bericht

report

bioenergy2020+

Andrea Sonnleitner
Dina Bacovsky
Stefan Humel
Bernhard Drosg
Magdalena Nussbaumer
Günther Bochmann
Michael Schagerl
Irina Ludwig
Jacqueline Jerney
Andreas Winzely
Michael Gaisbauer
Thomas Hölzl

Synergie von Abwasserreinigung und Mikroalgenkultivierung

Projekt SAM

Publizierbarer Projektendbericht

innovations kompetenz

bericht report

bioenergy2020+

Publizierbarer Projektendbericht

Synergie von Abwasserreinigung und Mikroalgenkultivierung

Projekt SAM

Datum	31.05.2013
Nummer	560 TR IK-I-1-87 04

Projektleitung	BIOENERGY 2020+ GmbH
Wissenschaftliche Partner	BOKU IFA Tulln
	Universität Wien, Department für Limnologie
Firmenpartner	Gemeindeabwasserverband Wieselburg
	Schreiber-AWATEC GmbH

Projektnummer	IK-I-1-87
Projektlaufzeit	01.06.2012 – 31.05.2013

Mit Unterstützung von

FFG

bmvit

Programm Intelligente Produktion

GÜSSING RENEWABLE ENERGY

BIOENERGY 2020+ GmbH

Standort Wieselburg
Gewerbepark Haag 3
A 3250 Wieselburg-Land
T +43 (0) 7416 52238-10
F +43 (0) 7416 52238-99
office@bioenergy2020.eu
www.bioenergy2020.eu

Firmensitz Graz
Inffeldgasse 21b, A 8010 Graz
FN 232244k
Landesgericht für ZRS Graz
UID-Nr. ATU 56877044

innovations kompetenz

Projektteam

bioenergy2020+

Andrea Sonnleitner, Dina Bacovsky, Stefan Humel

BOKU IFA TULLN

Bernhard Drosg, Magdalena Nussbaumer, Günther Bochmann

universität wien , DeLi Department of Limnology

Michael Schagerl, Irina Ludwig, Jacqueline Jerney

SCHREIBER UMWELTTECHNIK GMBH AWATEC www.schreiber-awatec.at

Andreas Winzely, Michael Gaisbauer

GEMEINDE ABWASSER VERBAND WIESELBURG

Thomas Hölzl

Inhalt

Zielsetzung 4

Potentiell geeignete Abwässer für die Algenkultivierung 6

Praktische Versuche zur Mikroalgenkultivierung auf Abwasser 7

Verfahrenstechnik der Algenkultivierung 10

Verwertungspotential der kultivierten Algenbiomasse 13

Perspektiven und Ausblick 15

Verzeichnisse 18

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis 19

Literaturverzeichnis 19

Zielsetzung

Das Sondierungsprojekt SAM sollte der Erschließung eines neuen Forschungsfeldes zwischen der Abwassertechnik und der Bioenergie dienen. Es wurden Produktionskonzepte erarbeitet, die Mikroalgen zur Abwasserreinigung einsetzen und die Algenbiomasse einer stofflichen und/oder energetischen Nutzung zuführen. Auf Basis unserer Projektergebnisse ist vorgesehen, weitere F&E-Arbeiten zur Entwicklung entsprechender Technologien zu führen.

Mikroalgen sind vorwiegend oxygene Photosynthese betreibende Mikroorganismen, die unter Verwertung von Wasser, CO_2, Strahlung und weiterer Elemente hocheffizient Biomasse produzieren (Sauerstoff wird als Nebenprodukt abgegeben). In ihrer Effizienz, Sonnenenergie zum Aufbau von Biomasse zu nutzen, sind Mikroalgen den Landpflanzen weit überlegen. Im Gegensatz zu Landpflanzen benötigen Mikroalgen keine Stützelemente und investieren den Großteil der Energie in die Nachkommenschaft, was sich in einem 10 - 100-fach erhöhten Biomasseertrag niederschlägt (Pulz 2009). Algenkultivierungsanlagen haben zusätzlich das Potential, landwirtschaftlich uninteressante Flächen zu nutzen, sodass dadurch keine Konkurrenz mit der Lebensmittelproduktion besteht.

Die industrielle Kultivierung von Mikroalgen ist in Österreich im Vergleich zu tropischen und subtropischen Gebieten aufgrund der klimatischen Bedingungen schwieriger. Neben den üblichen Voraussetzungen wie der kosteneffizienten Versorgung mit Strahlung, CO_2, Wasser und Nährstoffen ist während der Wintermonate in unseren Breitengraden die Umgebungstemperatur für eine erfolgreiche Algenkultivierung zu niedrig. Hier zeigen sich gleich mehrere Vorteile der Kultivierung in Abwässern gegenüber anderen Kultivierungssystemen: die Verfügbarkeit von Wasser, die Verfügbarkeit von Nährstoffen und die gegenüber natürlichen Systemen höhere Temperatur. In kommunalen Abwässern sowie in den Abwässern von Tierzuchtbetrieben und in eutrophierten Gewässern sind neben organischem Kohlenstoff auch Stickstoff und Phosphor enthalten. Diese Stoffe werden in der Regel in der biologischen Stufe einer Kläranlage von Bakterien umgesetzt. Diese Nährstoffe können auch mithilfe von Mikroalgen in Biomasse umgewandelt werden.

Die Kultivierung von Mikroalgen in Abwässern hat daher potentiell einen doppelten Nutzen (Lundquist, 2008): neben der Abwasserreinigung durch den Entzug von Stickstoff und Phosphor (Nährstoffreduktion) werden zusätzlich Algenbiomasse und/oder Wertstoffe aus Algen daraus gewonnen.

Eine Lebensgemeinschaft von Mikroalgen und anderen Mikroorganismen kann folgendermaßen funktionieren (Abbildung 1): Die Mikroalgen bauen Stickstoff und Phosphor in ihre Biomasse ein. Während der Photosynthese (bei Sonneneinstrahlung oder künstlicher Beleuchtung) nehmen die Mikroalgen CO_2 auf und geben Sauerstoff ab. Bakterien wiederum nutzen den Sauerstoff zur Nitrifikation. Im Zusammenspiel von Algen und Bakterien wird das Abwasser schließlich gereinigt und die Nährstoffe in der Algenbiomasse gebunden.

