

DIE ÖKOBILANZ ALS WERKZEUG ZUR BEURTEILUNG ALTERNATIVER KRAFTSTOFFE IN TURBOLUFTSTRAHLTRIEBWERKEN

M. Gehrler, H. Seyfried, S. Staudacher
Institut für Luftfahrtantriebe
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart, Deutschland

Kurzfassung

Biokraftstoff könnte zur Reduzierung des globalen Treibhauseffekts und zur Ressourcenschonung beitragen. Von großem Interesse sind Mikroalgen als Rohstofflieferant, da sie eine signifikant höhere Produktivität pro Hektar und Jahr aufweisen und zusätzlich CO_2 aus Industrieabgasen zum Wachstum nutzen können. Der Pfad für die Herstellung eines synthetischen Kraftstoffs aus der Süßwasser-Mikroalge *Auxenochlorella protothecoides* beginnt mit der Kultivierung und endet mit der Verbrennung im Triebwerk. Hier betrachten wir zunächst nur den Weg von der Anzucht bis zur Ernte der ölhaltigen Biomasse, das heißt die Prozessschritte Algenkultivierung, Vorkonzentration, Elektroporation und Entwässerung. Für die Bereitstellung des Primärenergiebedarfs für Prozessenergie und Prozessstoffe ergibt sich ein CO_2 -Äquivalent von 6,45 kg pro kg Algentrockenmasse und ein Netto-Energie-Verhältnis (*NER*) von 0,266, das im Vergleich zu konventionellem Kerosin (*NER*=0,867) unvorteilhaft ausfällt. Der Prozessenergie liegt der europäische Strommix zugrunde. Bei Verwendung regenerativer Energiequellen verbessert sich das Treibhauspotential auf 1,27 kg CO_2 -Äquivalente pro kg Algentrockenmasse und das *NER* auf 0,545. Wird bei der Berechnung des *NER* nur der nicht regenerative Primärenergieanteil berücksichtigt, ändert sich das *NER* auf 0,307 und bei Prozessenergie aus regenerativen Energiequellen auf 3,04.

ABKÜRZUNGEN

BtL	Synthetischer Kraftstoff aus Biomasse
C_B	Zellichte
CO_2	Kohlendioxid
H_u	Heizwert
HVO	Hydriertes Pflanzenöl
korr	korrigiert
<i>NER</i>	Netto-Energie-Verhältnis
TM	Trockenmasse

Außerdem kann CO_2 aus Industrieabgasen genutzt werden [23].

Derzeit liegt der Fokus der Luftfahrt auf „Drop-in“-Kraftstoffen, welche ohne Systemänderungen integriert werden können. Neben den synthetischen Kraftstoffen aus Kohle und Erdgas werden synthetische Kraftstoffe aus Biomasse (BtL) und hydrierte Pflanzenöle (HVO) untersucht. Die Rohstoffe werden in Kohlenwasserstoffe umgewandelt und haben dann nahezu identische Eigenschaften wie Kerosin [8, 9]. In Flugversuchen werden diese zu 50% herkömmlichem Kerosin beigemischt [1]. BtL und HVO aus Mikroalgen gelten als erneuerbare und CO_2 -neutrale Alternative. In dieser Studie wird ein synthetischer Kraftstoff aus der Süßwasser-Mikroalge *Auxenochlorella protothecoides* betrachtet.

1 EINFÜHRUNG

Biokraftstoffe der ersten Generation aus öl-, stärke- oder zuckerhaltigen Landpflanzen zeichnen sich durch eine hohe Technologiereife der Kraftstoffherstellung aus. Sie benötigen Ackerfläche und fruchtbare Böden zum Wachstum. Somit stehen sie in direkter Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion [6]. Eine neue Generation sind Biokraftstoffe aus Mikroalgen. Sie haben gegenüber Landpflanzen eine signifikant höhere Photosyntheseleistung und speichern Kohlenstoff als Biomasse vorwiegend in Lipid- oder Kohlehydratmolekülen [23]. Der Ölertrag pro Hektar erreicht bei Mikroalgen mit 30%-Ölgehalt pro kg Trockenmasse im Vergleich zu konventionellen Landpflanzen den 9–300-fachen Wert [6]. Dazu benötigen sie keine Ackerfläche.

