

Das Potenzial algenbasierter Biokraftstoffe für einen treibhausgasneutralen Straßengüterverkehr

Die Reduzierung der Treibhausgasemissionen des Straßengüterverkehrs spielt für die Erreichung der klimapolitischen Ziele Deutschlands eine wichtige Rolle. Biokraftstoffe aus Algen versprechen eine klimaneutrale Energieversorgung des Verkehrs, bei der auf die etablierte Antriebstechnik mit Verbrennungsmotoren zurückgegriffen, aber zugleich eine Flächenkonkurrenz zur Nahrungsmittelerzeugung oder Konflikte mit dem Naturschutz vermieden werden können. Zur technischen Machbarkeit von Algenkraftstoffen wird weltweit geforscht. Bislang ist es jedoch nicht gelungen, Algenkraftstoff energetisch und wirtschaftlich sinnvoll in einem für die Energieversorgung des Straßengüterverkehrs relevanten Umfang zu erzeugen. Ausichtsreiche Optionen zur Erreichung einer Wettbewerbsfähigkeit liegen in der verbesserten Selektion von Algen, der Optimierung der Kraftstoffherzeugung aus Algenbiomasse sowie der Verwertung von Algen in sogenannten Bioraffinerien, in denen neben Kraftstoffen zeitgleich andere algenbasierte Rohstoffe und Produkte erzeugt werden.

Kraftstoffausgangsstoffe ersetzen. Da sie aus nachwachsenden bzw. erneuerbaren Rohstoffen produziert werden, sind Biokraftstoffe weitgehend THG-neutral. Auch können sie mit der derzeitigen und über Jahrzehnte optimierten Lkw-Antriebstechnik und der existierenden Versorgungsinfrastruktur im In- und Ausland genutzt werden. Biokraftstoffe sind deshalb ein wichtiger Bestandteil der Bioökonomie- sowie der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung.

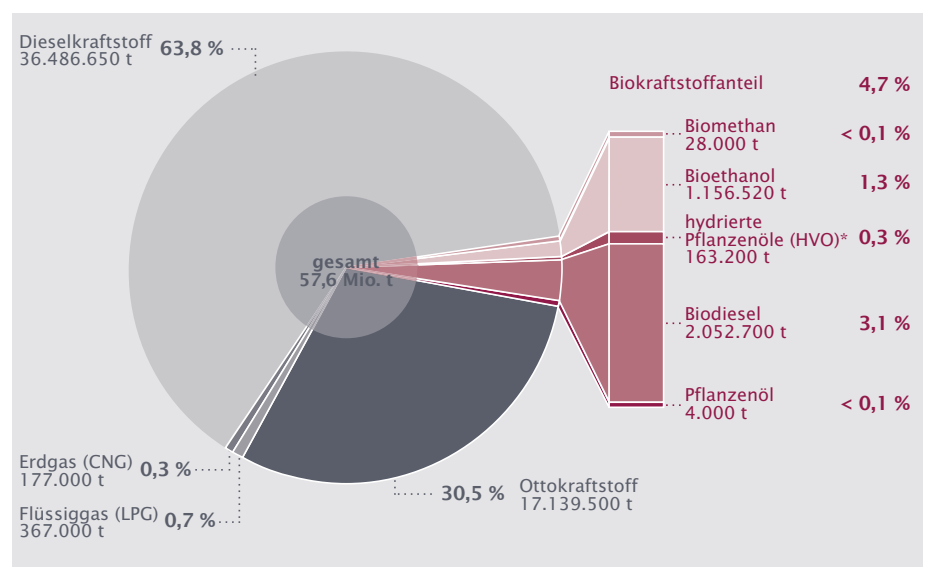
In den letzten Jahren standen Biokraftstoffe allerdings in der Kritik, durch den Anbau von Energiepflanzen auf Agrarflächen Landnutzungsänderungen und -konflikte angestoßen und eine Erhöhung der Lebensmittelpreise bewirkt zu haben. Propagiert werden daher Biokraftstoffe auf Basis von Algenbiomasse. Der Anbau der Algen kann auf Standorten erfolgen, die nicht für die landwirtschaftliche Produktion geeignet oder die aus naturschutzfachlichen Gründen besonders schützenswert sind. Zudem kön-

