

Nachhaltige aquatische Biomasse: Überblick zu rohstofflichen Verwendun- gen und Überlegungen zu Möglichkeiten und Grenzen der energetischen Nutzung

- Arbeitspapier -

erstellt von

Darmstadt, November 2007

Ines Richter

mit Unterstützung von Kirsten Wiegmann, Uwe R. Fritsche und
Klaus Hennenberg

Öko-Institut, Büro Darmstadt
Bereich Energie & Klimaschutz

Öko-Institut e.V.

Büro Darmstadt
Rheinstraße 95
D-64295 Darmstadt
Tel.: +49-(0)6151 8191-0
Fax: +49-(0)6151 8191-33

Geschäftsstelle Freiburg
Merzhauser Straße 173
D-79100 Freiburg
Tel.: +49-(0)761-452950
Fax: +49-(0)761-475437

Büro Berlin
Novalisstraße 10
D-10115 Berlin
Tel.: +49-(0)30-280486-80
Fax: +49-(0)30-280486-88

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung	1
1 Einleitung	3
2 Nutzung von Makroalgen und Seegräsern	5
2.1 Nutzungsverfahren	5
2.1.1 Ernte aus Wildbeständen von Makroalgen und Seegräsern	5
2.1.2 Kultivierung von Makroalgen	5
2.1.3 Integrierte Anbausysteme	7
2.2 Weltweite Nutzung von Makroalgen	8
3 Rohstoffliche Verwendungen von Makroalgen und Seegräsern	11
3.1 Makroalgen	11
3.2 Seegräser	12
4 Ökologische Konsequenzen der Nutzung aquatischer Biomasse	13
4.1 Wildfang von Makroalgen und Sägeräsern Fehler! Textmarke nicht definiert.	
4.2 Kultivierung von Makroalgen	13
5 Technische Optionen zur energetischen Nutzung aquatischer Biomasse	15
5.1 Vergärung von Makroalgen und Seegräser	16
5.2 Energetische Nutzung von Mikroalgen	18
5.2.1 Pyrolyse	18
5.2.2 Photosynthetische Produktion von Wasserstoff	20
5.2.3 Biogasanlage mit angekoppeltem Photobioreaktor	20
6 Potential der energetischen Nutzung von Makroalgen	21
6.1 Globales Potential von Makroalgen	21
6.2 Regionale Potentiale	25
6.2.1 Deutschland	25
6.2.2 Nordamerika	25
6.2.3 Entwicklungsländer	26
7 Fazit und Forschungsbedarf	27

Anhang	31
A Weitergehende Informationen zu Makroalgengattungen und - arten	31
B Weltweite Produktion von Makroalgen	33
C Rechtslage in Deutschland	33
D Artenliste vegetativ vermehrbare Rotalgen	35
E Detailinformationen zur Rotalgenkultivierung	38
Produktivitäten	38
Kultivierungsgebiete	40
<i>Chile</i>	40
<i>Peru und Brasilien</i>	43
<i>Tansania</i>	46
<i>Indien</i>	48
<i>Malaysia</i>	51
<i>Indonesien und Pazifische Inseln</i>	51
Ökologische Konsequenzen	52
F Bereitstellungsketten für die energetische Umwandlung von Makroalgen	55
Literatur	57
Abkürzungen	63

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Rangliste der Länder mit den meistproduzierten Makroalgenarten im Jahr 2001.....	10
Tabelle 2	Verwendung von Makroalgen und deren Inhaltstoffen.....	11
Tabelle 3	Kultivierte Makroalpengattungen und zugehörige Nutzungen.	12
Tabelle 4	Heizwerte von Makroalgen und verschiedener Biomassearten	15
Tabelle 5	Weltweite Biomasseertrag, Heizwert und Energieertrag (Methan aus Fermentation) für Makroalgen bei drei verschiedenen Produktivitäten.....	23
Tabelle 6	Beispielhafte Abschätzung der Aussichten einer energetischen Makroalgenutzung in Entwicklungsländern anhand der vorhandenen Rohstoffmärkte.	26
Tabelle 7	Weltweite Produktion von Makroalgen aus Wildfang und Aquakultur in Tonnen Frischgewicht im Jahr 2000.	33
Tabelle 8	Bedeutende Rotalgenarten mit vegetativer Vermehrung in Afrika.....	35
Tabelle 9	Bedeutende Rotalgenarten mit vegetativer Vermehrung in Zentral- und Südamerika.	36
Tabelle 10	Bedeutende Rotalgenarten mit vegetativer Vermehrung in Asien	37
Tabelle 11	Übersicht der Produktivitäten von Rotalgen in Chile, Brasilien, Peru, Tansania, Indien, Malaysia, Indonesien, China und Samoa	40
Tabelle 12	Ökonomisch wichtige Makroalgen in Chile und deren Verwertung.....	41
Tabelle 13	Verwertung der bedeutenden Makroalgen in Tansania	47
Tabelle 14	Ökonomisch wichtige Makroalgen und deren Bestand in Indien.	50

Abbildungsverzeichnis

Bild 1	Weltweite Produktion von Makroalgen aus Wildbeständen und aus Kultivierung im Jahr 2000.	8
Bild 2	Erträge aus Wildbeständen und Aquakultur von Fisch und Makroalgen im Jahr 2000.	9
Bild 3	Makroalgenertrag aus Wildbeständen und aus Aquakultur.	9
Bild 4	Netto-Primärproduktion von Makroalgen, verschiedenen Waldtypen, Kultur- und Grasländern.	16
Bild 5	Energetische Nutzungsoptionen aquatischer Biomasse.	18
Bild 6	Vorhandene Flächen an Land und im Ozean.	22
Bild 7	Potenzieller Energieertrag aus Makroalgen.	24
Bild 8	Wichtige Parameter zur energetischen Makroalgenutzung.	28
Bild 9	Regionen Chiles mit zugehöriger Rotalgenernte im Jahr 2004.	43
Bild 10	Bestände von Makroalgen an der peruanischen Küste.	45
Bild 11	Übersicht der verschiedenen Kultivierungsgebiete in Tansania.	48
Bild 12	Übersicht der Kultivierungsgebiete in Indien.	49
Bild 13	Bereitstellungskette von der Produktion der Makroalgen bis zur Bereitstellung der Endenergie (grau unterlegte Flächen: Energieträger; nicht unterlegte Flächen: Umwandlungsprozesse).	55

Vorwort und Danksagung

Die Erneuerbaren Energien sind ein wichtige Bausteine für Klimaschutz und Versorgungssicherheit, für die anspruchsvolle politische Ziele vorgegeben wurden: Bis 2010 werden in Deutschland mindestens 12,5 % Strom und mindestens 4,2 % Primärenergie aus Erneuerbaren Energien angestrebt. Im Jahr 2020 sollen dann mindestens 25% des Stroms aus Erneuerbaren Energien erzeugt werden. Auch *global* werden die Erneuerbaren als wichtiger – und stark steigender – Beitrag zum globalen Klimaschutz und zur nachhaltigen Entwicklung gerade auch für Entwicklungs- und Schwellenländer diskutiert.

Neben Erdwärme, Sonne, Wasserkraft und Wind ist insbesondere die *Biomasse* sowohl national wie auch EU-weit und global von großer Bedeutung. Von ihr werden künftig hohe Potenziale für die regenerative Energiebereitstellung und damit ein deutlicher Ausbau erwartet. Diese Hoffnungen werden sich aber nur erfüllen, wenn *bereits heute* durch Forschung und Investitionen die Innovationen angestoßen werden, durch die die Biomasse künftig wettbewerbsfähig wird.

Für eine nachhaltige Energiezukunft ist aber nicht nur der beschleunigte Ausbau wichtig, er muss auch *ökologisch und ökonomisch* verträglich sein, denn Biomasseerzeugung kann sich erheblich auf die Landnutzung auswirken.

Das Bundesumweltministerium förderte deshalb mit einer Laufzeit von drei Jahren das Forschungsprojekt „Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse“ unter Federführung des Öko-Instituts, das Ende 2004 mit einer Buchveröffentlichung und einer englischen Broschüre abgeschlossen wurde (ÖKO 2004).

Verschiedene Folgevorhaben betreffen Datenaktualisierung und -erweiterung, Übertragung der Ergebnisse auf regionale¹ und die europäische² Ebene sowie globale³ Fragen.

Weiterhin werden im Rahmen von Nachfolgearbeiten auch die *Fragen des Naturschutzes*⁴ vertieft untersucht.

Bioenergie sowie parallel die (roh)stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe stellen Themen dar, an denen ein stark wachsendes Interesse nicht nur auf der Forschungsseite zu konstatieren ist, sondern auch im politischen Raum.

1 www.bioregio.info

2 siehe www.oeko.de/service/bio für eine Übersicht zu den Studien des Öko-Instituts

3 Vgl. ÖKO (2005) und Arbeiten des Öko-Instituts zur IEA Bioenergy Task 40 (Sustainable International Biomass Trade) und zur WWI/GTZ-Global-Biofuels-Studie (i.A. des BMVEL)

4 Öko-Institut: „Bioenergie und Naturschutz: Sind Synergien durch die Energienutzung von Landschaftspflegereisten möglich?“, in Kooperation mit IE Leipzig, ALW und TU Berlin (W.Peters); Endbericht zum BMU-Vorhaben FZK 0327537;; Darmstadt
http://www.oeko.de/service/naturschutz/Dateien/endbericht_bioenergie_und_naturschutz.pdf

Eine der wesentlichen Fragen dabei ist stets: Was ist *nachhaltige Nutzung* – d. h. welche Chancen (Potenziale, Technologien, Kosten, Beschäftigung) und welche Restriktionen (Landnutzung, Naturschutz, Biodiversität usw.) gibt es?

Die vorstehend kurz skizzierten bisherigen und laufenden Arbeiten zum Thema „Nachhaltige Biomasse“ betreffen jedoch *allein terrestrische* Biomasse, also die auf dem *Festland* mögliche Bereitstellung und Nutzung.

Eingedenk der genannten Entwicklungen ist zumindest perspektivisch zu fragen, welche Möglichkeiten und Grenzen die nachhaltige *energetische* Nutzung von *aquatischer* Biomasse haben kann.

Unter der Perspektive einer globalen Energiewende ist zu erwarten, dass künftig auch aquatische biogene Ressourcen in Richtung Energiebereitstellung neu bewertet werden. Daher erscheint es nötig, *schon heute* die Frage der ökologischen Risiken und Nachhaltigkeitskriterien und gleichzeitig die Chancen aquatischer Bioenergie zu thematisieren. Das vorliegende Arbeitspapier ist als erster Beitrag zu verstehen, diese Diskussion in Deutschland zu beginnen.

Wir danken der Autorin Ines Richter, die das Papier im Rahmen eines einjährigen Praktikums am Öko-Institut und einem nachfolgenden Werkvertrag im Rahmen eines vom BMU geförderten Forschungsprojekts erstellte und hierzu erstmalig im deutschen Sprachraum den Stand und die möglichen Perspektiven aquatischer Biomasse recherchierte. Unser Dank gilt auch den TeilnehmerInnen an einem Expertenworkshop zum Thema „Aquatische Biomasse“, der am 11.8.2005 in Berlin von uns veranstaltet wurde.

Das Öko-Institut wird die begonnenen Arbeiten insbesondere unter dem Aspekt der globalen Fragen aquatischer Biomasse fortsetzen. Wir hoffen, mit dem vorliegenden Arbeitspapier eine Diskussion dieses recht neuen Themas anregen zu können und freuen uns über Rückmeldungen.

Darmstadt/Berlin, im November 2007

Uwe R. Fritsche, Kirsten Wiegmann und Klaus Hennenberg

1 Einleitung

Die Nutzung aquatischer Biomasse⁵ im *stofflichen* Bereich ist global auf dem Vormarsch, von Algen für Kosmetik, Medizin etc. bis hin zum Fischfang. Parallel bzw. alternativ hierzu wäre auch die *energetische* Nutzung aquatischer Biomasse denkbar.

Diese Option wird bisher allerdings (noch) nicht von potentiellen Akteuren in Politik und Wirtschaft diskutiert. Zudem ist das Potenzial für eine nachhaltige Bereitstellung aquatischer Biomasse kaum erforscht, u. a. da Konzepte zur Energienutzung aquatischer Biomasse vergleichsweise jung sind (seit den 1970er Jahren) und die Technologieentwicklungen bisher nicht über die Pilotphase hinaus gedungen sind..

Obwohl rund 75 % der Erdoberfläche vom Meer bedeckt sind und die Netto-Primärproduktion in den Ozeanen pro Jahr gut 500 Milliarden t Kohlenstoff beträgt, wird nur ein sehr geringer Teil von etwas 0.02 % (100 Millionen t) dieser Produktion durch die Fischerei und noch geringere Mengen für andere Anwendungen (Kosmetik, Pharmazie usw.) direkt genutzt⁶.

Eingedenk, dass von der vorhandenen Landfläche künftig lediglich 3-5 % für den Anbau von Energiepflanzen zur Verfügung stehen (ÖKO 2005), wird deutlich, dass der aquatischen Biomasse *potenziell* eine hohe Bedeutung zur zukünftigen Energiebereitstellung zukommen kann.

Aquatische Biomasse teilt sich auf in Makro- sowie Mikroalgen und Seegräser.

Für die Gruppe der *Makroalgen* ca. 18 000 Arten weltweit bekannt, die sich weiter unterteilen lassen in Grünalgen (*Chlorophyta*), Braunalgen (*Phaeophyta*) und Rotalgen (*Rhodophyta*). Makroalgen zeichnen sich durch einen hohen Differenzierungsgrad aus, bei dem die sich multiseriell teilenden Zellen in einem Gewebeverband verbunden bleiben. Es bilden sich die den Organen der höheren Pflanzen (Wurzel, Sproß und Blatt) analog Rhizoide, Cauloide und Phylloide. Für ihr Wachstum benötigen Makroalgen sowohl Anheftungssubstrat als auch Licht. Natürliche Bestände kommen daher lediglich in der euphotischen

⁵ Im Rahmen dieses Berichts umfasst der Begriff „aquatischer Biomasse“ lediglich pflanzliche Komponenten als Primärproduzenten. Unterteilt wird dabei die aquatische Biomasse in die Gruppen der Mikroalgen, der Makroalgen und der Seegräser. Tierische Komponenten einschließlich des Zooplanktons werden nicht berücksichtigt.

⁶ Die Bestände und Potenziale von Süßwasserbiomasse werden in diesem Arbeitspapier vernachlässigt. Zwar könnten eutrophierte Süßwasserseen (z.B. Viktoriasee, Laguna Fuquena oder Balaton) mit Hilfe von Algen saniert und die anfallende Biomasse als Reststoff genutzt werden (siehe auch <http://www.aquaflowgroup.com/> und <http://www.scoop.co.nz/stories/SC0612/S00039.htm>), jedoch sind die Probleme bei der Kultivierung und Ernte von z. B. Makroalgen in Süßwasser voraussichtlich weit aus größer als im Ozean.

Zone⁷ vor und sind auf das Inter- und Subtidal⁸ beschränkt. Meist wachsen sie in felsigen Gebieten, Korallenriffs oder Ästuaren (vgl. Anhang A).

Im Gegensatz zu Makroalgen weisen *Mikroalgen* eine geringere Organisationsstruktur auf (Einzeller bis hin zu Zellverbänden) und kommen im Meer sowohl schwimmend als auch festsitzend vor. Sie sind daher in der Lage, sowohl Küstengewässer als auch offene Meere als Phytoplankton zu besiedeln, wo sie zu einem großen Teil zur Primärproduktion beitragen.

Seegräser, die taxonomisch zu den Blütenpflanzen (Angiospermien) gehören, benötigen zum Wachstum Anheftungssubstrat und Licht. Sie kommen in den Flachwasserbereichen der Ozeane vor und sind Weltweit in fast allen Küstengebieten zu finden. Lediglich in Regionen mit hoher Brandung und starker Sedimentaufmischung oder mit geringer Salinität kommen Seegräser nicht vor. Die Zahl der weltweit vorkommenden Arten liegt mit knapp 60 Arten aber deutlich niedriger als die der Makroalgen. Seegraswiesen⁹, wie auch Makroalgenbestände, haben im Ökosystem Meer eine bedeutende Funktion. So sind diese Lebensgemeinschaften effektive „biologische Filter“ und dienen als Kinderstube vieler Fischarten oder anderer Organismen (Piker 2001). Seegräser tragen außerdem zur Stabilität von Sand- oder Sedimentbänken bei und erfüllen zahlreiche weitere wichtige ökologische Funktionen (Wagner 2002).

Die oben genannten relativ geringen Mengen an genutzter aquatischer Biomasse dürfen aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass jede Nutzung aquatischer Biomasse in die natürlichen Nahrungsketten eingreift und die marinen Lebensräume je nach Art ihrer Bewirtschaftung stark beeinflusst werden können. Ozeane sind ein bedeutender und komplexer Lebens- und Wirtschaftsraum, der aufgrund der global steigenden Bevölkerung immer stärker genutzt wird.

Ozeane sind zudem meist als sensible Ökosysteme einzuordnen, die bereits heute „unter Druck“ stehen und für die im Vergleich zu Ökosystemen auf dem Festland noch wenige ökosystematische Kenntnisse vorliegen. In diesem Kontext ist es außerdem sinnvoll, die Kopplungen zu Fragen der *Aquakultur* und der *Fischerei* zu berücksichtigen, da – ähnlich wie bei der terrestrischen Biomasse – auch hier Fragen von Nutzungskonkurrenzen und Synergien relevant sind¹⁰.

⁷ Obere lichtdurchflutete Zone der Wassersäule, in der Photosynthese möglich ist. Sie kann zwischen 30 und 200 m tief sein kann.

⁸ Das Intertidal ist die Fläche im Küstenbereich, die im Laufe der Gezeiten teilweise mit Wasser beflutet wird und teilweise trocken fällt. Das Subtidal dagegen ist ständig von Wasser bedeckt.

⁹ Eine der größten Seegraswiesen liegt südlich von Florida und hat eine Ausdehnung von ca. 5500 km².

¹⁰ An Land schafft Bioenergie Einkommensalternativen für die in Landwirtschaft, indem anstelle von „cash crops“ nun „energy crops“ angebaut werden – mit der Option, insgesamt nachhaltiger zu wirtschaften. Diese Grundfigur ließe sich in angepasster Form auch auf aquatische Biomasse übertragen: Die Küstentischerei stellt auf nachhaltige Algenproduktion für Energie (und Rohstoffe) um, die Hochseefischerei konzentriert sich auf nachhaltiges Bestandsmanagement. Dies ist jedoch nur als Grundüberlegung zu verstehen und noch nicht als „Programm“.

Um einen Beitrag zur Diskussion der energetischen Nutzung aquatischer Biomasse zu leisten, werden im Rahmen dieses Arbeitspapiers drei Ziele verfolgt:

1. die Darstellung der aktuellen stofflichen Nutzung aquatischer Biomasse (Kapitel 2 – Kapitel 3),
2. eine Einschätzung der ökologischen Konsequenzen der Nutzung aquatischer Biomasse (Kapitel 4) und
3. eine Einschätzung der technischen Möglichkeiten und der weltweiten Potentiale einer energetischen Nutzung aquatischer Biomasse (Kapitel 5 und 6).

2 Nutzung von Makroalgen und Seegräsern

Weltweit wird die Nutzung aquatischer Biomasse (ohne Fischfang und -zucht) durch die Nutzung von Makroalgen dominiert. Mengenmäßig lag sie im Jahr 2000 bei knapp 11,2 Mio. t (vgl. Anhang B). Im Vergleich hierzu spielten die Nutzung von Seegräsern mit 1,3 Mio. t¹¹ eine untergeordnete und die Nutzung von Mikroalgen mit weniger als 10 000 t¹² eine vernachlässigbare Rolle. Entsprechend wird auf eine Betrachtung der Mikroalgen an dieser Stelle verzichtet.

In diesem Kapitel werden zu erst Nutzungsverfahren für Makroalgen und Seegräser betrachtet (Kapitel 2.1) und anschließend die weltweite Nutzung von Makroalgen dargestellt (Kapitel 2.2).

2.1 Nutzungsverfahren

2.1.1 Ernte aus Wildbeständen von Makroalgen und Seegräsern

Makroalgen oder Seegräser können entweder aus Wildbeständen im Ozean geerntet oder kultiviert werden. Im Falle der Makroalgen werden beträchtliche Mengen am Strand aufgesammelt oder aus Wildbeständen abgeerntet (Wildfang). Im letzteren Fall kommt es allerdings häufig zum Abriss von Anheftungssubstrat, wodurch das Ökosystem leidet (Piker 2001). Seegräsern hingegen werden hauptsächlich aus Strandanwürfe verwendet (Wagner 2002). Die Ernte von Seegräsern aus Wildbeständen erscheint unwahrscheinlich und ist aufgrund zu erwartender immenser ökologischer Konsequenzen auch nicht vertretbar.

2.1.2 Kultivierung von Makroalgen

Da es bislang keine Kultivierungsansätze für Seegräser gibt, stammen Seegräser fast ausschließlich aus Wildbeständen (siehe Kapitel 2.1.1). Für die Makro-

¹¹ <http://www.biologie.uni-rostock.de/oekologie/literature/RMB/RMB-15/RMB-Band-15-Schories-et-al-Nutzung-87-104.pdf>

¹² <http://www.kraftstoff-info.de/Default.aspx?PageName=NewsViewer&NewsOID=368e397e-7be2-4885-a713-2232d5dc4fc9&ListPageOID=11111111-1111-1111-1111-111111111111&AspxAutoDetectCookieSupport=1>

algenkultivierung hingegen gibt es verschiedene Kultivierungsmethoden. Dabei wird einerseits zwischen der Anbauoption unterschieden (*extensiv* oder *intensiv*) und andererseits zwischen der Art der Vermehrung (*sexuell* oder *vegetativ*). Im Hinblick auf rechtliche Rahmenbedingungen zur Kultivierung von Makroalgen sind beispielhaft die Bedingungen in Deutschland in Anhang C zusammengestellt.

2.1.2.1 Extensive und intensive Kultivierung von Makroalgen

Bei *extensiven* Kultivierungsmethoden werden großflächig Makroalgen im Ozean gezüchtet, ohne dass ein hoher Aufwand an Maßnahmen notwendig ist. Dabei werden die Makroalgen an in der Wassersäule liegende Anheftungsmedien (Netzen, Gestellen oder Kulturleinen) befestigt. Die Vermehrung erfolgt über Setzlinge aus meist vegetativer Vermehrung. Die Kultivierungsperiode und Dauer unterscheidet sich dabei je nach Anbauort und Anbauart. Derzeit wird der Großteil der weltweit genutzten Makroalgenbiomasse in solchen Algenfarmen produziert (vgl. Kapitel 2.2). Besonders in ärmeren Ländern wird dieser Ansatz bevorzugt, da er relativ einfach und mit relativ wenig Mitteln durchgeführt werden kann.