Die Kraftstoffherstellung aus Mikroalgen geschieht in vier Prozessschritten: Kultivierung, Ernte, Rohstoffgewinnung und Rohstoffumwandlung in einen Kraftstoff. Die Kultivierung wird in offenen oder geschlossenen Systemen durchgeführt [2, 4, 6]. Offene Systeme, beispielsweise Raceway-Becken, sind einfach in ihrer Bauweise. Die Becken werden aus Beton gefertigt und zur Durchmischung wird die Mikroalgensuspension durch Schaufelräder angetrieben [2]. Die Kontaminierungsgefahr durch Fremdstoffe und die Verdunstungsraten sind hoch [2]. Allerdings betragen die Anlagenkosten ein Zehntel der Anlagenkosten der geschlos-

senen Systeme [16]. Geschlossene Systeme sind energie- und wartungsintensiver, da sie im Vergleich zu den offenen eine höhere Komplexität aufweisen [6]. Beide Systeme benötigen Nährstoffe, hauptsächlich Stickstoff und Phosphor, CO_2 und Licht [23]. Bei der Algenernte werden die Algen vom Wasser getrennt. Algenspezies und -größe bestimmen die Erntemethode. Bekannte Methoden sind Zentrifugation, Filtration, Flotation und Sedimentation [2]. Im Anschluss daran wird der Rohstoff gewonnen. Für Biodiesel oder HVO werden die Lipide durch mechanisch-chemischen Zellaufschluss mit anschließender Extraktion gewonnen [7]. BtL benötigt als Rohstoff ölhaltige Biomasse. Dazu werden die Algenzellen mittels Elektroporation aufgeschlossen. Anschließend wird das Wasser aus den Algenzellen entfernt [11]. Abschließend erfolgt die Umwandlung in den Kraftstoff.

Wir bewerten Energieaufwand und Umweltwirkung über eine Ökobilanz. Sie wird mit der Software „GaBi“ durchgeführt [20].

2 ÖKOBILANZ

Die Ein- und Ausgabegrößen sowie die potenziellen Umweltwirkungen eines Produkts oder einer Dienstleistung werden über den gesamten Lebensweg durch die Ökobilanz analysiert [10]. Als technische Grundlage definiert die DIN EN ISO 14044 die vier Phasen zur Durchführung einer Ökobilanz: Ziel und Untersuchungsrahmen, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Interpretation [10].

2.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

Die synthetische Kraftstoffherstellung aus Mikroalgen (Algenbiomassegewinnung, Verkokung, Synthesegasherstellung und Fischer-Tropsch-Synthese) ist in Abb. 1 dargestellt.

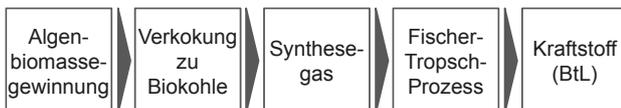


Abb. 1: Synthetische Kraftstoffherstellung (BtL) aus Mikroalgen

Ziel dieser Studie ist die Identifikation der Haupteinflussfaktoren der Algenbiomassegewinnung (Abb. 2). Untersuchungsgegenstand sind die Prozessschritte der Algenkultivierung aus Laborkultivierung und Kultivierung in offenen Systemen, der Vorkonzentration, der Elektroporation und der Entwässerung. Bisher gibt es noch keine großskalige industrielle synthetische Kraftstoffherstellung aus Mikroalgen. Die Daten

stammen aus Labor- und Pilotanlagen [3, 5]. Folgende Annahmen und Parameter liegen der Modellierung zugrunde:

- die funktionelle Einheit der Ökobilanz ist 1 kg Algentrockenmasse (kgTM);
- die Algenbiomassegewinnung in offenen Systemen findet in Europa statt;
- die Verdunstungsrate wird konstant mit 10 l/m^2 pro Tag angenommen [2];
- Verdunstung erfordert keinen Düngerausgleich;
- 1 kgTM bindet $1,8 \text{ kg CO}_2$ [6, 22];
- die Zelldichte C_B am Ende jedes Kultivierungsschritts ist konstant ($C_B = 1,3 \text{ g/l}$);
- abzentrifugiertes Wasser der Vorkonzentration wird ohne Wasseraufbereitung in das $1\,500\,000 \text{ l}$ -Raceway-Becken zurückgeführt;
- überschüssiges Wasser aus Vorkonzentration und Entwässerung wird als Abwasser behandelt;
- der Heizwert H_u der Algenbiomasse beträgt $31,55 \text{ MJ/kg}$ [17];
- schrittweise Kultivierung ab dem Laborstadium vermindert die Verunreinigung der Algenkultur [4];
- die Anlage und deren Herstellung wird bei technologischen Prozessen mit langer Laufzeit und hohem Durchsatz nicht mitbilanziert, da sich der Prozess stärker auf die Emissionen auswirkt als die Anlagegüter [20].