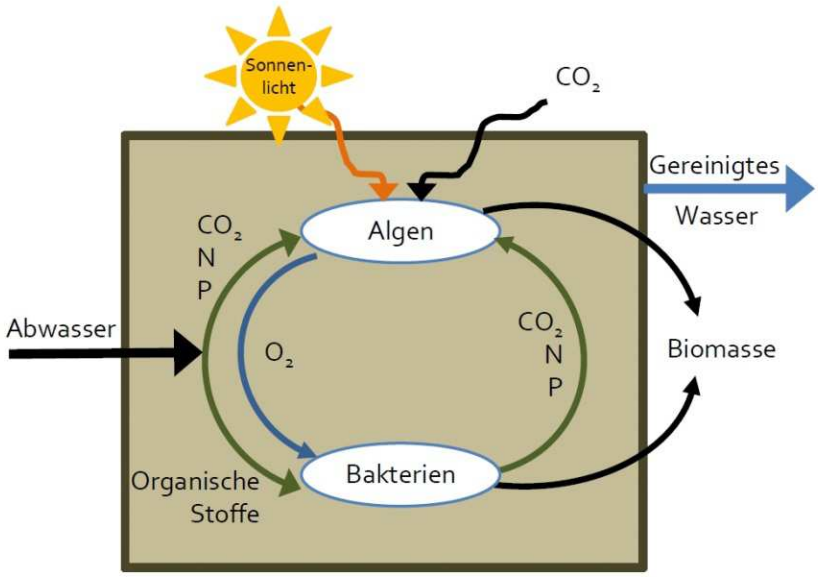

Abbildung 1: Mechanismen des Zusammenlebens von Bakterien und Algen (übersetzt aus U.S. DOE, 2010)

Die entstehende Algenbiomasse kann aus dem Abwasser abgetrennt werden und auf verschiedene Arten genutzt werden. Denkbar sind sowohl die Gewinnung von Wertstoffen aus der Algenbiomasse, die stoffliche Nutzung der Algenbiomasse (beispielsweise als Dünger) und die energetische Nutzung der Algenbiomasse (Brennan und Owende, 2010; Mata et al., 2010).

Im Sondierungsprojekt SAM wurden zwei unterschiedliche Fragen behandelt:

- Können mit Hilfe von Mikroalgen innovative Systeme zur Reinigung von Abwasser und zur Rückgewinnung von Nährstoffen (Stickstoff, Phosphor) in Österreich aufgebaut werden?
- Ist es möglich, aus den Nährstoffen im Abwasser Mikroalgen zur Verwendung als Rohstoff und Energieträger zu kultivieren?

Zu einer umfassenden Beantwortung dieser Fragen wurde ein Projektteam mit Experten aus der Abwassertechnik, der Biologie, der Verfahrenstechnik und der Biochemie zusammengestellt. Durch diesen interdisziplinären Ansatz war es möglich, anwendungsorientierte Ergebnisse zu gewinnen. Im Projekt wurden zunächst geeignete Abwässer recherchiert, die Kultivierung von Mikroalgen in praktischen Versuchen erprobt und die entstehende Algenbiomasse charakterisiert. Auf dieser Basis wurden mögliche Produkte identifiziert und mit den entsprechenden Abwässern und Algenkulturen zu Produktionskonzepten kombiniert. Der zur Umsetzung dieser Produktionskonzepte notwendige Forschungsbedarf wurde dargelegt. Auf Basis der Projektergebnisse sollen weitere F&E-Arbeiten zur Entwicklung entsprechender Technologien führen.

Potentiell geeignete Abwässer für die Algenkultivierung

Für ausreichendes Wachstum benötigen Algen neben Licht, Wasser und Kohlenstoff eine Vielzahl an mineralischen Nährstoffen. Ein Mangel an diesen Nährstoffen, genannt Nährstofflimitation (Graham et al., 2009), führt zu vermindertem Wachstum. Die wichtigsten Kriterien, die für das Mikroalgenwachstum relevant sind, sind in Abbildung 2 dargestellt.

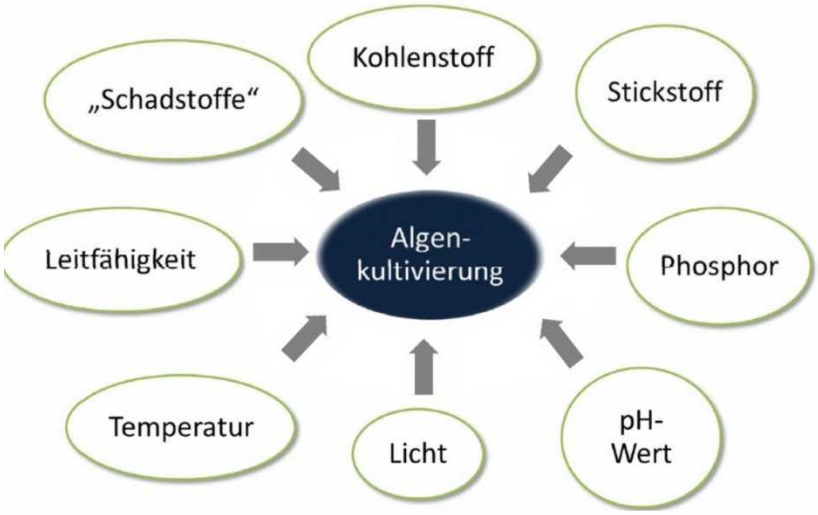

Abbildung 2: Entscheidende Parameter für die Mikroalgenkultivierung

Es gibt in Österreich verschiedene Arten von nährstoffhaltigen Wasservorkommen, die wie folgt kategorisiert werden können.

Eutrophierte Gewässer: in Österreich gibt es kaum eutrophierte Gewässer (WISA Wasser Informations System Austria, H2O Fachdatenbank Umweltbundesamt). Auch in den Flüssen mit Gewässergüte II-III sind die Nährstoffgehalte sehr gering und daher nicht zur aktiven Algenkultivierung geeignet. Diese Art von Gewässern ist daher nicht als Abwasser zu bezeichnen.

Landwirtschaftliche Abwässer: Gülle müsste für die Algenkultivierung stark verdünnt werden, einerseits wegen der starken Eigenfärbung, andererseits wegen der hohen Ammoniakgehalte. Sie könnte mit Waschwasser vorverdünnt werden, allerdings gibt es für Gülle bereits gute Verwertungswege (Direktausbringung aufs Feld, Aufbereitung in Biogasanlagen). Gülle erscheint daher für die direkte Algenkultivierung als ungeeignet.

