

**Zusammenfassung zur Promotionsschrift**

**Entwicklung und Bilanzierung eines Photobioreaktorsystems  
zur Makroalgenkultivierung am Standort einer  
landwirtschaftlichen Biogasanlage**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor - Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen der  
Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von  
**Tonia Annick Schmitz (M.Sc.)**

(Interne Doktorandin)

Mentor:  
Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kraft

Weimar, den 08. Januar 2020

## **Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit**

1. Marine Makroalgen besitzen vielversprechende Eigenschaften und Inhaltsstoffe für die Verwendung als Energieträger, Nahrungsmittel oder als Ausgangsstoff für Pharmazeutika. Dass die Quantität und Qualität der in natürlicher Umgebung wachsenden Makroalgen schwankt, reduziert jedoch deren Verwertbarkeit. Zudem ist eine Ausweitung der Zucht in marinen oder landbasierten, küstennahen Aquakulturen gegenwärtig wenig aussichtsreich.
2. Geschlossene, von einem Meerwasserzugang unabhängige Photobioreaktorsysteme ermöglichen eine Kultivierung von Makroalgen an einem frei wählbaren Standort unter vollständiger Kontrolle der abiotischen Zuchtparameter. Quantität und Qualität der produzierten Makroalgen können gegenüber etablierten Verfahren gesteigert und die Erschließung hochpreisiger Marktsegmente erleichtert werden.
3. Erfolgt die Makroalgenkultivierung am Standort einer landwirtschaftlichen Biogasanlage, können Synergiepotentiale erschlossen werden indem lokal anfallende Rest- und Abfallstoffe als Nähr- und Kohlenstoffquelle in der Zucht verwendet werden. Über die hofinterne Kreislaufführung werden die Emissionen der Biogasanlage reduziert und aquatische Biomasse als zusätzliches Produkt für eine energetische oder stoffliche Nutzung bereit gestellt.
4. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines geschlossenen Photobioreaktorsystems zur Kultivierung mariner Makroalgen am Standort einer landwirtschaftlichen Biogasanlage. Über die Identifizierung wachstumsfördernder Kultivierungsparameter hinaus ist die Eignung von Rest- und Abfallstoffen der landwirtschaftlichen Anlage als Nähr- und Kohlenstoffquelle für Makroalgen zu evaluieren. Abschließend sind die Aufwendungen und Erträge der Kultivierung und Verwertung von Makroalgen zu quantifizieren und zur Bewertung der Tragfähigkeit des entwickelten Systems zu bilanzieren.

## **Stand der Wissenschaft**

5. Die drei ausgewählten Arten *Ulva intestinalis*, *Fucus vesiculosus* und *Palmaria palmata* sind in der Lage sich vegetativ zu vermehren, besitzen einen hohen Nährwert und enthalten vielfältige sowohl stofflich, als auch energetisch verwertbare Inhaltsstoffe.
6. Makroalgen haben sich an ihre Umgebungsbedingungen genetisch adaptiert und können sich innerhalb phänotypisch festgelegter Grenzen an veränderte physikochemische Parameter akklimatisieren. Zahlreiche Studien sind zur Ermittlung geeigneter Wertebereiche innerhalb dieser Grenzen für die Faktoren der Licht-, Nähr- und Kohlenstoffversorgung sowie den Eigenschaften des Kulturmediums erfolgt. Es fehlen jedoch Erfahrungen zu den Auswirkungen einer Düngung mit organischen Nährstoffquellen wie Gärrest sowie einer Kohlenstoffzufuhr aus Abgasen auf das Wachstum der ausgewählten Algenarten.
7. Bislang entwickelte Photobioreaktorsysteme beschränken sich auf eine Umsetzung im labortechnischen Maßstab und sehen hohe Wasserwechselraten bzw. einen Meerwasserzugang vor. Es fehlen insbesondere Erfahrungen zur Aufbereitung des Kulturmediums sowie zu geeigneten künstlichen Lichtquellen für die Makroalgenzucht.