Bei der *intensiven Makroalgenkultivierung* wird deutlich mehr Ausrüstung, Personal und Know-How benötigt. Die Kultivierung erfolgt in großen Beckenanlagen oder auch in Photobioreaktoren¹³, wobei ein erheblicher Aufwand für Wasserdurchmischung, Temperaturkontrolle, Wasseraustausch, Düngung, Epiphytenkontrolle¹⁴ etc. notwendig ist. Zudem kann die terrestrische Installation zur intensiven Makroalgenkultivierung in direkter Flächenkonkurrenz zum Anbau von Landpflanzen stehen. Da bei den intensiven Anbauoptionen nicht nur genaue Kenntnisse zu den angebauten Arten und deren Biologie notwendig sind, spielt der Kostenfaktor eine große Rolle. Oftmals sind die Kosten durch die aufwändige Laborkultivierung sehr hoch und stellt sich nur als wirtschaftlich dar, wenn auf dem Markt genügend hohe Preise für die Algen erzielt werden können. Weitere Nachteile ergeben sich aus der Kontaminationsgefahr, die zu Zusammenbrüchen von Kulturen führen kann (Werner et al. 2004).

2.1.2.2 Sexuelle und vegetative Vermehrung von Makroalgen

Einige der Makroalgenarten (z.B. *Laminaria*, *Undaria*, *Porphyra*) können lediglich durch *sexuelle* Vermehrung kultiviert werden. In den letzten Jahren konnte die Aquakultur von Makroalgen mit sexueller Reproduktion enorme Fortschritte verzeichnen. Teilweise konnten neue Stämme gefunden werden, die besonders vorteilhaft für die sexuelle Kultivierung sind. Jedoch ist mit dieser Art der Kultivierung immer ein hoher Kosten- und Energieaufwand verbunden, der durch die Vorkultivierung im Labor zustande kommt.

¹³ Geschlossene Bottiche, in denen die Kulturbedingungen von außen kontrolliert werden.

¹⁴ Epiphyten sind Bewuchspflanzen, die auf lebenden oder abgestorbenen Pflanzen (z.B. Makroalgen) leben, ohne von diesen zu schmarotzen.

Andere Gattungen (z.B. *Eucheuma*, *Kappaphycus* und *Gracilaria*) lassen sich dagegen *vegetativ* vermehren. Hierbei werden Exemplare aus Wildbeständen ausgewählt und ihr Thallus¹⁵ in kleine Teile zerschnitten. Diese Teile werden auf Anheftungsmedien angebracht, an denen sie auswachsen können. Nach der Wachstumsperiode wird geerntet, wobei besonders gut wachsende Exemplare als Mutterpflanzen für die neuerliche Setzlingsproduktion ausgewählt werden. Durch die vegetative Vermehrung können große Mengen an Makroalgen auf relativ einfache Weise gezüchtet werden. Da es jedoch bei dieser Form der Aquakultur keinen genetischen Austausch gibt, können Bestände anfällig für Krankheiten oder andere Umweltfaktoren sein, weshalb kontinuierlich neue Stämme gesucht wird (Werner et al. 2004).

2.1.3 Integrierte Anbausysteme

Die Zucht von Makroalgen – und potentiell ebenso die von Mikroalgen und Seegräsern – kann prinzipiell an die Produktion von Fischen oder anderen Organismen gekoppelt werden. Häufig gehen mit dem Betrieb von Aquakulturen viele ökologische Probleme einher, insbesondere hohe Nährstofffrachten und intensiver Antibiotika Einsatz. Integrierte Systeme bergen das Potential, diese negativen Aspekte zu verringern und Produktionsprozesse zu optimieren (z. B. Nährstoffrecycling), wobei die anfallende Algenbiomasse zudem eine energetische Verwertung finden kann. Ein weiterer Vorteil besteht in der möglichen Vermeidung von Algenmonokulturen. Inwiefern diese integrierten Konzepte einer nachhaltigen Wirtschaftsweise gerecht werden können, ist bis heute nicht abschließend geklärt. Im EU-Projekt SEAPURA¹⁶ mit Projektpartnern aus Spanien, Portugal, Deutschland, Frankreich und Großbritannien wurde beispielsweise die integrierte Polykultur von Rotalgen in verschiedenen Tanksystemen untersucht. In einem weiteren Projekt in Schottland¹⁷ wird erforscht, inwiefern Makroalgen zur Verminderung der Nährstoffflüsse bei der Fischeaquakultur beitragen können. In Nordirland wurde zudem die Verwendung der Makroalgen als Biofilter in der Abwasserbehandlung untersucht¹⁸. Untersuchungen zur integrierten Aquakultur in Deutschland finden z. Z. vor allem an der Universität Kiel¹⁹ aber auch am AWI Bremerhaven²⁰ statt.

¹⁵ Der Thallus ist der vielzellige Vegetationskörper der niederen Pflanzen.

¹⁶ EU-Projekt: Species Diversification and Improvement of Aquatic Production in Seaweeds Purifying Effluents from Integrated Fish Farms, <http://www.seapura.com/>

¹⁷ Scottish Association for Marine Science (SAMS), REDWEED - Reducing the environmental impact of sea-cage fish farming through cultivation of seaweeds, <http://www.sams.ac.uk/research/research.htm>

¹⁸ Queens University Belfast, Marine Laboratory Portaferry, „The use of seaweeds as biofilters for inorganic nutrients and heavy metals in effluent from sewage treatment works“

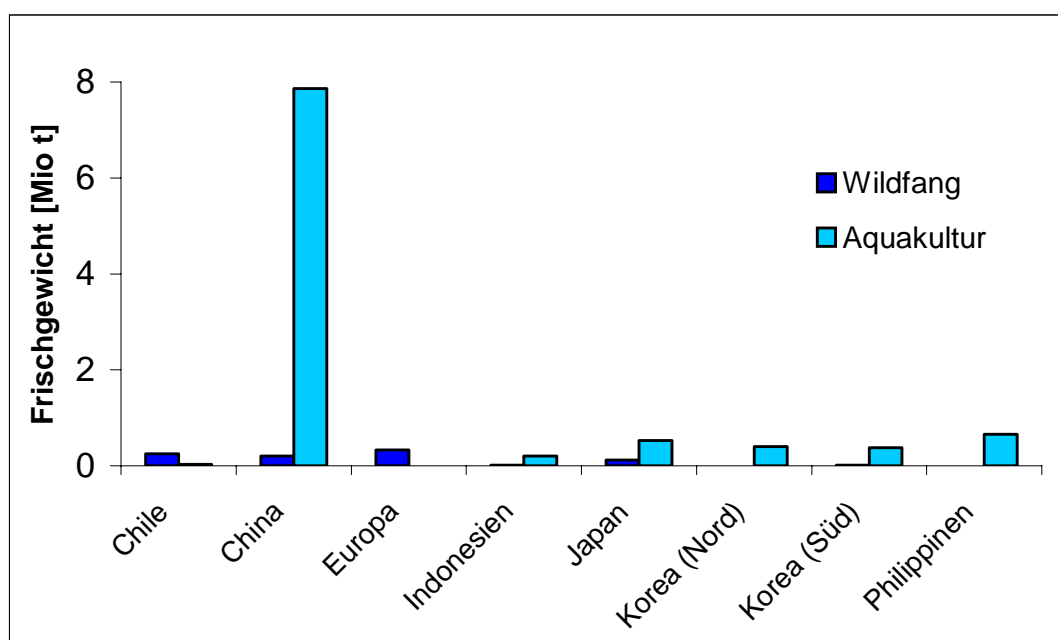
¹⁹ http://www.ifm.uni-kiel.de/allgemein/research/topics/fb3_select/fb3_s6.htm

²⁰ <http://www.algenfarm.de>

2.2 Weltweite Nutzung von Makroalgen

Die weltweite Produktion von Makroalgen ist in Bild 1 getrennt nach der Produktion aus Wildbeständen und der Produktion aus der Kultivierung dargestellt. Während Europa, Chile, China und Japan Makroalgen in ähnlichen Größenordnungen aus Wildbeständen ernten, ist China der Hauptproduzent von kultivierten Makroalgen. Der Markt für Makroalgen ist bislang jedoch wenig transparent und Daten verschiedener Quellen widersprechen sich oftmals. Nach Einschätzung von Piker (2001) kommen die hier dargestellten Daten der FAO den tatsächlichen Mengen höchstwahrscheinlich näher als etwa die Daten der Wirtschaft (z.B. Surialink²¹).

Bild 1 Weltweite Produktion von Makroalgen aus Wildbeständen und aus Kultivierung im Jahr 2000.



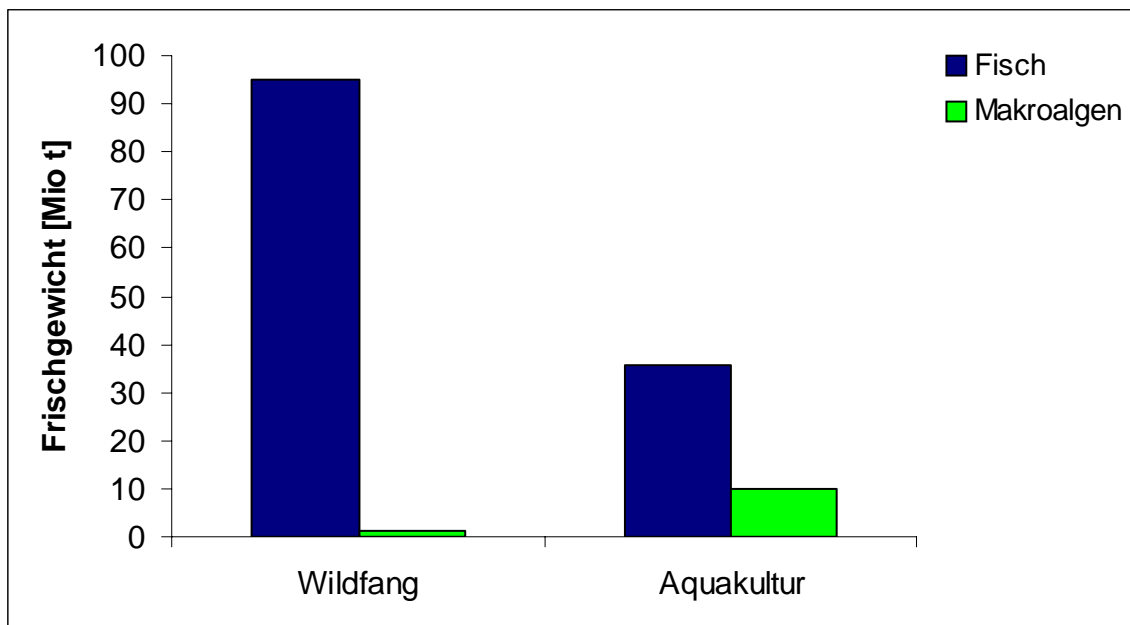
Quelle: Eigene Darstellung, Daten nach FAO (2002) und Werner et al. (2004); vgl. Anhang B.

Zu Einschätzung ihrer Bedeutung ist in Bild 2 ein Vergleich der Makroalgenproduktion mit dem weltweiten Fischfang dargestellt. Zwar machen die aus Wildfang geernteten Makroalgen nur ca. 1,3 % des weltweiten Ertrags des Fischfang aus, jedoch entspricht der Anteil der kultivierten Makroalgen ca. 28 % der Fischproduktion aus Aquakulturen (Werner et al. 2004).

Bereits in den letzten Jahren hat die Produktion an kultivierten Makroalgen – im Gegensatz zum Wildfang – stark zugenommen (Bild 3), und es ist damit zu rechnen, dass sich dieser Trend in Zukunft fortsetzen wird.

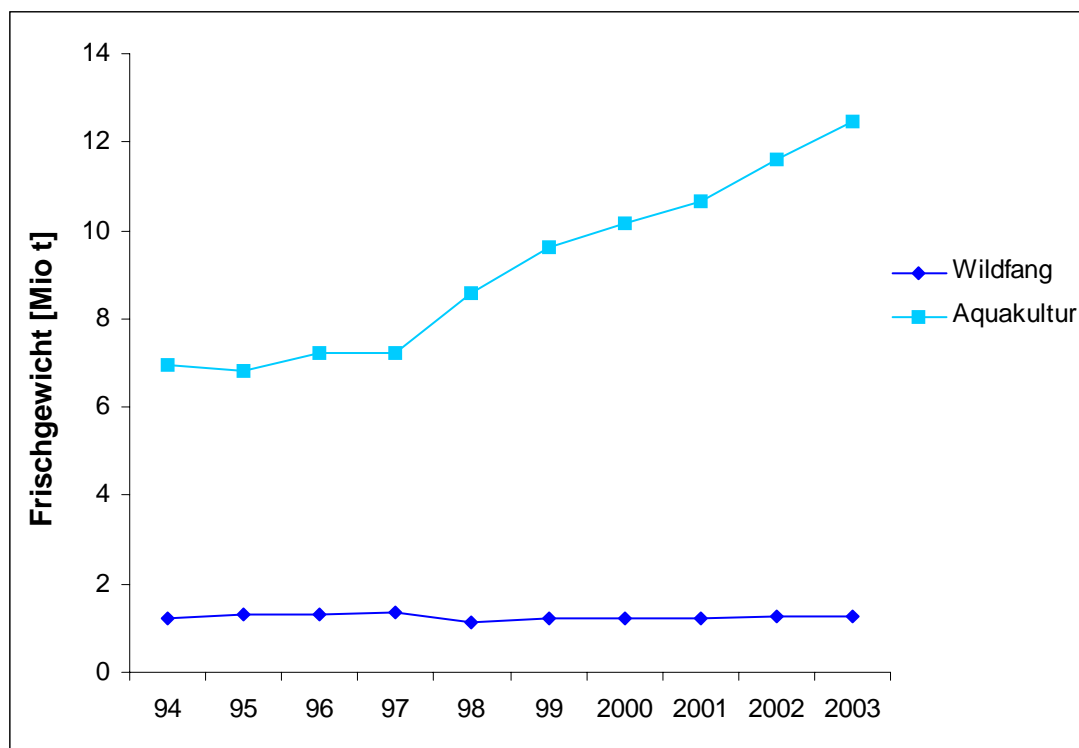
²¹ www.surialink.com

Bild 2 Erträge aus Wildbeständen und Aquakultur von Fisch und Makroalgen im Jahr 2000



Quelle: eigene Darstellung, Daten nach FAO (2002) und Werner et al. (2004)

Bild 3 Makroalgenertrag aus Wildbeständen und aus Aquakultur.



Quelle: Eigene Darstellung, Daten nach FAO (2003b)

Hinsichtlich der weltweit kultivierten Makroalgenarten treten zwischen einzelnen Ländern deutliche Unterschiede auf (Tabelle 1). Verantwortlich dafür sind die verschiedenen Vorlieben der Bevölkerung für den Verzehr bestimmter Algenarten in Asien. In anderen Ländern werden aus wirtschaftlichen Gründen zudem hauptsächlich heimische Arten kultiviert (z.B. Chile). China liegt mit der Produktion von *L. japonica* und mehreren Rotalgen insgesamt sehr deutlich vor anderen Ländern wie den Philippinen oder Japan (vgl. Bild 1).

Tabelle 1 Rangliste der Länder mit den meistproduzierten Makroalgenarten im Jahr 2001.

Platz	Land	Makroalgen aus Aquakultur	Anteil an globaler Aquakulturproduktion
1	China	<i>Laminaria japonica</i> (Kombu), (B)	38 %
		Verschiedene Rotalgen (R)	34 %
		<i>Porphyra</i> (Nori), (R)	5,5 %
2	Philippinen	<i>Kappaphycus alvarezii</i> , (R)	6,3 %
3	Japan	<i>Porphyra</i> (Nori), (R)	3,5 %
4	Nordkorea	<i>Laminaria japonica</i> , (B)	3,3 %
5	Indonesien	Verschiedene Rotalgen (R)	2 %
6	Südkorea	<i>Undaria pinnatifida</i> (Wakame), (B)	1,7 %
		<i>Porphyra</i> (Nori), (R)	1,6%
7	Chile	<i>Gracilaria</i> , (R)	0,6 %

Quelle: eigene Darstellung nach Werner et al. (2004); (B) = Braunalge, (R) = Rotalge

Wie in Tabelle 1 zu sehen kommt der Kultivierung von Arten aus der Gruppe der Rotalgen eine vorrangige Rolle zu. Dieser Situation wird mit Detailinformationen zur Rotalgenkultivierung in Anhang E Rechnung getragen.

3 Rohstoffliche Verwendungen von Makroalgen und Seegräsern

3.1 Makroalgen

Makroalgen besitzen ein breites Nutzungsspektrum und sind in einer Vielzahl an Produkten enthalten, da sie reich an Mineralien, Vitaminen, Spurenelementen und bioaktiven Substanzen sind. In Asien sind sie insbesondere als Nahrungsmittel sehr gefragt, während sie in Europa bislang nur in wenigen Regionen und in geringen Mengen genutzt werden. Weltweit nimmt die Bedeutung von Makroalgen und deren Produkten jedoch kontinuierlich zu.

Während aus Makroalgen der Gruppe der Braun- und Rotalgen eine Vielzahl an Rohstoffen gewonnen werden können, besitzen Grünalgen kaum Algeninhaltsstoffe, die von Bedeutung sind. Besonders die quellfähigen Inhaltsstoffe im Thallus der Braun- und Rotalgen sind von Interesse (Buck 2002). Diese so genannten Phyko- oder Hydrokolloide können hauptsächlich in die drei Stoffgruppen Agar, Carrageenan und Alginat (siehe Tabelle 3) eingeteilt werden und sind z. B. als Verdickungsmittel, Gele, wasserlösliche Filme oder Stabilisatoren verwendbar (Tabelle 2). Makroalgen können aber auch als Nahrungsmittel, Dünger, Tier- und Fischfutter genutzt oder in der integrierten Aquakultur, als Indikatororganismen für Umweltverschmutzungen, als Biofilter in der Fischzucht und der Abwasserbehandlung sowie als Anti-Viren Mittel in der Medizin (z.B. gegen HIV) eingesetzt werden (FAO 2003a, Werner et al. 2004).

Tabelle 2 Verwendung von Makroalgen und deren Inhaltsstoffen

Bereich	Verwendungszweck
Nahrungsmittel-industrie	Gelee, Marmelade, Pudding, Fleischkonserven, Wursthüllen, Diät-nahrung, Speiseeis, Kakaogetränke, Getränke, Mayonnaise, Mar-garine etc.
Textil- und Farb-industrie	Kunstseide, Textildruckfarben, Kunstfaser, Baumaterial, Leim, Foto-industrie, Schaumgummi, Füllmaterial, Papierveredelung, Bindemit-tel in Braunkohlenbriketts, cellophanartige Filme und Folien
Kosmetik- und Pharmaindust-rie	Zahnpasta, Rasierseife, Lippenstifte, Nährböden für die Mikrobiolog-ie, Hautcremes, Salben, Cremes, Hüllsubstanz medizinischer Kapseln, Trenngele der analytischen Chemie, chirurgische Nähfä-den
Weitere Ver-wendungen	Dünger, Tierfutter, Fischfutter, Integrierte Aquakultur, Abwasserbe-handlung

Quelle: Eigene Darstellung nach Buck (2002) und FAO (2003a)

Die stoffliche Verwertung der Makroalgen hängt hauptsächlich von den Inhaltsstoffen der jeweiligen Gattung ab. Tabelle 3 gibt eine Übersicht zu den wichtigsten kultivierten Gattungen und deren Nutzungszweck.

Tabelle 3 Kultivierte Makroalpengattungen und zugehörige Nutzungen.

Klasse	Gattung	Nutzung
Braunalgen	<i>Laminaria</i>	Alginatproduktion , Nahrungsmittel
	<i>Undaria, Cladosiphon</i>	Nahrungsmittel
Rotalgen	<i>Asparogopsis</i>	Medizinische Anwendungen
	<i>Gelidiella, Gelidiopsis, Gelidium, Gracilaria, Pterocladia</i>	Agarproduktion , Nahrungsmittel und medizinische Anwendungen
	<i>Chondrus, Eucheuma, Kappaphycus, Gigartina, Hynea, Iridea, Porphyra</i>	Carageenanproduktion , Nahrungsmittel
	<i>Palmaria</i>	Nahrungsmittel und Pferdefutter
Grünalgen	<i>Monostroma, Enteromorpha</i>	Nahrungsmittel

Quelle: eigene Darstellung nach Werner et al. (2004)

In Deutschland wird die stoffliche Nutzung von Makroalgen bereits am Institut Coastal Research & Management (CRM)²² in Kiel und am Alfred Wegener Institut (AWI)²³ Bremerhaven erforscht. Bislang ist die Nachfrage in der Kosmetik- und Lebensmittelherstellung groß, jedoch ist der Absatzmarkt für Makroalgen in Deutschland eher schwach ausgeprägt. Innerhalb des europäischen Binnenmarktes stammt der Rohstoff Makroalge hauptsächlich aus Frankreich, Italien oder Großbritannien. Das wachsende Interesse an der Makroalgenzucht spiegelt sich aber bereits in der steigenden Zahl an Forschungsprojekten wider.

3.2 Seegräser

Die Gruppe der Seegräser werden – wenn auch bisher mengenmäßig der Nutzung der Makroalgen untergeordnet – hauptsächlich als Dämm- oder Isolierstoff genutzt. Sie können aber auch als Futterzusatz, Polster-, Füll-, Verpackungs-, Filter- und Anstrichstoff oder Dünger verwendet und selbst in der Pharma- oder Kosmetikindustrie eingesetzt werden (Wagner 2002).

²² <http://www.crm-online.de>

²³ <http://www.awi-bremerhaven.de/Biomeer/aquaculture-e.html>

4 Ökologische Konsequenzen der Nutzung aquatischer Biomasse

4.1 Kultivierung von Makroalgen

Zu den ökologischen Konsequenzen der Makroalgenzucht im Ozean gibt es bislang wenige Studien. Es ist jedoch davon auszugehen, dass der Anbau von Makroalgen im Ozean sowohl Vor- als auch Nachteile für das Ökosystem mit sich bringen kann:

- Oftmals kommt es im Bereich der Algenfarmen zu einer Entfernung von Gesteinen oder anderen störenden Hindernissen sowie zu einem verstärkten Betreten der flachen Küstengewässer. Dadurch können die lokalen Lebensgemeinschaften beeinflusst und im schlimmsten Fall sogar sensitive Arten lokal aussterben. Weitere Folgen entstehen durch die großflächigen Farmstrukturen (z.B. Leinen, Bojen etc.). Beispielsweise können örtliche Wasserströmungen verändert werden und zu einer gesteigerten Sedimentation führen, in deren Konsequenz die Gefahr von Artenverdrängungen besteht (UNDP/FAO 1990a).
- Die hohe Aufnahmekapazität der Makroalgen für Nährstoffe kann zu einer Verminderung der Nährstoffkonzentration im Kultivierungsgebiet führen. Negative Einflüsse auf die Phytoplankton Nahrungsketten und damit auch auf die Nährstoffkreisläufe und die Sekundärproduktion sind zu befürchten (UNDP/FAO 1989). In nährstoffarmen Gebieten kommt es im Rahmen einer Kultivierung dagegen oftmals zum Einsatz von Düngern, um die Produktivität zu steigern. Die langfristigen Folgen dieser Düngungsmaßnahmen sind derzeit unklar (UNDP/FAO 1989). Der Forschungsbedarf auf diesen Gebieten ist derzeit als groß einzuschätzen.
- Nach Eklof et al. (im Druck) können Makroalgenfarmen die Benthosgemeinschaften beeinflussen, indem sie Seegräser verdrängen, das gelöste organische Material im Wasser verringern und die Lebensgemeinschaften der Makrofauna verändern.
- Eine weitere Gefahr besteht in der Einschleppung fremder und insbesondere invasiver Arten in das Kultivierungsgebiet, wodurch das lokale Ökosystem immens beeinflusst werden kann (z.B. Einschleppung fremder Krankheiten oder Verdrängung von einheimischen Arten). Auch das selektive Züchten von Makroalgenstämmen kann zu einer erhöhten Konkurrenzfähigkeit dieser Stämme führen, die in Gebieten außerhalb von Kultivierungsgebieten zur Verdrängung von heimischen Arten führen kann. Dieser Problematik wurde bislang jedoch kaum Beachtung geschenkt und der Forschungsbedarf zu diesem Thema ist groß (UNDP/FAO 1990a).
- Bei den intensiven Anbaumethoden kann es zu einem Einsatz von verschiedenen Chemikalien (z.B. Formaldehyd) kommen, die eine mögliche Gefahr für das Ökosystem oder die Farmarbeiter darstellen können (Santelices und

Doty 1989). Es ist daher wichtig sowohl für das Ökosystem als auch die Farmarbeiter unbedenkliche Anbaumethoden zu entwickeln.