Industrielle Abwässer: In den Abwasseremissionsverordnungen (AEVs) sind diverse Abwasserarten aus einer Vielzahl von Branchen angeführt – einige davon scheiden für die

Betrachtung zur Kultivierung von Mikroalgen bereits von vornherein aus, wie etwa Abwässer aus dem medizinischen Bereich (zu risikoreich), Textilherstellung (Chemikalien im Abwasser, niedrige Nährstoffkonzentrationen), chemische, metallurgische und mineralverarbeitende Prozesse (unzureichende Nährstoffmengen). Weitere Abwasserarten würden prinzipiell für die Kultivierung von Mikroalgen geeignet sein, scheiden allerdings durch andere Faktoren aus, wie z.B. Rohabwasser aus Schlachthöfen - dieses ist im Vergleich zu anderen „Abwässern risikoreich, da es Krankheitserreger enthalten kann. Abwasser aus der Zucker- und Stärkeerzeugung würde genügend Nährstoffe zur Verfügung stellen, allerdings ist dies periodisch anfallendes Wasser und somit nicht für eine ganzjährige Algenproduktion geeignet.

Kommunale Abwässer: Bei den kommunalem Abwasser kann man in Großkläranlagen (Gemeindeabwasserverbände) und Kleinkläranlagen (<1000 EW) unterteilen. Dieses Abwasser ist in ausreichenden Mengen vorhanden und mit genügend Nährstoffen versetzt.

Innerhalb des Projektes wurde ein Abwasserkatalog mit den in Österreich verfügbaren Abwässern und deren Mengen erstellt. In einem Kriterienkatalog wurden die für die Algenkultivierung notwendigen Parameter beschrieben und anhand einer umfangreichen Literaturrecherche Grenzwerte und Empfehlungen festgelegt. Aufgrund dieser Ergebnisse wurden für die Durchführung der praktischen Versuche vier potentiell als geeignet erscheinende Abwasserarten ausgewählt:

- Brauereiabwasser
- Kommunales Abwasser Großkläranlage
- Kommunales Abwasser Kleinkläranlage
- Molkereiabwasser

Von den Mengenverhältnissen ist hiervon in Österreich das kommunale Abwasser mit mehr als 450 Mio. m^3 a^{-1} (Auf Basis 150 l d^{-1} pro Person) in den größten Mengen verfügbar. Abwässer aus Brauerei und Molkerei liegen bei ca. 2,5-3,5 Mio. m^3 a^{-1} (0,5 m^3 hl^{-1} erzeugtem Bier, 1,2 m^3 t^{-1} verarbeiteter Milch).

Praktische Versuche zur Mikroalgenkultivierung auf Abwasser

In einer ersten Versuchsserie wurden die Abwässer einem Screening mit Microplates unterzogen, um (1) eine geeignete Verdünnung zu finden, (2) geeignete Rein- bzw. Rohkulturen zu wählen und (3) zu untersuchen, ob das Abwasser vor Applizierung autoklaviert werden muss oder roh verwendet werden kann. Es zeigte sich, dass mit einer Verdünnung von 1 + 4 = Abwasser + Leitungswasser gute Wachstumserfolge erzielt werden konnten, eine Verdünnung von 1 + 49 = Abwasser + Leitungswasser erwies sich als zu hoch. Als ideale Reinkultur wurde *Chlorella emersonii* gefunden. Dieses Taxon blieb Großteils in Lösung und zeigte keine Tendenzen zu Verklumpen, während andere Testorganismen bei Verwendung von Abwasser starke Anhaftungen an den Gefäßrändern bzw. Ausfällungen zeigten. Neben dieser Reinkultur wurde für weitere Versuche auch eine Rohkultur gezüchtet, die aus der Umgebung der Kläranlage Wieselburg stammte (Sammelprobe aus Klärbecken und Vorfluter) und hauptsächlich aus den kokkalen Grünalgentaxa *Coenochloris hindakii, Chlorolobion braunii, Scenedesmus* sp. bestand. Die Screening-tests zeigten, dass nicht-autoklaviertes Abwasser für die Algenkultivierung geeignet ist, was die großtechnische Verwendung deutlich erleichtert. Anhand der Screening-tests wurde schließlich Abwasser der betrachteten Kleinkläranlage für weitere Versuche ausgeschlossen; möglicherweise sind hohe Kupferkonzentrationen in genau dieser Anlage für das schlechte Algenwachstum verantwortlich.

Die Kultivierungsversuche wurden mit 3 Abwässern (Kommunal K, Molkerei M, Brauerei B) und mit drei verschiedenen Kultivierungssystemen (Erlenmeyerkolben, Bubble Columns und Fließrinnen (ATS)) durchgeführt. Für Erlenmeyerkulturen und Bubble Columns wurden Reinkulturen von *Chlorella emersonii* verwendet, für Fließrinnen Rohkulturen, da dieses System der Umgebungsluft ausgesetzt war. Dabei wurden sowohl das Biomassewachstum als auch die Phosphoreliminierung berechnet. Die Erlenmeyerkulturen dienen als Modell für offene Teiche. Die Erlenmeyeransätze zeigten teilweise starke Niederschläge der Algenzellen und das geringste Wachstum. Die belüfteten Bubble Columns wiesen deutlich höheres Wachstum und eine höhere Vitalität auf, die Suspension zeigte gute Homogenisierung. Als dritte Option wurden Fließrinnen untersucht. Im Gegensatz zu den beiden ersten Kultivierungsmethoden werden hier Algen nicht in Lösung gehalten, sondern stellen einen Teil des Biofilmes dar, der am Boden der Fließrinnen wächst. Der Fließrinnenansatz wurde mit der Rohkultur durchgeführt, das Abwasser dabei mittels Pumpen im Kreislauf geführt. Die Fließrinnen erwiesen sich als das produktivste System, wobei das Molkereiabwasser das höchste Biomassewachstum erzielte, gefolgt von der Kläranlage (Abbildung 3). Das Brauereiabwasser zeigte bei allen Kultivierungsversuchen das geringste Wachstum. Die Zusammensetzung des Biofilms aller Versuche zeigte, dass Algen einen Anteil kleiner 40% des Trockengewichtes ausmachten und der Biofilm zudem hauptsächlich aus anorganischem Material besteht. Das bedeutet, dass ein Großteil der Phosphorreduktion nicht über die Algen, sondern über die Biofilmmatrix erfolgt. Es konnte eine Phosphorentfernung von über 90% in M und ca. 40% in K und B erreicht werden.