Im Jahr 2016 trug der Verkehr insgesamt mit mehr als 165 Mio. t CO₂-Äq. etwa 16 % zu den gesamten Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) Deutschlands bei. Während in anderen Sektoren seit 1990 zum Teil deutliche Emissionsminderungen erzielt wurden, sind die THG-Emissionen des Straßenverkehrs sogar leicht gestiegen und konterkarieren das Ziel der Bundesregierung, bis zum Jahr 2050 eine weitgehende Klimaneutralität Deutschlands zu erreichen. Zwar konnten die spezifischen Emissionen je km Fahrleistung durch verbesserte Motoren- und Antriebstechnik gesenkt werden, dies wurde aber durch die insgesamt gestiegene Verkehrsleistung überkompensiert.

Der Straßengüterverkehr verursacht derzeit mehr als ein Drittel der gesamten THG-Emissionen des Verkehrssektors; etwa 60 % des Endenergieverbrauchs entfallen dabei auf schwere Lkw, die im Fernverkehr eingesetzt werden. Zudem wird eine weitere Zunahme der Verkehrsleistung im Straßengüterverkehr um knapp 40 % bis zum Jahr 2030 prognostiziert. Fernverkehrs-Lkw mit hohen Fahrleistungen stellen somit einen potenziell großen Hebel dar, um durch eine klimaneutrale Energieversorgung vergleichsweise weniger Fahrzeuge einen spürbaren Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele leisten zu können.

Einen wichtigen Baustein für die Minderung der THG-Emissionen des Verkehrs bilden Biokraftstoffe, deren Anteil am gesamten Endenergieverbrauch des Verkehrs im Jahr 2017 bei knapp 5 % lag (Abb. 1). Biokraftstoffe werden aus Biomasse, d. h. aus organischen Stoffen pflanzlichen oder tierischen Ursprungs gewonnen, die fossile Ressourcen als

Abb. 1 Anteil von Biokraftstoffen am Gesamtkraftstoffverbrauch in Deutschland im Jahr 2017



* Schätzungen auf Basis des Wertes von 2016
Prozentangaben bezogen auf den Energiegehalt

Quelle: FNR 2018; nach BAFA, Destatis, DVFG, BDEW, BLE (2018)

nen bei der Algenproduktion Flächenproduktivitäten erreicht werden, die um den Faktor 7 bis 30 höher liegen, als bei pflanzenbasierter Biomasseerzeugung.

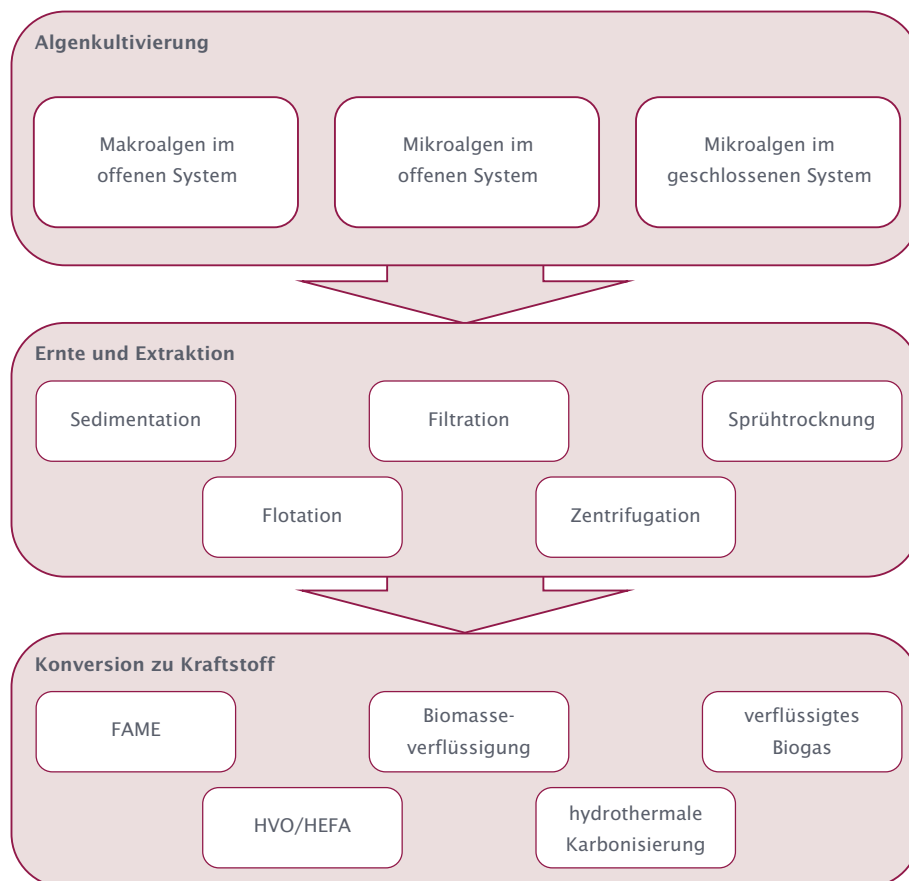
Vor diesem Hintergrund wurde das TAB beauftragt, den Wissensstand zu algenbasierten Biokraftstoffen zusammenzutragen und das Potenzial für die Erreichung eines klimaneutralen Straßengüterfernverkehrs abzuschätzen. Im Folgenden werden die zentralen Erkenntnisse des Vorhabens in Bezug auf die Produktion von Algenbiomasse, die Kraftstoffherstellungsoptionen sowie den Reifegrad der Technologie und die Weiterentwicklungsmöglichkeiten dargestellt.

Biomassenproduktion aus Algen

Unter den Sammelbegriff Algen wird eine Vielzahl von im Wasser lebenden Organismen gefasst, die Photosynthese betreiben. Algen werden grundsätzlich nach Makro- und Mikroalgen unterschieden. Makroalgen besitzen gut erkennbare Stängel sowie Blätter und sind oft verwurzelt. Mikroalgen sind wesentlich kleiner, ein- oder wenigzellig, divers und anpassungsfähig. Ihre Größe bewegt sich im Nano- bis Millimeterbereich. Konservative Schätzungen gehen von mehr als 70.000 Mikroalgenarten aus.

Die enorme Diversität von Algen hat zu großen Forschungsanstrengungen geführt, besonders geeignete Algenarten für die Biomasseproduktion bzw. Kraftstoffherzeugung zu identifizieren. Mikroalgen können selbst unter vergleichbaren (natürlichen) Bedingungen und innerhalb einer Art eine große Variabilität der biochemischen Zusammensetzung aufweisen und sie reagieren sensibel auf die Umgebungsverhältnisse. Wesentliche Forschungsanstrengungen fließen daher in die Identifikation besonders geeigneter Algenarten und der Variation ihrer Kultivierungsbedingungen.

Abb. 2 Prozessschritte der Erzeugung algenbasierter Kraftstoffe



Grundsätzlich kann Biomasse sowohl von Makro- als auch von Mikroalgen als Rohstoff für die Kraftstoffherzeugung verwendet werden (Abb. 2). Der Anbau von Makroalgen ist jedoch nur in natürlichen Gewässern möglich, sodass Ertrag und Qualität der Algenbiomasse starken Schwankungen unterliegen. Für die Zucht von Mikroalgen sprechen die höheren Wachstumsraten durch effizienteren Nährstoffumsatz in der Alge und die größere technische Kontrollierbarkeit der Produktion. Dies ermöglicht auch die Förderung der Bildung der für die Kraftstoffgewinnung besonders relevanten Algeninhaltsstoffe. Die wissenschaftlichen Studien zu Algenbiokraftstoffen beziehen sich daher zum überwiegenden Teil auf die Nutzung von Biomasse aus Mikroalgen.

Für die Produktion von Mikroalgen gibt es eine Vielzahl an Systemvariationen, die grundsätzlich in offene und geschlossene Produktionssysteme unterschieden werden. In offenen Produktionssystemen wird das Kulturmedium aus Wasser und Nährstoffen in einem etwa 20 bis 30 cm tiefen Becken umgewälzt, sodass eine gleichmäßige Sonnenbestrahlung der Algen gewährleistet wird. Vorteile dieser Produktion liegen in der vergleichsweise einfachen Technik und Handhabung der Anlagen sowie im relativ geringen Energieaufwand. Nachteilig wirken sich die saisonalen Schwankungen der Wärme- und Lichtverhältnisse sowie Verdunstung aus. Eine weitere Herausforderung besteht in der Gefahr von Kontaminationen, die durch Einträge von Abgasen oder Verunreinigung durch Mikroorganismen, In-

sekten, Vögel und andere Tiere entstehen können. Geschlossene Produktionssysteme bestehen entweder aus langen transparenten Röhren oder flachen, vertikal errichteten Platten, durch die das Nährmedium beständig gepumpt wird. So ist es möglich, Temperatur- und Strahlungsschwankungen auszugleichen. Durch die kontrollierten Bedingungen im geschlossenen System ist eine höhere Produktivität als in offenen Systemen möglich und die Algen können in hoher Reinheit mit den gewünschten Eigenschaften produziert werden. Nachteilig sind die aufwendigere und kostenintensivere Technik und der höhere Energieeinsatz bei der Produktion der Algen.

Herstellung algenbasierter Kraftstoffe

Algenbiomasse kann auf verschiedenen Wegen zu Biokraftstoff verarbeitet werden. Der am intensivsten untersuchte Kraftstoffpfad ist die Nutzung der in den Algen enthaltenen Öle bzw. Lipide, die sich in herkömmlichen Raffinerien zu Kraftstoff verarbeiten lassen. Für die Gewinnung der Algenöle muss die Algenbiomasse zunächst gesammelt und getrocknet werden. Für Ernte, Trocknung und Ölextraktion sind verschiedene Verfahren entwickelt worden, die technisch anspruchsvoll und häufig sehr energieintensiv sind. In vielen Studien führt dies dazu, dass die für die Kraftstoffherstellung notwendige Energie den Energiegehalt des gewonnenen Kraftstoffes übersteigt. Teilweise muss auch mit umweltgefährdenden Flockungs- und Lösungsmitteln gearbeitet werden.

Die aus den Algen gewonnenen Öle lassen sich durch eine Reihe unterschiedlicher Verfahren zu Biokraftstoffen umwandeln. Für eine Dekarbonisierung des Straßengüterfernverkehrs sind vor allem jene Verfahren relevant, die Biokraftstoffe erzeugen, die fossilem Diesel beigemischt werden oder ihn komplett ersetzen können. So ist es zum einen möglich, Algenöle

zu Fettsäuremethylester (Fatty Acid Methyl Ester [FAME]) umzuwandeln. Zum anderen lassen sich Dieselsubstitute durch die Hydrierung von Ölen (Hydrotreated Vegetable Oils [HVO] bzw. Hydrotreated Esters and Fatty Acids [HEFA]) herstellen. Beide Verfahren sind für die Verwendung anderer Biomasse bereits etabliert. So wurden im Jahr 2015 weltweit rund 25 Mio. t FAME-Diesel und rund 3 Mio. t HEFA-Kraftstoffe produziert. Für die Nutzung von Algenölen gibt es derzeit allerdings noch keine kommerziell produzierende Anlage.

Um den technisch und energetisch aufwendigen Prozess der Extrahierung der Algenöle zu vermeiden, werden zunehmend Kraftstoffpfade erforscht, die die ganze Alge nutzen. So wird untersucht, wie aus Algenbiomasse synthetische Kraftstoffe erzeugt werden können; ein Verfahren, das für andere nachwachsende Rohstoffe, wie Stroh und Holz, bereits gut erforscht ist. Noch größere Hoffnungen ruhen auf dem Kraftstoffpfad der hydrothermalen Verflüssigung, bei dem zusätzlich auf eine Trocknung der Algenbiomasse verzichtet werden kann. Beiden Optionen der Algenkraftstoffherzeugung wird zwar großes Potenzial zugesprochen, allerdings besteht bei beiden Verfahren auch noch erheblicher Entwicklungsbedarf. Schließlich können statt Dieselsubstituten potenziell auch Kerosin oder gasförmige Kraftstoffe aus Algenbiomasse gewonnen werden, die für den Antrieb von Lkw des Straßengüterverkehrs allerdings eine zu vernachlässigende Rolle spielen.

Kosten der Herstellung von Algenkraftstoffen

Die erzeugbaren Mengen an algenbasierten Biokraftstoffen und die Kosten ihrer Produktion lassen sich aufgrund des noch frühen technologischen Entwicklungsstands nur in großen Unsicherheitsbereichen abschätzen. Unter den klimatischen Bedingungen in Deutschland kann im Mittel von Jahreserträgen an Algenbio-

masse von ca. 30 bis 50 t/ha in offenen und 30 bis 100 t/ha in geschlossenen Produktionssystemen ausgegangen werden. Die neben dem Jahresertrag entscheidende Größe für die Ausbeute an Biokraftstoffen ist der Ölgehalt der Algen, der in Abhängigkeit von Algenart und Nährstoffangebot im Wachstumsmedium in großen Bandbreiten variieren kann.

Für Vergleichsrechnungen werden häufig durchschnittliche Ölgehalte von 25 bis 30 % der erzeugten Algenbiomasse angesetzt. Demnach ließen sich etwa 7,5 bis max. 30 t Algenöle/ha in Deutschland erzeugen. Ein Vergleich mit Raps, der in Deutschland mit Abstand bedeutendsten Ölpflanze, macht das grundsätzliche Potenzial von Algen für die Kraftstoffherzeugung deutlich: Bei einem mittleren Jahresertrag von 3,5 t/ha und einem Standardölgehalt von 40 % erhält man einen Rapsölertrag von lediglich 1,2 t/ha.

Ein großes Hindernis für die Wettbewerbsfähigkeit algenbasierter Biokraftstoffe sind jedoch die Produktionskosten der Algenbiomasse – diese werden in offenen Systemen auf 500 bis 20.000 Euro/t in geschlossenen Systemen sogar auf 500 bis 100.000 Euro/t geschätzt. Im Vergleich dazu liegt das Erzeugerpreisniveau für Raps (ca. 300 Euro/t) und für Weizen (170 Euro/t) deutlich niedriger. Die Kosten der Weiterverarbeitung der Algenöle zu Kraftstoffen sind hingegen grundsätzlich mit denen anderer Biokraftstoffe auf Basis von Pflanzenölen vergleichbar.

Das Potenzial von Algenkraftstoffen: theoretisch hoch, in der Praxis gering

Betrachtet man das Potenzial algenbasierter Biokraftstoffe für eine Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs, so zeigen sich auf der einen Seite die theoretischen Vorteile dieser Technologie. Die höhere Flächenproduktivität gegenüber der Erzeugung pflanzenbasierter Rohstoffe und die Möglichkeit, auf Standort-

ten zu produzieren, die nicht in Konkurrenz zur Erzeugung von Nahrungsmitteln oder dem Naturschutz stehen, helfen dabei, unerwünschte Nebenwirkungen von Biokraftstoffen abzumildern. Gegenüber Kraftstoffen aus fossilen Rohstoffen ist zudem eine vorteilhafte THG-Bilanz zu erwarten.

Auf der anderen Seite zeigt der wissenschaftliche Erkenntnisstand aber auch, dass algenbasierte Biokraftstoffe unter den derzeit als plausibel angenommenen Produktionsoptionen in kurz- und mittelfristiger Sicht keinen Beitrag für einen klimaneutralen Verkehr leisten können. So muss derzeit mehr Energie in die Erzeugung der Algenöle zur Kraftstoffherstellung investiert werden, als letztlich in Form des Kraftstoffs gewonnen wird. Darüber hinaus führen die immer noch frühe Phase der Technologieentwicklung und die hohen Produktionskosten der Algenbiomasse dazu, dass auf mittlere Sicht kaum mit dem Aufbau von industriellen Produktionsstrukturen für Algenkraftstoffe zu rechnen ist. Für Deutschland sind zudem das potenzielle Angebot an Flächen für die Algenproduktion und auch die Produktivität der Algen unter den hier herrschenden klimatischen Bedingungen eingeschränkt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass ein spürbarer Beitrag zur Verbesserung der THG-Bilanz des Straßengüterverkehrs bis zum Jahr 2050 von algenbasierten Biokraftstoffen nicht erwartet werden kann. Hierfür wären wissenschaftlich-technische Durchbrüche und Prozessinnovationen vonnöten, die derzeit nicht absehbar sind. Strombasierte Antriebskonzepte scheinen für die Erreichung eines THG-neutralen Verkehrs unausweichlich. Der Einsatz synthetischer Kraftstoffe sowie begrenzter Mengen nachhaltig produzierter Biokraftstoffe wäre dagegen eher auf jene Einsatzbereiche zu beschränken, in denen eine direkte Elektrifizierung technisch oder ökonomisch nicht realisierbar ist (z. B. im Luft- und Seeverkehr).

Ansätze zur Nutzbar- machung der Potenziale

Die Aufarbeitung des aktuellen Wissensstandes hat deutlich gemacht, dass für eine großtechnische und aus Nachhaltigkeitsaspekten sinnvolle Realisierung der Erzeugung algenbasierter Kraftstoffe wesentliche Fortschritte insbesondere hinsichtlich ihrer Energiebilanz erforderlich sind. Die gezieltere Auswahl von Algenarten sowie Prozessinnovationen bei der Extrahierung der Algenöle und der Weiterverarbeitung zu Kraftstoffen sind hier Ansatzpunkte. Der Vergleich mit anderen Kraftstoffen zeigt, dass die Herausforderungen vor allem bei der Produktion der Algenbiomasse bestehen. In technischer Hinsicht gibt es zwar auch auf der Kraftstoffproduktionsseite noch spezifischen Entwicklungsbedarf. Der eigentliche Engpass ist jedoch die für eine Kraftstoffproduktion notwendige Massenproduktion von Algen.

Um sich den theoretischen Potenzialen der Algentechnologie in der Praxis sinnvoll anzunähern, wird derzeit eine möglichst umfassende Verwertung der Algenbiomasse in Bioraffinerien angestrebt und intensiv beforscht. Hierbei steht die Erzeugung hochpreisiger algenbasierter Produkte mit hohem Vermarktungspotenzial (z. B. Nahrungsergänzungsmittel, Kosmetika, andere chemische Verbindungen) im Vordergrund. Dieser Ansatz, in dem die Kraftstoffproduktion nur ein nachgeordneter Aspekt ist, könnte dabei helfen, die Kosten der Algenkraftstoffherzeugung auf ein marktfähiges Niveau zu senken.

Als zweite Möglichkeit ist die Nutzung von Abwässern als Nährmedien für die Algenzucht interessant. Die sich hier ergebenden Synergien zwischen Nährstoffbereitstellung und Abwasserreinigung könnten ein Weg für eine langfristige Kostensenkung der Algenkraftstoffproduktion sein. Allerdings resultieren aus der komplexen und vielgliedrigen Prozesskette von der Zucht der Algenbiomasse bis zur Produktion der algenbasierten

Produkte noch zahlreiche Forschungsfragen, für deren Beantwortung vor allem die Förderung von Pilotanlagen sinnvoll erscheint, um die verfügbaren modelltheoretischen Überlegungen in der wissenschaftlichen Literatur mit realen Betriebsdaten zu untersetzen.

Der TAB-Arbeitsbericht Nr. 181 »Das Potenzial algenbasierter Kraftstoffe für den LKW-Verkehr« wurde im Juli 2018 fertiggestellt und befindet sich momentan im Abnahmeprozess durch den ABFTA.

Kontakt

Dr. Christoph Schröter-Schlaack
Christoph.Schroeter-Schlaack@ufz.de
Tel.: +49 341 235-1475