- Die Makroalgenkultivierung wird in ärmeren Ländern auch über Korallenriffen, Seegrasbetten oder in Mangrovegebieten angewandt (z.B. in Indonesien oder den Philippinen). Dies wird durch die schlechte Umsetzung der Gesetzeslage und dem geringen Bewusstsein der Bevölkerung für ökologische Schäden gefördert. Als indirekte Schäden durch die Makroalgenkultivierung wurden z. B. in Indonesien die Nutzung von Mangrovenhölzern als Befestigungsstrukturen beschrieben, wodurch benachbarte Mangroven zerstört werden (Mandagi und White unveröff.).
- Farmstrukturen können aber auch der verstärkten Erosion mancher Küstenbereiche entgegenwirken. Außerdem werden den Lebensgemeinschaften mehr Hartsubstrate zur Ansiedlung geboten. Hierdurch kann das Wachstum der marinen Organismen – wie bei künstlichen Riffen – gesteigert werden, insbesondere das der Wirbellosen und Fische. Die Makroalgenkultivierung kann somit zur Regenerierung zerstörter Küstenzonen beitragen oder die Produktivität in unproduktiven Meeresregionen anregen (Ask 1999).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bislang nur sehr wenige Untersuchungen zu den ökologischen Konsequenzen der Makroalgenkultivierung vorhanden sind (siehe zudem weitere Information in Anhang E). Um eine nachhaltige Nutzung von Makroalgen aus dem Ozean sicherzustellen, ist daher eine Intensivierung der Erforschung dieser Zusammenhänge zu fordern.

5 Technische Optionen zur energetischen Nutzung aquatischer Biomasse

Grundsätzlich zeichnet sich aquatische Biomasse durch einen sehr hohen Wassergehalt aus. Im Falle einer thermischen Verwertung würde sich dies aufgrund der dann notwendigen Energie zur Wasserverdampfung energetisch als ungünstig darstellen. Aus diesem Grund ist für die energetische Verwertung von aquatischer Biomasse ein feucht geführter Prozess zu bevorzugen (Bird und Benson 1987). Dabei stellt im Hinblick auf Makroalgen und Seegräsern die Fermentation in Biogasanlagen derzeit den am weitesten entwickelten Prozess dar, für den zeitnah die Entwicklung von anwendungsreifen Anlagen erwartet werden kann. Aus diesem Grund wird in der Kapitel 5.1 die Fermentation von Makroalgen und Seegräsern detailliert betrachtet. Zudem werden in Kapitel 5.2 energetische Nutzungsoptionen für Mikroalgen aufgezeigt.

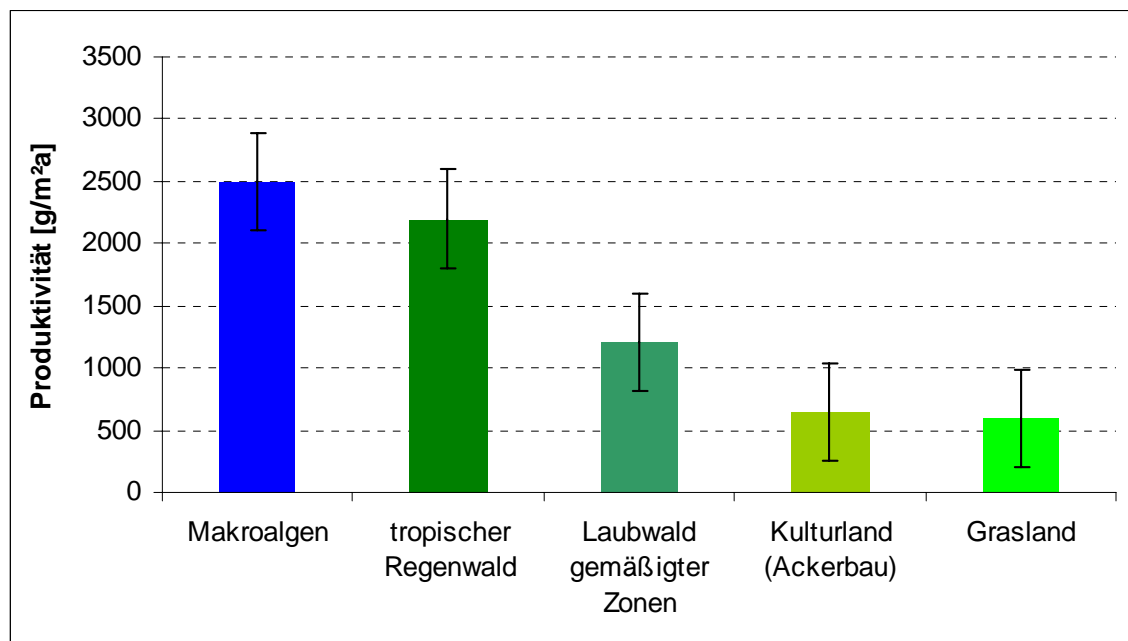
Aus Tabelle 4 ist ersichtlich, dass der Heizwert verschiedener Makroalgen an die Größenordnung terrestrischer Biomasse heranreichen kann. Makroalgen sind außerdem sehr produktiv und können bei günstigen Wachstumsbedingungen die Produktivität von Regenwäldern übertreffen (Bild 4). Diese Werte zeigen, dass Makroalgen ein nennenswertes Potenzial für die Energienutzung aufweisen könnten.

Tabelle 4 Heizwerte von Makroalgen und verschiedener Biomassearten

Marine Makroalgen	Heizwert (MJ/kg Trockenmasse a-schefrei)	Terrestrische Biomasse*	Heizwert (MJ/kg)
<i>Gracilaria</i>	8,98 – 11,13	<i>Waldrestholz</i>	15,6
<i>Laminaria</i>	8,26 – 10,77	<i>Getreidestroh</i>	14,3
<i>Macrocystis</i>	5,03 – 14,36	<i>Getreideganzpflanzen</i>	14,1
<i>Sargassum</i>	2,15 – 6,82	<i>Chinaschilf</i>	14,6
<i>Ulva</i>	11,13	<i>Pappel, Weide</i>	15,4

Quelle: Makroalgen: Chynoweth (2002), *Leitfaden Bioenergie 2005

Bild 4 Netto-Primärproduktion von Makroalgen, verschiedenen Waldtypen, Kultur- und Grasländern



Quelle: eigene Darstellung nach Holdgate (1996)

5.1 Vergärung von Makroalgen und Seegräser

Bei der Fermentation von Makroalgen und Seegräsern werden die organischen Komponenten der Biomasse durch nicht-methanogene und methanogene Bakterien zu den Hauptprodukten Methan und CO_2 umgesetzt. Chynoweth (1987) fand heraus, dass die Mikroorganismen aus Klärschlamm auch bei der Fermentation von mariner Biomasse eingesetzt werden können. Sie müssen lediglich auf einen hohen Salzgehalt adaptiert werden. Um den Gesamtprozess regulieren und kontrollieren zu können, ist es hilfreich, je nach Algensubstrat die besten Fermentationsbedingungen experimentell zu ermitteln (Bird und Benson 1987).

Aufgrund der steigenden Energiepreise in den 1970er Jahren wurden hohe Summen an Forschungsgelder in die Erforschung der Biomethanproduktion investiert. In den USA gab es zwischen 1968 und 1990 einige Forschungsprojekte, die die Fermentation von Makroalgen zu Methan untersuchten (Chynoweth 2002). Jedoch wurden diese Forschungen im Zuge der sich erholenden Öl- und Erdgaspreise wieder eingestellt und es folgten lediglich vereinzelte Workshops, bei denen das Thema diskutiert wurde. Neuere Studien über die vollständige Prozesskette von der Alge bis zur Verwertung gibt es derzeit nicht.

Neben dem hohen Salzgehalt unterscheiden sich Makroalgen von terrestrischer Biomasse auch in ihrer Zusammensetzung. Während terrestrische Pflanzen hauptsächlich aus Zellulose, Hemizellulose und Lignin bestehen, fehlt den Algen das Lignin. Zwar besitzen einige Arten einen geringen Anteil an Zellulose,

die Hauptbestandteile sind jedoch komplexe Polysaccharide wie Algin, Laminarian, Fucoidan, Agar oder Carrageen und Formen von Stärke und Zucker. Zudem besitzen die Makroalgen auch einen Teil an einfachen Speicherprodukten wie Mannitol²⁴, das bei manchen Arten 25% des Trockengewichts ausmachen kann. Im Hinblick auf eine Fermentation handelt es sich also bei Makroalgen um ein leicht zu Methan abbaubares Substrat, für das geringe Verweilzeiten im Fermenter erwartet werden können. Seegräser hingegen ähneln in ihrer Zusammensetzung den terrestrischen Pflanzen und sind im Vergleich zu Makroalgen weniger gut zu Biogas umsetzbar.

Die bei der Fermentierung zurückbleibenden Gärreste können als Nährstoffzusatz beim Makroalgenanbau verwendet werden (Hanisak 1981). Versuche in Schweden, die bei der Fermentation von Makroalgen entstehenden Gärreste als Dünger in der Landwirtschaft zu verwenden, scheiterten allerdings aufgrund des hohen Cadmiumgehaltes des Rückstandes (Linné pers. Mitt.).

Für die thermische Verwertung kommen verschiedene Verfahren in Betracht, wobei die Pyrolyse zu Biodiesel der gängigste Prozess ist (vgl. Kapitel xx).

Bei der thermochemischen (Druck²⁵)Verflüssigung²⁶ entsteht Restwasser, das als Sonderabfall behandelt werden muss. Außerdem ist die notwendige Raffination des produzierten Schweröls teuer und energieaufwändig.

Bei der Vergasung²⁷ ist keine Abwasserbeseitigung nötig, da sie weitgehend teerfreie Gase erzeugt und keine Kondensate anfallen. Allerdings ist die erforderliche Vortrocknung der Biomasse auf Wassergehalte unter 30 % sehr energieaufwendig und führt zu hohen Kosten. Zudem wird das Verfahren noch nicht kommerziell verfügbar. Eine direkte Verbrennung kommt nicht in Frage, da die Mikroalgenbiomasse verschiedene Salze enthält, die zu einer starken Säurebildung im Rauchgas führen und eine aufwändige Abgasreinigung erfordern.

Derzeit kommen für eine energetische Verwertung aufgrund des Entwicklungsstands für Makroalgen und Seegräser vorwiegend die Fermentation zu Biogas und für Mikroalgen die Pyrolyse zu Biokraftstoff oder die anoxygene Photosyn-

²⁴ Mannitol ist ein Zuckeralkohol der Mannose.

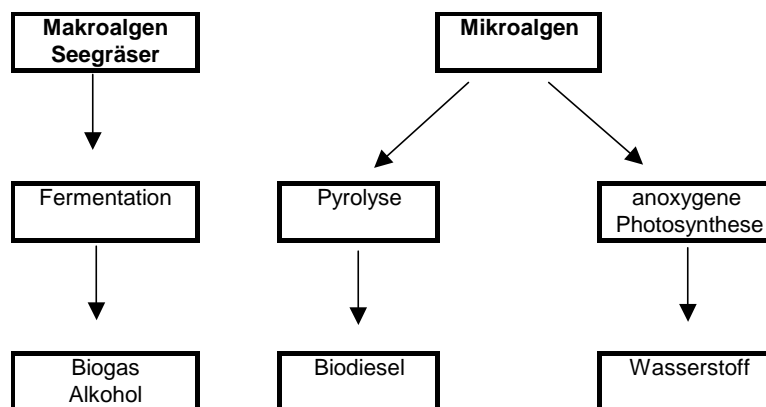
²⁵ Dieses Verfahren läuft analog der Kohleverflüssigung ab. Die Zersetzung ist pyrolytischer Natur und findet unter hohem H₂-Druck und in Gegenwart von Katalysatoren und einem Lösungsmittel statt (Kaltschmitt/Hartmann 2001).

²⁶ Darunter versteht man Verfahren, mit deren Hilfe ein Biobrennstoff über eine Kombination aus Pyrolyse, Vergasung und Oxidation in einen flüssigen Sekundärenergieträger überführt wird (Kaltschmitt und Hartmann 2001).

²⁷ Am weitesten erscheint derzeit das Carbo-V-Verfahren, bei dem die Biomasse ähnlich der Holzkohleherstellung verschwelt und das Schwelgas im Anschluss daran bei Temperaturen > 1000° C verbrannt wird. So entsteht ein sauberes Synthesegas, das sich über die Fischer-Tropsch-Synthese verflüssigen lässt.

these zu Wasserstoff in Frage (Bild 5). In den nachfolgenden Kapiteln (5.1 – 5.2.3) werden diese Techniken weiter ausgeführt.

Bild 5 Energetische Nutzungsoptionen aquatischer Biomasse.



Quelle: eigene Darstellung

5.2 Energetische Nutzung von Mikroalgen

5.2.1 Pyrolyse

Mikroalgen können mittels Pyrolyse in biogene Öle umgewandelt werden.²⁸ Die Pyrolyse ist ein Hochtemperaturprozess, bei dem Biomasse unter Ausschluss von Sauerstoff stark erhitzt und teilweise abgebaut wird. Durch Einwirkung von thermischer Energie werden dabei die makromolekularen Hauptbestandteile der Biomasse größtenteils in niedermolekulare Bruchstücke gespalten (Kaltschmitt und Hartmann 2001).

Die Hauptkomponenten von Mikroalgen sind Proteine, Lipide und Kohlenhydrate (60-80 %), wohingegen die Hauptkomponenten von höheren Pflanzen Hemicellulose, Zellulose und Lignin sind (> 95 %). Durch die Unterschiede in der Biomassezusammensetzung zwischen Mikroalgen und höheren Pflanzen unterscheidet sich auch das aus ihnen gewonnene Öl in den chemischen Klassen und der Elementzusammensetzung (Miao et al. 2004). Da die Pyrolyse selbst beim Einsatz terrestrischer Biomasse bislang nicht wirtschaftlich machbar ist, ist dies auch nicht für Makroalgen und Seegräser zu erwarten. Zudem ist damit zu rechnen, dass bei der Verwendung von Mikroalgen zusätzliche Probleme auftreten, die zu erhöhten Gesamtkosten führen können. Vor allem die Ernte und Vorbehandlung (Zentrifugieren, Waschen, Gefriertrocknen, Mörsern etc.) ist aufwändig und treibt die Kosten in die Höhe. Weiterhin sind für die gewonnenen Produkte schlechter Qualitäten zu erwarten und müssen chemisch weiter be-

²⁸ <http://www.aquaflowgroup.com/> und <http://www.scoop.co.nz/stories/SC0612/S00039.htm>: Weltweit erste Biokraftstoffherstellung auf Basis von Algenbiomasse.

handelt werden (z. B. Raffinierung). Die vergleichsweise geringen Ausbeuten (ca. 20%) führen zu hohen Abwassermengen, die Teerkondensate enthalten und daher aufwendig gereinigt werden müssen.

Dennoch wird diese Möglichkeit in China untersucht. Bei Versuchen in China hat man z. B. festgestellt, dass der Lipidgehalt der Zellen und damit die Bio-Öl Ausbeute bei heterotrophem²⁹ Wachstum der Mikroalgen immens erhöht werden konnte (Wu und Miao unveröff.).

In jüngster Zeit wurden auch in den USA Forschungsprojekte initiiert, die die energetische Nutzung von Mikroalgen ins Auge fassen. An der Universität New Hampshire gibt es ein Biodiesel-Projekt³⁰, das die Potenziale der Biodieselproduktion aus Mikroalgen untersucht. Hier wird vorgeschlagen, Beckensysteme zur Mikroalgenkultivierung in Wüstengebieten aufzustellen, um aus den gewonnenen Mikroalgen Biodiesel herzustellen. Allerdings dürfte der Energieertrag pro Flächeneinheit auch langfristig deutlich unter dem von Photovoltaiksystemen liegen. Andere Forscher der Universität Ohio³¹ untersuchen die Möglichkeit, freigesetztes CO₂ aus Kraftwerksabgasen zum Wachstum von Mikroalgen zu verwenden. Damit könnte das Abgas gereinigt werden und Biomasse zur Biodieselproduktion gewonnen werden. Diese Überlegungen befinden sich bislang erst in der Planungsphase (Columbus Dispatch 2006).

In Deutschland gibt es ebenfalls die Idee, Mikroalgen in großen Beckenanlagen zu züchten und die anfallende Biomasse entweder stofflich oder energetisch zu verwerten.³² Auch dieser Ansatz befindet sich derzeit erst in der Planungsphase. Die zu den USA analoge Nutzung von Algen im Kontext der CO₂-Abscheidung aus Kraftwerksabgasen soll in Kürze in einem Projekt der E.ON Hanse in Kooperation mit der Umweltbehörde Hamburg demonstriert werden³³.

²⁹ Heterotrophes Wachstum = Kurzbezeichnung für den Begriff "chemo-organo-heterotroph". Die Lebensweise von Mikroorganismen, bei der Energie zum Aufbau von Biomasse durch Oxidations- oder Reduktionsreaktionen gewonnen wird (chemotroph). Dienen organische Substanzen als Elektronendonatoren spricht man von organotroph, wird Kohlenstoff zum Aufbau von Biomasse aus organischen Substanzen bezogen von heterotroph.

³⁰ http://www.unh.edu/p2/biodiesel/article_alge.html

³¹ <http://columbusdispatch.com>, Ohio Coal Research Center und Universität Ohio

³² www.spirolymp-ltd.com: SpirOlymp@Ltd. Zweigniederlassung Leipzig.

(<http://www.mikrosystemtechnik-kongress.de/kongress/zukunftsworkshops>: Die Gewinnung von Mikroalgen-Biomasse zur energetischen Nutzung ist z. B. ein Schwerpunkt des vom VDE und BMBF veranstalteten Mikrosystemtechnik-Kongress 2007 im Rahmen eines Zukunftsworkshops.

³³ siehe Pressemitteilung vom 2.11.2007: E.ON Hanse und die Freie und Hansestadt Hamburg unterstützen Forschungsprojekt zur CO₂-Verringerung durch Mikroalgen
www.eon-hanse.com/pages/eha_de/Presse/Pressemitteilungen/Aktuelle_Presse/Pressemitteilung.htm?id=429369

5.2.2 Photosynthetische Produktion von Wasserstoff

Anstelle von oxygener Photosynthese können einige Grünalgen mit Hilfe des Enzyms Hydrogenase Wasserstoff über die sogenannte anoxygene Photosynthese produzieren, wenn sie durch Nährstoffentzug (z.B. Schwefelmangel) unter Stress gesetzt werden. Auch mit Purpurbakterien besteht die Möglichkeit der Wasserstoffproduktion, die in einem Hell-Dunkel-Kreislauf stattfindet und über das Enzym Nitrogenase katalysiert wird. Der so gewonnene Wasserstoff könnte beispielsweise in Brennstoffzellen genutzt werden. Die Wasserstoffproduktion aus Mikroalgen wird vorrangig in Japan, aber auch in Deutschland³⁴ untersucht.

5.2.3 Biogasanlage mit angekoppeltem Photobioreaktor

Ein weiterer Verfahrensweg könnte die Errichtung von angekoppelten Photobioreaktoren an eine herkömmliche Biogasanlage (an Land) sein. In Biogas ist immer ein gewisser Anteil an Kohlendioxid als sog. Ballastgas enthalten (ca. 40 %). Wird das Biogas durch den Photobioreaktor geleitet, können Mikroalgen das CO₂ fixieren (biologische Gasreinigung) und dadurch den Brennwert des Biogases steigern. Zudem ist die Algenmasse selbst energetisch nutzbar.

Die Effizienz einer Biogasanlage kann somit in doppelter Hinsicht gesteigert werden. Dies wird derzeit von der Schmack Biogas AG im Rahmen eines von der FNR geförderten Projekts³⁵ (EBSIE) untersucht.

In einer ersten Phase (2004-2005) wurden im Labormaßstab erste Erkenntnisse über die technische und wirtschaftliche Machbarkeit des Verfahrens erzielt. Hierbei konnte die Anreicherung von CH₄ und Abreicherung von CO₂ im Biogas gezeigt werden. Die Mikroalgen waren leicht vergärbar. In einer weiteren Technikumsphase (2007-2008) wird diese Technologie nun weiterentwickelt und optimiert werden.³⁶

³⁴ <http://www.leben-begreifen.uni-bonn.de/happe.html>

³⁵ <http://www.fnr.de> (FKZ: 22014003), <http://www.schmack-biogas.de>

³⁶ persönliche Mitteilung von Dr. Dirk Brusis, Schmack Biogas vom Nov. 2007

6 Potential der energetischen Nutzung von Makroalgen

6.1 Globales Potential von Makroalgen

Nach den Daten, die in Kapitel 3 und 4 zusammengestellt wurden, liegen sind derzeit die größten Biomassepotentiale für Makroalgen erschließbar, die mit bereits vorhandenen technischen Möglichkeiten (Fermentierung, Kapitel 5.1) energetisch genutzt werden können. Daher bleibt im Rahmen dieses Arbeitspapiers die Potentialeinschätzung auf diese Gruppe beschränkt. Aus Nachhaltigkeitsgründen sollte eine Intensivierung der Nutzung natürlicher Makroalgenbestände – wie auch der Seegrassbestände – im Rahmen einer Energieproduktion vermieden werden (Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und Anhang E).