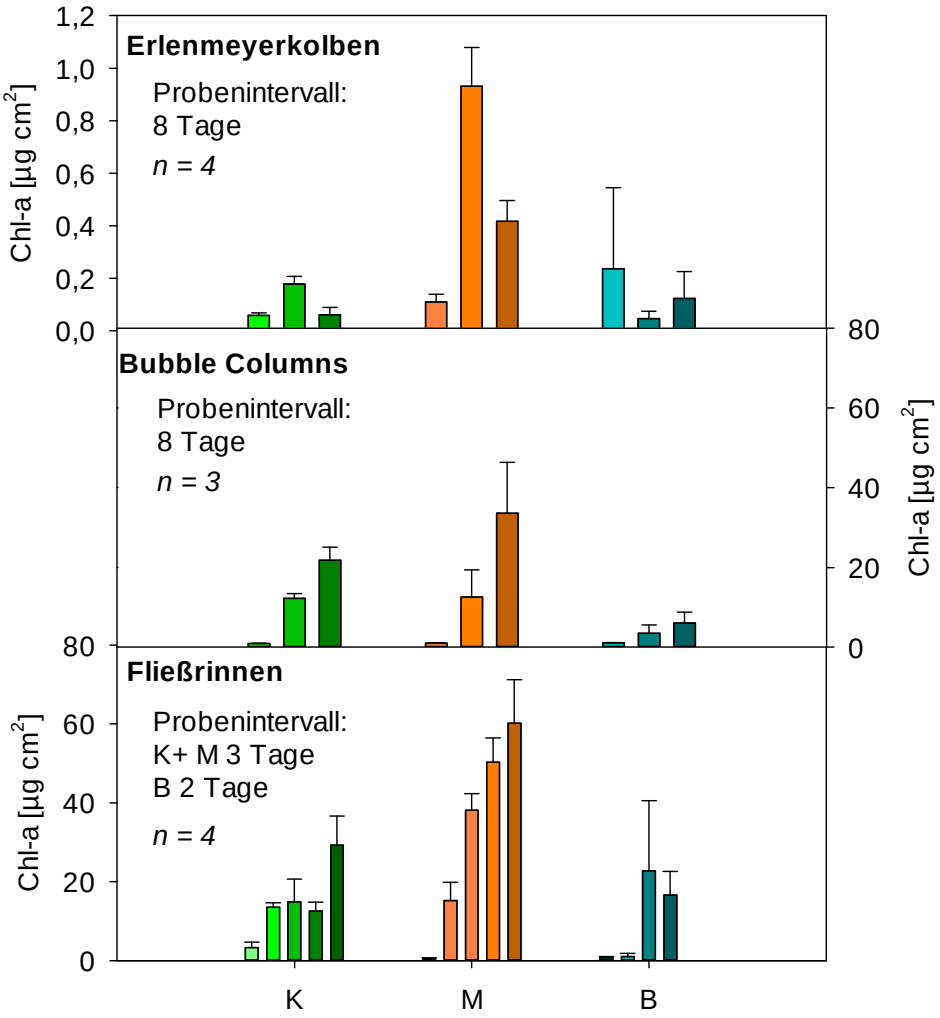

Abbildung 3: Vergleich der Produktion auf bestrahlte Fläche in Erlenmeyerkolben, Bubble Columns und Fließrinnen, Mittelwerte mit Standardabweichung; beachte unterschiedliche y-Skalierung.

Chl-a…Chlorophyll-a Gehalt; n…Anzahl der Proben; K…kommunales Abwasser; M…Molkereiabwasser; B…Brauereiabwasser

Aus den Versuchen kann abgeleitet werden, dass Molkereiabwasser neben kommunalem Abwasser in allen Kultivierungssystemen am besten abschnitt und sowohl das höchste Biomassewachstum (gemessen am Chl-a Gehalt) als auch die effizienteste Phosphorentfernung aufwies. Auch erwies sich eine 1:5 Verdünnung der Abwässer in nicht autoklaviertem Rohabwasser als geeignet, was die großindustrielle Anwendung wesentlich vereinfacht. Von den 3 Kultivierungssystemen zeigten die Fließrinnen vielversprechende Ergebnisse.

Verfahrenstechnik der Algenkultivierung

Kultivierungssysteme von Algen lassen sich einerseits in offene und geschlossene Systeme einteilen und andererseits in Kultivierungssysteme mit suspendierten Kulturen und in jene mit immobilisierten Kulturen unterteilen. Die für die Abwassernutzung in Frage kommenden Systeme sind High Rate Algal Ponds HRAP (offenes System, suspendierte Kultur), Algal Turf Scrubber ATS (offenes System, immobilisierte Kultur) und Photobioreaktoren PBR (geschlossenes System, suspendierte Kultur). Zurzeit gibt es keine großtechnischen Anlagen, die mit Abwasser betrieben werden; vereinzelt finden sich Pilotanlagen von HRAP und ATS Systemen (< 5 m^3).

HRAP sind ovale schleifenförmige Becken mit etwa 30 cm Tiefe, in denen die Durchmischung der Suspension mittels Schaufelrad erfolgt. Dieses System ist das meist genutzte Algenkultivierungssystem in Verbindung mit Abwasserbehandlung (Craggs et al., 2011; Woertz et al., 2009). ATS sind leicht geneigte Fließrinnen, auf denen ein Biofilm bestehend aus Algen, Bakterien, Pilz und anderen Organismen aufwächst und über den kontinuierlich Nährmedium fließt. ATS Systeme können als „Einbahnsystem“ oder mit Rezyklierung des Nährmediums betrieben werden. PBR bestehen aus lichtdurchlässigen Materialien und können tubulär, als Säule oder Platte sowie in horizontaler und vertikaler Konfiguration ausgeführt sein (Chisti, 2007; Ugwu et al., 2007). PBR Systeme werden meist in Kombination mit Glashäusern und Folientunneln gebaut, um eine Temperierung sicherzustellen (Kühlung im Sommer, Beheizung im Winter).

Diese drei Systeme wurden hinsichtlich ihrer Eignung als Kultivierungssystem für den Ausgangsstoff Abwasser qualitativ bewertet (**Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.**).

Tabelle 1: Qualitative Bewertung der Kultivierungssysteme für den Anwendungsfall Abwasser
+…positiv, o…neutral, -…negativ

Parameter	HRAP	ATS	PBR
Prozesskontrolle	-	-	+
Platzbedarf	o	o	+
Energieaufwand	+	+	o
Ernteaufwand	o	+	o
Investitionskosten	o	+	-
Betriebskosten	+	+	-
Scale-up	+	+	-
Praktische Erfahrung	+	-	-
Sauerstoffkonzentration	o	+	-
Kontaminationen	-	-	+

Für Abwasser als Ausgangsstoff sind die einfachen, kostengünstigen Varianten (ATS, HRAP) dem komplexen und teuren PBR System vorzuziehen. Welches der angeführten Systeme für die spezifische Anwendung am besten geeignet ist, hängt unter anderem vom verwendeten Abwasser, der Größe der Anlage, der nachfolgenden Verwertung (Wertstoffe, Bulk-Produkte) und der reellen Umsetzbarkeit ab.

