abbildet. Durch die Integration der Mikroalgenprozesse und -parameter in das ASM 3 entsteht ein neues integriertes Mikroalgen-Bakterienmodell, welches die Interaktion der Mikroalgen und der Bakterien sowie die Umwelteinflussfaktoren wie Temperatur und Licht berücksichtigt.

9. Experimentelle Untersuchungen im Labormaßstab unter definierten Betriebsbedingungen dienen der Kalibrierung des neuen mathematischen Modells. Es werden vier Szenarien (Frühling, Sommer, Herbst, Winter) untersucht, die den Einfluss von Temperatur und Lichtintensität entsprechend der Jahreszeiten in Mitteldeutschland variieren. Die Lichtintensität wird mittels einer LED-Lampe simuliert, während die Temperatur reguliert wird. Ein Labor-Photobioreaktor (Volumen 50 l) mit suspendierender Biomasse wird kontinuierlich mit realem Abwasser beschickt.

10. Unter realen Bedingungen wird eine halbtechnische Pilotanlage betrieben und liefert Online-Messwerte in Intervallen von 15 Minuten. Die kontinuierliche Online-Messung der Nährstoffkonzentrationen stellt eine Methodik dar, die bislang in der wissenschaftlichen Literatur zu Mikroalgen-Bakterienbiozönose nicht beschrieben wurde. Diese dichte Datenlage der experimentellen Untersuchungen im Pilotmaßstab stellt die Basis der Validierung des entwickelten Modells dar.

11. Die Pilotanlage wird auf dem Gelände der Kläranlage Ober-Bessingen (Hessen) im halbtechnischen Maßstab errichtet und mit realem Abwasser nach der mechanischen Reinigung beschickt. Die Pilotanlage besteht verfahrenstechnisch aus einer Vorklärung, einer Hochlastbelebung zur Kohlenstoffentfernung, einem Mikroalgen-Bakterienbecken (Volumen 3 m^3) zur Phosphor und Stickstoffentfernung, ausgeführt als „High Rate Algae Pond“ (HRAP) und einem anschließenden Tuchfilter zur Abtrennung der Biomasse. Die Pilotanlage wird nicht

temperiert, und als Lichtquelle kommt ausschließlich Sonnenlicht zum Einsatz. Dadurch wird das Potenzial der Technologie unter realen Bedingungen grundlegend untersucht.

12. Im Rahmen einer dynamischen Simulation des entwickelten Modells wird eine Beispielkläranlage (für 1000 Einwohnerwerte (EW)) über ein Jahr hinweg in 15-minütigen Intervallen simuliert. Auf Basis der Ergebnisse wird eine Empfehlung für die Auslegung der HRAP-Verfahrensstufe abgeleitet. Mithilfe einer simulierten Zulaufregelung zum HRAP wird die theoretische Aufenthaltsdauer berechnet und die erforderliche Fläche des HRAP ermittelt

Wesentliche Ergebnisse

13. Die bisher noch nicht untersuchte Verfahrenskombination aus Hochlastbelebung und HRAP stellt eine effektive Lösung für die Nährstoffelimination und Nährstoffanreicherung in der Mikroalgen-Bakterien-Biomasse dar. Der Einfluss von Licht und Temperatur auf die Wachstumskinetik ist entscheidend für die Biomassenbildung und somit auch für die Entfernungsrate der Nährstoffe aus dem Abwasser. Im betrachteten Zeitraum im Monat Juni werden 83 % des CSB abgebaut, über 60 % N_{ges} reduziert und 88 % P_{ges} in Biomasse akkumuliert.

14. Das entwickelte integrierte Mikroalgen-Bakterienmodell „AlgA“ besteht aus sechs partikulären (X) und acht gelösten (S) Komponenten, welche relevant für die biochemischen und physikalische Prozessen sind. Das Modell beinhaltet 19 Prozesse, wobei zwölf davon aus dem ASM3 stammen und Prozesse im Zusammenhang mit Bakterien definieren. Weitere vier Prozesse beschreiben Mikroalgenprozessraten und weitere drei Prozesse stellen den Gasaustausch zwischen der Flüssig- und der Gasphase dar. Die mathematische Abbildung der Einflussfaktoren ermöglicht einen breiten Toleranzbereich und ist somit für variierende Biomassenzusammensetzungen anwendbar.

15. Das Anwendungsbeispiel für das Modell basiert auf einer Ganzjahressimulation einer fiktiven kommunalen Kläranlage (1000 EW). Dabei wird gezeigt, wie der Einsatz von HRAP im Durchlaufbetrieb unter den klimatischen Bedingungen Mitteldeutschlands möglich ist. Eine kontinuierlich stabile Nährstoffentfernung mittels Mikroalgenbiotechnologie ist bei niedrigen Temperaturen und bei wenig Licht nur bedingt möglich. Zur Einhaltung der geforderten Überwachungswerte ist eine Anpassung der Anlagentechnik notwendig. Zwischen Mai und September ist ein theoretischer HRAP-Flächenbedarf von 2 m²/EW erforderlich. In den Wintermonaten November bis Februar würde sich der theoretische HRAP-Flächenbedarf auf bis zu 19 m²/EW erhöhen, was für größere Kläranlagen unrealistisch hoch ist.

16. Sowohl die Ergebnisse der Langzeitmessungen auf der Pilotanlage als auch die durch Simulation ermittelten Werte zeigen, dass ein Betrieb der Mikroalgenbiotechnologie auf einer Kläranlage in Mitteldeutschland nur saisonal betrieben werden kann. Eine kontinuierliche Nährstoffentfernung und die Einhaltung der Ziele der EU-Wasserrahmenrichtlinie können nur in Kombination mit dem konventionellen Belebungsverfahren mit Nährstoffelimination in den Wintermonaten eingehalten werden. Für eine ganzheitliche Betrachtung des Verfahrens sind weitere Untersuchungen zur stofflichen und energetischen Verwertung der Biomasse erforderlich.