Für eine Abschätzung der Makroalgenpotentiale zur Energieproduktion spielt zum einen die Fläche eine Rolle, die sich für eine Makroalgenkultivierung eignet und nach nationaler Rechtslage genutzt werden darf (siehe Anhang C zur Gesetzeslage in Deutschland). Zum anderen ist die regionale Produktivität, die vor allem von lokalen Wachstumsbedingungen wie dem Nährstoff- und Lichtangebot und den Temperaturbedingungen und dem verfügbaren Artenpool abhängt, zu berücksichtigen.

Für eine vereinfachte Abschätzung der *nutzbaren Fläche* wird angenommen, dass eine zeitnahe Makroalgenproduktion in einem Küstenstreifen von 20 km (entspricht der 12-Meilenzone) möglich ist, da diese Fläche der nationalen Hoheit unterliegt und die Rechtslage für eine mögliche Nutzung geklärt ist (vgl. Anhang C). Bei einer weltweiten Küstenlinie mit einer Länge von ca. 750 000 km ergibt sich eine Fläche von etwa 15 Mio. km².³⁷

Diese Fläche wird aber zum einen aus technischen Gründen wie der Möglichkeit, Kulturleinen, Netze oder Gestelle zur Makroalgenkultivierung zu installieren und zum anderen aus Gründen einer nachhaltigen, naturverträglichen Nutzung von Makroalgen deutlich niedriger liegen.

Zur Potentialeinschätzung der für die Biomasseproduktion aus Makroalgen wird daher von einer zur Verfügung stehenden Fläche von 1 %³⁸ der oben genannten 15 Mio. km² ausgegangen (150 000 km²).

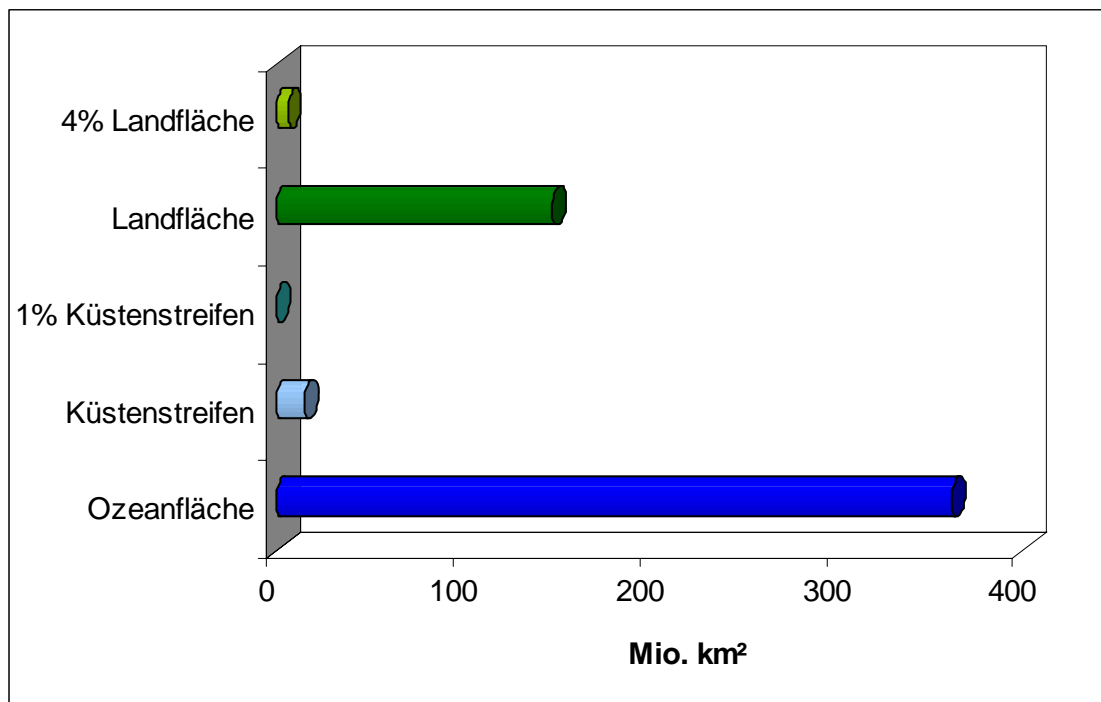
Da für die nachfolgenden Berechnungen ein linearer Zusammenhang vorliegt, können die Ergebnisse aber bei der Annahme größerer Flächen entsprechend hochgerechnet werden. Demgegenüber steht eine Landfläche von ca. 150 Mio.

³⁷ Eigener Schätzwert.

³⁸ Aufgrund des hohen Nutzungsdruckes in Küstennähe und um den Eingriff in den Naturhaushalt möglichst minimal zu halten, wird angenommen, dass lediglich 1 % des angenommenen Küstenstreifens für die Beerntung herangezogen werden kann.

km², von der insgesamt rund 6 Mio. km² (~ 4 %) für den Anbau von Energiepflanzen zur Verfügung stehen (Bild 6).

Bild 6 Vorhandene Flächen an Land und im Ozean



Quelle: eigene Darstellung; zur Berechnung der Fläche des Küstenstreifens wurde von einer weltweiten Küstenlinie von 750 000 km und einer Breite des Küstenstreifens von 20 km ausgegangen

Für eine erste Annäherung an die potentielle Energiemenge, die aus Makroalgen gewonnen werden kann, wird von den drei *Produktivitäten* 300, 4.000 und 10.000 t Trockenmasse (TM) pro km² und Jahr ausgegangen (FAO 2003a)³⁹.

Bei einer für die Makroalgenproduktion nutzbaren Fläche von 150 000 km² läge für die drei Produktivitäten die mögliche Biomasseproduktion bei 45, 600 bzw. 1 500 Mio. t_{TM} pro Jahr (siehe Tabelle 5).

³⁹ Die Biomasseerträge von kultivierten Makroalgen liegen je nach Region zwischen 300-10 000 t aschefreie Trockenmasse/km²*a (FAO 2003a) und wurden in der Näherung mit 300 (klein), 4 000 (mittel) und 10 000 (hoch) t aschefreie Trockenmasse/km²*a angenommen. Der hohe Wert ist als Obergrenze zu verstehen.

Tabelle 5 Weltweite Biomasseertrag, Heizwert und Energieertrag (Methan aus Fermentation) für Makroalgen bei drei verschiedenen Produktivitäten.

Produktivität [t _{TM} / km ² *a]	Biomasseproduktion [Mio. t _{TM} /a]	Heizwert [EJ/a]	Energieertrag [EJ/a]
300 (klein)	45	0,45	0,22
4 000 (mittel)	600	6,0	2,88
10 000 (hoch)	1 500	15,0	7,20

Quelle: eigene Berechnung

Für die nachfolgenden Berechnungen wird für Makroalgen von einem mittleren Heizwert von 10 MJ/kg_{TM} ausgegangen (vgl. Tabelle 4). Danach ergibt sich für die drei Produktivitäten weltweit ein Heizwert der Makroalgen von 0,45, 6,0 bzw. 15,0 EJ/a.

Die Größenordnung dieser Daten deckt sich mit anderer Analysen, die kürzlich publiziert wurden (EPOBIO 2007).

Im Hinblick auf die Energieproduktion in Biogasanlagen können bei Landpflanzen zwischen 55 und 65% des Heizwertes von Pflanzen in Biogas umgesetzt werden, wobei von der gewonnenen Energiemenge ca. 20% für den Betrieb einer Anlage (Rührwerke, Beheizung des Fermenters usw.) verwendet werden müssen (ÖKO 2004)⁴⁰.

Für die Vergärung von Makroalgen liegen derzeit keine Werte für den Betrieb von Biogasanlagen vor. Zwar ist zu erwarten, dass der Wassergehalt im Frischmaterial von Makroalgen höher ist als in Landpflanzen, was einen erhöhten Verbrauch an Betriebsenergie bedeuten würde.

Dieser Aspekt dürfte aber durch hohe Biogausausbeuten und kurze Verweilzeiten des Substrats im Fermenter aufgrund der sehr guten Umsetzbarkeit der Makroalgen (vgl. Kapitel 5.1) wieder ausgeglichen werden.

Daher wird an dieser Stelle von Energieproduktion von 60% und einem Verbrauch an Betriebsenergie von 20% ausgegangen. Hiernach ergeben sich jährliche Energieerträge je Produktivität von 0,22, 2,88 bzw. 7,20 EJ (Tabelle 5).

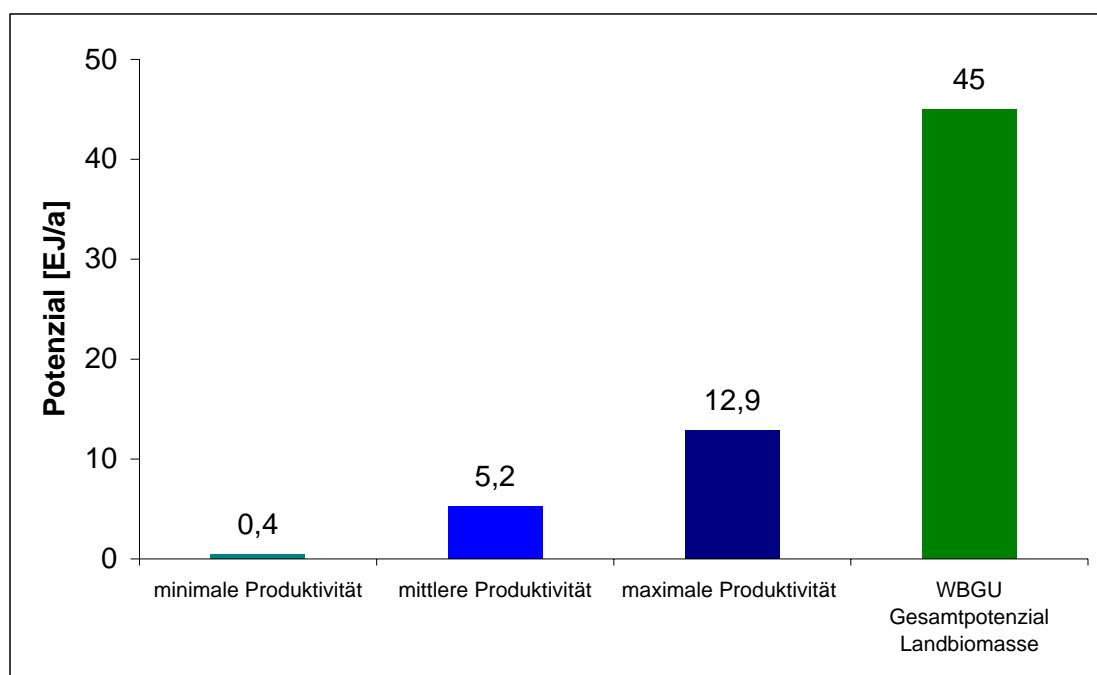
⁴⁰ Nach Chynoweth (2002) müssen bei der Verwertung der Algenbiomasse in Biogasanlagen ca. 35 % der erzeugten Energie für den Prozess aufgewendet werden, was leicht über dem Bedarf bei der Verwertung terrestrischer Biomasse liegt.

In diese Berechnung gehen allerdings weder Transportenergieaufwendungen noch Energieverbräuche bei der Kultivierung und Ernte der Makroalgen ein (vgl. Anhang F).

Im Vergleich zu den berechneten Werten liegt der derzeitige weltweite Energiebedarf bei etwa 450 EJ/a, wobei das *nachhaltig* nutzbare Potenzial von terrestrischen Energiepflanzen und biogenen Reststoffen **insgesamt** mit rund 100 EJ/a angegeben (WBGU 2003).

Eine grafische Darstellung der Anbaupotenziale gibt die folgende Abbildung.

Bild 7 *Potenzieller Energieertrag aus Makroalgen.*



Quelle: eigene Berechnungen des Öko-Instituts und WBGU (2003); Annahmen: Anbau an 1% der weltweiten Küstenlinie bei Produktivitäten von 300, 4 000 und 10 000 t_{TM}/km²*a

Die Differenz in den Potenzialen der Energieproduktion aus terrestrischer Biomasse und Makroalgenbiomasse entsteht durch den großen Unterschied der vorhandenen Anbauflächen, die sich aus den oben für die Berechnung festgelegten Annahmen bedingt.

In der Literatur ist für terrestrische Biomasse allerdings noch eine weitaus größere Bandbreite errechneter Potenziale zu finden. Mit 33 bis 1.130 EJ/a (Moreira 2004) liegen die Werte allesamt über den hier angeführten Potenzialen für Makroalgenbiomasse.

6.2 Regionale Potentiale

6.2.1 Deutschland

Entlang der Deutschen Küstenlinien finden sich z. T. schutzwürdige Ökosysteme, die eine weltweit herausragende Bedeutung einnehmen (z. B. Wattenmeer). Eine weitere Intensivierung der Nutzung der deutschen Küstenlinie durch eine Kultivierung von Makroalgen ist aus ökologischen Gründen bedenklich. Allerdings wird derzeit die Möglichkeit diskutiert, Makroalgen innerhalb von Offshore-Windkraftanlagen zu züchten, indem an den Anlagen Ringe zur Kultivierung von Makroalgen befestigt werden. Die Algenzüchter könnten hierbei durch die bereits vorhandene Infrastruktur profitieren und die Windparkbetreiber die Anbaufläche als Ausgleich für verkleinerte Fischfanggründe geltend machen. Ähnlich verhält es sich bei der Nutzung von Öl- und Gasplattformen, an denen ebenfalls Strukturen zur Makroalgenzucht befestigt werden könnten. Plattformen dieser Art sind sicher gebaut und bieten ausreichenden Schutz für verschiedene Kulturorganismen.

An der deutschen Küste ist die lokale Produktivität der Makroalgen niedrig und liegt bei etwa 300 t aschefreie Trockenmasse pro km² und Jahr (Piker 2001). Die Erwartungsfläche der künftigen Windkraftanlagen im deutschen Offshore-Bereich bis zum Jahr 2030 beträgt ca. 6200 km² (BMU 2002 und BSH per. Mitt.). Unter der Annahme, dass innerhalb dieser gesamten Fläche Makroalgen gezüchtet werden können, ergibt sich ein Energieertrag von ca. 9 PJ im Jahr. Im Vergleich hierzu liegt der derzeitige Energieverbrauch in Deutschland bei 14 500 PJ/a.

Im Hinblick auf einzelne im Meer installierte Windanlagen ist festzuhalten, dass sich an einem Windrad lediglich sechs Ringe zur Algenzucht befestigen lassen, so dass eine Flächenausnutzung ähnlich der von Algenfarmen innerhalb von Offshore-Windkraftanlagen nicht möglich ist. Demnach ist der voraussichtliche Energieertrag durch Makroalgen pro Windrad mit 80 MJ im Jahr verschwindend gering. Eine Co-Nutzung von Windkraftanlagen und der Makroalgenzucht lohnt sich aufgrund der geringen Energieausbeute demnach nicht. Die an der deutschen Küste zahlreich vorhandenen Nutzungskonkurrenzen erschweren diese Art der Co-Nutzung zusätzlich.

6.2.2 Nordamerika

In den Gewässern der USA (z.B. Golf von Mexiko) ist die Nutzung von Öl- oder Gasplattformen denkbar, da dort viele Plattformen nicht mehr in Benutzung sind oder nicht mehr wirtschaftlich arbeiten (Buck 2002). Viele Küstenabschnitte sind mit etwa 10.000 t Biomasse pro km² und Jahr im Idealfall um mehr als das zehnfache produktiver als deutsche Gewässer, da die Wachstumsbedingungen in den Gewässern der USA vorteilhafter sind. Im Vergleich zur deutschen Küste könnte eine Makroalgenfarm von 6200 km² Größe daher ca. 300 PJ Energie im Jahr erwirtschaften (Chynoweth 2002). Allerdings sind die Erfahrungen mit der

Makroalgenkultivierung in den USA bisher klein und es ist fraglich, ob diese theoretischen Zahlen tatsächlich erreichbar sind.

6.2.3 Entwicklungsländer

Von einigen Organisationen (FAO, UNDP, Weltbank etc.) wird die Makroalgenzucht als eine gute Möglichkeit zur Armutsbekämpfung, zur Förderung der nachhaltigen Entwicklung und zur Produktion von erneuerbaren Kulturpflanzen erachtet. Außerdem wird sie als Alternative oder Ergänzung zu Ressourcenschädigenden Fischfangmethoden angesehen (FAO 2001). Durch eine Verbindung der Makroalgen- und Fischzucht könnten möglicherweise negative Effekte der Fischproduktion (z.B. Überdüngung, Überfischung, Parasiten etc.) gemindert und gleichzeitig zusätzliche ökologische und ökonomische Vorteile für die Küstenbevölkerung geschaffen werden.

Das globale Potenzial der energetischen Verwertung von Makroalgen ist jedoch von den Rohstoffmärkten abhängig. Während in Ländern ohne stoffliche Makroalgenutzung eine energetische Verwertung denkbar ist, ist sie in Ländern mit stofflicher Nutzung weniger wahrscheinlich, da bereits ein Markt für Makroalgenprodukte besteht. Hier kommt lediglich eine energetische Nutzung der anfallenden Reststoffe in Frage.

In Tabelle 6 ist für ausgewählte (Entwicklungsländer aufgelistet, ob eine gute Aussichten für eine künftige energetische Makroalgenutzung bestehen könnte. Um genauere Aussagen treffen zu können, muss die Eignung der jeweiligen Gebiete jedoch genauer analysiert werden; vor allem die Umweltverträglichkeit, Verwertungsmöglichkeiten, wirtschaftliche und regionsspezifische Aussichten spielen hierbei eine große Rolle.

Tabelle 6 Beispielhafte Abschätzung der Aussichten einer energetischen Makroalgenutzung in Entwicklungsländern anhand der vorhandenen Rohstoffmärkte.

Region	geringe Aussichten	gute Aussichten
Afrika	Senegal	Kenia, Marokko, Mozambique, Namibia, Südafrika, Tansania
Asien	China, Indonesien, Vietnam	Bangladesh, Malaysia, Sri Lanka, Thailand
Lateinamerika	Argentinien, Brasilien, Mexiko, Venezuela	Kolumbien, Kuba, Ecuador, Peru, Westindische Inseln

Quelle: Eigene Darstellung nach FAO (2001)

7 Fazit und Forschungsbedarf

Gegenwärtig scheint die energetische Nutzung im direkten Vergleich mit der rohstofflichen nicht konkurrenzfähig zu sein. Lediglich an Standorten mit geringer oder nicht vorhandener stofflicher Nutzung könnte Potenzial für eine energetische Nutzung entstehen. Dabei kommen hauptsächlich Standorte mit hoher biologischer Produktivität, langer Küstenlinie und wenig konkurrierenden Nutzungen in Frage. Solche Standorte sind vor allem in Ländern zu finden, in denen bislang keine oder kaum Makroalgenkultivierung stattfindet (z.B. Südostasien).

In Entwicklungsländern könnte die Makroalgenkultivierung als Einkommensalternative zum küstennahen Ressourcen schädigenden Fischfang eingesetzt werden (wie in Tansania), wenn ein nachhaltiger Anbau gewährleistet werden kann. Da bei der stofflichen Nutzung jedoch höhere Preise erzielt werden können, kann der energetischen Verwertung von Makroalgenbiomasse nur eine Nischenrolle zukommen, so lange nicht extreme Energiepreissteigerungen angenommen werden.

Aus heutiger Sicht bietet sich daher lediglich die Nutzung von Reststoffen aus der Algenproduktion und –verarbeitung an. Wie auch bei terrestrischer Biomassenutzung könnten über den Weg der wirtschaftlichen Reststoffnutzung effiziente Umwandlungstechnologien entwickelt werden.

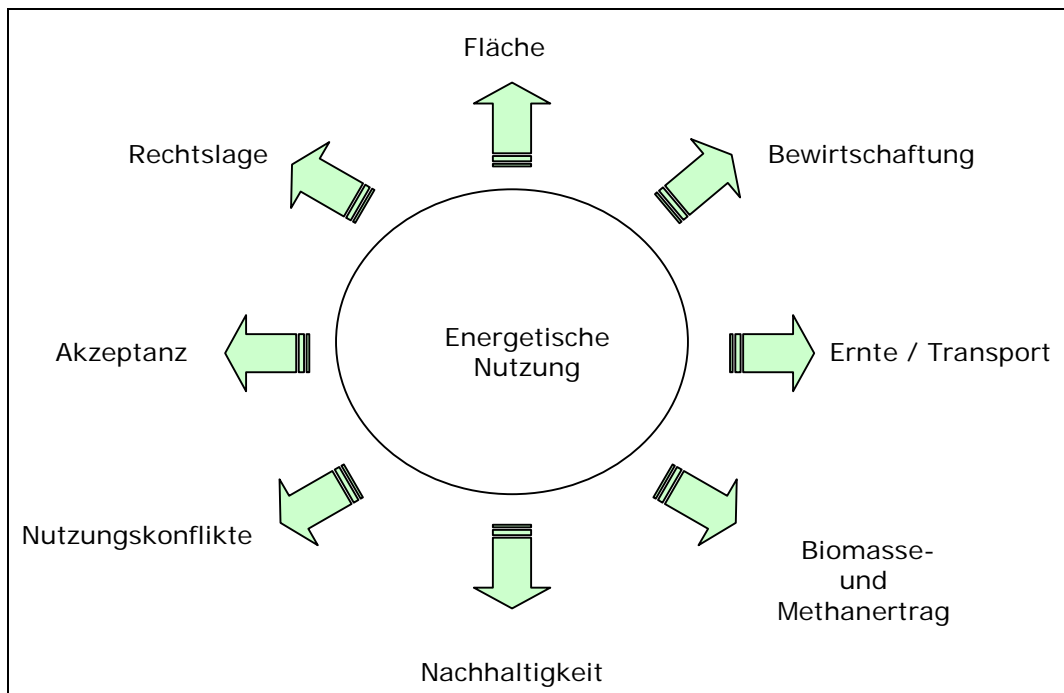
Inwiefern eigens angebaute Algenbiomasse nachhaltig zur Energieerzeugung genutzt werden kann, hängt davon ab, wie die Rahmenbedingungen gestaltet werden können. Hier muss zusammenfassend festgehalten werden, dass noch viele Unsicherheiten hinsichtlich einer energetischen Nutzung von Makroalgen bestehen.

Bild 8 veranschaulicht die Parameter, die hierbei von Bedeutung sind. Aufgrund der derzeitigen Vorrangstellung der stofflichen Nutzung dürften die zur energetischen Nutzung zur Verfügung stehenden *Flächen* bislang klein sein. Es fehlen aber genaue Analysen zu den Flächenpotenzialen.

Für eine Gesamtenergiebilanz sind *Ernte, Transport, Bewirtschaftungsaufwand, Biomasse- und Methanertrag* von Bedeutung. Auch hier fehlen genaue Analysen, vor allem experimenteller Art bezüglich des Methanertrags.

Weiterhin gibt es Forschungsbedarf zur *nachhaltigen Umsetzung*, den *Nutzungskonflikten*, der *Akzeptanz* und der *Rechtslage*.