Eine Abtrennung der Algen erfolgt zur Effizienzsteigerung der weiteren Verwertungsschritte meistens in 2 Stufen: eine Aufkonzentrierung der Algensuspension auf 2-7 % Feststoffanteil und eine Eindickung auf 15-25 % Feststoffanteil (Brennan und Owende, 2010).

Die Erntesysteme können eingeteilt werden in chemikalien-basierte (chemische Flockulation), mechanische (Zentrifugation, Filtration, Flotation, Sedimentation, mechanisches Abschaben), elektrische und biologische Abtrennmethoden (Christenson und Sims, 2011). Es kann allerdings keine generelle Aussage getroffen werden, welche dieser Methoden die beste Option für die Abtrennung der Algenbiomasse darstellt.

Die Herausforderungen bei der Algenkultivierung sind vielfältig und müssen für jeden Anwendungsfall getrennt beachtet werden: ausreichende Nährstoffversorgung, Gastransfer und -austausch, Versorgung mit photosynthetisch aktiver Strahlung, Vermeidung von Kontaminationen, Prozesskontrolle, die Standortwahl und die klimatischen Bedingungen des Standortes Österreich, der Landbedarf in der Nähe von Wasser- und Nährstoffressourcen, Scale-up und großtechnische Auslegung und die Downstream-Prozessschritte sind wichtige Punkte, die zu berücksichtigen sind. Abwasser als Ausgangsstoff kann zu weiteren Problemen und Einschränkungen in der Nutzung und Auswahl der Kultivierungssysteme führen (mögliche Probleme: ein bereits vorhandener Mikroorganismenmix verhindert Reinkultur, verringerte bis keine Reinigungsleistung im Winter ohne Beheizung und Beleuchtung, schwankende Abwasserqualitäten erschweren kontinuierliche Prozessführung, Hemmstoffe im Abwasser führen zu Wachstumsminderung).

Basierend auf den geeigneten Abwasserarten in Österreich (Kommunales Abwasser ca. 450 Mio. m^3a^{-1} in Großkläranlagen und Kleinkläranlagen, Brauereiabwasser ca. 2,7-4,5 Mio. m^3a^{-1} und Molkereiabwasser ca. 3,6 Mio. m^3a^{-1}) konnten 4 Anwendungsmöglichkeiten identifiziert werden.

1. *Kommunales Abwasser aus Großkläranlagen (> 1000 EW):* Bei Großkläranlagen ist genügend Abwasser für eine Kultivierung von Algen vorhanden. Weiters können hier Abgas (CO_2-haltig) und Abwärme des BHKW für die Kultivierung von Mikroalgen genutzt werden. Die Algenkultivierung kann innerhalb der Prozesskette integriert werden. In großen Kläranlagen sollte die Algenkultivierung vor der Hauptklärung stattfinden, da die notwendigen Grenzwerte zur Direkteinleitung mit der Algenkultivierung alleine nicht erreicht werden können.

2. *Kommunales Abwasser aus Kleinkläranlagen (< 1000 EW):* Bei Kleinkläranlagen macht die Algenkultivierung nach der ersten Vorreinigungsstufe Sinn. Bei diesen Anlagen ist keine Verwertung des Klärschlammes angedacht, daher wird kein Biogas erzeugt und es entstehen weder Abgas noch Abwärme, die genutzt werden können.

3. *Brauereiabwasser:* In Brauereien können neben Abwasser auch Stoffströme aus dem Brauprozess für die Algenkultivierung genutzt werden (Abwärme und Abgas). Abwärme steht auf Niedertemperaturniveau zur Verfügung, teilweise auch in Form von Abwasser und Abgas. Diese Wärme kann in den Wintermonaten zum Beheizen der Kulturen verwendet werden. Das bei der Wärmeerzeugung entstehende Abgas weist einen hohen CO_2 Gehalt auf und kann ebenfalls für das Algenwachstum verwendet werden. Die Algenkultivierung wird dem Brauereiprozess nachgeschaltet, das vorgereinigte Abwasser wird danach in eine bestehende Abwasserreinigungsanlage geleitet.

4. *Molkereiabwasser:* Ebenso wie bei der Brauerei werden die Algenkultivierung und die Abwasserreinigung direkt nach dem Milchverarbeitungsprozess betrieben und sind als Folgestufe zu sehen. Im Molkereiprozess fällt wenig Abwärme und Abgas an, in manchen Fällen gibt es einen internen Wärmeerzeuger. Diese Stoffströme können wie im Brauereiprozess genutzt werden. Bei Verwendung von Molkereiabwasser ist auf die pH Wert Schwankungen (zwischen 1 und 13) zu achten – eine Neutralisation kann nötig sein.

Verwertungspotential der kultivierten Algenbiomasse

Die Realisierbarkeit möglicher Verwertungswege von Mikroalgenbiomasse, welche auf Abwasser kultiviert wurde, hängt in erster Linie von den rechtlichen Rahmenbedingungen ab (siehe Abbildung 4).

Produkte, die derzeit aus Abwasser generiert werden, wie z.B. Klärschlamm, werden rechtlich als Abfall eingestuft. Daher ist anzunehmen, dass auf Abwasser kultivierte Mikroalgenbiomasse ebenfalls als Abfall eingestuft wird. Das Abfallwirtschaftsgesetz beschreibt Wege, um aus Abfall ein Produkt zu generieren, z.B. könnte in Analogie zu Biodiesel aus Altspeiseöl dieser auch aus Algenöl produziert werden.

Eine weitere Alternative für die Produktion hochwertiger Produkte (z.B. Futtermittel, Lebensmittel) stellt die Verwendung von Prozesswasser („industrielles Nebenprodukt“) aus einem Industrieprozess anstelle von Abwasser dar. Dieses Prozesswasser wird noch nicht als Abwasser bezeichnet. Im Fall der Molkerei wäre dies z.B. die Molke, welche im Prozess noch den rechtlichen Status eines Lebensmittels aufweist.