2.2 Sachbilanz

Algenkultivierung

In Abb. 2 sind die Kultivierungsschritte dargestellt. Die Anzucht findet in Erlenmeyerkolben statt und dauert 7 Tage. Die Biomasseanreicherung erfolgt schrittweise von den Blasensäulen über die offenen Systeme (Raceway-Becken). Jede Kultivierungseinheit benötigt ein Animpfen mit frischer Algensuspension von 10-15% des Kultivierungsvolumens zum Schutz vor Fremdalgen und Fremdorganismen wie beispielsweise Bakterien [5]. Der Rest der Kultivierungseinheit wird mit Wasser aufgefüllt. Die Kultivierungseinheiten müssen entsprechend dem Animpfvolumen vervielfacht werden (Abb. 2). Pro 20l-Säule sind zwei $1,221 \text{ l}$ -Blasensäulen nötig, während pro 1000 l -Raceway-Becken sieben 20l-Blasensäulen benötigt werden. 15% Animpfvolumen des $15\,000 \text{ l}$ -Raceway-Beckens entsprechen 2250 l . Für deren Bereitstellung werden drei 1000 l -Raceway-Becken benötigt, 750 l bleiben im Becken. Da die Lipidanreicherung der Algenbiomasse 15 Tage dauert und im $1\,500\,000 \text{ l}$ -Raceway-Becken