Bild 8 Wichtige Parameter zur energetischen Makroalgenutzung



Quelle: Eigene Darstellung

Eine Gesamtenergiebilanz kann Aufschluss über Rentabilität und Zukunftsaussichten der energetischen Nutzung geben. Hierfür sind jedoch Pilotprojekte nötig, um insbesondere mehr Daten zur praktischen Umsetzung der energetischen Konversion zu erhalten. Gekoppelte Ansätze könnten helfen die zu befürchtenden Effizienzprobleme in den Griff zu kriegen (z.B. Kopplung an Muschelzucht, Fischzucht oder Windkraftanlagen). Hier fehlen grundsätzliche Analysen, die regional unterscheiden und Rahmenbedingungen für eine nachhaltige Nutzung identifizieren.

Betrachtet man die Bereitstellungskette, so haben Ernte und Transport der Biomasse eine hohe Bedeutung für die Umsetzung und Wirtschaftlichkeit der Makroalgenutzung. Bei der Ernte entstehen Personal- und Materialkosten. Im Falle von Wildfängen sind zudem spezielle Erntemaschinen notwendig, die die Kosten weiter erhöhen. Für den Transport der Biomasse ans Festland sind Schiffe mit Hebe- oder Kranvorrichtungen an Bord erforderlich. Hier fallen erneut Personal-, Material- und Treibstoffkosten an. Die Entfernung des Erntebietes bzw. der Makroalgenfarm von der Verwertungsanlage wirkt sich damit stark auf die Kosten aus.

Erste Untersuchungen zum anaeroben Abbau von Makroalgen wurden von Bird und Benson (1987) durchgeführt, wonach sich der Mannitol- und der Stickstoffgehalt der Algen direkt auf die Abbaubarkeit und die Stabilität des Prozesses auswirken. Es bedarf jedoch noch weiterer Forschungen, um genaueren Auf-

schluss über die Zusammenhänge zu erhalten. Beispielsweise sollte eine großskalige Durchführbarkeit nachgewiesen werden, da sie eine bessere Prozesskontrolle erlaubt. Die jeweils erforderliche Bakterienpopulation und die Behandlung des Abwassers bzw. des Gärrückstandes sollten ebenfalls gründlicher erforscht werden.

Ein Artenmix ist aus ökologischen Gründen zwar zu empfehlen, kann aber bei einer Fermentierung aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung der Arten zu Problemen führen. Der anaerobe Abbau erfordert verschiedene Mikroorganismen, die in der Lage sind die unterschiedlichen Inhaltstoffe zu spalten. Durch eine solche stark gemischte Bakterienpopulation kann aber die Zahl der Endprodukte dramatisch ansteigen, wodurch der Gesamtprozess gestört wird. Im Einzelfall muss daher geprüft werden, welche Bakterienpopulation bei welcher Artzusammensetzung am besten geeignet ist.

Die ökologischen Konsequenzen von Wildfang und Kultivierung der Makroalgen wurden bislang nicht ausreichend untersucht. Wie bereits erwähnt, ist eine Reihe von Schädigungen zu erwarten. Dazu gehören z.B. Abriss von Anheftungs-substrat (Wildfang), Änderungen der Lebensgemeinschaften, Artenverdrängungen, Veränderung der Stoffflüsse, Einschleppung fremder Arten, Zerstörung von Korallen etc.. Differenzierte Aussagen sind aufgrund des geringen Wissenstandes derzeit jedoch nicht möglich.

Für die Kultivierung sollten einheimische Algenarten ausgewählt und Mischkulturen anstelle von Monokulturen angelegt werden. Bei einer rohstofflichen Nutzung könnte das aus ökonomischen Gründen im Einzelfall schwierig durchsetzbar sein. Hingegen müssen bei einer energetischen Nutzung in jedem Fall die Kriterien der Nachhaltigkeit eingehalten werden. Es ist denkbar, Arten mit ähnlichen Wachstumseigenschaften kombiniert zu kultivieren und somit auch eine bessere Ausnutzung der Fläche zu erreichen. Außerdem könnten die Besatzdichten so verringert werden, dass sie nicht mehr zu ökologischen Nachteilen führen.

Da langfristig von einer Zunahme der Kultivierung auszugehen ist, müssen die ökologischen Konsequenzen intensiver untersucht und Maßnahmen entwickelt werden diese zu vermeiden. Gleich welche Nutzung der Biomasse angestrebt wird - stofflich oder energetisch - sollten Nachteile fürs Ökosystem unbedingt minimiert bzw. vermieden werden.

Aufgrund der steigenden Nutzungskonflikte in Küstenzonen ist eine energetische Nutzung von Makroalgen in vielen Küstengebieten derzeit unwahrscheinlich. Auch die Rechtsprechung in Küsten- oder Offshore-Bereichen ist hinsichtlich des Betreibens von Makroalgenfarmen nicht eindeutig und insgesamt äußerst komplex (siehe Anhang). Die Rechtsprechung muss daher im Einzelfall überprüft werden und je nach Lage entsprechende Maßnahmen getroffen werden.

Der Akzeptanz der Makroalgenkultivierung in küstennahen Gewässern wurde bislang wenig Aufmerksamkeit geschenkt. In Südostasien wo traditionell Makroalgen kultiviert werden ist die Akzeptanz insgesamt groß. Auch in Entwicklungsländern sind der küstennahe Fischfang und die Aquakultur weit verbreitet.

Dagegen ist in anderen Ländern (z.B. europäische Küste) die Makroalgenkultivierung kaum fortgeschritten. Die Wahrscheinlichkeit, dass es innerhalb der Bevölkerung Bedenken gegen großflächiges Küstenfarming gibt, ist daher groß. Bislang gibt es auf diesem Gebiet aber keine Untersuchungen, so dass entsprechender Forschungsbedarf besteht.

Anhang

A Weitergehende Informationen zu MakroalgenGattungen und -arten

Braunalgen

Braunalgen werden am häufigsten genutzt und erzielen als Nahrungsmittel die höchsten Preise am Markt. Die größten Produzenten sind China, Nord- und Südkorea und Japan, wobei meist die Spezies *Laminaria japonica* („Kombu⁴¹“) und *Undaria pinnatifida* („Wakame⁴²“) angebaut werden. Zu den aus Wildfang gewonnenen Gattungen zählen hauptsächlich: *Ascophyllum*, *Durvillaea*, *Ecklonia*, *Laminaria* und *Macrocystis*. Bei der Kultivierung müssen zunächst durch eine Manipulation des komplizierten Reproduktionszyklus im Labor die Jungpflanzen kultiviert werden. Anschließend können diese Jungpflanzen an Langleinen ausgebracht und kultiviert werden. Kultivierte Braunalgen werden hauptsächlich als Nahrungsmittel genutzt (Werner et al. 2004). Die für die Alginatproduktion⁴³ verwendeten Arten müssen dagegen aus Wildfang gewonnen werden, da sich die kostenintensive Kultivierung nur bei einer Verwendung als Lebensmittel rechnet. Einzig in China werden mitunter Überschussmengen von *L. japonica* der Alginatproduktion zugeführt (FAO 2003a).

Rotalgen

Unter den Rotalgen gibt es sehr viele verschiedene Gattungen (Werner et al. 2004):

Eucheuma Arten werden hauptsächlich zur Carageenproduktion⁴⁴ verwendet. Sie werden in ärmeren Regionen (Philippinen, Indonesien, Tansania) großflächig zur Einkommensverbesserung angebaut. Da viele der anderen Carageenanquellen (*Chondrus*, *Gigartina*) nur aus Wildbeständen gewonnen werden können, nimmt die Beliebtheit dieser Gattung zu. Die Kultivierung ist einfach und erfolgt vegetativ über Setzlinge. In den großflächigen Monokulturen gibt es allerdings häufig Probleme durch Krankheitsbefall.

Porphyra („Nori⁴⁵“) besitzt in östlichen Kulturen als Delikatesse großen Wert. Die Kultivierung ist aufgrund mehrerer sexueller Reproduktionsphasen sehr

⁴¹ „Kombu“ ist der japanische Name für getrocknete Makroalgen der Gattung *Laminaria* spp. In China wird *Laminaria japonica* dagegen „Haida“ genannt.

⁴² „Wakame“ ist der umgangssprachliche Name für *Undaria pinnatifida* in China und Südkorea.

⁴³ Alginat ist ein Polysaccharid aus den Zellwänden von Braunalgen. Einige der Salze sind wasserlöslich und werden als Verdickungsmittel eingesetzt.

⁴⁴ Carrageen ist ein komplexes Gemisch verschiedener Polysaccharide und wird zur Gelierung und Stabilisierung in der Lebensmittelindustrie verwendet.

⁴⁵ „Nori“ ist der umgangssprachliche Name für Makroalgen der Gattung *Porphyra* spp. Sie werden in Japan, China und der Südkorea kultiviert und hauptsächlich für Sushi-Röllchen verwendet.

kompliziert und es werden Labore oder Gewächshausanlagen für die Sporenproduktion benötigt. Zudem kommt meist hochspezielle und teure Ausrüstung zum Einsatz. Da auch diese Gattung in Monokulturen angebaut wird, besteht auch hier die Gefahr des Krankheitsbefalls der Kulturen.

Gracilaria wird hauptsächlich zur Agarproduktion⁴⁶ verwendet, wobei die meisten Ernten aus Wildfängen stammen. Hierbei kommt es meist zu einer übermäßigen Ernte, die zu erheblichen Ökosystemschäden führt. Eine Kultivierung wäre zwar möglich, die Produktionskosten übersteigen jedoch die für Agar erzielbaren Preise auf dem Markt.

Chondrus wird meist in großen Becken zur Nahrungsmittelproduktion gezüchtet (z.B. Kanada und Japan). Dagegen ist die Kultivierung zur Carageenanproduktion derzeit nicht wirtschaftlich machbar.

Palmaria wird ebenfalls in Becken zur Nahrungsmittelproduktion gezüchtet. Die Bedeutung dieser Gattung ist weltweit jedoch eher als gering einzuschätzen.

Asparogopsis ist ein Newcomer auf dem Aquakulturmarkt. Er wird bislang erst in Frankreich und Irland in kleinen Mengen gezüchtet und dessen medizinische Anwendungen erforscht (z.B. Anti-Viren Mittel bei HIV).

Grünalgen

Grünalgen (z.B. *Monostroma*, *Enteromorpha*, *Ulva*) werden hauptsächlich als Nahrungsmittel oder Gewürz verwendet. Die Kultivierung kann ähnlich der Kultivierung der Rotalgengattung *Porphyra* oder auch in Beckensystemen erfolgen. Der Hauptabsatzmarkt liegt in Japan, wo Grünalgen als Delikatesse angesehen werden. Gelegentlich werden Grünalgen auch zur Abwasserbehandlung in Betracht gezogen.

⁴⁶ Agar ist ein nicht genau definiertes Polysaccharid, das in Nährboden für die Mikrobiologie und als Verdickungsmittel Verwendung findet.

B Weltweite Produktion von Makroalgen

Tabelle 7 Weltweite Produktion von Makroalgen aus Wildfang und Aquakultur in Tonnen Frischgewicht im Jahr 2000.

Land	Wildfang (t/a)	Aquakultur (t/a)
Australien	13 650	-
Chile	247 376	33 471
China	204 290	7 863 540
China (Taiwan)	125	12 529
Europa	333 801	3 000
Indonesien	17 916	205 227
Japan	119 030	528 881
Kanada	14 790	-
Korea (Nord)	-	401 000
Korea (Süd)	13 030	374 648
Philippinen	413	656 631
Russland	53 653	3 008
Südafrika	6 000	157
Tansania	5 000	7 000
USA	42 058	-
Vietnam	-	15 000

Quelle: FAO (2002) und Werner et al. (2004)

C Rechtslage in Deutschland

Bei der Errichtung von Makroalgenfarmen in Küstengewässern oder Offshore-Gebieten ist die Rechtslage äußerst komplex und regional sehr unterschiedlich. Daher soll im Folgenden lediglich die Situation in deutschen Gebieten kurz dargestellt werden.

Nach dem Seerechtsübereinkommen (SRÜ) unterscheidet man folgende Gebiete: die Küstengewässer, den Festlandsockel, die Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ) und die Hohe See. Zur aquatischen Hoheitszone der BRD zählt neben den Binnengewässern und den Bereichen entlang der Küstenlinie das Küstenmeer innerhalb der 3 Seemeilenzone. Die Küstengewässer sind außerdem auf die 12 Seemeilenzone ausgedehnt und beschreiben das Gewässer,

in dem souveräne Rechte ausgeübt werden dürfen. Das restliche deutsche Hoheitsgebiet wird durch die an das Küstenmeer angrenzende AWZ gebildet. Dieser gesamte aquatische Raum unterliegt den Bestimmungen unterschiedlicher Behörden, Dezernate und Verbände, wobei die einzelnen Institutionen gesetzlich verankerte Aufgaben zu erfüllen haben (Buck 2002).

Küstenmeer

Das Küstenmeer gehört zum Territorialgewässer der BRD und unterliegt somit einer souveränen Verwaltung. Hier ist laut Grundgesetz das Recht des jeweilig angrenzenden Bundeslandes zu beachten. Die Zulassung eines Aquakulturbetriebes unterliegt der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung (z.B. Landesnaturschutzgesetz). Wenn Eingriffe hier nicht zu vermeiden sind, müssen sie ausgeglichen oder ersetzt werden. Zudem müssen nach der Novelle des Bundesnaturschutzgesetzes 2003 in der 12-Seemeilenzone gesetzlich zu schützende Biotop neu ausgewiesen werden. An internationalen Rechtsvorschriften gelten die FFH-Richtlinie, die Bestimmungen zu Vogelschutzgebieten (IBA), die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und die Agenda 21 zum Schutz der Küstengebiete (Buck 2002). Auf nationaler Ebene müssen bei einer Nutzung von Wasserflächen durch eine Aquakulturfarm verschiedene Genehmigungen (z.B. Genehmigung für das Einbringen von Stoffen, wasserrechtliche Genehmigung, strom- und schiffahrtspolizeiliche Genehmigung, Genehmigung von Seezeichen etc.) eingeholt werden (Buck 2002).

AWZ

Die AWZ gehört als „Funktionshoheitsraum“ nicht zum Hoheitsgebiet des Küstenstaates, sondern konstituiert eine „besondere Rechtsordnung“ (Art. 55 SRÜ). Mit ihr ist ein spezifisches Nutzungsrecht verbunden, in dem sich Rechte und Jurisdiktionsbefugnisse des Küstenstaates mit den Rechten und Freiheiten anderer Staaten mischen. Der Küstenstaat darf in der AWZ nur die souveränen Rechte und Hoheitsbefugnisse ausüben, die ihm durch das SRÜ explizit zugewiesen sind (Wolf 2005). Der Küstenstaat hat laut SRÜ das Recht, Verordnungen zu erlassen, die das Errichten und Nutzen von Anlagen (z.B. Aquakulturfarmen) regeln (Buck 2002).

Es kann mit Vor- oder Begleituntersuchungen einer Anlage gerechnet werden. Dabei sollen mögliche Auswirkungen auf die marine Umwelt festgestellt und daraus Maßnahmen entwickelt werden, wie diese Auswirkungen zu vermeiden oder einzugrenzen sind. Die jeweilige Erfordernis zu solchen Untersuchungen ergibt sich aus dem Umfang des Projektes und dessen mögliche Auswirkungen auf das betroffene Gebiet (Buck 2002).

Derzeit ist allerdings nicht abschließend geklärt, ob die Regeln der AWZ der Aufgabenverwaltung des Bundes oder der, der jeweiligen Länder unterliegen.

Die Gesetzesgrundlage in der AWZ ist ebenfalls ungeklärt, da das Zulassungsregime in der AWZ sowohl durch völkerrechtliche (SRÜ, OSPAR⁴⁷) als auch gemeinschaftsrechtliche (FFH, IBA, Agenda 21 etc.) und nationale Regelungen geprägt wird (Wolf 2005).

Fazit

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Rechtslage innerhalb der 12-Seemeilenzone geklärt ist, aber sehr viele Konflikte mit dem Naturschutz und anderen Interessensvertretern bestehen. In den Offshore-Gebieten der AWZ sind zwar weniger Nutzungskonflikte zu erwarten, hier besteht jedoch das Problem einer noch nicht eindeutig geklärten Rechtslage. Eine Verbesserung des rechtlichen Rahmens im Entwicklungsraum der Offshore-Nutzungen, kann daher potenzielle Nutzungskonflikte regeln und zu einer größeren Sicherheit beim Aufbau von Algenfarmen beitragen (Keller 2005).

D Artenliste vegetativ vermehrbarer Rotalgen

In Anhang D sind die vegetativ vermehrbaren Rotalgenarten getrennt nach Kontinenten und Ländern aufgelistet. Berücksichtigt sind nur die Arten, die in den jeweiligen Ländern in bedeutenden Mengen aus Wildbeständen oder Kultivierung geerntet werden.

Tabelle 8 Bedeutende Rotalgenarten mit vegetativer Vermehrung in Afrika.

Land	Gattung	Art
Ägypten	<i>Gracilaria</i>	<i>verrucosa</i>
Madagaskar	<i>Eucheuma</i>	<i>denticulatum, striatum</i>
	<i>Gelidium</i>	<i>madagascariense</i>
Namibia	<i>Gracilaria</i>	<i>gracilis</i>
Senegal	<i>Hypnea</i>	<i>musciformis</i>
Südafrika	<i>Gelidium</i>	<i>abbottiorum, capense, pristoides, pteridifolium</i>
	<i>Gracilaria</i>	<i>gracilis</i>
Tansania	<i>Kappaphycus</i>	<i>alvarezii</i>
	<i>Eucheuma</i>	<i>spinosum</i>

Quelle: www.surialink.com

⁴⁷ OSPAR = Oslo-Paris Übereinkommen von 1992

Tabelle 9 *Bedeutende Rotalgenarten mit vegetativer Vermehrung in Zentral- und Südamerika.*

Land	Gattung	Art
Argentinien	<i>Gracilaria</i>	<i>verrucosa</i>
Brasilien	<i>Gracilaria</i>	<i>caudata, cornea, domingensis</i>
	<i>Gracilariopsis</i>	<i>tenuifrons</i>
	<i>Hypnea</i>	<i>musciiformis</i>
Chile	<i>Gelidium</i>	<i>chilense, lingulatum, rex</i>
	<i>Gracilaria</i>	<i>chilensis, lemanaeformis</i>
	<i>Chondrus</i>	<i>canaliculatus</i>
Karibik	<i>Gracilaria</i>	<i>cornea, crassissima, domingensis</i>
Mexiko	<i>Gelidium</i>	<i>robustum</i>
	<i>Gigartina</i>	<i>canaliculata</i>
	<i>Gracilaria</i>	<i>lemaniformis</i>
Peru	<i>Chondracanthus</i>	<i>chamissoi</i>
	<i>Gracilaria</i>	<i>howei, lemaniformis</i>
	<i>Gracilariopsis</i>	<i>lemaniformis</i>

Quelle: www.surialink.com

Tabelle 10 Bedeutende Rotalgenarten mit vegetativer Vermehrung in Asien

Land	Gattung	Art
Bangladesch	<i>Gelidium</i>	<i>pusillum</i>
	<i>Hypnea</i>	<i>pannosa</i>
Burma	<i>Gracilaria</i>	<i>spp.</i>
	<i>Hypnea</i>	<i>spp.</i>
China	<i>Eucheuma</i>	<i>gelatinae</i>
	<i>Gelidium</i>	<i>spp.</i>
	<i>Gracilaria</i>	<i>asisatica, tenuistipitata var. liui</i>
Indien	<i>Gracilaria</i>	<i>edulis, folifera</i>
	<i>Hypnea</i>	<i>musciiformis, valentiae</i>
	<i>Gelidiella</i>	<i>spp.</i>
Indonesien	<i>Eucheuma</i>	<i>gelatinae, muricatum</i>
	<i>Gelidium</i>	<i>anansii, latifolium</i>
	<i>Gracilaria</i>	<i>eucheumoides, verrucosa</i>
	<i>Grateloupia</i>	<i>filicina</i>
	<i>Kappaphycus</i>	<i>alvarezii</i>
Japan	<i>Chondrus</i>	<i>ocellatus</i>
	<i>Eucheuma</i>	<i>cartilagineum, gelatinae</i>
	<i>Gelidium</i>	<i>spp.</i>
	<i>Gracilaria</i>	<i>bursa-pastoris, lemanceiformis, verrucosa</i>
Kiribati	<i>Kappaphycus</i>	<i>alvarezii</i>
Malaysia	<i>Kappaphycus</i>	<i>alvarezii</i>
	<i>Gracilaria</i>	<i>spp.</i>
Nordkorea	<i>Chondrus</i>	<i>crassicaulis</i>
	<i>Gelidium</i>	<i>anansii</i>
	<i>Gracilaria</i>	<i>verrucosa</i>
Philippinen	<i>Acanthophora</i>	<i>spicifera</i>
	<i>Eucheuma</i>	<i>gelatinae</i>
	<i>Gracilaria</i>	<i>firma, heteroclada, tenuistipitata var. liui</i>
	<i>Hypnea</i>	<i>pannosa</i>
	<i>Kappaphycus</i>	<i>alvarezii</i>
Südkorea	<i>Chondrus</i>	<i>crassicaulis</i>
	<i>Gelidium</i>	<i>anansii</i>
	<i>Gracilaria</i>	<i>verrucosa</i>
Thailand	<i>Gracilaria</i>	<i>changii, fisheri, salicornia, tenuistipitata var. liui, spp.</i>
Vietnam	<i>Acanthophora</i>	<i>spicifera</i>
	<i>Gigartina</i>	<i>intermedia</i>
	<i>Gracilaria</i>	<i>asisatica, coronopifera, eucheumoides, firma, heteroclada, salicornia, tenuistipitata var. liui, spp.</i>
	<i>Hypnea</i>	<i>var. liui, spp.</i>
	<i>Kappaphycus</i>	<i>muscooides, valentiae alvarezii</i>

Quelle: www.surialink.com

E Detailinformationen zur Rotalgenkultivierung

Für eine energetische Nutzung von Makroalgen eignen sich ausschließlich Gattungen, die kostengünstig und in großen Mengen kultiviert werden können. Dies trifft lediglich auf vegetativ vermehrbare Gattungen aus der Gruppe der Rotalgen zu, die in Anhang D aufgelistet sind.

Die Rotalgenkultivierung wurde in folgenden Ländern untersucht, wobei die Auswahl der Länder anhand der Datenverfügbarkeit getroffen wurde: Chile, Peru, Brasilien, Tansania, Indien, China, Malaysia, Indonesien und Pazifische Inseln. In den jeweiligen Ländern wird der Stand der Rotalgenkultivierung erläutert, gegenwärtige Kultivierungsgebiete und Produktivitäten identifiziert und das Potenzial zur Ausweitung der bisherigen Nutzung abgeschätzt. Schließlich werden Umwelteinflüsse und mögliche Konsequenzen daraus dargestellt.

Produktivitäten

Rotalgen wachsen je nach Region, Kultivierungstechnik und Art mit unterschiedlicher Produktivität (siehe Übersicht in Tabelle 7). Diese wird in aschefreiem Trockengewicht (DAFT⁴⁸) pro km² und Jahr angegeben. Neben *Gracilaria* kommt der Gattung *Kappaphycus* besondere Bedeutung zu. Ursprünglich wuchs sie lediglich in Indonesien und auf den Philippinen. Da *Kappaphycus* jedoch besonders leicht zu kultivieren ist und hohe Produktivitäten erzielt, haben mehrere Länder diese Gattung importiert und mit der Kultivierung begonnen.