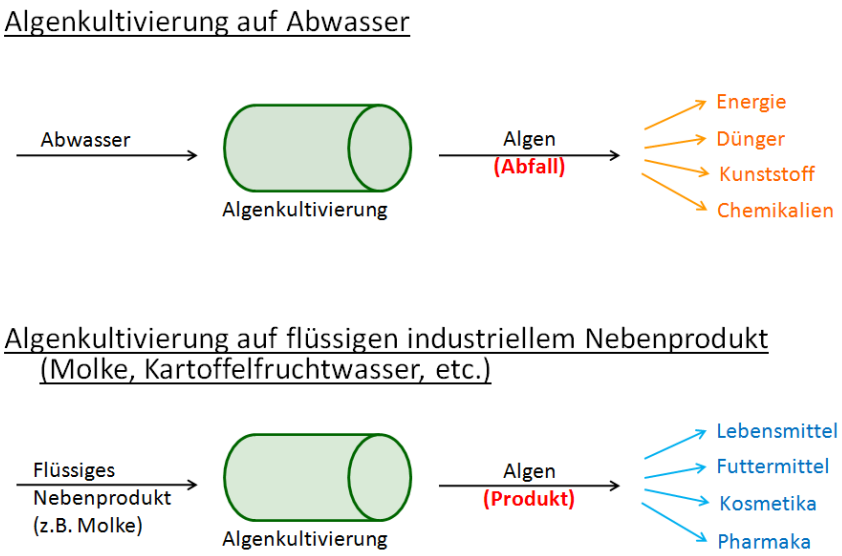

Abbildung 4: Aus rechtlicher Sicht mögliche Verwertungswege abhängig vom rechtlichen Status des „Abwassers“

Abgesehen von den rechtlichen Rahmenbedingungen sind die biotechnologischen Herausforderungen zu berücksichtigen. Für die meisten Verwertungswege (z.B. Algenöl) ist es einerseits notwendig, Mikroalgen möglichst unialgal (eine dominierende Art) zu kultivieren, andererseits ist die Produktausbeute hoch zu halten (z.B. durch gezielte Nährstofflimitierung) - beides ist bei der Kultivierung auf Abwasser eine Herausforderung.

Als energetischer Verwertungsweg ist z.B. die Biogasproduktion interessant, weil weder Reinheit, noch die Detailzusammensetzung der Mikroalgenbiomasse relevant sind, und bei den meisten Kläranlagen ein Faulturm mit Überkapazitäten vorhanden ist. Im Projekt gemessene Methanausbeuten für einzelne Algenstämme sind in Tabelle 2 angegeben. Eine weitere interessante Option der energetischen Nutzung ist die Bereitstellung von Biotreibstoff aus Algenöl, wenn es gelingt, sehr ölreiche Algen auf Abwasser kostengünstig zu kultivieren. Als Umwandlungstechnologien könnten Umesterung zu Biodiesel oder z.B. Fluid Catalytic Cracking (FCC) angewandt werden. In Zukunft könnte auch die hydrothermale Verflüssigung an Bedeutung gewinnen, da die eingesetzte Algenbiomasse einen hohen Wassergehalt aufweisen kann, keine Kultivierung ähnlich einer Reinkultur notwendig ist, und auch die Zusammensetzung der Algenbiomasse eine untergeordnete Rolle spielt.

Tabelle 2: Bestimmung der Methanausbeute unbehandelter Mikroalgen aus unialgaler Anzucht auf Kulturmedium

oTS…organische Trockensubstanz, TS…Trockensubstanz, CSB…Chemischer Sauerstoffbedarf, Anzahl der Replikas n=3

	Pseudomuriella	***Chlorella emersonii***	***Chlorella vulgaris***
$Nm^3\ CH_4\ t^{-1}$ oTS	313	417	241
$Nm^3\ CH_4\ t^{-1}$ TS	264	136	186
$Nm^3\ CH_4\ t^{-1}$ CSB	159	156	146

Auch zur stofflichen Verwertung können Mikroalgen zur Bereitstellung biologischer Produkte eingesetzt werden. Im Falle der Verwendung von Abwasser sind aufgrund der rechtlichen Situation die Anwendungsfelder hier eher im Bereich der verarbeitenden und chemischen Industrie zu sehen. Innovative und spannende Produkte zur stofflichen Verwertung sind in Abbildung 5 dargestellt, wobei diese noch fern eines tatsächlichen Produktionsprozesses sind. Diese sind Faserstoffe, Phenole zur Bereitstellung biologischer Phenolharze für die Holzverarbeitung, Biopolymere für die Biokunststoffherstellung, Wachse, Klebstoffe oder Enzyme. Mikroalgen könnten aber auch als Ausgangsstoffe für Fermentationsprozesse (z.B. ABE-(Aceton-Butanol-Ethanol)-Fermentation) eingesetzt werden, wodurch sich weitere Möglichkeiten ergeben.

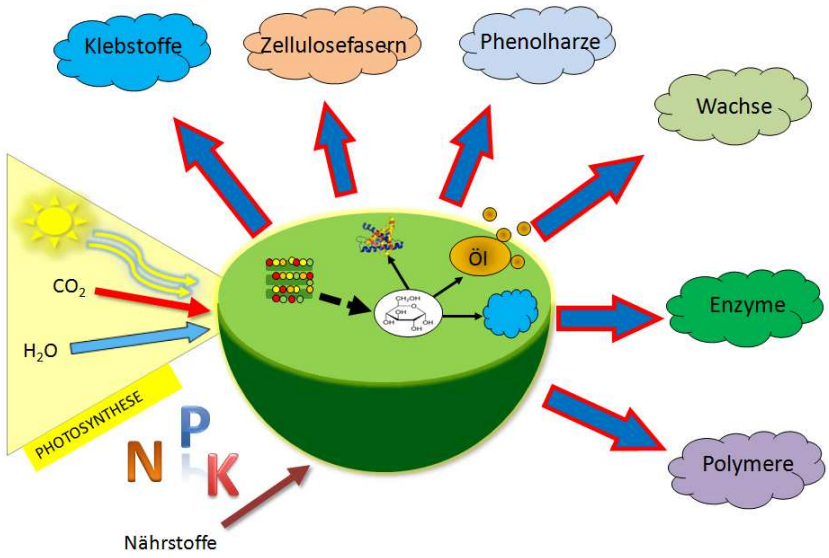

Abbildung 5: Zukünftige potentiell interessante (nicht energetische) Produkte, die in Mikroalgen produziert werden können, welche auf Abwasser kultiviert worden sind

Abschließend lässt sich sagen, dass sowohl die industrielle Kultivierung als auch die Nutzung von Mikroalgen noch in den Kinderschuhen steckt, und obwohl sich hier zahlreiche potentielle Anwendungsfelder auftun, herrscht noch starker Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um potentiell wirtschaftlich interessante Prozesse zu entwickeln.