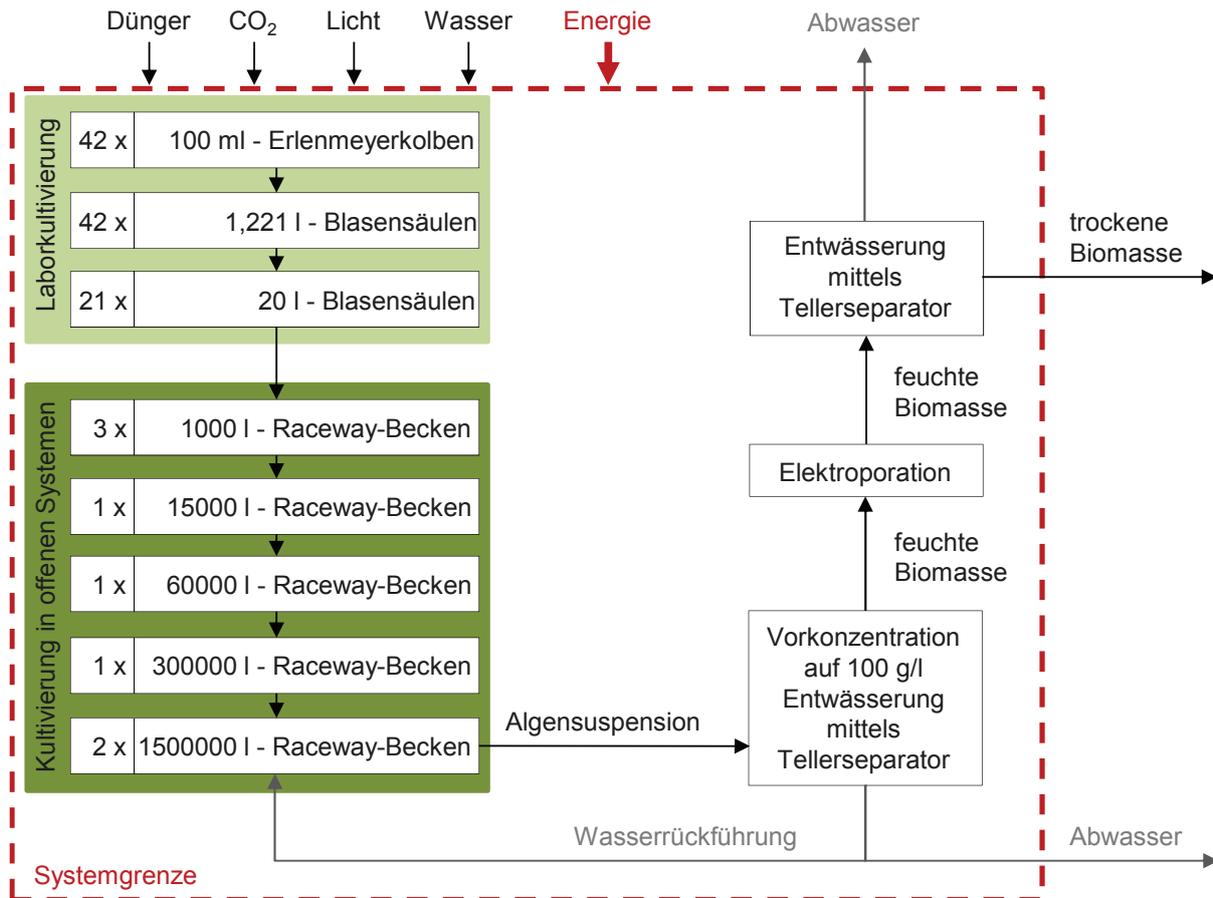


Abb. 2: Algenbiomassegewinnung durch Algenkultivierung, Vorkonzentration, Elektroporation und Entwässerung

stattfindet werden zwei Raceway-Becken benötigt. Dadurch können alle 10 Tage 1950 kg Algentrockenmasse geerntet werden.

Die Mikroalge *Auxenochlorella protothecoides* benötigt zum Wachstum die mineralischen Nährstoffe Stickstoff (N), Phosphor (P), Magnesium (Mg), Eisen (Fe) und Calcium (Ca). In Tab. 1 sind die Konzentrationen in mmol/l angegeben, die für das Wachstum nötig sind. Die Biomasseanreicherung erfolgt bei einer Stickstoffzufuhr von 2 mmol/l. Für die Lipidanreicherung wird die Stickstoffzufuhr auf 1 mmol/l reduziert. Zur Gewährleistung eines konstanten pH-Werts werden 3 mmol/l KH_2PO_4 zugeführt [5].

Tab. 1: Nährstoffkonzentration in mmol/l [5]

Nährstoff	mmol/l
$(\text{NH})_4\text{2HPO}_4$	2,0
KH_2PO_4	3,0
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,5
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,02
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,2

Die Anzucht der Mikroalgen in Erlenmeyerkolben erfordert Energie für Beleuchtung, Kühlung, Belüftung, Betrieb eines Kreisschüttlers und Reinigung. Dies sind 66 kWh in 7 Tagen für 200 ml Algensuspension in zwei Erlenmeyerkolben. Für die nächste Kultivierungsstufe von 2,442 l-Algensuspension werden zwei 1,221 l-Blasensäulen benötigt. Diese verbrauchen in 10 Tagen 377,2 kWh für Beleuchtung, Klimatisierung und CO_2 -Einblasung mittels einer Luftpumpe. Mit 2,442 l kann die 20 l-Blasensäule angeimpft werden, welche in 10 Tagen 353,4 kWh benötigt. Die Beleuchtung skaliert mit der Anzahl an Kultivierungseinheiten. Die Kühlenergie wird über den volumenbezogenen Wärmeeintrag skaliert ($\dot{Q} \sim V^{\frac{2}{3}}$).

Die Durchmischung in den anschließenden Raceway-Becken erfolgt durch Schaufelräder bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 30 cm/s [4]. Der Energieverbrauch liegt bei 0,016 kWh/m² pro Tag [2]. Über einen Carbonator wird CO_2 in die Raceway-Becken eingeblasen. In 10 h werden 2,6 kg CO_2 pro 75 m² Oberfläche eingeblasen [4]. Die eingeblasene CO_2 -Menge pro Raceway-Becken wird über die Carbonatorfläche und -anzahl skaliert. Die benötigte Pumpenergie zur Einblasung des CO_2 -haltigen Industrieabgases

aus einem Kraftwerk wird mit 0,0222 kWh pro kg CO₂ veranschlagt [18]. Überschüssiges CO₂, dass nicht in Biomasse gebunden wird, weil es über die Wasseroberfläche ausgast, wird in der Ökobilanz berücksichtigt. Der Sauerstoff aus der Photosynthese wird als Emission berücksichtigt. Die Energie zum Umpumpen der Algensuspension von einem in das nächste Raceway-Becken wird über eine Kreiselpumpe mit einem Förderstrom von 50 m³/h und einer Leistungsaufnahme von 9 kW berechnet [15].

In Tab. 2 sind die benötigten Energiemengen in kWh pro kgTM für die Bereitstellung der Strömungsgeschwindigkeit, der CO₂-Einblasung und des Umpumpens der Raceway-Becken angegeben. Für die Lipidanreicherung im 1 500 000 l-Raceway-Becken liegt die Kultivierungsdauer bei 15 Tagen, wohingegen die Biomasseanreicherung in den vorherigen Becken nur 10 Tage dauert. Die Energiemenge pro kgTM zum Schaufelantrieb steigt deshalb von 0,41 auf 0,65 kWh pro kgTM.

Tab. 2: Prozessenergie der Raceway-Becken in kWh pro kgTM [2, 15, 18]

Prozessenergie	kWh pro kgTM
Schaufelradantrieb	0,41 (0,65)
CO ₂ -Einblasung	0,0222
Umpumpen	0,138

Vorkonzentration

Die Mikroalge *Auxenochlorella protothecoides* gehört zur Gattung der *Chlorella* und hat eine Größe von 2–12 µm [14]. Um einen adäquaten Durchsatz und eine Konzentration von C_B= 100 g/l zu gewährleisten, werden Zentrifugen zur Wasserabscheidung verwendet. Der verwendete Tellerseparator hat einen Durchsatz von 24 m³/h bei einer Effektivleistung von 30 kW und wird von verschiedenen Herstellern speziell für Algen entwickelt [12, 21].

Elektroporation

Zur Gewinnung ölhaltiger Algenbiomasse muss Wasser aus den Algenzellen entfernt werden. Die Zellmembran der Mikroalgen wird durch Hochspannungsentladungen zerstört [13]. Die entstehende Zellperforation entspricht der Größe der Wassermoleküle. Die dafür nötige Energie beträgt 1,5 MJ pro kgTM [11]. Die Elektroporation wird bisher nur in Laboranlagen durchgeführt; eine Durchflusszelle hat einen Durchsatz von 0,5 l/h [11].

Entwässerung

Die abschließende Fest-Flüssig-Trennung entfernt das freie Wasser zwischen und innerhalb der Algenzellen.

Zum Einsatz kommen die Tellerseparatoren der Vorkonzentration. Endprodukte sind Wasser und ölhaltige Biomasse.

In Tab. 3 sind die Eingangsgrößen des Gesamtprozesses der Algenbiomassegewinnung zur Erzeugung von einem kgTM je Prozess zusammengefasst.

Tab. 3: Eingangsgrößen der Prozesse der Algenbiomassegewinnung zur Erzeugung von 1 kgTM [2, 15, 18]

Prozessschritt	Menge pro erzeugtem kgTM	Einheit
<i>Labor Kultivierung</i>		
Elektrische Energie	8,578	kWh
Dünger	2,1·10 ⁻⁴	kg
Frischwasser gesamt	0,228	kg
<i>Offene Systeme</i>		
Elektrische Energie	0,802	kWh
Dünger	0,729	kg
CO ₂	2,6	kg
Frischwasser gesamt	564,4	kg
<i>Vorkonzentration</i>		
Elektrische Energie	1,1	kWh
<i>Elektroporation</i>		
Elektrische Energie	0,417	kWh
<i>Entwässerung</i>		
Elektrische Energie	0,0125	kWh

3 ERGEBNISSE

Die Algenbiomassegewinnung hat einen Primärenergiebedarf von 118,56 MJ pro kgTM. In Abb. 3 ist die Verteilung des Primärenergiebedarfs im Verlauf der Algenbiomassegewinnung dargestellt. Bezugsgröße ist ein kgTM.

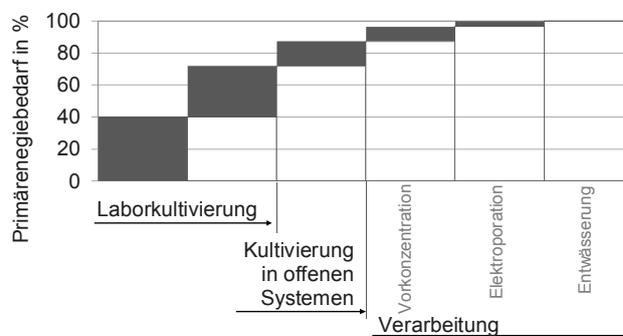


Abb. 3: Kumulative Verteilung des Primärenergiebedarfs der Algenbiomassegewinnung

Den größten Primärenergieanteil mit 71,7% haben die Prozessschritte der Laborkultivierung. Ihnen folgt die Kultivierung in offenen Systemen mit 15,5%. Die nachfolgenden Prozesse der Verarbeitung bestehend aus Vorkonzentration, Elektroporation und Entwässerung haben zusammen einen Anteil von 12,8%.

Der hohe Primärenergiebedarf der Laborkultivierung ist eine Folge der Prozessenergie. Der Primärenergiebedarf für die Prozessstoffe liegt unter einem Promille. Die Prozessenergie der Laborkultivierung teilt sich auf in 82,8% für die Kühlung, 10,5% für die Beleuchtung und 6,7% für Sonstiges (Abb. 4).

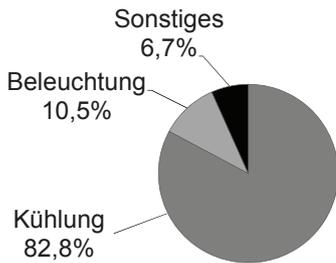


Abb. 4: Prozessenergie der Laborkultivierung

Auch in der Gesamtbilanz ist die Prozessenergie für den hohen Anteil des Primärenergiebedarfs verantwortlich; er beträgt 91,2%. Die eingesetzten Prozessstoffe Dünger und Wasser haben einen Anteil von 8,8% am Primärenergiebedarf. 1 kgTM erfordert 39,27 MJ Prozessenergie und 567,957 kg Prozessstoffe. Zu deren Bereitstellung werden 118,56 MJ Primärenergie benötigt. Davon sind 102,8 MJ nicht regenerativ und 15,76 MJ regenerativ. Der nicht regenerative Primärenergieanteil setzt sich zu 90,2% aus der Prozessenergie und zu 9,8% aus den Betriebsstoffen zusammen. In Abb. 5 ist der Zusammenhang dargestellt.

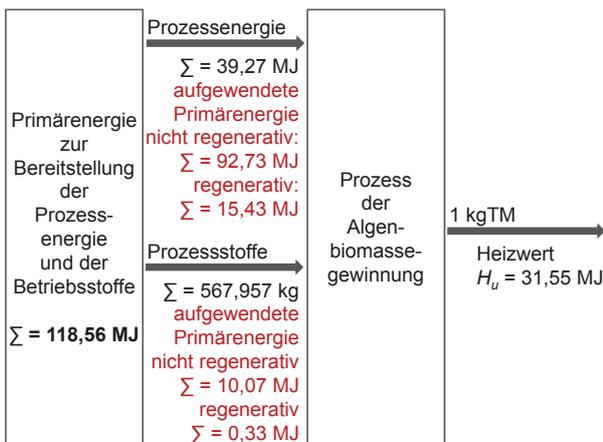


Abb. 5: Primärenergiebedarf der Algenbiomassegewinnung

In der Sachbilanz wird der Prozessenergie der europäi-

sche Strommix zugrunde gelegt. Für die Bereitstellung von 1 MJ europäischem Strommix sind 2,75 MJ Primärenergie nötig; davon sind 2,36 MJ nicht regenerativ und 0,39 MJ regenerativ [20].

In Abb. 6 ist der nicht regenerative und regenerative Primärenergiebedarf für 1 kgTM in Abhängigkeit der Prozessenergie aus verschiedenen Quellen dargestellt. Der Anteil der Betriebsstoffe an der Primärenergie bleibt konstant. Wird die elektrische Energie durch Strom aus Photovoltaik bereitgestellt, so erhöht sich der Primärenergiebedarf pro kgTM von 118,56 MJ auf 315,64 MJ. Davon sind 18,98 MJ nicht regenerativ und 296,66 MJ regenerativ. Durch Strom aus Windkraft verringert sich der Primärenergiebedarf pro kgTM von 118,56 MJ auf 110,48 MJ und durch Strom aus Wasserkraft auf 57,91 MJ. Der nicht regenerative Anteil der Prozessenergie liegt bei Strom aus Wind- und Wasserkraft unter 2%.

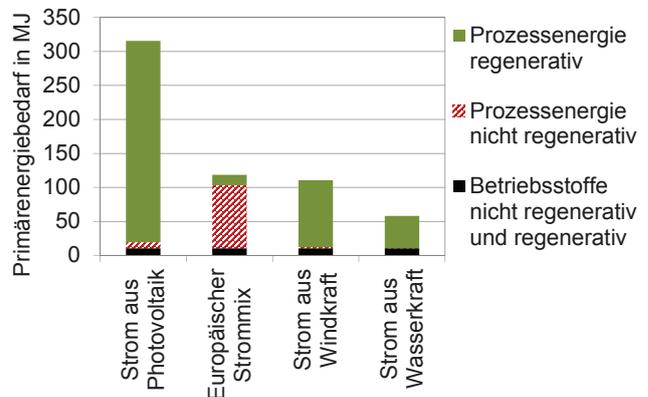


Abb. 6: Primärenergiebedarf in MJ für 1 kgTM in Abhängigkeit der Prozessenergie aus verschiedenen Quellen

Das Netto-Energie-Verhältnis (*NER*) setzt den Heizwert eines Produkts ins Verhältnis zum aufgewendeten Primärenergiebedarf für die Herstellung eines Produkts [17].

$$(1) \quad NER = \frac{\text{Heizwert eines Produkts}}{\text{Aufgewendeter Primärenergiebedarf}}$$

Ein ökonomisch sinnvoller Prozess hat ein *NER* > 1, was bedeutet, dass weniger Energie zur Herstellung des Produkts benötigt wird, als Energie in ihm gespeichert ist. Für die Algenbiomassegewinnung mit einem Primärenergiebedarf von 118,56 MJ pro kgTM und einem Heizwert H_u der Algenbiomasse von 31,55 MJ/kg beträgt das *NER* 0,266. Für die Bestimmung des *NER* eines synthetischen Kraftstoffs aus Mikroalgen müssen zusätzlich die Prozessschritte Verkokung, Synthesegas und Fischer-Tropsch-Prozess berücksichtigt werden. Allerdings ist das *NER* der Algenbiomassege-

winnung bereits ohne diese Raffinerieprozesse niedriger als das des Kerosins; dieses hat ein NER von 0,867 [20]. Wird die Energiebereitstellung auf Strom aus Windkraft umgestellt, so steigt das NER auf 0,286 und für Strom aus Wasserkraft auf 0,545. Für Strom aus Photovoltaik reduziert sich das NER auf 0,1. Hierbei wird allerdings der Primärenergiebedarf aus nicht regenerativem und regenerativem Anteil berücksichtigt. Da der regenerative Anteil ohne fossile Energie und ohne Umweltwirkung gewonnen wird, muss dieser bei der Berechnung des NER abgezogen werden. Das korrigierte NER_{korrr} berechnet sich dann aus dem Heizwert eines Produkts und dem nicht regenerativen Primärenergiebedarf für die Herstellung eines Produkts [19].

$$(2) \quad NER_{\text{korrr}} = \frac{\text{Heizwert eines Produkts}}{\text{nicht regenerative Primärenergie}}$$

In Tab. 4 sind die NER_{korrr} für die Algenbiomassegewinnung aus verschiedenen Energiequellen im Vergleich zu den berechneten NER zusammengefasst.

Tab. 4: NER_{korrr} für die Algenbiomassegewinnung aus verschiedenen Energiequellen im Vergleich zu NER

Energiequelle	NER	NER_{korrr}
Europäischer Strommix	0,266	0,307
Strom aus Photovoltaik	0,1	1,66
Strom aus Windenergie	0,286	2,66
Strom aus Wasserkraft	0,545	3,04

Nur wenn die Prozessenergie aus regenerativen Quellen bereitgestellt wird, kann ein $NER_{\text{korrr}} > 1$ erreicht werden und ist damit auch höher als das des Kerosins.

Allerdings sind die CO_2 -Äquivalente der Algenbiomassegewinnung pro kgTM bereits ohne die Raffinerieprozesse höher als die des Kerosins (0,384 kg CO_2 -Äquivalente pro kg Kerosin [20]). Neben der Prozessenergie wirken sich die Prozessstoffe auf die CO_2 -Äquivalente aus. Das Treibhauspotential der Algenbiomassegewinnung pro kgTM errechnet sich zu 6,45 kg CO_2 -Äquivalenten. Wird die Prozessenergie durch Strom aus Wasserkraft bereitgestellt, so verringert sich das Treibhauspotential auf 1,27 kg CO_2 -Äquivalente pro kgTM. Wird die Prozessenergie durch Strom aus Windkraft bezogen, errechnet sich das Treibhauspotential zu 1,33 kg CO_2 -Äquivalente pro kgTM und durch Strom aus Photovoltaik zu 1,76 kg CO_2 -Äquivalente pro kgTM. Haupteinflussfaktoren sind Dünger und Frischwasser.

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Die Ökobilanz der Algenbiomassegewinnung aus der Mikroalge *Auxenochlorella protothecoides* zeigt, dass die Prozessenergie mit 91,2% am Gesamtprimärenergieaufwand (118,56 MJ) des Verfahrens beteiligt ist. Bei Einsatz von europäischem Strommix ergibt das ein CO_2 -Äquivalent von 6,45 kg pro kgTM und ein NER von 0,266. Das NER fällt gegenüber dem Wert von 0,867 für konventionelles Kerosin deutlich schlechter aus. Wird Prozessenergie aus regenerativen Quellen eingesetzt, so verbessert sich das Treibhauspotential auf 1,27 kg CO_2 -Äquivalente und das NER auf 0,545. Wird das NER um den regenerativen Primärenergieanteil korrigiert, ändert sich das NER_{korrr} für die Algenbiomassegewinnung mit Strom aus regenerativen Quellen auf 3,04. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Erzeugung von Flugzeugkraftstoff aus Algenbiomasse beim derzeitigen Stand des Herstellungsverfahrens mit großer Wahrscheinlichkeit erst dann sinnvoll ist, wenn die CO_2 -Bilanz deutlich verbessert wird und die benötigte elektrische Energie ausschließlich aus regenerativen Quellen stammt.

In einer Folgestudie soll untersucht werden, ob und wie sich Prozessoptimierungen auf das NER und das Treibhauspotential auswirken und wie groß der Einfluss der nachgeschalteten Raffinerieprozesse ist.

LITERATUR

- [1] AIR TRANSPORT ACTION GROUP: Sustainable biofuels - Testing programme. *www.enviro.aero*, (Stand: 2013).
- [2] BECKER, E.W.: *Microalgae Biotechnology and Microbiology*. Cambridge University Press, 2008.
- [3] BEN-AMOTZ, A.: Bio-Fuel and CO_2 Capture by Algae. *Seambiotic Ltd.*, (2008).
- [4] BOROWITZKA, M.A.: Culturing microalgae in outdoor ponds. *Algal Culturing Techniques, Academic Press*, (2005).
- [5] BÜCHLE, C.: *Konstruktion und Aufbau eines Photobioreaktors zur online-Überwachung der Produktivität von Algen und Erfassung der Produktivitätsparameter von Auxenochlorella protothecoides*. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, Biologisches Institut, Abteilung Pflanzenbiotechnologie, 2013.
- [6] CHISTI, Y.: Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances 25, Elsevier Science Inc.*, (2007).
- [7] COONEY, M. ET AL.: Extraction of Bio-oils from Microalgae. *Separation & Purification Reviews, London, UK*, (2011).

- [8] DAGGETT, D. ET AL.: Alternative Fuels and Their Potential Impact on Aviation. *ICAS-2006-5.8.2, Hamburg, Deutschland*, (2006).
- [9] DAGGETT, D. ET AL.: Alternative Fuels for use in Commercial Aircraft. *ISABE-2007-1196, Peking, China*, (2007).
- [10] DIN EN ISO 14044: *Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitung*. Deutsches Institut für Normung e.V., Stand 2006.
- [11] FREY, W. ET AL.: Konditionierung von Mikroalgen mit gepulsten elektrischen Feldern für die energetische Nutzung. *Sustainable BioEconomy*, (2011).
- [12] GEA WESTFALIA SEPARATOR GROUP: *Separation Technology for Algae Production*. GEA Mechanical Equipment GmbH, Deutschland, 2012.
- [13] GÖTTEL, M. ET AL.: Influence of pulsed electric field (PEF) treatment on the extraction of lipids from the microalgae *auxenochlorella protothecoides*. *IEEE International Conference on Plasma Science*, (2011).
- [14] GRAHAM, L.E.; WILCOX, L.W.: *Algae*. Prentice-Hall Inc., 2000.
- [15] GRUNDFOS: *Pumpenhandbuch*, 2004.
- [16] INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION: *Report on Alternative Fuels*. www.iata.org, 2008.
- [17] JORQUERA, O. ET AL.: Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors. *Bioresource Technology 101, Elsevier Science Ltd.*, (2011).
- [18] KADAM, K.L.: Environmental implications of power generation via coal-microalgae cofiring. *Energy 27, Elsevier Science Ltd.*, (2002).
- [19] MANISH, S. ET AL.: Sustainability analysis of renewables for climate change mitigation. *Energy for Sustainable Development, Volume X No. 4*, (2006).
- [20] PE INTERNATIONAL: *GaBi Software: Handbuch*, 2012.
- [21] PIERALISI: *Vertikale Tellerseparatoren*. Stampaprint, Jesi (AN), Italien, 2000.
- [22] SCHENK, P.M. ET AL.: Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production. *Bioenergy Research, Springer*, (2008).
- [23] SHEEHAN, J. ET AL.: *A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program: Biodiesel from Algae*. National Renewable Energy Laboratory, USA, 1998.