Während *Gracilaria* in Chile mit einer Produktivität von 675-1125 DAFT/km²/a wächst (Westermeier et al. 1991), konnten in Brasilien Produktivitäten von 600-3100 DAFT/km²/a erreicht werden, wenn die Kultivierung an die Shrimpszucht gekoppelt wurde (Internetquelle BMLP). In Peru konnten in einer Testkultivierung von *Gracilariopsis lemaneiformis* bislang nur eine Produktivität von ca. 200 DAFT/km²/a erreicht werden (Cisneros, Bautista und Santos 1997).

In Tansania liegt die Produktivität von *Kappaphycus* bei 3750 DAFT/km²/a (FAO 1991), wobei eine Steigerung der Produktivität durch Verbesserung der Anbaumethoden möglich ist.

In Indien konnten insbesondere *Kappaphycus alvarezii* und *Hypnea musciformis* mit einer Produktivität von 750 DAFT/km²/a kultiviert werden (Khan und Satam 2003). Dagegen konnte *Gelidiella arosa* mit einer Produktivität von 500 DAFT/km²/a und *Gracilaria edulis* und *Hypnea spp.* mit einer Produktivität von 1500 DAFT/km²/a kultiviert werden (Gomkale et al. 2000 aus Kumar, Katiha und Joshi 2003). Auch hier sind Steigerungen der Produktivität wahrscheinlich, da die Entwicklungen gerade erst in ihren Anfängen stecken.

⁴⁸ DAFT= Dry Ash Free Tons (Aschefreies Trockengewicht in Tonnen)

In den Anbaugeländen von Malaysia wird meist *Kappaphycus alvarezii* angebaut, da diese Art die höchsten Preise am Markt erzielt. In Einzelfällen konnten zwar Produktivitäten von 6000-9000 DAFT/km²/a erreicht werden (Komilus et al. 1999), oftmals liegen die Produktivitäten jedoch bei 2000 DAFT/km²/a (UNDP/FAO 1990a).

Nach mehreren Versuchen in Indonesien zeigte sich, dass *Kappaphycus alvarezii* dort sehr gut wächst. Die Produktivität betrug hierbei im Bestfall bis zu 6225 DAFT/km²/a. *Eucheuma* Arten besitzen dagegen Produktivitäten von 2000-3000 DAFT/km²/a (Hirmen et al. 2002).

China ist der Hauptproduzent an Makroalgen, die zu vielerlei Zwecken genutzt werden. Hauptsächlich werden *Laminaria*, *Porphyra* und *Gracilaria* angebaut (UNDP/FAO 1990a), aber auch zu kleineren Mengen *Undaria*, *Gelidium* und *Eucheuma* (FAO 1988). Insgesamt ist die Makroalgenkultivierung in China in ihrer Entwicklung sehr weit fortgeschritten. Für die energetisch interessanten Rotalgen der Gattung *Gracilaria* konnten Produktivitäten von ca. 1600-4300 DAFT/km²/a erreicht werden (Chiang 1981, UNDP/FAO 1990b). Da das Hauptaugenmerk in China auf der Produktion von Braunalgen liegt, ist eine Steigerung der Produktivität durch eine Verbesserung der Anbaumethoden durchaus möglich.

Auf Samoa konnten für *Kappaphycus alvarezii* Produktivitäten von 6300-8400 DAFT/km²/a erzielt werden (FAO 1999). Diese Werte dürften zwar für die übrigen Pazifischen Inseln ebenfalls gelten, beschränken sich aber meist auf sehr kleine Anbauflächen. Außerdem wurden sie in kurzen Zeiträumen ermittelt und auf ein Jahr hochgerechnet.

Tabelle 11 Übersicht der Produktivitäten von Rotalgen in Chile, Brasilien, Peru, Tansania, Indien, Malaysia, Indonesien, China und Samoa

Land	Gattung	Produktivität DAFT/km ² /a	Quelle
Chile	<i>Gracilaria</i>	675-1125	(Westermeier et al. 1991)
Brasilien	<i>Gracilaria</i>	600-3100	(Internetquelle BMLP)
Peru	<i>Gracilariopsis</i>	200	(Cisneros, Bautista und Santos 1997)
Tansania	<i>Kappaphycus</i>	3750	(FAO 1991)
Indien	<i>Kappaphycus</i>	750	(Khan und Satam 2003)
	<i>Gelidiella</i>	250	(Kumar, Katiha und Joshi 2003)
	<i>Gracilaria</i>	1500	(Kumar, Katiha und Joshi 2003)
Malaysia	<i>Kappaphycus</i>	2000-9000	(Komilus et al. 1999, UNDP/FAO 1990a)
Indonesien	<i>Kappaphycus</i>	6225	(Hirmen et al. 2002)
	<i>Eucheuma</i>	200-300	(Hirmen et al. 2002)
China	<i>Gracilaria</i>	1600-4300	(Hirmen et al. 2002)
Samoa	<i>Kappaphycus</i>	6300-8400	(Chiang 1981)
			(FAO 1999)

DAFT= Dry Ash Free Tons (Aschefreies Trockengewicht in Tonnen)

Kultivierungsgebiete

Im Folgenden soll ein Überblick zur bisherigen Makroalgenkultivierung in Chile, Peru, Brasilien, Tansania, Indien, Indonesien, Malaysia und den Pazifischen Inseln gegeben werden und eine Abschätzung des weiteren Potenzials erfolgen. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf Rotalgengattungen.

Chile

Die Nutzung von Makroalgen in Chile begann in den 1950er Jahren und hat bis heute stark zugenommen. Die wichtigsten in Chile geernteten Rotalgen sind die Carrageenophyten⁴⁹ *Sarcothalia crispata*, *Mazzaella laminarioides*, *Gigartina skottsbergii*, *Chondracanthus chamissoi* und die Agarophyten⁵⁰ *Gracilaria chilensis* und *Chondrus canaliculatus* (Nurambuena 1996, Buschmann et al. 2001). Ansonsten werden vor allem die Braunalgen (Alginophyten⁵¹) *Lessonia nigrescens*, *L. trabeculata*, *Macrocystis pyrifera*, *M. integrifolia* und *Durvil-*

⁴⁹ Carrageenophyten= Makroalgen, die zur Carrageenproduktion verwendet werden.

⁵⁰ Agarophyten= Makroalgen, die zur Agarproduktion verwendet werden.

⁵¹ Alginophyten= Makroalgen, die zur Alginatproduktion verwendet werden.

laea antarctica genutzt (Roma 2005). In Tabelle 12 sind die in Chile genutzten Makroalgen ihrer Verwertung nach aufgelistet.

Tabelle 12 *Ökonomisch wichtige Makroalgen in Chile und deren Verwertung*

Verwertung	Gattung
Agarproduktion	<i>Gracilaria, Gelidium</i>
Carrageenproduktion	<i>Gigartina, Sarcothalia, Mazzaella, Chondracanthus</i>
Alginatproduktion	<i>Lessonia, Macrocystis, Durvillaea</i>
Verzehr	<i>Chodracantuhs chamissoi, Callophyllis spp., Porphyra columbina, Durvillaea antarctica</i>

Quelle: Romo (2005)

Mit Ausnahme von *Gracilaria chilensis* werden die Makroalgen aus Wildbeständen gewonnen. Da die natürlichen Bestände von *G. chilensis* in den 1970er und 1980er Jahren überfischt wurden, entwickelte man für diese Art Kultivierungstechniken. Heute stammt 93 % der Produktion an *G. chilensis* aus Makroalgenfarmen (Avila und Pavez 2000), wobei die Anzahl der Makroalgenfarmen in Chile von 10 im Jahr 1982 auf 322 im Jahr 1996 angestiegen ist (Buschmann et al. 2001).

Da das Basiswissen zur Kultivierung anderer Rotalgen in Chile derzeit noch nicht vorhanden ist, beschränkt sich die Makroalgenzucht momentan auf *Gracilaria*. Aufgrund des steigenden Drucks auf die Wildbestände nehmen die Bemühungen zu auch andere wertvolle Rotalgen zu kultivieren (Buschmann et al. 2001). Derzeit untersuchen z.B. mehrere Forschungsgruppen unterschiedliche Ansätze zum Management und zur Kultivierung verschiedener ökonomisch wichtiger Makroalgen, wobei auch einige Firmen an diesen Arbeiten beteiligt sind (Rojas et al. 1996, Buschmann et al. 2001).

Bezüglich der Produktivität kann festgehalten werden, dass in den subtidalen Gebieten im Süden von Chile höhere Produktivitäten erzielt werden als in den intertidalen Gebieten der gleichen Region (Buschmann et al. 1995). Im Norden von Chile, wo es bislang kaum Makroalgenkultivierungen gibt, könnte die Produktivität aufgrund der höheren Temperaturen und der längeren Lichtexposition sogar noch übertroffen werden. Da neben der geographischen Lage auch die ozeanographischen Bedingungen oder Ernte- und Kultivierungsmethoden einen Einfluss auf die Produktivität haben, wird derzeit erforscht, wie die Biomasseausbeute oder die Effizienz einer Farm gesteigert werden kann (Buschmann et al. 2001).

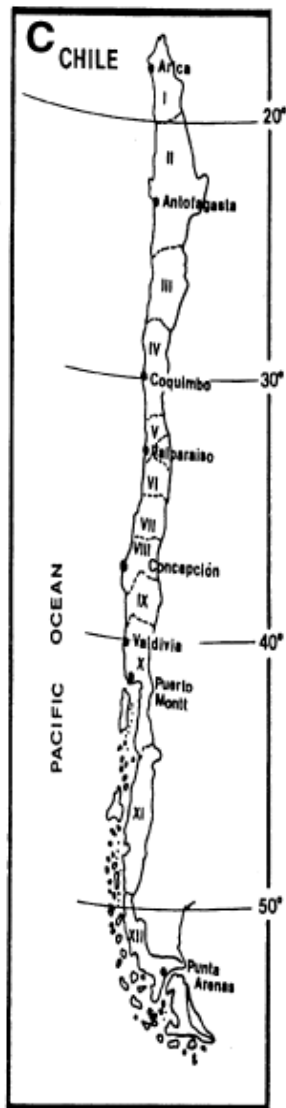
Hauptaugenmerk liegt dabei darauf, neue Systeme oder Ansätze zur Kultivierung zu entwickeln. Beispielsweise hat sich bei *Gracilaria* die Kultivierung im offenen Gewässer (off-shore) als technisch und ökonomisch machbar erwiesen.

Diese Kultivierungsmethode wird jedoch von unvorhersehbaren Preisschwankungen und weiteren Problemen wie Krankheitsbefall etc. behindert (Buschmann et al. 2001). Außerdem wird erwogen, im äußersten Süden, ca. 1200 km südlich von Puerto Montt, *Gigartina scottsbergii* und *Sarcothalia crispata* zu kultivieren, die aber nicht vegetativ vermehrbar sind (Romo 2005).

Die Gesamternte an Rotalgen aus Wildbeständen und Kultivierung unterscheidet sich in den einzelnen Regionen sehr stark. Chile wird in zwölf Regionen eingeteilt, die mit römischen Zahlen benannt werden. Hinzu kommt eine weitere Region (RM⁵²), in der sich die Hauptstadt Santiago befindet (Bild 9a). Am höchsten ist die Gesamternte in der Region X bei Puerto Montt, in der sich auch die meisten Makroalgenfarmen befinden. Dagegen ist sie im Norden und Süden Chiles sehr geringsten (Bild 9b). Ergänzend hierzu sind in Bild 9c die allein aus Kultivierung erzeugten Erntemengen an *Gracilaria* im Jahr 2004 dargestellt.

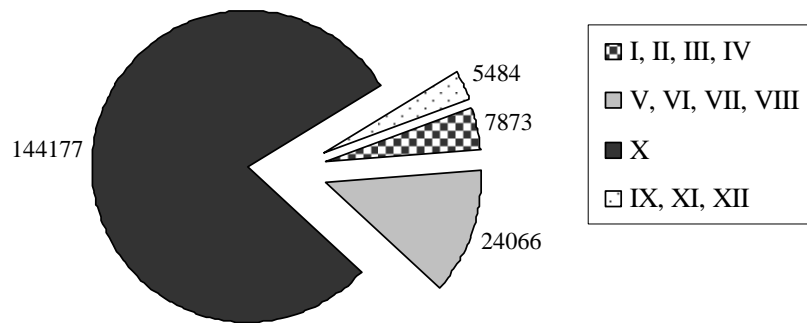
⁵² Región Metropolitana de Santiago

Bild 9 Regionen Chiles mit zugehöriger Rotalgenernte im Jahr 2004



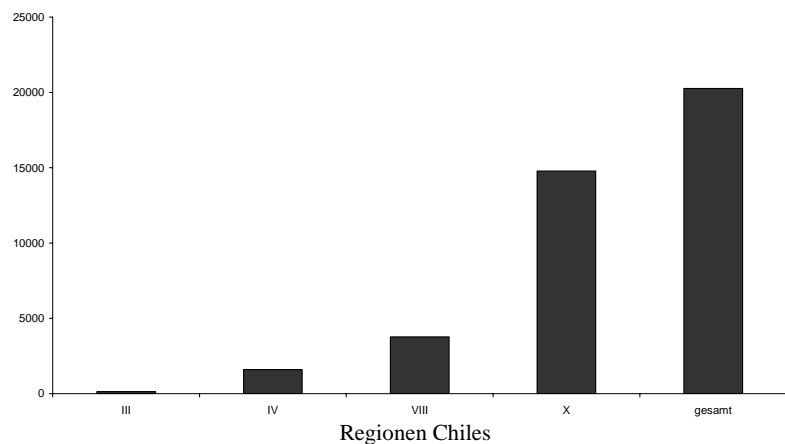
a) Regionen Chiles, Buschmann et al. (2001)

Gesamte Rotalgenernte unterteilt nach Regionen in t



b) Fischereiministerium Chile (2004), Zahlen angegeben in Tonnen

Ernte an Gracilaria aus Kultivierung im Jahr 2004 in t



c) Fischereiministerium Chile (2004)

Peru und Brasilien

In Peru sind insbesondere die Rotalgen *Chondracanthus chamissoi* und *Gracilariopsis lemaneiformis*, die in den zentralen und nördlichen Gebieten wachsen, von kommerzieller Bedeutung. In geringerem Maße auch die in südlichen Gebieten wachsenden Braunalgen *Lessonia nigrescens*, *Macrocystis pyrifera* und *Macrocystis integrifolia* (

Bild 10). Bislang wird ausschließlich aus Wildbeständen geerntet. Während *Chondracanthus* zur Carrageenproduktion und *Gracilariopsis* zur Agarproduktion verwendet wird, werden die Braunalgen zu Alginat verarbeitet.

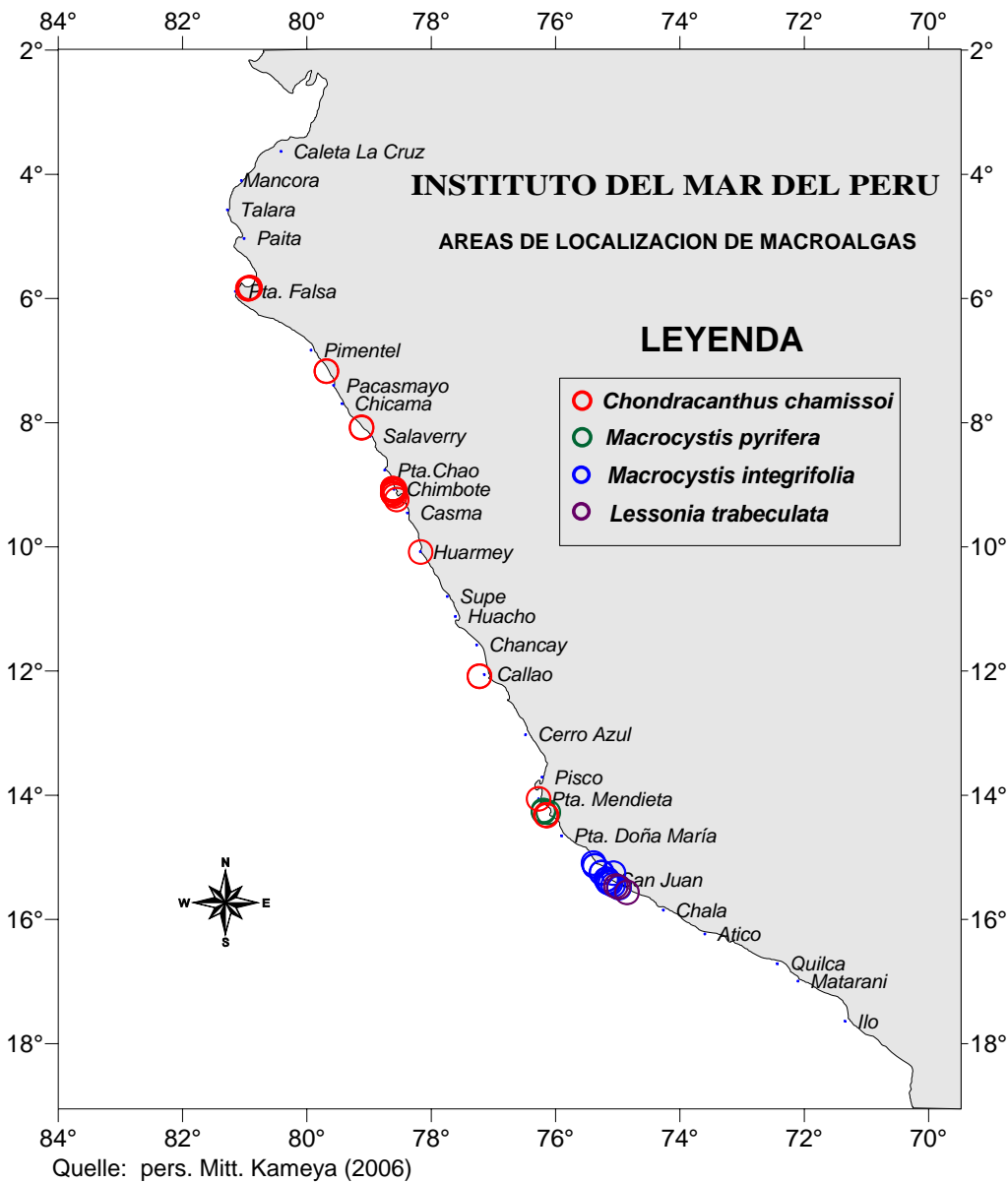
Chondracanthus chamissoi ist eine endemische⁵³ Art des tropischen Südpazifiks von Peru bis Chile und kommt vorwiegend entlang der peruanischen Küste vor. Sie wächst hauptsächlich in den intertidalen und subtidalen Felsküsten und wird meist frisch verzehrt. Zwischen 1972 und 2000 betrug die Ernte im Schnitt nur 130 t/a Frischgewicht. Sie ist großen Schwankungen unterworfen, die hauptsächlich auf „El Niño“ zurückzuführen sind (pers. Mitt. Kameya 2006).

Erste Versuche der Kultivierung von Rotalgen wurden mit der Art *Gracilariopsis lemanaeformis* in drei Regionen durchgeführt: Lambayeque-Chiclayo-Cherrepe (Norden), Piura-Paita-Yacila (Norden) und Ancon-Pucusana-Lima (Zentralperu). *G. lemanaeformis* lässt sich im Gegensatz zu *C. chamissoi* vegetativ vermehren und erfüllt somit die Voraussetzung für eine energetische Nutzung.

Die höchsten Wachstumsraten konnten dabei in den Monaten September bis November erzielt werden. Da die Bemühungen bislang noch in ihren Anfängen stecken, können die bisherigen Wachstumsraten von 200 DAFT/km²/a auf lange Sicht vermutlich übertroffen werden. Weiterhin sind zahlreiche potenzielle Standorte für die Kultivierung vorhanden, weshalb eine Makroalgenkultivierung in Peru Zukunft haben könnte (pers. Mitt. Kameya 2006).

⁵³ endemisch= Arten, die nur in einer bestimmten Gegend zu finden sind.

Bild 10 Bestände von Makroalgen an der peruanischen Küste



In Brasilien gibt es zwar zwei Firmen die Phycokolloide⁵⁴ verarbeiten. Jedoch stammen diese meist aus dem Ausland und nur zu sehr geringen Anteilen aus Wildfängen an der Nordostküste. Die Makroalgenkultivierung könnte diese Situation verbessern und zur Einkommenssteigerung bei Fischern beitragen. Die Kultivierung von *Gracilaria* zur Agarproduktion wird an der Nordostküste bereits durchgeführt, allerdings stecken die Bemühungen in ihren Anfängen und sind bislang nur wenig professionalisiert (Anhalt 2003).

⁵⁴ Phycokolloide= Bezeichnung für Polysaccharide aus Algen (z.B. Agar, Alginat und Carrageen).

In jüngster Zeit wird auch versucht die Gracilariazucht an die Shrimpszucht zu koppeln (Internetquelle BMLP). Außerdem gibt es ein Projekt eines brasilianischen Forschungsinstitutes (IDER⁵⁵) und einer lokalen NGO („Terramar“) in Kooperation mit InWent⁵⁶ an der nördlichen Ostküste Brasiliens (Flecheiras), bei dem versucht wird die Makroalgenkultivierung zu fördern. Die Anwendung eines Solartrockners soll den Wert der produzierten Frischmasse steigern, die Vermarktung erleichtern und dadurch die Produktion ankurbeln (Anhalt 2003).

Eine Kultivierung von Makroalgen könnte zudem der Ausrottung bzw. Überfischung der natürlichen Bestände entgegenwirken. Da in Brasilien derzeit die für den Binnenmarkt nötigen Makroalgenrohstoffe importiert werden müssen, könnte die Makroalgenkultivierung wesentlich dazu beitragen Brasilien unabhängig von Makroalgeneinfuhren zu machen (Anhalt 2003).

Tansania

Tansania hat eine Küstenlinie von ca. 800 km. Das Kontinentalschelf ist schmal und zwischen 2-80 km breit. Die Küste sowie die drei großen Inseln (Pemba, Sansibar und Mafia) sind von Korallenriffen gesäumt. Viele dieser Flächen sind unberührt und bieten sich für den Makroalgenanbau an, wenn dabei keine ökologisch oder ökonomisch wertvollen Habitate zerstört werden (TCMP 1999).

Der Makroalgenanbau ist in Tansania technologisch machbar, sozial akzeptiert und gehört zu den größten Industriezweigen. Meist werden die Makroalgen in Farmen kultiviert, eine Ernte aus Wildbeständen findet kaum noch statt (pers. Mitt. Msuya 2006).