Perspektiven und Ausblick

Technische Bewertung

Die geeigneten Abwässer (kommunales Abwasser (Großkläranlage, Kleinkläranlage), Brauereiabwasser, Molkereiabwasser) wurden technologisch bewertet.

In Brauereiabwasser sind relativ wenige Nährstoffe enthalten, es kann nur ein geringer Zusatzerlös erzielt werden und für höherwertige Produkte stehen keine flüssigen Restströme, die nicht als Abwasser gekennzeichnet sind, zur Verfügung.

Bei kommunalen Kleinkläranlagen kann kein technologischer und ökonomischer Nutzen aus der Kombination mit einer Mikroalgenkultivierung gewonnen werden. Die Reinigungsleistung durch die Algen ist sehr gering und ein Ernten und die anschließende Verwertung der Biomasse erweist sich als praktisch nicht umsetzbar. Die Kombination mit bereits bestehenden Anlagen erscheint derzeit nicht sinnvoll, es müsste für diese Anlagen eine neuartige Technologie basierend auf Mikroalgen erarbeitet werden.

Im Molkereiprozess macht die Nutzung des Abwassers ökonomisch keinen Sinn, da keine hochwertigen Produkte erzeugt werden können. Hier kann jedoch die Molke als industrieller Reststrom, der noch nicht als Abwasser bezeichnet wird, verwendet werden. Die aus der Molke gewonnene Biomasse kann in einem Bioraffineriekonzept zu hochwertigen Produkten (Futtermittel, Dünger, Kosmetika, Chemikalien, Biokunststoffe, …) weiterverarbeitet und aus den Reststoffen Energie erzeugt werden.

Abwasser aus einer kommunalen Kläranlage besitzt großes Potential zur kombinierten Mikroalgenkultivierung. Dieses Konzept kann in ganz Österreich angewendet werden. Die Verfügbarkeit dieses Abwassers liegt bei mehreren hundert Mio. m^3a^{-1} in ca. 635 Kläranlagen (EW > 2.000; Überreiter et al. 2012) verteilt in Österreich. Das Abwasser weist genügend hohe Nährstoffkonzentrationen auf, ist in großen Mengen in Österreich vorhanden, meist sind genügend freie Flächen im Bereich der Kläranlagen verfügbar und Stoffströme wie Abwärme und Abgas des Blockheizkraftwerkes können genutzt werden. Die Mikroalgenkultivierung dient der Vorreinigung und Biomasseproduktion. Die erzeugte Biomasse kann einer stofflichen und energetischen Verwertung zugeführt werden und bedingt somit zusätzliche Erlöse. Nachteilig sind der hohe Anfall an Klärschlamm und der äußerst hohe Flächenbedarf, wenn man das gesamte Abwasser vorreinigen möchte. Das Konzept ist in Abbildung 6 dargestellt.

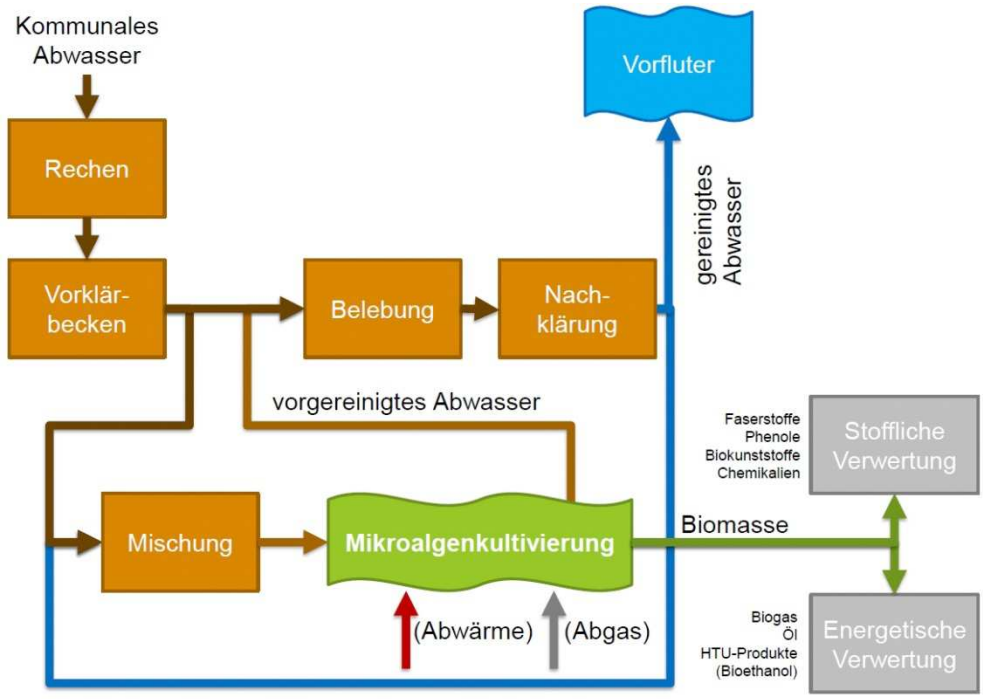

Abbildung 6: Produktionskonzept der kombinierten kommunalen Abwasserreinigung und Mikroalgenkultivierung

Aufgrund der Betrachtung der gesamten Produktionskette wird ersichtlich, dass für Brauereien und Kleinkläranlagen derzeit kein sinnvolles Konzept zur kombinierten Abwasserreinigung und Mikroalgenkultivierung erstellt werden kann. Mögliche Produktionskonzepte sind die kombinierte Abwasserreinigung in kommunalen Kläranlagen mit HRAP oder mit Biofilmproduktion auf ATS Systemen zur stofflichen und energetischen Verwertung. Weitere Nutzungsmöglichkeiten, die innerhalb des Projektes nicht untersucht werden konnten, stellen die Mikroalgenkultivierung auf Molke dar mit einer nachgeschalteten Bioraffinerie oder die Erarbeitung einer neuen Technologie im Bereich der Kleinkläranlagen.

Ökonomische Betrachtung

Die erste Betrachtung und Abschätzung von Kostenfaktoren zeigte, dass die Kombination der Abwasserreinigung und Mikroalgenkultivierung unter den derzeitigen technologischen und rechtlichen Rahmenbedingungen enormes Optimierungspotential aufweist, um wirtschaftlich in großtechnischen Anlagen betrieben werden zu können. Um die ökonomische Umsetzbarkeit bewerten zu können, müssen alle Prozessschritte und deren Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit betrachtet werden. Durch den innovativen Charakter dieser Technologie ist derzeit keine fundierte Datengrundlage zur Kombination der Mikroalgenkultivierung und Abwasserreinigung in Österreich vorhanden und eine detaillierte ökonomische Analyse ist nicht möglich. Es ist zu prüfen, ob eine Technologie- und Prozessoptimierung zu einer wirtschaftlichen Machbarkeit führt oder ob die Produktion von höherwertigen Produkten unumgänglich ist. Für letztere ist die rechtliche Situation zu klären und zu diskutieren. Um diese

Fragen zu beantworten und eine detaillierte wirtschaftliche und ökologische Bewertung vorzunehmen, sind weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten nötig.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich der kombinierten Abwasserreinigung und Mikroalgenkultivierung ist auf mehreren Ebenen gegeben. Neben Laborversuchen und Studien sind vor allem Langzeitversuche in Pilotanlagen essentiell.