8. In Bilanzierungsstudien zur Bewertung der ökologischen und ökonomischen Tragfähigkeit existierender Anlagen und Konzepte kristallisiert sich studienübergreifend die Notwendigkeit einer Reduktion des Flächen-, Rohstoff- und Energiebedarfs der Makroalgenkultivierung heraus.

### **Eingesetzte Methoden**

9. In vorbereitenden Untersuchungen wird der Einfluss ausgewählter Kulturmedien, Nähr- und Kohlenstoffquellen auf die Makroalgenarten *Ulva lactuca*, *Fucus vesiculosus* und *Palmaria palmata* in labortechnischen Kultivierungsversuchen ermittelt und die Eignung verfügbarer Lichtquellen zur Zucht der gewählten Makroalgenarten über eine theoretische Betrachtung evaluiert.
10. Die Funktionalität und Produktivität des entwickelten Photobioreaktorsystems wird in 28-tägigen Kultivierungsversuchen mit den Algenarten *Ulva intestinalis*, *Fucus vesiculosus* und *Palmaria palmata* ermittelt. Die Versuchsparmeter orientieren sich an den Ergebnissen der vorbereitenden Untersuchungen und den Literaturangaben zu geeigneten Kultivierungsbedingungen für die gewählten Algenarten.
11. Die Bewertung der anaeroben Verfügbarkeit der gewählten Makroalgenarten erfolgt in Batch-Gärtests nach VDI 4630 unter Verwendung von Gärrest einer Schweinegülle-Monofermentation als Inokulum. Zur Einschätzung der Übertragbarkeit und Relevanz der Ergebnisse für landwirtschaftliche Biogasanlagen wird Ganzpflanzenmaissilage als Vergleichssubstrat eingesetzt.
12. Die Ermittlung der mit den gewählten Algenarten erzielbaren Methangaserträge erfolgt über kontinuierliche Vergärungsversuche im halbtechnischen Maßstab mit Schweinegülle als Hauptsubstrat. Zur Einordnung der substratspezifischen Leistung der gewählten Algenarten gegenüber etablierten Energiesubstraten wird Ganzpflanzenmaissilage als Vergleichssubstrat eingesetzt.
13. Die Bilanzierung der Makroalgenkultivierung und -verwertung erfolgt in Anlehnung an die Methode der Umweltkostenrechnung unter Einbeziehung der stofflichen, energetischen und finanziellen Aufwendungen und Erträge die mit diesen Verfahren einhergehen.

### **Im Wesentlichen erzielte Ergebnisse**

14. Eine mit Trinkwasser und Tropic Marin® CLASSIC- Salz angemischte Salzlösung als Kulturmedium führt zu positiven Wachstumsraten für *Ulva lactuca*, *Fucus vesiculosus* und *Palmaria palmata* wenn die Salinität artspezifisch angepasst wird.
15. Die organischen Nährstoffquellen Schweinegülle und Schweinegüllegärrest führen zu einer erheblichen Steigerung der Turbidität des Kulturmediums und in der Folge zu stark wachstumslimitierenden Umgebungsbedingungen für Makroalgen. In geschlossenen Photobioreaktorsystemen sind sie als Düngemittel ungeeignet.
16. Die Zufuhr von Kohlenstoff über Abgase der Biogasverbrennung führt zu einer dauerhaften Übersäuerung des Kulturmediums und verminderten Wachstumsraten von Makroalgen gegenüber einer Kultivierung mit N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>-Gasgemisch oder Atmosphäre.

17. Es wurde ein Photobioreaktorsystem zur Makroalgenkultivierung entwickelt welches eine umfassende Kontrolle der Zuchtbedingungen und eine effektive Aufbereitung des Kulturmediums ermöglicht. So wird die Einstellung einer artspezifischen Temperatur, Licht- und Nährstoffversorgung verfahrenstechnisch ermöglicht und die Standortunabhängigkeit gegenüber existierenden Anlagen erhöht. Über eine sensorgestützte Überwachung und Steuerung der Anlage werden Havarien vermieden und eine hohe Bedienerfreundlichkeit erreicht.
18. Im Rahmen von Kultivierungsversuchen in dem entwickelten Photobioreaktorsystem wurden maximale Wachstumsraten von 7,72%/d für *Ulva intestinalis* erreicht. Die erzielten Werte liegen im Mittelfeld der in der Literatur für Photobioreaktorsysteme beschriebenen Wachstumsraten ohne jedoch die für labortechnische Versuche dokumentierten Werte zu erreichen. Mit den Algenarten *Fucus vesiculosus* und *Palmaria palmata* waren durch einen Ausfall der entwickelten Zuchtbeleuchtung bzw. durch Transportschäden der Makroalgen keine repräsentativen Kultivierungsversuche in dem Photobioreaktorsystem möglich.
19. In Batch-Gärtests wurde die Vergärbarkeit der gewählten Algenarten in Schweinegüllegärrest grundsätzlich bestätigt: Die Summenkurven der Biogasproduktion deuten in allen Versuchsreihen auf eine gute Abbaubarkeit der verwendeten Substrate. Eine Erhöhung des Verhältnisses von Substrat zu Inokulum führte nicht zu einer signifikanten Reduzierung der Biogasproduktion, sodass keine substratspezifische Hemmung der anaeroben Biozönose durch die Algenarten *Ulva intestinalis*, *Fucus vesiculosus* und *Palmaria palmata* nachgewiesen wird.
20. In kontinuierlichen Vergärungsversuchen wurden spezifische Gaserträge von täglich 182 L CH<sub>4</sub>/kg<sub>OTR</sub> für *Ulva intestinalis*, -36 L CH<sub>4</sub>/kg<sub>OTR</sub> für *Fucus vesiculosus*, 514 L CH<sub>4</sub>/kg<sub>OTR</sub> für *Palmaria palmata* und 347 L CH<sub>4</sub>/kg<sub>OTR</sub> für Ganzpflanzenmaissilage erzielt. Während die Methanbildung der Silage dem Ertrag von Praxisanlagen entspricht, liegen die mit *Ulva intestinalis* und *Palmaria palmata* erzielten Ergebnisse über den in der Literatur dokumentierten Werten. Demgegenüber kann die Vergärbarkeit der Algenart *Fucus vesiculosus* nicht bestätigt werden.
21. Die Bilanzierung der Makroalgenkultivierung im entwickelten Photobioreaktorsystem offenbart einen hohen Energiebedarf in der Produktion der Algenarten *Ulva intestinalis* (38 kWh/d), *Fucus vesiculosus* (30 kWh/d) und *Palmaria palmata* (44 kWh/d). Die Temperierung des Kulturmediums und die Zuchtbeleuchtung tragen überproportional zum Energiebedarf bei.
22. Gegenwärtig kann in dem entwickelten Photobioreaktorsystem lediglich mit der Algenart *Ulva intestinalis* eine positive finanzielle Bilanz für die stoffliche Verwertung erzielt werden. Eine Nutzung als Energiesubstrat, muss für alle drei Algenarten ausgeschlossen werden.
23. Wird ein Optimalszenario betrachtet in dem die Besatzdichte verzehnfacht und die Wachstumsraten an die für labortechnische Versuche in der Literatur dokumentierten Werte angeglichen werden, bleibt die Energiebilanz negativ für alle getesteten Varianten. Werden die gezüchteten Makroalgen jedoch zu marktüblichen Preisen veräußert, können finanzielle Einnahmen von jährlich 460.869€ für *Ulva i.*; 4.010€ für *Fucus v.* und 16.913€ für *Palmaria p.* erzielt werden. Im Ergebnis ist eine stoffliche Verwertung der gezüchteten Makroalgen anzustreben und die Produktivität der Zuchtanlage im Sinne des Optimalszenarios zu vergrößern.