Traditionell bedingt wird der Wildfang und die Kultivierung von Makroalgen von Frauen ausgeführt, da diese von jeher für das Absuchen der Küste nach Muscheln und Tintenfischen zuständig sind (FAO 1991). Seit 1989 fanden schätzungsweise 40.000 Menschen hier eine neue Einkommensquelle. Somit kann der Anbau von Makroalgen zur Reduktion der Armut und Unterstützung von Frauen in Tansania beitragen (Mshigeni 2001). Allerdings gibt es auch Probleme mit der Preisstabilität der Produkte auf dem Weltmarkt, die sich auch auf den Absatzmarkt in Tansania auswirken (pers. Mitt. Msuya 2006).

An ostafrikanischen Küsten sind fünf *Euचेuma* Arten zu finden: *E. spinosum*, *E. platycladum*, *E. speciosum/mauritium*, *E. stritium* und *E. cottonii* (umbenannt in *Kappaphycus alvarezii*). In Tansania werden hauptsächlich *E. spinosum* und *Kappaphycus alvarezii* kultiviert und vermarktet (pers. Mitt. Fourn 2006). In Tabelle 13 sind die verschiedenen Makroalgen ihrer Verwertung nach aufgelistet, wobei fast ausschließlich die *Euचेuma* und *Kappaphycus* Arten von Bedeutung sind.

⁵⁵ IDER= Instituto de Desenvolvimento Sustentável de Energias Renováveis, Fortaleza, Ceará, Brasilien

⁵⁶ InWent= Internationale Weiterbildung und Entwicklung gGmbH, Deutschland

Tabelle 13 Verwertung der bedeutenden Makroalgen in Tansania

Gruppe	Spezies
Carrageenproduktion	<i>Eucheuma, Kappaphycus</i>
Agarproduktion	<i>Gracilaria, Gelidium, Gelidiella, Pterocladia</i>
Alginatproduktion	<i>Sargassum, Turbinaria, Hormophysa, Cystoseira</i>

Quelle: FAO (1991)

Kultiviert werden die Makroalgen hauptsächlich in Sansibar, Pemba, Mafia und an der sonstigen Festlandküste. Auf Sansibar vorwiegend in Unguja, Potoa, Matemwe, Uroa, Togoni und Michamwi. Auf Pemba in Kangani, Weshu und Maziwa Ngombe. An der restlichen Festlandküste werden derzeit insbesondere in Tanga, Bwagamoyo, Kilwa und Mtwara Makroalgen gezüchtet (pers. Mitt. Fourn 2006 und Msuya 2006). Eine Übersicht ist in Bild 11 (a-d) dargestellt.

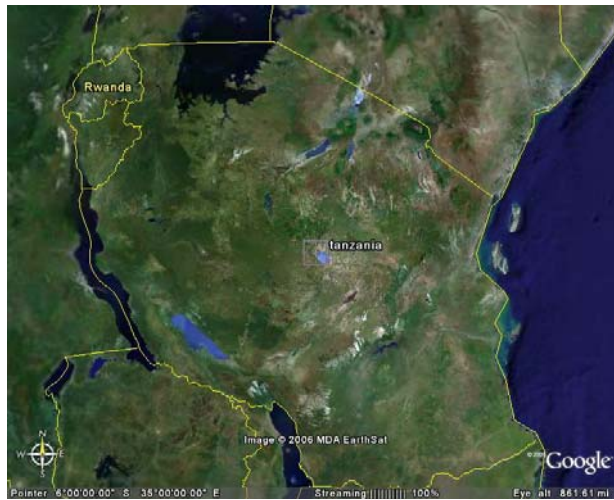
Die produktivste Region ist der Süden von Sansibar. In diesem Gebiet werden mehr Makroalgen gezüchtet als in den anderen Regionen und die Frischmasse zur Anzucht der Kulturen stammt meist von dort. Insgesamt werden in Tansania jährlich 7000-8000 t Trockengewicht geerntet (pers. Mitt. Fourn 2006).

Das größte Potenzial zur Ausweitung des Anbaus haben die südlichen Festlandregionen, da dort noch zahlreiche potenzielle Kultivierungsgebiete vorhanden sind. Es ist aber auch denkbar die Makroalgenausbeute durch die Anwendung neuer Anbaumethoden zu steigern. Hier kommt vor allem die Anwendung von „deep water rafts“⁵⁷ in Frage, die die sogenannte „off-bottom“⁵⁸ Methode ersetzen könnten (pers. Mitt. Msuya 2006).

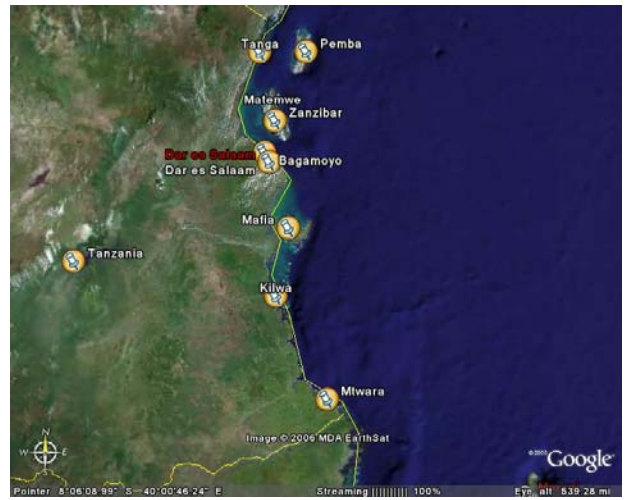
⁵⁷ deep water raft= Kultivierungsmethode, bei der die Algen an Gestelle oder Rahmen angebracht werden, so dass sie ständig von Wasser bedeckt sind und den Wasserbewegungen des Ozeans folgen.

⁵⁸ off-bottom Methode= Kultivierungsmethode, bei der Holzpflocke in den Meeresboden gesteckt werden, um an dazwischen befestigten Leinen Makroalgen zu kultivieren.

Bild 11 Übersicht der verschiedenen Kultivierungsgebiete in Tansania.



a) Tanzania, ©Google Earth (2006)



b) Küste von Tansania mit den Gebieten der Makroalgenkultivierung (gelb markiert), © Google Earth (2006)



c) Kultivierungsgebiete in Sansibar (gelb markiert), ©Google Earth (2006)



d) Kultivierungsgebiete in Pemba (gelb markiert), ©Google Earth (2006)

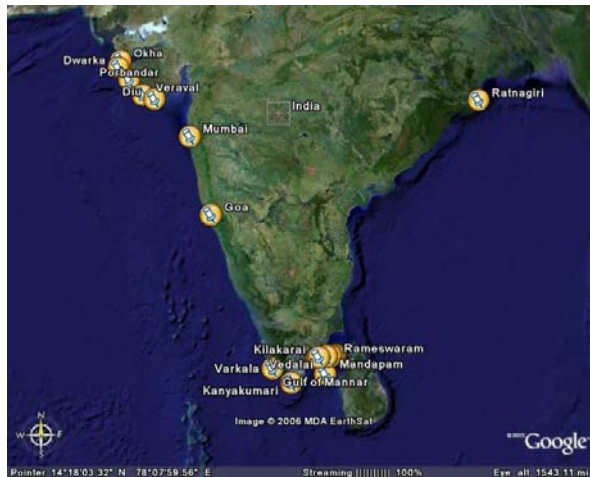
Indien

An der indischen Küste gibt es sehr reiche Makroalgenbestände. Insgesamt gibt es in den Flach- und Tiefwassergebieten Indiens ca. 700 Arten, von denen 60 wirtschaftlich von Bedeutung sind und einen Bestand von ca. 100 000 t vorweisen (Kaladharan und Kaliaperumal 1999). Rotalgen können das ganze Jahr über geerntet werden (Wildfang), während Braunalgen nur von August bis Januar an der Südküste geerntet werden können (Khan und Satam 2003).

Indiens Wildbestände befinden sich hauptsächlich an der Tamil Nadu Küste im Südosten (Golf von Mannar, Palk Bay und Kanyakumari), an der Küste von Gujarat im Westen (Okha, Dwarka, Veraval, Porbandar und Diu) und vor Karnatka,

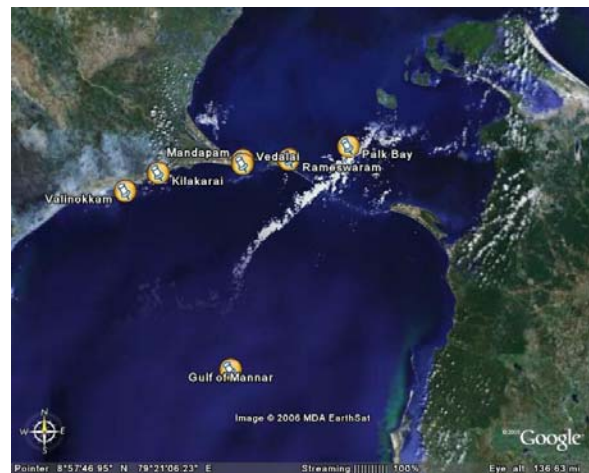
Andra prades, Malwan, Mumbai und Goa (pers. Mitt. Jha 2006). Dies ist in Bild 12 (a-d) dargestellt.

Bild 12 Übersicht der Kultivierungsgebiete in Indien



a) Wildbestände an Makroalgen in Indien (gelb markiert), ©Google Earth (2006)

b) Wildbestände an Makroalgen (gelb markiert) im Nordwesten Indiens (Ausschnitt), ©Google Earth (2006)



c) Wildbestände an Makroalgen (gelb markiert) im Süden von Indien (Tamil Nadu), ©Google Earth (2006)

d) Wildbestände an Makroalgen in der Palk Bay (gelb markiert), ©Google Earth (2006)

Hauptsächlich werden *Gelidiella*, *Gracilaria*, *Sargassum* und *Tubinaria* abgeerntet (Khan und Satam 2003). Hierbei können ca. 4500 t Trockenmasse pro Jahr erwirtschaftet werden, die zu Agar und Alginat weiterverarbeitet werden (Kaladharan und Kaliaperumal 1999). In Tabelle 14 ist eine Übersicht zu den bedeutendsten Makroalgen in Indien und deren Beständen zu sehen.

Tabelle 14 Ökonomisch wichtige Makroalgen und deren Bestand in Indien.

Gruppe	Spezies	Bestand (t)
Agarproduktion	<i>Gracilaria edulis</i>, <i>G. corticata</i>, <i>G. crassa</i>, <i>G. folifera</i>, <i>G. verrucosa</i>, <i>Gelidiella acerosa</i>, <i>Gelidium spp.</i>, <i>Pterocladia spp.</i>	6 000
Alginatproduktion	<i>Sargassum spp.</i> , <i>Turbinaria spp.</i> , <i>Laminaria spp.</i> , <i>Undaria spp.</i> , <i>Dictyota spp.</i> , <i>Hormophysa spp.</i> ,	16 000
Carrageenproduktion	<i>Hypnea spp.</i>, <i>Chondrus spp.</i>, <i>Euचेuma spp.</i>	8 000
Verzehr	<i>Ulva spp.</i> , <i>Enteromorpha spp.</i> , <i>Caulerpa spp.</i> , <i>Codium spp.</i> , <i>Laurencia spp.</i> , <i>Acanthophora spp.</i>	70 000

Quelle: Kumar, Katiha und Joshi (2003); Vegetativ vermehrbare Spezies sind fett dargestellt.

Es besteht zwar eine große Nachfrage nach Phycokolloiden, aber die Versorgung aus den vorhandenen Beständen reicht bislang nicht aus, um die nötigen Mengen an Makroalgen für die Industrie bereitzustellen. Daher werden der Marikultur von Makroalgen in Indien gute Aussichten bescheinigt.

Es gibt bislang allerdings erst einen Versuch Algen an einem 10 km langen Küstenstreifen zu kultivieren. Hier versucht die Firma Pepsi Foods Limited (PFL) mit technischer Unterstützung eines Forschungsinstitutes (CSMCRI⁵⁹) *Kappaphycus alvarezii* und *Hypnea musciformis* innerhalb eines Gebietes von 100 ha zu züchten. Dort konnten Produktivitäten von 100 t Frischmasse pro ha erreicht werden. In naher Zukunft soll das Zuchtgebiet auf 5.000-10.000 ha ausgedehnt werden, um die Produktionsmenge zu steigern (Khan und Satam 2003).

Insgesamt steigen die Bemühungen hinsichtlich der Makroalgenkultivierung in Indien. Dabei werden vegetative und sexuelle Kultivierungstechniken, sowohl an der Küste als auch in Beckensystemen erforscht (Kumar, Katiha und Joshi 2003). Beispielsweise wird am CSMCRI die Offshore-Kultivierung von Makroalgen untersucht (pers. Mitt. Reddy 2006). Forscher des CMFRI⁶⁰ haben außerdem Kultivierungstechniken für *Gelidiella arosa*, *Gracilaria edulis*, *Hypnea musciformis* und *Acanthophora spicifera* entwickelt (Khan und Satam 2003). Weiterhin wurde die Spezies *Kappaphycus striatus* von Wissenschaftlern des CSMCRI an der Madapamküste angebaut. Die Steigerung der Produktivität

⁵⁹ CSMCRI= Central Salt and Marine and Chemical Research Institute, Bhavnagar

⁶⁰ CMFRI= Central Marine Fisheries Research Institute, Cochin

kommerziell nutzbarer Arten durch Hybridbildung wird ebenfalls erforscht (Kumar, Katiha und Joshi 2003).

Malaysia

Obwohl Malaysia eine ausgedehnte Küstenlinie besitzt und eine Küstenbeschaffenheit vorweist, die das Wachstum von Makroalgen begünstigt, werden kaum Makroalgen aus Wildfang gewonnen. Bisher gibt es keine industrielle Produktion von Makroalgen oder deren Produkten. Der Bedarf an Makroalgen ist jedoch groß, weshalb große Mengen aus dem Ausland importiert werden. Aufgrund der hohen Nachfrage im Land ist das Potenzial für die Kultivierung von *Gracilaria*, *Eucheuma* und *Kappaphycus* sehr groß (UNDP/FAO 1990b).

Seit 1994 nimmt die Makroalgenkultivierung in Malaysia zu, da diese zur Steigerung des Einkommens beiträgt. Viele Fischer wechseln daher von der Fischerei zum Makroalgenanbau. Die Makroalgenkultivierung hat den Vorteil geringer Investitionskosten, einfacher Technologie und hoher Preise für das Produkt. Dennoch müssen die Infrastruktur, die Vermarktung und Regulierung in Malaysia verbessert werden. Zudem kann es Probleme durch die Monokulturen von *Kappaphycus alvarezii* geben, weshalb den Folgen dieses einseitigen Anbaus größere Beachtung zukommen sollte (Komilus et al. 1999).

In einem Pilotprojekt (Insel Banggi, Kudat) wird die Kultivierung von *Eucheuma* spp. untersucht. Dabei sollten Kultivierungsgebiete identifiziert und ausgewählt und die Kultivierungsmethode verbessert werden. Weitere Ziele waren: Ausweitung der Kultivierung, Ermutigung von Teilnehmern in den Makroalgenanbau einzusteigen, Erstellung eines Vermarktungskonzepts für Makroalgen und Untersuchung des Potenzials der Makroalgenprodukte auf dem lokalen Absatz- und Exportmarkt (Internetquelle BMRI).

Indonesien und Pazifische Inseln

In Indonesien werden Makroalgen bislang hauptsächlich aus Wildbeständen gewonnen (*Gelidium*, *Gracilaria*, *Eucheuma*, *Kappaphycus*). *Gracilaria* und *Kappaphycus* werden aber auch kultiviert (hauptsächlich in Nord Sulawesi). Während *Gelidium* und *Gracilaria* für die Agarproduktion verwendet werden, werden *Kappaphycus* und *Eucheuma* zu Carrageen verarbeitet. Letztere machen den Hauptteil der indonesischen Makroalgenproduktion aus.

Da es wenige Produktionsstätten für Phycokolloide gibt, werden die Makroalgen meist in getrockneter Form exportiert oder direkt als Nahrungsmittel genutzt. Der Nachteil liegt darin, dass getrocknete Algen einen geringeren Preis auf dem Markt erzielen (UNDP/FAO 1990b). Zwar ist Indonesien einer der größten Exporteure von getrockneten Makroalgen, jedoch fluktuiert der Markt sehr stark und die Preise sind nicht stabil.

Indonesien besitzt sehr viele Inseln, eine lange Küstenlinie und sehr ausgedehnte Riffgebiete, weshalb ein großes Potenzial für die Makroalgenkultivierung vorhanden ist. Diese sieht sich jedoch mehreren Problemen konfrontiert. Hier

sind Beeinträchtigungen der Algen durch Regenfall, Fische und Epiphyten zu nennen. Bislang werden die Marktpreise für *Kappaphycus alvarezii* von den Philippinen diktiert. Die Bedeutung Indonesiens wird aber zunehmen, da dort die Arbeitskosten geringer sind. Insgesamt besteht eine Gefahr der Überversorgung des Marktes durch Indonesien und die Philippinen (FAO 1999).

Auf einigen Pazifikinseln (z.B. Kiribati, Samoa und Fidji) wird *Kappaphycus alvarezii* ebenfalls angebaut. Kiribati ist beispielsweise der viertgrößte Exporteur von frischem *Kappaphycus alvarezii* (nach den Philippinen, Indonesien und Malaysia). Diese erfolgreiche Entwicklung hat dazu geführt, dass das Interesse am Makroalgenanbau in diesen Ländern steigt (FAO 1999).

Oftmals ist allerdings eine finanzielle und technische Förderung der Bevölkerung nötig, um die Kultivierung von Makroalgen erfolgreich etablieren zu können. Weiterhin gibt es Probleme durch tropische Zyklone, hohe Exportfrachttgelder, herbivore Fische und Schwierigkeiten am Markt.

Ökologische Konsequenzen

Wie bereits (Kapitel 4) erläutert, kann die Makroalgenzucht verschiedene ökologische Konsequenzen nach sich ziehen. Hierzu zählen beispielsweise:

- Verminderung der Nährstoffkonzentration im Kultivierungsgebiet
- Verstärkter Dünger- oder Chemikalieneinsatz
- Krankheitsausbrüche (Epiphyten etc.) durch zu hohe Besatzdichten
- Einschränkung der Belichtung durch zu hohe Besatzdichten
- Verstärkte Sedimentation
- Einschleppung fremder Arten
- Verdrängung von Arten
- Zerstörung von Korallen oder Mangroven

Weitere Umwelteinflüsse können außerdem die Produktivität und Effizienz einer Makroalgenfarm verändern. Diese sind im Folgenden für die einzelnen Länder kurz dargestellt.

In *Chile* wird bislang lediglich eine Makroalgenart (*Gracilaria chilensis*) kultiviert. Bei der Kultivierung kann es durch Schädlinge und Krankheitserreger zu Einbrüchen der Kulturen kommen. Hierfür sind vor allem herbivore Fische, Schnecken und Würmer verantwortlich (Buschmann et al. 2001). Oftmals kommen daher Pestizide zum Einsatz, die die Sterblichkeit von Räubern höherer ökologischer Stufe erhöhen und das gesamte Ökosystem negativ beeinflussen (Buschmann et al. 1996). In einigen Gebieten kann es auch zu einem Bewuchs der Algen mit Muscheln kommen, gegen deren Ausbreitung bislang kaum Mittel gefunden wurden. Daher wird vorgeschlagen die Kultivierungsgebiete häufig zu wechseln und zwischen ihnen zu rotieren (Buschmann et al. 2001).

Die Gracilariakulturen können außerdem von Epiphyten befallen werden, wodurch die Produktion verringert wird. In den subtidalen Makroalgenfarmen kann die Sedimentation zum Problem werden, da den Algen Licht entzogen wird. Das ist insbesondere der Fall, wenn die Makroalgen am Meeresboden kultiviert werden. Begünstigt wird die Sedimentation durch den verstärkten Gebrauch von Holzzäunen, die das Kultivierungsgebiet begrenzen und Verluste ins Ökosystem verhindern sollen (Buschmann et al. 2001).

In *Tansania* gibt es mehrere Faktoren, die den Makroalgenanbau im Ozean behindern. Die Monsunwinde, die jedes Jahr über den Indischen Ozean fegen können Verankerungen der Makroalgenfarmer lösen und im Extremfall sogar eine ganze Farm zerstören. Starke Regenfälle können in der Regenzeit zu einem vermehrten Süßwassereintrag über die Flüsse führen und damit die Salinität so stark verringern, dass die Makroalgen nicht mehr wachsen können. Weiterhin kann der Ozean im Kultivierungsgebiet durch verschmutzte Abwässer, Öltanker oder Touristenboote stark verschmutzt sein und die Kultivierung von Makroalgen erschweren (pers. Mitt. Foum 2006). Eine besondere Gefahr besteht auch darin, dass eine Ausweitung der Makroalgenzucht zu einer vermehrten Zerstörung der wertvollen Korallenriffe führt.

Das Hauptproblem in Tansania ist jedoch, dass eine *Kappaphycus* Art vom Aussterben bedroht ist. Als Ursache hierfür werden hohe Temperaturen, geringe Salinitäten in der Regenzeit und Bewuchsorganismen (Epiphyten) vermutet. Um diese Vermutungen zu überprüfen, wird dieses Aussterben derzeit von verschiedenen Forschern in Tansania näher untersucht. Bislang sind noch keine fundierten Aussagen möglich (per. Mitt. Flowe 2006).

Die Makroalgenkultivierung in *Indien* kann durch natürliche Faktoren negativ beeinflusst werden. Hierzu zählen Zyklone, starke Winde, starke Unterwasserströmungen, Tsunamis und andere natürliche Katastrophen, die Farmstrukturen beschädigen können. Hauptsächlich besteht jedoch die Gefahr der Überfischung der natürlichen Bestände und damit der Erschöpfung der Ressourcen.

Kultivierungsversuche wurden bislang nur in kleinen Gebieten unternommen, so dass die Konsequenzen von Kultivierungen in größeren Gebieten erst überprüft werden sollte. Neuerdings wird die Einführung von Hybrid-Spezies erwogen, von denen sich ein gesteigertes Wachstum und ein besserer Nährstofftrag erhofft wird (Khan und Satam 2003). Die Einführung solcher Arten ist jedoch nicht ungefährlich, da Verluste solcher Hybride ins natürliche System immense Auswirkungen nach sich ziehen können, die nach heutigem Wissen nicht abschätzbar sind.

Die Firma Pepsi Foods Limited (PFL) erforscht die Kultivierung von *Kappaphycus* in Indien (Palk Bay) und versucht die Produktion auszudehnen (Khan und Satam 2003). Da diese Art ursprünglich aus den Philippinen stammt, kann das heimische Ökosystem stark beeinflusst werden (z.B. Artenverdrängung), insbesondere wenn es zu Verlusten der kultivierten Algen ins natürliche Ökosystem

kommt. Die Testgebiete der Palk Bay befinden sich in der Nähe des Golfs von Mannar, dessen einzigartige Biosphäre besonders von solchen Ereignissen betroffen sein könnte.