Grundlegende Fragen können in Laborversuchen untersucht werden, wie die Definition der Hemmstoffe im Abwasser, geeignete Verdünnungsstufen und Mikroalgenarten, die Biofilmzusammensetzung und stoffliches Verwertungspotential. Zusätzlich müssen weiterführende theoretische Studien und Bewertungen in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit, die Ökobilanz, Treibhausgasauswirkungen, Standortwahl und Deklaration der Biomasse (Abfall oder Wertstoff) durchgeführt werden.

Der Großteil der Forschung kann durch Langzeitversuche an Pilotanlagen gedeckt werden. Innerhalb dieser Versuche werden belastbare und fundierte Daten für weitere Bewertungen, wie Wirtschaftlichkeitsbewertung oder Lebenszyklusanalyse generiert. In den Pilotversuchen werden Einflüsse des Klimas in Österreich und der schwankenden Abwasserqualität sowie die Reinigungsleistung bestimmt. Es können die Kultivierungssysteme auf die Rahmenbedingungen (Abwasserart, Mikroalgenart, Produkt, Ernte) angepasst und hinsichtlich Energiebedarf, Kosten und Technologie optimiert werden. Aussagen zu adäquaten Erntesystemen werden getroffen. Das energetische Verwertungspotential von erfolgversprechenden Pfaden (Biogas, Hydrothermale Konversion) muss genauer bestimmt werden.

Mit den Ergebnissen dieser Forschungsarbeiten, kann die Technologie zur kombinierten Abwasserreinigung und Mikroalgenkultivierung optimiert und weiterentwickelt werden. Auf Basis von zuverlässigen Daten zu Stoff- und Energieströmen aus den beschriebenen Versuchen können eine ökonomische und eine ökologische Bewertung durchgeführt werden. Ausgehend davon kann man den möglichen Zeitpunkt der Umsetzung der Technologie für die industrielle und kommunale Abwasserreinigung abschätzen.

Verzeichnisse

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Mechanismen des Zusammenlebens von Bakterien und Algen (übersetzt aus U.S. DOE, 2010) 5

Abbildung 2: Entscheidende Parameter für die Mikroalgenkultivierung 6

Abbildung 3: Vergleich der Produktion auf bestrahlte Fläche in Erlenmeyerkolben, Bubble Columns und Fließrinnen, Mittelwerte mit Standardabweichung; beachte unterschiedliche y-Skalierung. 9

Tabelle 1: Qualitative Bewertung der Kultivierungssysteme für den Anwendungsfall Abwasser10

Abbildung 4: Aus rechtlicher Sicht mögliche Verwertungswege abhängig vom rechtlichen Status des „Abwassers“..... 13

Tabelle 2: Bestimmung der Methanausbeute unbehandelter Mikroalgen aus unialgaler Anzucht auf Kulturmedium 14

Abbildung 5: Zukünftige potentiell interessante (nicht energetische) Produkte, die in Mikroalgen produziert werden können, welche auf Abwasser kultiviert worden sind..... 15

Abbildung 6: Produktionskonzept der kombinierten kommunalen Abwasserreinigung und Mikroalgenkultivierung 17

Literaturverzeichnis

Brennan 2010

Brennan, Liam; Owende, Philip : *Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 / 557- 577, 2010

Chisti 2007

Chisti, Y. : *Biodiesel from microalge*. Biotechnology Advances 25 / 294 – 306 , 2007

Christenson 2011

Christenson, Logan; Sims, Ronald : *Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts*. Biotechnology Advances 29 /686 – 702 , 2011

Craggs 2011

Craggs, R.J., Park, J., Heubeck, S., Lundquist, T.J., Benemann, J.R. : *Algal biofuels from waste water treatment high rate algal ponds*. Water Science and Technology 63 / 4 / 660 - 665 , 2011

Graham 2009

Graham, L.E.; Graham, J.M.; Wilcox, L.W. *: Algae (2nd edition)*. Pearson Education, San Francisco, California. 2009

Lundquist 2008

Lundquist, Tryg J. *: Production of Algae in Conjunction with Wastewater Treatment.* NREL Air Force Office of Scientific Research joint workshop on algal oil for jet fuel production, 2008

Mata 2010

Mata, Teresa M.; Martins, António A.; Caetano, Nidia S. : *Microalgae for biodiesel production and other applications: A review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 / 217 - 232, 2010

Pulz 2009

Pulz, Otto :*Microalgae – Energy for the Future?* – Vortrag beim Algenstammtisch Amsterdam, 2009

U.S. DOE 2010

U.S. DOE : *National Algal Biofuels Technology Roadmap* . U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2010

Überreiter 2012

Überreiter, Ernst; Lenz, Katharina; Windhofer, Georg; Zierlitz, Irene : *Kommunale Abwasserrichtlinie der EU – 91/271/EWG Österreichischer Bericht 2012*, BMLFUW 2012

Ugwu 2007

Ugwu, C.U., Aoyagi, H., Uchiyama, H.: *Influence of irradiance, dissolved oxygen concentration, and temperature on the growth of Chlorella sorokiniana*. Photosynthetica 45 / 2 / 309 – 311 , 2007

Woertz 2009

Woertz, I., Feffer, A., Lundquist, T., Nelson, Y. : *Algae grown on dairy and municipal wastewater for simultaneous nutrient removal and lipid production for biofuel feedstock*. . Journal of Environmental Engineering 135 / 11 / 1115 - 1122 , 2009

bioenergy2020+

Bericht Nr. 560 TR IK-I-1-87 04
Wieselburg-Land, 31.05.2013

BIOENERGY 2020+ GmbH

Standort Wieselburg
Gewerbepark Haag 3, A 3250 Wieselburg-Land
T +43 (0) 7416 52238-10
F +43 (0) 7416 52238-99
office@bioenergy2020.eu
www.bioenergy2020.eu

Firmensitz Graz
Inffeldgasse 21b, A 8010 Graz