In *Indonesien* ist eine Zerstörung von Korallenriffen zu befürchten, wenn die Kultivierung von Makroalgen in solch einzigartigen Habitaten durchgeführt wird. Gegenwärtig gefährden hauptsächlich Fische (Wegfraß) und starke Regenfälle die Kulturen. Bei Bewuchs mit Epiphyten (z.B. bei *Ulva*) kann es weitere Beeinträchtigungen geben. Während der Regenzeit (Oktober-April) verlangsamt sich die Wachstumsrate der Makroalgen beispielsweise derart, dass manchmal alle Algen zerstört werden können („ice-ice“-Syndrom). Zwar sind die Gründe für dieses Phänomen bislang nicht bekannt, aber es wird mit der allgemeinen Zerstörung des Ökosystems in Zusammenhang gebracht (UNDP/FAO 1990b).

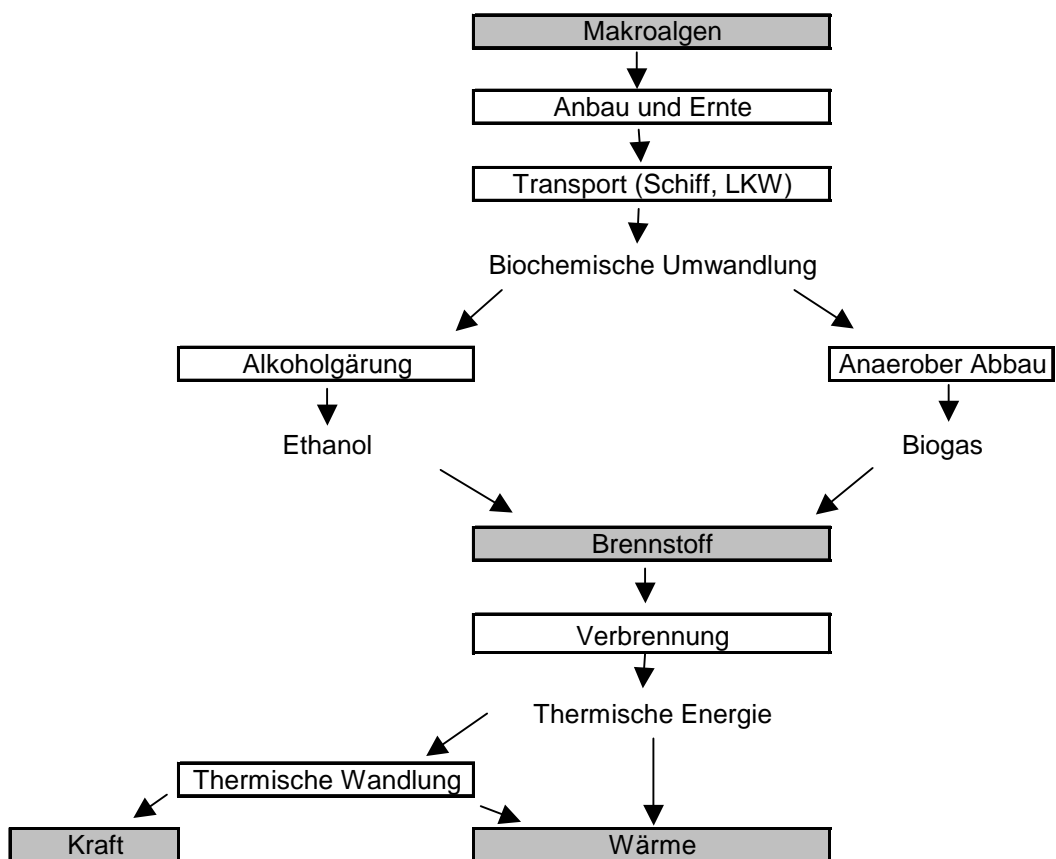
Es bedarf weiterer Forschungsarbeiten, in denen Kultivierungsmethoden entwickelt werden müssen, die mit dem lokalen Ökosystem in Einklang zu bringen sind. Außerdem müssen die ökologischen Folgen für die Meeresumwelt besser überwacht und erforscht werden (UNDP/FAO 1990b).

Da in *Peru* und *Brasilien* die Makroalgenkultivierung kaum fortgeschritten ist, gibt es bislang keine Daten zu den Umweltfolgen. Auch in *Malaysia* und den *Pazifischen Inseln* steckt die Makroalgenkultivierung noch in ihren Anfängen. Hier sind ähnliche Probleme wie in *Indonesien* zu befürchten.

F Bereitstellungsketten für die energetische Umwandlung von Makroalgen

Für die energetische Nutzung von Makroalgen bietet sich hauptsächlich die Fermentierung zu Biogas (Kapitel 5.1) aber auch die alkoholische Vergärung an. Zwischen der Makroalgenengewinnung und der Bereitstellung der Endenergie liegen mehrere Schritte (Bild 13). Dazu gehören neben der Produktion der Biomasse (Anbau, Ernte und Transport) auch die Umwandlungsprozesse (z.B. Anaerober Abbau oder Alkoholgärung) bis hin zur Bereitstellung der Nutzenergie in Form von Wärme oder Kraft.

Bild 13 Bereitstellungskette von der Produktion der Makroalgen bis zur Bereitstellung der Endenergie (grau unterlegte Flächen: Energieträger; nicht unterlegte Flächen: Umwandlungsprozesse).



Quelle: Eigene Darstellung, (verändert nach Kaltschmitt und Hartmann 2001)

Zu Beginn der energetischen Verwertung von Makroalgen erfolgt die *Artauswahl*, die nur aus heimischen Arten getroffen werden sollte. Die intensiven Kultivierungstechniken kommen bei einer energetischen Nutzung aufgrund des hohen Aufwands nicht in Frage. Daher sollten nur solche Makroalgen ausgewählt werden, die extensiv kultiviert und vegetativ vermehrt werden können.

Je nach genauer Kultivierungstechnik müssen spezielle *Strukturen* ins Küstengewässer eingebracht werden (z.B. Langleinen), an denen die Makroalgensetzlinge befestigt werden können. Hierfür fallen Materialkosten und Personalaufwand an. Während der Wachstumsphase ist der Aufwand dagegen gering, da die Algen ohne weitere Pflege auswachsen können. Eine derartige Makroalgenfarm kann je nach den lokalen Bedingungen ca. 2-3 Mal im Jahr beerntet werden.

Nach dem Auswachsen erfolgt die *Ernte* mit Schneidemaschinen oder Werkzeugen. Anschließend werden Setzlinge für die weitere Zucht ausgewählt und wieder an die Leinen angebracht, während die restlichen Algen mit Hilfe von Transportschiffen ans Festland transportiert werden. Hierfür muss Personal, Hebevorrichtungen an Bord des Schiffes und Treibstoff aufgebracht werden. Da das Material nass ist und ein *Transport* über weite Strecken aufgrund des Treibstoffverbrauchs nicht lohnt, sollte die Verwertungsanlage in Küstennähe liegen, so, dass sie aus einem möglichst großen Umkreis beliefert werden kann.

Insgesamt fällt folgender *Aufwand* an:

- Material → Farmstrukturen (Leinen, Bojen, Verankerungen), Treibstoff
- Personal → Auswahl und Anbringen der Setzlinge, Kontrolle, Ernte, Transport
- Geräte → Schneidemaschinen, Erntegeräte
- Transportmittel → Schiff mit Hebevorrichtung (Kran)

Eine Makroalgenfarm mit anschließender energetischer Verwertung ist nur umsetzbar, wenn in Nähe einer Verwertungsanlage genügend Biomasse erwirtschaftet werden kann, um den wirtschaftlichen Betrieb der Anlage zu gewährleisten. Daher ist zu überlegen, ob zusätzlich zu Makroalgen auch andere Biomassearten in der Anlage verwertet werden können (Kofermentation). Da aber auch die weiteren Kosten (Investitionskosten, Kosten zur Erhaltung der Anlage, Produktionskosten und Konversionskosten) die Wirtschaftlichkeit des Gesamtverfahrens beeinflussen, ist es notwendig den Kostenrahmen und Aufwand abzuschätzen und ein Gesamtkonzept zu erstellen, das wirtschaftlich umsetzbar ist.

Literatur

- Anhalt, Jörg-Dieter 2003: „The use of renewable energy in the production of goods: Seaweed“, Rio 3 – World Climate & Energy Event, 411-422, 1-5 December 2003, Rio de Janeiro, Brazil
- Ask, E.H. und F. Ellis, 2001: „The livelihoods approach and management of small-scale fisheries“, *Marine Policy*, 25:377-388
- Avila, M. und H. Pavez 2000: „Utilization and Cultivation of Seaweeds in Chile“, Instituto de Fomento Pesquero, Puerto Montt, (Bericht einzusehen unter: <http://www.ib.usp.br/apf/seaweedchile.html>)
- AWI (Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung) 2002: „Eine Machbarkeitsstudie über die multifunktionale Nutzung von Offshore-Windparks und Offshore-Marikultur im Raum Nordsee“, *Berichte zur Polar- und Meeresforschung* 412, Bremerhaven
- Bird, K. T. und P.H. Benson, eds. 1987: „Seaweed Cultivation for Renewable Resources“, Elsevier, New York
- Briggs, M. 2004: „Widescale Biodiesel Production from Algae“, University New Hampshire, Physics Department
- Buck, B.H. 2002: „Eine Machbarkeitsstudie über die multifunktionale Nutzung von Offshore-Windparks und Offshore-Marikultur im Raum Nordsee“, *Berichte zur Polar- und Meeresforschung* 412/2002, ISSN 1618 - 3193, Alfred-Wegener-Institut Bremerhaven
- BMU, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; „Strategie der Bundesregierung zur Windenergienutzung auf See (im Rahmen der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung), beteiligte Ressorts: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen (BMVBW), Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) und Bundesministerium der Verteidigung (BMVg) unter Beteiligung der Deutschen Energie-Agentur (dena), Januar 2002
- Buschmann, A. H., R. Westermeier, M.C. und C. Retamales 1995: „Cultivation of *Gracilaria* in the sea-bottom in southern Chile: A review“, *Journal for Applied Phycology* 7, 291-301.
- Buschmann, A. H., D. A. López und A. Medina 1986: „A review of the environmental effects and alternative production strategies of marine aquaculture in Chile“, *Aquacult. Eng.* 15, 397-421
- Buschmann, A. H., J.A. Correa, R. Westermeier, M.C. Hernández-González und R. Norambuena 2001: „Red Algal Seaweed Farming in Chile: A review“, *Aquaculture* 194 (2001), 203-220.
- Chiang, Y. M 1981: „Cultivation of *Gracilaria* (Rhodophycophyta, Gigartinales) in Taiwan“, *Proc. Int. Seaweed Symp.*, 10:569–574
- Chynoweth, D. P., 1987: „Biomass Conversion Options,“ in Smith, W. H. and Reddy, R.K., eds., *Aquatic plants for Water Treatment and Resource Re-*

- covery, 621-642, Magnolia Publ. Inc., Orlando, Florida
- Chynoweth, D.P. 2002: „Review of Biomethane From Marine Biomass”, Report prepared for Tokyo Gas Company
- Eklof, J.S., M. Castro de la Tore, L. Adelskold, N.S. Jiddawi und N. Kautsky 2005: „Differences in macrofaunal and seagrasses assemblages in seagrass beds with and without seaweed farms”, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Im Druck
- EPOBIO 2007: Micro- and Macro-Algae: Utility for Industrial Applications - Outputs from the EPOBIO project
www.epobio.net/pdfs/0709AquaticReport.pdf
- FAO (World Food and Agriculture Organization) 1988: „Seminar report on the status of seaweed culture in China, India, Indonesia, ROK, Malaysia, Philippines and Thailand”, Regional Seafarming Development and Demonstration Project (RAS/86/024), Editors: Alessandro Lovatelli and Pedro B. Bueno,
- FAO (World Food and Agriculture Organization) 1991: „Seaweed Collection and Culture in Tanzania“, Aquaculture for Local Community Development Programme GCP/INT/436/SWE.14, Harare, Zimbabwe
- FAO (World Food and Agriculture Organization) 1999: „Potential for Eucheuma cottonii Seaweed Farming in Samoa“, Field Document No. 17, South P
- FAO (World Food and Agriculture Organization) 2001: „Prospects for Seaweed Production in Developing Countries“, FAO Fisheries Circular No. 968 FIIU/C968 (EN), Rome
- FAO (World Food and Agriculture Organization) 2002: „The state of world fisheries and aquaculture“, FAO Fisheries, Sofia,
www.fao.org/sof/sofia/index_en.htm
- FAO (World Food and Agriculture Organization) 2003a: „A guide to seaweed industry“, FAO Fisheries Technical Paper 441, Rome
- FAO (World Food and Agriculture Organization) 2003b: „Yearbooks of Fishery Statistics“, Summary Tables 2003,
<ftp://ftp.fao.org/fi/stat/summary/default.htm>
- Fischereiministerium Chile 2004: Subsecretariade Pesca, Departamento de Pesquarias, Sectorialista Unidad de Recursos Bentónicos, Daten erhältlich unter: <http://www.subpesca.cl/>
- Gomkale, S.D., K. Rama Rao, P.V. Subha Rao, K. Eswaran, M. Ganesan und O.P. Mairh, 2000: „Prospects of cultivation of seaweeds and its impact on sea weed industry” In: Symposium of Ecofriendly Mariculture Technology packages – An Update (Abstracts) 25-26th April, 2000. MBAI, CMFRI, Mandapam Camp.
- Hanisak, M.D. 1981: „Recycling the residues from anaerobis digesters as a nutrient source for seaweed growth”, Bot. Mar. 24:57-61
- Hemminga, M. und C.M. Duarte 2000: „Seagrass Ecology”, Cambridge Univer-

sity Press

- Hirmen, Mirza Pedju, P.J. Mous und J.S. Pet 2002: „Seaweed Culture as an Alternative Livelihood for Local Coastal Villages around Komodo National Park“, Project Update Seweed Culture, January 2002, The Nature Conservancy Coastal and marine Program Indonesia
- Holdgate, M. 1996: The ecological significance of biological diversity“, *Ambio* 25:409-416, The Royal Swedish Academy of Sciences
- Kaladharan, P. und N. Kaliaperumal 1999: „The seaweed industry in India“, *Naga*, The ICLARM Quarterly, 22(1):11-14
- Kaltschmitt, M. und H. Hartmann (Hrsg.) 2001: „Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken, Verfahren“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Keller, „Rechtsschutzdefizite Dritter gegen Genehmigungserteilungen für Windenergieanlagen in der AWZ?“, *Zeitschrift für Umweltrecht*, Aufsätze S.184-191 4/2005, 2005
- Khan, S. I. und S.B. Satam 2003, „Seaweed Mariculture: Scope and Potential in India“, College of fisheries, Agricultural University, Ratnagiri
- Komilus, C.F., T. Hassan, W.C. Shing, I. Isnain, B. Martin, D. Laision, G. Gueh, R. Biusing & B. Jintony, 1999. The Semporna Islands Project: The Marine Fisheries Industry. A Report for the Semporna Islands Project. Fisheries Research Centre, Sabah.
- Kumar, A., P. Katiha und P.K. Joshi 2003: „A Profile of People, Technologies and Policies in Fisheries Sector in India“, National Centre for Agricultural Economics and Policy Research (NCAP), New Delhi, India
- Leitfaden Bioenergie 2005: „Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen“, Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe, 2. Überarbeitete Auflage, ISBN 3-00-015389-6, Lfd. Nr. 189
- Mandagi, S.V. und I. White 2005: „A new technique for seaweed cultivation to minimise impacts on tropical, coastal environments“, Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University, Canberra, Working Paper in Progress
- Miao, X., Q. Wu und C. Yang 2004: „Fast pyrolysis of microalgae to produce renewable fuels“, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 71:855-863
- Moreira, J.R. 2004: „Global Biomass Energy Potential“; Paper prepared for expert workshop on Greenhouse Gas Emissions and Abrupt Climate Change: Positive Options and Robust Policy, Paris 30 September – 1 October 2004 (Bezug als pdf unter <http://accstrategy.org/simiti/moreira.pdf>)
- Mshigeni, Keto E. 2001, „The cost of Scientific and technological ignorance“ With special reference to Africa’s rich Biodiversity, UNDP/UNOPS Regional Project RAF/99/021, ZERI Regional Office for Africa
- ÖKO (Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie e.V.) 2004: „Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse“; Uwe R.

- Fritsche (Projektleitung) in Kooperation mit FhI-UMSICHT (Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, Oberhausen), IE (Institut für Energetik und Umwelt, Leipzig), IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg), IZES (Institut für ZukunftsEnergie-Systeme, Saarbrücken), TU Braunschweig (Institut für Geoökologie/Abt. Umweltsystemanalyse), TU München (Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaues); Endbericht gefördert vom BMU, Darmstadt usw. (Bezug als PDF unter www.oeko.de/service/bio)
- ÖKO (Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie e.V.) 2005: „Bewertung des Pflanzenanbaus zur Gewinnung von Biokraftstoffen in Entwicklungsländern unter ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten“, Uwe R. Fritsche/Katja Hünecke/Kirsten Wiegmann, Kurzstudie für das BMZ, Darmstadt
- Piker L. 2001: „Wirtschaftliches und Ökologisches Potenzial einer Algenfarm in Deutschland“, Coastal Research and Management Kiel
- Romo, Héctor, 2005: „Explotación y Futuro des los Recursos Algológicos en Chile“, Universidad de Concepción Seminario FEORPA, Talcahuano
- Santelices B. und M.S. Doty 1989: „A Review of Gracilaria Farming“, Aquaculture 78, p.95-133
- TCMP, 1999: „Tanzania Mariculture Issue Profile“, Prepared by Tanzania Coastal Management Partnership Support Unit and the Mariculture Working Group, Working Document: 5009 TCMP, Dar es Salaam, August 1999, A joint initiative between the National Environment Management Council, the University of Rhode Island/Coastal Resources Center and the United States Agency for International Development
- UNDP (United Nations Development Program) und FAO (World Food and Agriculture Organization) 1989: „Culture of Kelp (*Laminaria japonica*) in China“, Prepared for the *Laminaria* polyculture with mollusc training course conducted by the Yellow Sea Fisheries Research Institute in Quindao, China, organized by the Regional Seafarming Development And Demonstration Project (RAS/86/024)
- UNDP (United Nations Development Program) und FAO (World Food and Agriculture Organization) 1990a: Technical Resource Papers Regional Workshop On The Culture And Utilization Of Seaweeds Volume II, „Environmental aspects of seaweed culture“, Phillips M. J., Regional Seafarming Development And Demonstration Project (RAS/90/002), Philippines
- UNDP (United Nations Development Program) und FAO (World Food and Agriculture Organization) 1990b: „Report of the Regional Workshop on the Culture & Utilization of Seaweeds“, Regional Seafarming Development and Demonstration Project RAS/90/002, Network of Aquaculture Centres in Asia Bangkok, Thailand
- Wagner, H. 2002: „Küstengewässer: Ökologische und ökonomische Bedeutung“, Mittelseminar: Gewässerschutz und –management, Geographisches Institut der Universität Kiel

- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) 2003: „Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit“; Berlin
- Werner, A., D. Clarke und S. Kraan 2004: „Strategic Review of the Feasibility of Seaweed Aquaculture“, Irish Seaweed Centre, Martin Ryan Institute, National University of Ireland, Galway
- Wolf, „Grundfragen der Entwicklung einer Raumordnung für die Ausschließliche Wirtschaftszone“, Zeitschrift für Umweltrecht, Ausätze S.176-184 4/2005, 2005
- Wu, Q. und X. Miao 2005: „Biofuels production from Microalgae after heterotrophic growth“, Department of Biological Sciences and Biotechnology, Tsinghua University, Beijing, China

Internetquellen:

<http://www.algenfarm.de>

<http://www.awi-bremerhaven.de/Biomeer/aquaculture-e.html>

<http://www.columbusdispatch.com>

<http://www.crm-online.de>

http://www.energienetz.de/pre_cat_43-id_484-subid_808-subsubid_810_.html

<http://www.fnr.de>

http://www.ifm.uni-kiel.de/allgemein/research/topics/fb3_select/fb3_s6.htm

<http://www.leben-begreifen.uni-bonn.de/happe.html>

<http://www.schmack-biogas.de>

<http://www.seapura.com/>

www.spirolymp-ltd.com

<http://www.surialink.com>

http://www.ums.edu.my/ipmb/en/infra_seaweed.htm, Borneo Marine Research Institute (BMRI), UMS Seaweed Cultivation Project .

http://www.unh.edu/p2/biodiesel/article_alge.html

<http://web.uvic.ca/bmlp/news/news32.html>, Brazil Mariculture Linkage Program (BMLP), Positive results in macroalgae culture at Barra dos Carvalhos stimulate nearby communities.

Persönliche Mitteilung:

Dr. Dirk Brusis, Schmack Biogas vom Nov. 2007

BSH, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, 2005

Dr. Flower E. Msuya, Institute of Marine Sciences, University Dar es Salaam, Zanzibar, Tanzania

Omar Fom, Expert in Seaweeds, Tanzania

Linné, M. 2005: www.biomil.se

Dr. CRK Reddy, Marine Algae and Marine Environment Discipline, Central Salt and Marine Chemicals Research Institute, Bhavnagar, India

Prof. Dr. Jha, Deputy Director, Head Marine Algae&Environment, Chief Co-ordinator, Centre of Excellence in Marine Biotechnology, Central Salt and Marine Chemicals Research Institute, Bhavnagar, India

Albertina Kameya, Jefa de Investigaciones en Biodiversidad, Instituto del Mar del Peru, Callao-Peru

María Alejandra Pinto Blaña, Sectorialista Unidad de Recursos Bentónicos, Departamento de Pesquerías, Subsecretaría de Pesca

Abkürzungen

AWI	Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven
AWZ	Ausschließliche Wirtschaftszone
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMLP	Brazil Mariculture Linkage Program
BMRI	Borneo Marine Research Institute
BRD	Bundesrepublik Deutschland
CH ₄	Methan
CMFRI	Central Marine Fisheries Research Institute
CO ₂	Kohlendioxid
CRM	Coastal Research and Management für Mensch und Meer, Kiel
CSMCRI	Central Salt and Marine and Chemical Research Institute
DAFT	dry ash-free tons
EBSIE	Projekt: Effizienzsteigerung der Biogasnutzung durch Solarenergie
EJ	Exajoule (10 ¹⁸ Joule)
FAO	World Food and Agriculture Organization
FFH	Flora-Fauna-Habitat
FNR	Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe
HIV	Human Immundeficiency Virus
IBA	Important Bird Area
IDER	Instituto de Desenvolvimento Sustentável de Energias Renováveis
INWENT	Internationale Weiterbildung und Entwicklung gGmbH, Deutschland
MJ	Megajoule (10 ⁶ Joule)
OSPAR	Oslo-Paris Übereinkommen
ÖKO	Öko-Institut (Institut für angewandte Ökologie e.V.)
PFL	Pepsi Foods Limited
PJ	Petajoule (10 ¹⁵ Joule)
RM	Región Metropolitana de Santiago
SEAPURA	EU-Projekt : Species Diversification and Improvement of Aquatic Production in Seaweeds Purifying Effluents from Integrated Fish Farms

SRÜ	Seerechtsübereinkommen
TCMP	Tanzania Coastal Management Partnership
TM	Trockenmasse
UNDP	United Nations Development Program
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie