

Bericht

**des Ausschusses für Bildung, Forschung und
Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss)
gemäß § 56a der Geschäftsordnung**

Technikfolgenabschätzung (TA)

Das Potenzial algenbasierter Kraftstoffe für den LKW-Verkehr

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort des Ausschusses	5
Zusammenfassung	9
1 Einleitung	17
2 Biokraftstoffe zur Reduzierung der THG-Emissionen des Verkehrs	21
2.1 Bioökonomie, Klimawandel und internationale Verpflichtungen zum Klimaschutz.....	21
2.2 Klassifizierung von Biokraftstoffen	21
2.3 Regulatorischer Rahmen für Biokraftstoffe	24
2.3.1 Regelungen auf europäischer Ebene	24
2.3.2 Regelungen in Deutschland.....	25
2.4 Gegenwärtige Lage auf dem Biokraftstoffmarkt.....	26
3 Algen als Rohstoff für Biokraftstoffe	29
3.1 Definition und Diversität.....	31
3.2 Die Kultivierung von Algen.....	32
3.2.1 Stoff- und Energiewechsel: photo-, hetero- und mixotrophe Nährmedien	32
3.2.2 Produktion von Makroalgen off-shore	33
3.2.3 Produktion von Mikroalgen in offenen Systemen.....	34
3.2.4 Produktion von Mikroalgen in geschlossenen Systemen	34

	Seite
3.3 Ernte, Entwässerung und Extraktion von Inhaltsstoffen	35
3.4 Mögliche Produktionsmengen von Mikroalgen	37
3.4.1 Produktivität verschiedener Produktionssysteme	37
3.4.2 Hochrechnungen zu Produktionspotenzialen für Algenbiomasse.....	40
3.5 Mögliche Produktionskosten von Mikroalgen	41
4 Kraftstoffherstellung aus Algenbiomasse.....	43
4.1 Konversionspfade für algenbasierte Kraftstoffe.....	43
4.1.2 Biodiesel durch Umesterung	44
4.1.3 Kraftstofferzeugung durch Hydrierung	45
4.1.4 Kraftstoffe via hydrothermale Verflüssigung.....	46
4.1.5 Synthetische Kraftstoffe	46
4.1.6 Verflüssigtes Biogas.....	47
4.2 Produktionskosten algenbasierter Kraftstoffe	48
4.3 Erzeugbare Algenkraftstoffmengen	49
5 Nachhaltigkeitsaspekte algenbasierter Kraftstoffe	51
5.1 Flächenbedarf für die Biomasseerzeugung	51
5.2 Energieeinsatz und -verbrauch	52
5.3 THG-Emissionen und Klimarelevanz	55
5.4 Wasserverbrauch und Wasserverschmutzung	57
5.5 Fazit.....	59
6 Zur Rolle algenbasierter Biokraftstoffe für einen THG- neutralen Lkw-Fernverkehr.....	61
6.1 Verkehrsaufkommen und Infrastruktur im Lkw-Fernverkehr.....	62
6.2 Kraftstoffverbrauch von Lkw: technische Entwicklungen und Einsparmöglichkeiten.....	68
6.3 Antriebs- und Kraftstoffalternativen für Fern-Lkw.....	72
6.3.1 Dieselmotor	72
6.3.2 Gasbetriebener Ottomotor	73
6.3.3 Brennstoffzelle	75
6.3.4 Elektromotor	76
6.4 Modellierung verschiedener Antriebs- und Kraftstoffalternativen für einen THG-neutralen Lkw- Verkehr.....	77
6.4.1 Grundannahmen der Modellierung	77
6.4.2 Annahmen zu einzelnen erneuerbaren Kraftstoffalternativen.....	79
6.4.3 THG-Minderungsleistung durch Einsatz der Antriebs- und Kraftstoffalternativen im Jahr 2050	87

	Seite
6.5 Herausforderungen für die Umstellung des Lkw-Fernverkehrs auf alternative Antriebe bzw. Kraftstoffe	90
6.6 Fazit.....	91
7 Resümee und Handlungsoptionen	93
7.1 Bedeutung algenbasierter Biokraftstoffe für einen klimaneutralen Lkw-Verkehr	93
7.2 Entwicklung von Bioraffineriekonzepten.....	94
7.3 Förderung von Forschung und Entwicklung	94
7.3.1 Kontinuierliche Förderung und Zugänglichkeit von Forschungsergebnissen.....	94
7.3.2 Algenselektion und genetische Modifikation.....	95
7.3.3 Optimierung der Algenkultivierung	95
7.3.4 Weiterentwicklung spezifischer Herstellungsverfahren für Algenkraftstoffe.....	96
8 Literatur	97
8.1 In Auftrag gegebene Gutachten.....	97
8.2 Weitere Literatur	97
9 Anhang	113
9.1 Abbildungen.....	113
9.2 Tabellen.....	114
9.3 Abkürzungen	111

Vorwort des Ausschusses

Die sichere, ausreichende, bezahlbare und ökologisch vernünftige Versorgung mit Energie ist eine große Herausforderung unserer Zeit, nicht zuletzt mit Blick auf das von Deutschland verfolgte Ziel, bis 2050 eine weitgehende Klimaneutralität zu erreichen. Für die Erreichung dieses Ziels spielt der Energieverbrauch im Verkehrssektor eine wichtige Rolle. So trägt der Verkehr insgesamt zu etwa einem Fünftel der gesamten Treibhausgasemissionen Deutschlands bei, woran der Straßengüterverkehr durch Lkw einen Anteil von etwa 35 Prozent hat. Schwere Lkw mit hohen Fahrleistungen stellen einen potenziell großen Hebel dar, um durch Modifikation vergleichsweise weniger Fahrzeuge einen wichtigen Beitrag für die Reduzierung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs zu leisten. Es stellt sich daher die Frage, ob Kraftstoffalternativen zum herkömmlichen Diesel möglich sind, die den spezifischen Anforderungen des Fernverkehrs gerecht werden und einen Beitrag zur Erreichung der Minderungsziele bei den Treibhausgasemissionen leisten können. Da aus Algen Kraftstoffe erzeugt werden können, die als Dieselsubstitute in reiner Form oder mit Diesel gemischt ohne große Anpassung der Infrastruktur in Lkw genutzt werden können, könnte dies interessante Möglichkeiten eröffnen, die bisherige Abhängigkeit des Lkw-Verkehrs von fossilen Kraftstoffen zu mindern.

Vor diesem Hintergrund hat der Deutsche Bundestag das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) mit einer Untersuchung im Rahmen des TAB-Monitoring „Nachhaltige Potenziale der Bioökonomie – Biokraftstoffe der 3. Generation“ beauftragt. Der hierzu vorliegende Bericht legt den Fokus auf „Das Potenzial algenbasierter Kraftstoffe für den LKW-Verkehr“. Ungeachtet dieser Fokussierung werden jedoch auch andere Kraftstoffe und ihre jeweiligen Antriebssysteme angesprochen, um so die potenzielle Rolle von Algenkraftstoffen für Lkw im Hinblick auf Minderungen in den Treibhausgasemissionen im Verkehr in Relation zu diesen anderen Technologiepfaden abwägen zu können. Hierzu eruiert der Bericht, ob bzw. welche Menge algenbasierten Biokraftstoffs umweltverträglich zur Verfügung gestellt werden könnte sowie den aktuellen Forschungszustand zur gesamten Energiebilanz der neuen Kraftstoffe inklusive der Herstellung. Zudem wird dargelegt, welche forschungs- und wirtschaftspolitischen Strategien und Instrumente zur Verfügung stehen oder ggf. notwendig wären, um dieses Potenzial zu heben und in welchen Zeiträumen algenbasierte Biokraftstoffe ggf. zur Marktreife geführt werden könnten.

Zur Beantwortung dieser Fragen bietet der Bericht eine Analyse der technischen, ökologischen und ökonomischen Vor- und Nachteile bzw. Stärken und Schwächen spezifischer Algenproduktions- und Kraftstofferzeugungsverfahren, auch im Hinblick auf Zielkonflikte zu Belangen des Umwelt- und Naturschutzes. Daneben werden für die Kraftstoffversorgung im Lkw-Verkehr exemplarisch Fragen zum Zusammenhang von Antriebstechnik und Mobilität behandelt, um besser die zukünftige Bedeutung von Biokraftstoffen der 3. Generation im Verkehrssektor einschätzen zu können.

Mit dem vorliegenden TAB-Bericht erhält der Deutsche Bundestag eine solide wissenschaftliche Basis für eine differenzierte Einschätzung, ob mit der Verwendung von Algen als Ausgangsstoff für die Produktion von Biokraftstoffen zum einen ein alternativer Weg der Bereitstellung von Biomasse gegangen werden kann, der nicht mit Landnutzungskonflikten oder negativen Umwelteffekten einhergeht, und zum anderen welchen Beitrag algenbasierte Biokraftstoffe für die Erreichung eines treibhausgasneutralen Verkehr leisten könnten.

Berlin, den 26. Juni 2019

Dr. Ernst Dieter Rossmann

Vorsitzender

Stephan Albani

Berichterstatter

René Röspel

Berichterstatter

Dr. Michael Ependiller

Berichterstatter

Mario Brandenburg

Berichterstatter

Ralph Lenkert

Berichterstatter

Dr. Anna Christmann

Berichterstatterin

Christoph Schröter-Schlaack
Christoph Aicher

unter Mitarbeit von
Reinhard Grünwald
Christoph Revermann
Johannes Schiller

Das Potenzial algenbasierter Kraftstoffe für den Lkw-Verkehr

Sachstandsbericht zum Monitoring
»Nachhaltige Potenziale der Bioökonomie –
Biokraftstoffe der 3. Generation«

TAB- Arbeitsbericht Nr. 181

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) berät das Parlament und seine Ausschüsse seit 1990 in Fragen des technischen und gesellschaftlichen Wandels. Das TAB ist eine organisatorische Einheit des Instituts für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) im Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Zur Erfüllung seiner Aufgaben kooperierte es bis September 2013 mit dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, dem IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH sowie der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.

Büro für Technikfolgen-Abschätzung
beim Deutschen Bundestag
Neue Schönhauser Straße 10
10178 Berlin

Tel.: +49 30 28491-0
buero@tab-beim-bundestag.de
www.tab-beim-bundestag.de

2019

Zusammenfassung

Im Kontext der klimapolitischen Ziele Deutschlands widmet sich der vorliegende Bericht mit der Abschätzung des Potenzials algenbasierter Biokraftstoffe zur Erreichung eines treibhausgas(THG)neutralen Lkw-Fernverkehrs. Es wird dargelegt, welche Vor- und Nachteile die Kultivierung von Algen gegenüber landbasierten Ausgangsstoffen für die Herstellung von Biokraftstoffen mit sich bringt und welche Art und Menge von Biokraftstoff potenziell zur Verfügung gestellt werden könnten. Zudem wird anhand der spezifischen technischen und institutionellen Rahmenbedingungen des Lkw-Fernverkehrs diskutiert, welchen Beitrag algenbasierte Biokraftstoffe für die Erreichung eines THG-neutralen Straßengüterverkehrs leisten können. Der Lkw-Fernverkehr (mit Streckenlängen über 150 km) erbrachte im Jahr 2016 knapp 70 % der gesamten Transportleistung inländischer Lkw und war für etwa 60 % des dadurch verursachten Endenergieverbrauchs verantwortlich. Zugleich stellen die Jahresfahrleistungen der Fahrzeuge zwischen 80.000 und 150.000 km hohe Anforderungen an Zuverlässigkeit und Energiedichte alternativer Kraftstoffe.

Klimaschutzziele und Rolle des Straßengüterverkehrs

Die Bundesregierung verfolgt das Ziel, bis zum Jahr 2050 eine weitgehende Klimaneutralität Deutschlands zu erreichen. Für die Erreichung dieses Ziels spielen der Energieverbrauch und die THG-Emissionen des Verkehrssektors eine wichtige Rolle. Im Jahr 2016 trug der Verkehr insgesamt mit mehr als 165 Mio. t CO₂-Äq. etwa 16 % zu den gesamten THG-Emissionen Deutschlands bei. Für den Verkehrssektor strebt der Klimaschutzplan der Bundesregierung das ambitionierte Ziel an, die THG-Emissionen bis zum Jahr 2030 um 40 bis 42 % gegenüber dem Ausgangsjahr 1990 zu verringern. Während jedoch in anderen Sektoren seit 1990 zum Teil deutliche Emissionsminderungen erzielt wurden, sind die THG-Emissionen des Verkehrs im gleichen Zeitraum sogar leicht gestiegen. 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 durch Lkw hat derzeit einen Anteil von etwa 35 % (knapp 55 Mio. t CO₂-Äq.) an den THG-Emissionen des Verkehrssektors (UBA 2017). Zudem wird eine weitere Zunahme der Verkehrsleistung im Straßengüterverkehr um knapp 40 % bis zum Jahr 2030 gegenüber dem Basisjahr 2010 prognostiziert. Schwere Lkw mit hohen Fahrleistungen stellen somit einen potenziell großen Hebel dar, um durch Modifikation vergleichsweise weniger Fahrzeuge einen wichtigen Beitrag für den Klimaschutz und die Reduzierung der THG-Emissionen des Verkehrs zu leisten.

Neben veränderten Mobilitätskonzepten (Stichwort Verkehrswende), die nicht Gegenstand der Untersuchung sind, werden daher alternative Kraftstoff- und Antriebstechniken benötigt, die das realistische Potenzial haben, die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu reduzieren.

Einsatz von Biokraftstoffen in Deutschland

Eine wichtige Rolle für die THG-Minderungen des Verkehrs spielen Biokraftstoffe. Diese werden aus Biomasse, d. h. organischen Stoffen pflanzlichen oder tierischen Ursprungs, gewonnen und können fossile Ressourcen als Kraftstoffausgangsstoffe ersetzen. Da sie aus nachwachsenden Rohstoffen produziert werden, sind Biokraftstoffe im Prinzip weitgehend THG-neutral. Auch können Biokraftstoffe 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 Bioökonomiestrategie und der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung.

Der Anteil der Biokraftstoffe am gesamten Endenergieverbrauch des Verkehrs im Jahr 2015 lag bei 4,6 %. Aus Pflanzenölen (z. B. Raps) gewonnener Biodiesel ist mit einem Anteil von fast 65 % am gesamten Biokraftstoffverbrauch in Deutschland der mengenmäßig wichtigste Biokraftstoff. Aus zucker- und stärkehaltigen Pflanzenteilen lässt sich Bioethanol herstellen, das konventionellem Ottokraftstoff beigemischt werden kann. Marktgängig sind Kraftstoffe mit 5- bis 10%iger Beimischung (E5 bzw. E10). Bioethanol ist mit einem Anteil von gut 26 % der zweitwichtigste Biokraftstoff in Deutschland. Darüber hinaus kann aus Biomasse auch Biomethan produziert,

können Pflanzenöle als Reinkraftstoff genutzt oder über die Erzeugung von Synthesegas aus Biomasse synthetische Kraftstoffe gewonnen werden. Der gemeinsame Anteil dieser drei Kraftstofftypen am gesamten Biokraftstoffverbrauch in Deutschland liegt bei unter 10 %.

Der Einsatz von Biokraftstoffen ist geprägt von der rahmengebenden europäischen und nationalen Gesetzgebung zum Klimaschutz und der Förderung des Einsatzes erneuerbarer Energien. Nach Abschaffung zuvor geltender Quoten müssen nun Biokraftstoffe in einem Umfang genutzt werden, der sich aus ihrer THG-Minderung gegenüber fossilen Kraftstoffen bemisst. Bis 2020 ist eine Minderung von 6 % die Zielvorgabe (bezogen auf 1990). Dieses Ziel kann sowohl durch den Einsatz größerer Mengen an Biokraftstoffen erreicht werden als auch durch technologische Weiterentwicklungen, die zu geringeren THG-Emissionen bei ihrer Herstellung führen.

Diskussion um Biokraftstoffe und erwartete Vorteile algenbasierter Kraftstoffe

In den letzten Jahren standen Biokraftstoffe in der Kritik, durch den Anbau von Energiepflanzen auf Agrarflächen – neben anderen negativen Umwelteffekten einer Intensivlandwirtschaft – Landnutzungsänderungen und -konflikte sowie eine Erhöhung der Lebensmittelpreise bewirkt zu haben (sogenannte Tank-Teller-Debatte). Mit der Weiterentwicklung von Biokraftstoffen wird daher auch das Ziel verfolgt, alternative Quellen von Biomasse zu nutzen, die nicht oder in weitaus geringerem Maße mit Landnutzungskonflikten verbunden sind.

Der Untersuchung liegt eine gängige Einteilung der Biokraftstoffe in Generationen anhand der Herkunft der verwendeten Biomasse zugrunde: Biokraftstoffe der 1. Generation werden mit Biomasse erzeugt, die speziell zu diesem Zweck angebaut wird (z. B. Raps oder Soja). Die Kraftstoffherzeugung steht damit potenziell in Konkurrenz mit einer Produktion von Nahrungsmitteln. Biokraftstoffe der 2. Generation werden auf Basis von Reststoffen (z. B. aus landwirtschaftlichen und anderen organischen Abfällen) oder aus Energiepflanzen (z. B. Holz oder Pflanzenreststoffe wie Stroh) gewonnen, die nicht mit der Nahrungsmittelproduktion in Konkurrenz stehen. Für Biokraftstoffe der 3. Generation wird aquatische Biomasse von Algen verwendet.

Mit algenbasierten Biokraftstoffen der 3. Generation sind große Hoffnungen verbunden. Der Anbau der Algenbiomasse kann auf Standorten erfolgen, die nicht für die landwirtschaftliche Produktion geeignet sind, z. B. Konversionsflächen. Auch kann die Nutzung von Flächen vermieden werden, die aus Naturschutzgründen besonders schützenswert sind. Zudem verspricht die gegenüber terrestrischen Energiepflanzen höhere Produktivität der Algen eine insgesamt geringe Flächenbeanspruchung für die Erzeugung der benötigten Biomasse für die Kraftstoffherstellung. Aus der Algenbiomasse lassen sich überdies energiereiche Substitute für fossile Dieselmotorkraftstoffe erzeugen, sodass die Antriebs- und Motorenkonzepte der Lkws und die bestehende Tank- und Versorgungsinfrastruktur weiter verwendet werden können. Die Aufarbeitung der wissenschaftlichen Erkenntnisse zu diesen Erwartungen war Gegenstand des vorliegenden Berichts.

Wissensstand zu algenbasierten Biokraftstoffen

Die potenziellen Vorteile der Produktion von algenbasierten Biokraftstoffen, die in der wissenschaftlichen Literatur herausgearbeitet werden, konnten bisher in der Praxisanwendung nicht realisiert werden. Produktionsanlagen für Algen existieren bislang nur in einem Versuchsstadium oder zur Herstellung hochpreisiger Produkte jenseits der Kraftstoffherzeugung, z. B. für Nahrungsergänzungspräparate oder Kosmetika.

Die stoffliche und energetische Nutzung von Algen wird zwar seit rund 80 Jahren erforscht, dennoch befindet sich die Algentechnologie noch immer im Forschungsstadium. Seit der ersten Ölpreiskrise (1973) rückt die Kraftstoffentwicklung in Zyklen regelmäßig in den Blick, und in den letzten 10 Jahren ist international eine deutliche Zunahme wissenschaftlicher Publikationen zum Thema zu erkennen. Insbesondere werden die technische Machbarkeit und ökonomische Rentabilität von Algenkraftstoffen aus verschiedenen Produktionssystemen untersucht. Darüber hinaus fokussiert die Forschung auf die (Weiter-)Entwicklung von Kraftstoffgewinnungsoptionen aus Algenbiomasse. Schließlich wird versucht, potenziell erzeugbare Algenkraftstoffmengen abzuschätzen.

Die Ergebnisse basieren jedoch auf Hochrechnungen kleinskaliger Pilotbetriebe oder theoretischen Modellierungen, sodass die Angaben zur Produktivität der Algenbiomasseerzeugung, zur Effizienz der Gewinnung der für die Kraftstoffherstellung relevanten Inhaltsstoffe sowie der insgesamt maximal erzeugbaren Algenkraft-

stoffmenge in hohem Maße unsicher sind bzw. in erheblichen Bandbreiten schwanken. Insgesamt ist zu konstatieren, dass bislang wenig konsolidiertes Wissen und vor allem kaum publizierte empirische Belege über die Prozesskette der Algenproduktion bis hin zur Erzeugung von Kraftstoff vorliegen.

Optionen der Algenkultivierung

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.

Sowohl Makro- als auch Mikroalgen können im Prinzip als Rohstoff für die Kraftstofferzeugung verwendet werden. Im vorliegenden Bericht wird sich vor allem auf Mikroalgen konzentriert. Der Anbau von Makroalgen wäre nur in natürlichen Gewässern möglich und zöge daher stark schwankende Erträge und Produktqualitäten nach sich. Hinzu kommt, dass als Standorte primär fruchtbare Küstengebiete infrage kämen, sodass dies auch aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten ungünstig wäre. Für die Zucht von Mikroalgen sprechen auch die höheren Wachstumsraten durch effizienteren Nährstoffumsatz in der Alge und die größere technische Kontrollierbarkeit der Produktion, sodass besonders die Bildung gewünschter Algeninhaltsstoffe gefördert werden kann. Für die Produktion von Mikroalgen gibt es eine Vielzahl an Systemvariationen, die grundsätzlich in offene (sogenannte Open Ponds) und geschlossene Produktionssysteme (sogenannte Photobioreaktoren) 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 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. Um die Bedingungen für die Mikroalgen im optimalen Bereich zu halten, müssen deshalb Teile des Kulturmediums immer wieder ausgetauscht werden. Eine weitere Herausforderung besteht in der Gefahr von Kontaminationen, die durch Einträge von Abgasen oder Verunreinigung durch Mikroorganismen, Insekten, Vögel und andere Tiere entstehen können.

Solche Kontaminationen lassen sich in geschlossenen Produktionssystemen vermeiden. Die Photobioreaktoren 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 können Algen in hoher Reinheit und mit gewünschten Eigenschaften produziert werden. Sie gewährleisten daher eine höhere Produktivität als offene Systeme. Nachteilig sind die aufwendigere und kostenintensivere Technik und der mitunter erheblich höhere Energieeinsatz bei der Produktion der Algen.

Die enorme Diversität von Algen hat zu großen Forschungsanstrengungen geführt, besonders geeignete Algenarten 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. Eine genetische Modifikation von Algen zur gezielten Erzeugung gewünschter Eigenschaften erscheint jedoch wegen der sehr kurzen Reproduktionszyklen und der hohen Anpassungsfähigkeit von Mikroalgen an die jeweiligen Umweltbedingungen als wenig sinnvoll. Gentechnisch modifizierte Algen müssten entsprechend ständig überprüft werden, ob sich in diesen dynamischen Prozessen die besonderen und gentechnisch hervorgebrachten Eigenschaften nicht sehr schnell wieder verflüchtigen.

Erzeugung von algenbasierten Biokraftstoffen

Der Kraftstoffpfad, der im Bericht den breitesten Raum einnimmt, ist die Gewinnung von Algenölen (Lipide), die sich in herkömmlichen Raffinerien zu Kraftstoff verarbeiten lassen. Hier sind sowohl der Wissensstand als auch die technologische Reife der Verfahrensschritte in der Prozesskette am weitesten fortgeschritten.

Zur Gewinnung der Algenöle muss die Algenbiomasse zunächst aus der Nährlösung geerntet und anschließend für eine Extrahierung der Inhaltsstoffe getrocknet werden. Für Ernte, Trocknung und Ölextraktion können verschiedene Verfahren eingesetzt werden, einige befinden sich noch in der Entwicklungsphase. Gemeinsam ist

allen Verfahren, dass sie technisch anspruchsvoll und energieintensiv sind. Teilweise muss auch mit umweltgefährdenden Flockungs- und Lösungsmitteln gearbeitet werden.

Die aus den Algen gewonnen Lipide lassen sich durch eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren zu Biokraftstoffen umwandeln. Für eine Defossilisierung bzw. Dekarbonisierung – also die Umstellung von fossilen bzw. kohlenstoffhaltigen hin zu erneuerbaren Energieträgern – des Straßengüterfernverkehrs sind vor allem jene Verfahren relevant, die Biokraftstoffe erzeugen, die fossilem Diesel beigemischt werden oder ihn komplett ersetzen könnten. Dazu stehen verschiedene technologische Wege zur Verfügung.

So ist es möglich, die in Algen enthaltenen Lipide durch eine physikalisch-chemische Ver- bzw. Umesterung zu Fettsäuremethylester (Fatty Acid Methyl Ester [FAME]) umzusetzen. Das Verfahren ist für die Verwendung von Pflanzenölen und tierischen Fetten etabliert, weltweit werden rund 25 Mio. t FAME-Diesel produziert. Obwohl die Nutzung von Algenlipiden schon länger beforscht wird, gibt es derzeit keine kommerziell produzierende Anlage für algenbasierten FAME-Diesel.

Auch lassen sich Dieselsubstitute durch Hydrierung von Ölen oder Lipiden (Hydrotreated Vegetable Oils [HVO] bzw. Hydrotreated Esters and Fatty Acids [HEFA]) herstellen. Dieses Verfahren wird mit anderen pflanzlichen Ölen ebenfalls schon eingesetzt, weltweit wurden im Jahr 2015 rund 3 Mio. t HEFA-Kraftstoffe produziert. Bei Algen ist der Prozess jedoch noch im Forschungsstadium.

Um den aufwendigen Prozess der Extrahierung der Algenöle zu vermeiden, werden derzeit auch Kraftstoffpfade erforscht, die die ganze Alge nutzen können. So wird untersucht, wie aus Algenbiomasse synthetische Kraftstoffe erzeugt werden können; ein Verfahren, dass 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 Algenkraftstofferzeugung wird zwar großes Potenzial zugesprochen, allerdings besteht bei beiden Verfahren auch noch erheblicher Entwicklungsbedarf.

Statt Dieselsubstituten können potenziell auch gasförmige Kraftstoffe für den Lkw-Antrieb genutzt werden. Dazu müssten Lkw mit Ottomotoren ausgerüstet werden, bislang ist dies nur ein Nischenmarkt. Ein hierfür nutzbarer Kraftstoff wäre Algenmethan, der aus der Vergärung von Algenbiomasse und der Aufarbeitung des entstehenden Biogases gewonnen werden kann.

Abschätzung der Kosten und erzeugbaren Menge algenbasierter Biokraftstoffe

Die Abschätzungen erzeugbarer Mengen an Algenbiomasse beruhen auf Hochrechnungen kleinskaliger Pilotbetriebe oder theoretischen Modellierungen. Sie sind daher mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Dies gilt entsprechend auch für die Bestimmung potenziell erzeugbarer Biokraftstoffmengen. Zudem ist die Weiterverarbeitung der Algenbiomasse zu Kraftstoffen noch in einer frühen Entwicklungsphase und somit sind viele Prozessparameter noch unsicher. Folglich lassen sich auch die Kosten einer Algenkraftstoffproduktion nur sehr grob abschätzen.

Unter den klimatischen Bedingungen in Deutschland kann im Mittel von Jahreserträgen von ca. 30 bis 50 t/ha in offenen und 30 bis 100 t/ha in geschlossenen Systemen ausgegangen werden. Wissenschaftliche Metastudien schätzen, dass Erträge höher als 60 t/ha/a selbst in Regionen mit hoher Sonneneinstrahlung unwahrscheinlich sind.

Die neben dem Jahresertrag entscheidende Größe für die Ausbeute an Biokraftstoffen ist der Lipidgehalt der Algen. Er kann in einer großen Bandbreite variieren und ist am höchsten, wenn man die Algen durch Nährstoffentzug in einen kontrollierten Hungerzustand versetzt. Es ist daher unmöglich maximales Algenwachstum und maximalen Lipidgehalt gleichzeitig zu erreichen.

In Vergleichsrechnungen werden häufig durchschnittliche Lipidgehalte von 25 bis 30 % der erzeugten Algenbiomasse angesetzt. Demnach ließen sich etwa 7,5 t bis max. 30 t biokraftstoffrelevante Algenlipide pro ha in Deutschland erzeugen. Ein Vergleich mit Raps, der in Deutschland mit Abstand bedeutendsten Ölpflanze, macht das grundsätzliche Potenzial von Algen als Ausgangsrohstoff für die Kraftstofferzeugung 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.

Wesentliches Hindernis zur Erschließung dieses Potenzials ist jedoch die Produktion von Algen als Kraftstoffsubstrat zu wettbewerbsfähigen Kosten. Die Produktionskosten für 1 t Algenbiomasse werden in offenen Systemen auf 500 bis 20.000 Euro, in geschlossenen Systemen sogar auf 500 bis 100.000 Euro geschätzt. Im Vergleich dazu liegt das Erzeugerpreisniveau für die Biomasse zur Herstellung bei den Biokraftstoffen der

1. Generationen mindestens um den Faktor 3 bis 4 darunter. Die wesentlichen Kostentreiber liegen auf Seiten der Algenproduktion. Die Kostenstruktur der Erzeugung von Algenkraftstoffen aus den Algenlipiden ist unabhängig vom Verfahren grundsätzlich mit denen anderer Biokraftstoffe auf Basis von Pflanzenölen oder Reststoffen vergleichbar.

Nachhaltigkeit von Algenkraftstoffen

Betrachtet man die Nachhaltigkeitswirkungen von algenbasierten Biokraftstoffen, so zeigt sich einerseits das theoretische Potenzial dieser Technologie. Die höhere Flächenproduktivität gegenüber Landpflanzen und die Möglichkeit, auf Standorten zu produzieren, die nicht in Konkurrenz zur Erzeugung von Nahrungsmitteln stehen, sind günstig für den Flächenbedarf je Energieeinheit des gewonnenen Kraftstoffs. Zudem können Algenkraftstoffe mit einem gegenüber anderen Biokraftstoffen geringeren Wasserbedarf erzeugt werden. Jedoch finden sich optimale Produktionsbedingungen für Algen oft in Ländern mit hoher Wasserknappheit, sodass sinnvolle Aussagen nur standörtlich differenziert getroffen werden können.

Andererseits muss vor dem Hintergrund der bislang vorhandenen wissenschaftlichen Erkenntnisse gefolgert werden, dass die Herstellung von Algenkraftstoff aus energetischer Sicht nicht sinnvoll ist. In der überwiegenden Mehrheit der Studien zeigt sich, dass Algenkraftstoffe unter den gegenwärtig plausiblen Annahmen hinsichtlich Produktivität, Lipidkonzentration und Aufwand zur Extraktion der Lipide zur Gewinnung der Ausgangsrohstoffe der Kraftstofferzeugung eine negative Nettoenergiebilanz aufweisen. Für die Erzeugung der Algenlipide muss also mehr Energie investiert werden, als letztlich im Algenkraftstoff enthalten ist. Vergleicht man dies mit anderen Biokraftstoffen, so zeigt sich, dass deren Nettoenergiebilanz positiv ist: für Bioethanol (durchschnittliche Nettoenergiebilanz von 5, d. h., der Energiegehalt des Kraftstoffs ist 5-mal höher als die zur Herstellung aufgewendete Energie) etwas höher als für konventionellen, also nicht algenbasierten Biodiesel (durchschnittliche Nettoenergiebilanz von 2). Wesentliche Anknüpfungspunkte für die Verbesserung der Energiebilanz von Algenkraftstoffen sind die Optimierung der Selektion von Algenarten speziell für die Kraftstoffproduktion sowie die Reduzierung des Energieeinsatzes bei der Kultivierung und der Extrahierung der Algeninhaltsstoffe. Daher werden große Hoffnungen in die (weitere) Erforschung von Kraftstofferzeugungsverfahren gesetzt, die die Verwertung der gesamten Algenbiomasse ohne Trocknung und Extrahierung der Algenlipide ermöglichen. Eine seriöse Schätzung, ob und wann Algenkraftstoffe eine positive Energiebilanz erreichen werden, ist derzeit aber nicht möglich.

Aus diesem Grund müssen auch die Erwartungen hinsichtlich der THG-Bilanz von Algenkraftstoffen relativiert werden. Zwar ist gegenüber fossilen Rohstoffen eine bessere THG-Bilanz möglich, wenn unterstellt wird, dass die Prozessenergie aus erneuerbaren Quellen stammt. Gegenüber anderen Biokraftstoffen ist eine spürbare Verbesserung der THG-Bilanz – mindestens unter den klimatischen Bedingungen in Deutschland – aber unwahrscheinlich. Denn berücksichtigt werden müssen neben den energieintensiven Prozessen der Algenkultivierung und Extrahierung der Algeninhaltsstoffe auch die in den Vorprodukten (z. B. Düngemittel für die Algenzucht) enthaltenen THG-Emissionen. Insbesondere der Stickstoffbedarf von Algen ist deutlich höher als bei landbasierter Biomasse für die Kraftstoffherstellung. Je nach Quelle und Verwertung hat Stickstoff einen mehr oder weniger starken negativen Effekt auf die Klimabilanz der Algenproduktion.

Antriebsoptionen und Kraftstoffbedarfe im Straßengüterverkehr

Heute kommen im Straßengüterverkehr ganz überwiegend schwere Gespanne und Sattelzugmaschinen zum Einsatz, die fast ausschließlich mit Dieselmotoren ausgerüstet sind. Alternative Antriebsoptionen, z. B. gasbetriebene Ottomotor-Lkw, Brennstoffzellen-Lkw oder elektrisch betriebene Fahrzeuge (mit Batterie bzw. als Oberleitungs-Lkw), sind derzeit Nischenprodukte.

Eine Analyse der Realverbräuche schwerer Lkw zeigt, dass es in den letzten zwei Jahrzehnten gelungen ist, den Kraftstoffverbrauch bei etwa 35 l Diesel je 100 km Fahrleistung weitgehend konstant zu halten, obwohl die gesetzlichen Anforderungen im Hinblick auf die Minderung von Schadstoffemissionen (Stickstoffoxide, Partikel) stark gestiegen sind. Verbesserungen an den Antriebssystemen konnten den höheren Aufwand für die Abgasnachbehandlung nahezu kompensieren. Durch weitere Optimierung des Gesamtsystems könnte der Verbrauch schwerer Lkw bis zum Jahr 2030 um bis zu 40 % reduziert werden, wenn bei Aerodynamik, Motor (insbesondere Hybridisierung des Antriebs), Wärmerückgewinnung, Rollwiderstand, Gewicht sowie beim Fahrverhalten Verbesserungen vorgenommen werden. Auf dieser Grundlage wird geschätzt, dass sich der Gesamtenergiebedarf für den Straßengüterverkehr durch schwere Lkw bei stark steigender Verkehrsnachfrage dennoch

leicht erhöhen würde, während bei geringerer Verkehrsnachfrage eine langfristig spürbare Reduktion denkbar wäre. Da die Umrüstung der Lkw-Flotte und der Aufbau entsprechender alternativer Infrastrukturen, z. B. für Oberleitungen für elektrisch betriebene Fernverkehr-Lkw, Zeit und finanzielle Ressourcen benötigt, kommt dem Dieselantrieb zumindest mittelfristig nach wie vor eine herausgehobene Stellung zu.

Mögliche Rolle von Algenkraftstoffen für den Straßengüterverkehr

Algenbasierter Biodiesel könnte als Dieselsubstitut in reiner Form oder fossilem Diesel beigemischt ohne große Anpassung der Motorentechnik eingesetzt werden. Für gasbetriebene Ottomotoren könnte Algenmethan zum Einsatz kommen. Allerdings können, wie zuvor bereits angedeutet, Algenkraftstoffe derzeit keinen Beitrag zur Erreichung eines THG-neutralen Straßengüterverkehrs leisten. Aufgrund der derzeit noch negativen Energiebilanz der Algenkraftstoffe und der damit einhergehenden THG-Emissionen wird ein möglicher Beitrag auch auf absehbare Zeit begrenzt bleiben.

Eine Simulation der THG-Bilanz des Einsatzes verschiedener Antriebs- und Kraftstoffalternativen im Straßengüterverkehr zeigt, dass eine Reduktion der THG-Emissionen um mehr als 95 % auch langfristig nur mit strombasierten Antrieben möglich ist. Auch unter der optimistischen Annahme, dass für die Erzeugung der Algenlipide ausschließlich erneuerbarer Strom und erneuerbare Wärme eingesetzt würde, würde dieses Ziel von algenbasierten Kraftstoffen verfehlt. Höhere THG-Minderungen wären theoretisch denkbar, wenn auch die Bereitstellung der Düngemittel für die Algenzucht, insbesondere des benötigten Stickstoffs, vollständig auf Basis erneuerbarer Energien erfolgen würde. Weitere Optionen wären Nährstoffrecycling durch die Nutzung organischer Abwässer. Wie dies praktisch umgesetzt werden könnte, ist allerdings derzeit noch unklar. Zudem kann nicht davon ausgegangen werden, dass in absehbarer Zeit Algenreaktoren finanziert und aufgebaut werden, durch die mehrere 10.000 t Kraftstoff pro Jahr produziert werden, da der Aufbau entsprechender Kapazitäten aus betriebswirtschaftlicher Sicht für die Marktakteure nicht attraktiv ist. Darüber hinaus ist es unter den Bedingungen in Deutschland unwahrscheinlich, dass im Inland eine ausreichend große Menge an Algenkraftstoffen erzeugt werden könnte, um einen spürbaren Beitrag zu einem klimaneutralen Straßengüterverkehr zu leisten.

Resümee und Handlungsoptionen

Biokraftstoffe aus Mikroalgen bieten das theoretische Potenzial, durch die Substitution von Dieselmotorkraftstoff aus fossilen Ressourcen THG-Minderungen im Straßengüterverkehr zu ermöglichen. Gegenüber Biokraftstoffen aus ackerbaulich erzeugten Energiepflanzen (sogenannte Biokraftstoffe der 1. Generation) würden sich algenbasierte Biokraftstoffe durch eine Reihe weiterer potenzieller Vorzüge auszeichnen. So ließen sich Landnutzungskonflikte mit der Erzeugung anderer landwirtschaftlicher Produkte (z. B. Nahrungsmittel) vermeiden und Energie- und Kraftstoffherstellung auch auf nicht landwirtschaftlich nutzbaren Flächen (z. B. Brachen oder Konversionsflächen) realisieren. Überdies könnte durch eine bessere Umsetzung der zugeführten (Sonnen-)Energie und der Nährstoffe für das Wachstum der Algenbiomasse eine höhere Flächenproduktivität gegenüber der Biomasseerzeugung durch konventionelle Energiepflanzen erreicht werden. Dies könnte auch Konflikte mit anderen gesellschaftlichen Zielen wie dem Naturschutz abmildern.

Allerdings existieren derzeit keine Anlagen zur Erzeugung von Algenbiomasse in einem für die Kraftstoffproduktion relevanten Umfang, sodass Abschätzungen der Potenziale wesentlich auf theoretischen Überlegungen und Modellierungen beruhen und mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet sind. Klar ist, dass für eine großtechnische und aus Nachhaltigkeitsaspekten sinnvolle Realisierung der Erzeugung algenbasierter Kraftstoffe wesentliche Fortschritte insbesondere hinsichtlich der Energie- und THG-Bilanz erforderlich sind. Die gezielte Auswahl von Algenarten sowie Prozessinnovationen bei der Extraktion der Inhaltsstoffe bzw. bei 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. Dabei zeigen Abschätzungen zu den theoretischen Produktionspotenzialen, dass mit der Menge an Algenbiomasse, die unter den in Deutschland herrschenden Bedingungen auf den zur Verfügung stehenden Flächen erzeugt werden könnte, lediglich ein geringer Anteil des Kraftstoffbedarfs in Deutschland gedeckt werden könnte.

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.

Entsprechend äußert sich auch der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen in seinem Verkehrsgutachten. Die für die Einführung und Verbreitung strombasierter Mobilität notwendige (Weiter-)Entwicklung von Antriebs- und Energieversorgungssystemen (Oberleitung, Batterie, Brennstoffzelle) ist zeitnah anzustreben, da die für die Zielerreichung bis 2050 notwendige möglichst vollständige Flottendurchdringung Zeit benötigt und ansonsten eine Zielerreichung mit immer größeren Schwierigkeiten verbunden ist. 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).

Um sich den theoretischen Potenzialen der Algentechnologie sinnvoll anzunähern, wird derzeit eine möglichst umfassende Verwertung der Algenbiomasse in Bioraffinerien angestrebt. 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 sowie deren Ökobilanz entscheidend zu verbessern.

Als zweite Möglichkeit ist die Nutzung von Abwässern als Nährmedien für die Algenzucht hochinteressant. Die sich hier ergebenden Synergien zwischen Nährstoffbereitstellung und Abwasserreinigung könnten ein aussichtsreicher Weg für eine langfristige Kostensenkung der Algenkraftstoffproduktion sein. Hier ergeben sich in der komplexen und vielgliedrigen Prozesskette von der Algenproduktion bis zur Produktion der algenbasierten Produkte allerdings noch zahlreiche Forschungsfragen, für deren Beantwortung vor allem praktische Versuchs- und Pilotanlagen sinnvoll erscheinen.

1 Einleitung

Postfossile Energieversorgung für den Lkw-Verkehr als Beitrag zum Klimaschutz

Das Wissen um Klimawandel stellt Politik, Wirtschaft und Gesellschaft weltweit vor große Herausforderungen und lässt den Ruf nach Transformationen von Wirtschaft und Gesellschaft lauter werden. In der EU und Deutschland wird in den Debatten um Transformation der sogenannten Bioökonomie eine Schlüsselrolle zugewiesen (BMBF/BMEL 2014; EK 2012). Unter Bioökonomie wird vereinfacht ein Wirtschaftssystem verstanden, das auf nachwachsende Rohstoffe setzt und die Nutzung fossiler oder nichterneuerbarer Ressourcen als materielle und energetische Basis der Produktion in Zukunft stark einschränkt und langfristig sogar ausschließt. In der angestrebten Bioökonomie kommt der stofflichen Nutzung biogener Substanzen (Biomasse), aber auch deren Nutzung für die Produktion erneuerbarer Energie große Bedeutung zu. Dadurch sollen endliche Rohstoffe geschont und klimaschädliche THG-Emissionen verhindert oder zumindest stark vermindert werden. Zugleich soll die Versorgung mit Rohstoffen und Energie zuverlässig, umweltschonend und bezahlbar bleiben. Dahinter steht auch die Erwartung, die Abhängigkeit Deutschlands von Energieimporten in Form von Öl, Gas oder Kohle zu verringern.

Vor diesem Hintergrund hat sich die Bundesregierung bereits im Jahr 2010 das Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2050 die THG-Emissionen um 80 bis 95 % mit Bezug auf das Jahr 1990 zu reduzieren (BMWi/BMU 2010). Bis zum Jahr 2016 konnten die THG-Emissionen um gut 27 % verringert werden (UBA 2018). Dieses Ziel und seine Dringlichkeit wurden durch die Abschlusserklärung der Staats- und Regierungschefs 2015 beim G7-Treffen in Elmau (Bundesregierung 2016), durch das Paris-Abkommen (UN 2015) und den Klimaschutzplan 2050 (BMUB 2016) unterstrichen. Mit der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (Bundesregierung 2002; 2017) und der »Agenda 2030« für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals [SDGs]; Vereinte Nationen 2015) hat sich Deutschland zudem verpflichtet, die Klimapolitik und die Dekarbonisierung (im Sinne eines Ersatzes fossiler Kraftstoffe durch synthetische Kohlenwasserstoffe) im Rahmen einer sozial, ökonomisch und ökologisch umfassend verstandenen Nachhaltigkeit voranzutreiben.

Auch der Verkehrs- und Transportsektor muss einen wesentlichen Beitrag leisten, will Deutschland bis 2050 sektorübergreifend die genannten THG-Minderungen erreichen. Noch ist der Verkehr (Schifffahrt-, Luftfahrt-, Schienen- und Straßenverkehr) zu überwiegenden Teilen auf fossile Ressourcen als Grundlage der Energieversorgung angewiesen. Im Jahr 2016 trug der Verkehr mit rund 165 Mio. t CO₂-Äq.¹, was einem Anteil von etwa 16 % an den gesamten THG-Emissionen Deutschlands entspricht, wesentlich zur Problematik des Klimawandels bei (UBA 2018). Und während in anderen Sektoren seit 1990 zum Teil deutliche Emissionsminderungen erzielt wurden, sind die Emissionen des Verkehrs im gleichen Zeitraum sogar leicht gestiegen. Die CO₂-Emissionen des Verkehrssektors liegen mit rund 165 Mio. t im Jahr 2016 wieder über dem Ausgangsniveau des Jahres 1990 mit ca. 162 Mio. t (UBA 2018).

Der Klimaschutzplan 2050 hat für den Verkehr das ambitionierte Zwischenziel einer THG-Minderung von 40 bis 42 % bis zum Jahr 2030 gesetzt (BMUB 2016). Von diesen angestrebten Minderungszielen in Bezug auf die verkehrsbedingten THG-Emissionen ist man gegenwärtig weit entfernt. Die verringerten Emissionen je km Fahrleistung, die durch verbesserte Motoren- und Antriebstechnik ermöglicht wurden, werden durch die insgesamt gestiegene Verkehrsleistung mindestens teilweise kompensiert. Das gilt insbesondere für die CO₂-Emissionen des Straßengüterverkehrs, die sich zwischen 1995 und 2014 trotz technischer Verbesserungen der Lkw und einer Reduzierung der Emissionen/tkm um 16 % erhöhten (von 34,2 auf 39,7 Mio. t).

Für Deutschland wurde in den letzten Jahren eine Vielzahl verschiedener Klimaschutzszenarien mit Zieljahr 2050 entwickelt, in denen auch der Verkehr adressiert wurde (Nitsch et al. 2010; Repenning et al. 2015; UBA 2014; Schlesinger et al. 2014). Diesen Szenarien ist gemeinsam, dass der Endenergieverbrauch des Verkehrs inklusive des Luftverkehrs bis 2050 selbst mit weitreichenden Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung, Verkehrsverlagerung und Optimierung der Energieeffizienz der Verkehrsmittel lediglich um rund 40 bis 50 % gegenüber dem Jahr 2005 sinkt. Oder anders formuliert: Vermeiden, Verlagern und Verbessern ermöglicht bis 2050 eine Senkung des Endenergieverbrauchs und damit auch der THG-Emissionen von rund 50 %. Soll der Verkehr bis

1 Der Verkehr verursacht Emissionen verschiedener Luftschadstoffe, z. B. Kohlendioxid, Stickstoffoxide, flüchtige organische Verbindungen oder Feinstäube. CO₂-Äq. sind eine Maßzahl für den Beitrag dieser Emissionen zum Treibhauseffekt. Sie entspricht derjenigen Menge CO₂, die rechnerisch dieselbe Klimawirkung hätte, wie die festgelegte Menge eines beliebigen THG.

2050 vollständig dekarbonisiert sein, ist dies nur durch eine THG-neutrale, regenerative Energieversorgung des Verkehrs möglich.

Über die problematische Klimawirkung hinaus hat der Straßenverkehr viele negative Auswirkungen auf Natur und Umwelt sowie die menschliche Gesundheit. Mit etwa 38 % im Jahr 2015 war er der Hauptemittent von anthropogenen Stickstoffoxiden (NO_x) (SRU 2017). In den Städten wird der zulässige Jahresgrenzwert für Stickstoffdioxid (NO₂) vielerorts überschritten. Auch die Feinstaubbelastung wird wesentlich durch den Straßenverkehr mitverursacht (SRU 2017). Der Fokus auf die Reduzierung der negativen Klimawirkung verkehrsbedingter Emissionen ist daher zwar eine wesentliche, aber nicht die einzige Herausforderung für die zukünftige Gestaltung des Verkehrs.

Neben veränderten Mobilitätskonzepten (Stichwort Verkehrswende, z. B. SRU 2017), die nicht Gegenstand der Untersuchung sind, werden also alternative Kraftstoff- und Antriebstechnologien benötigt, die das realistische Potenzial haben, die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu reduzieren, und dies bei möglichst geringen Umwelteffekten und hoher technischer und ökonomischer Umsetzbarkeit. Eine wichtige Rolle spielen dabei Biokraftstoffe, die aus Biomasse, d. h. organischen Stoffen pflanzlichen oder tierischen Ursprungs, gewonnen werden und fossile Energieträger ersetzen können. Sie sind deshalb ein wichtiger Bestandteil der Bioökonomiestrategie und der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS) (BMVBS 2013). In den letzten Jahren sind Biokraftstoffe und ihre forcierte Beimischung (Biokraftstoffquote) jedoch in die Kritik geraten, da sie Landnutzungskonflikte mit land- und forstwirtschaftlicher Nutzung oder dem Naturschutz anstoßen und im internationalen Kontext zu Bodendegradation und der Zerstörung von Biotopen, Verarmung und Hunger beitragen können (Adolf et al. 2013; UBA 2015). Solch problematische Entwicklungen stünden einer langfristigen und ernstzunehmenden Lösung der Klimafragen im Wege. Entwicklungen dieser Art wären unvereinbar mit den Zielen der »Agenda 2030« für nachhaltige Entwicklung (Vereinte Nationen 2015) und der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (Bundesregierung 2002 u. 2017).

Einer Gruppe von Biokraftstoffen wird jedoch zugesprochen, die angesprochenen Landnutzungskonflikte gar nicht oder in weitaus geringerem Ausmaß entstehen zu lassen: sogenannte Biokraftstoffe der 3. Generation. Darunter werden Kraftstoffe aus aquatischer Biomasse aus Algen verstanden. Biokraftstoffen aus Algen wird im Vergleich zu Biomasse aus landwirtschaftlichen Systemen eine deutlich höhere Produktivität und nicht zuletzt deshalb künftig ein großes Mengenpotenzial unterstellt (Kröger et al. 2016, S. 24). Bislang sind Biokraftstoffe aus Algen nicht im Markt etabliert. Produktionssysteme für Algen und Prozesse zur Kraftstoffproduktion aus Algenbiomasse sind allerdings Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Untersuchungen und vielfältiger Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten.

Mit einem derzeitigen Anteil von etwa 35 % an den zuvor genannten Verkehrsemissionen (knapp 55 Mio. t. CO₂-Äq.) ist der Straßengüterverkehr für die Klimadebatten von hoher Relevanz (UBA 2017). Laut »Verkehrsverflechtungsprognose 2030« des BMVI wird eine 39%ige Zunahme der Verkehrsleistung im Straßengüterverkehr von 437 Mrd. tkm im Jahr 2010 auf 607 Mrd. tkm im Jahr 2030 erwartet (Schubert et al. 2014). Der Lkw-Fernverkehr trägt wesentlich zu diesen Entwicklungen bei. Gleichzeitig zeichnet er sich durch Eigenheiten aus, die ihn für den Einsatz von Algenkraftstoffen in besonderer Weise geeignet erscheinen lassen.

So kommen im Lkw-Fernverkehr in der Regel schwere Lkws zum Einsatz. Ihre Stückzahl ist im Verhältnis zu derjenigen der Pkw gering, was grundsätzlich einen Technologiewechsel vereinfacht. Sie zeichnen sich zugleich durch hohe Jahresfahrleistungen aus, weshalb ihr Beitrag zu den THG-Emissionen beträchtlich ist. Weil sie hohe Reichweiten erbringen müssen, benötigen sie einen Kraftstoff mit hoher Energiedichte, wie es der derzeit dominierende Dieselmotor ist, und/oder ein Antriebssystem mit hoher Effizienz.

Wenn die genannten THG-Minderungsziele erreicht werden sollen, sind Alternativen zum herkömmlichen Diesel gefragt, die den spezifischen Anforderungen des Fernverkehrs gerecht werden. Jedoch bestehen für die Einführung alternativer Kraftstoffe gerade für Lkw erhebliche technische und ökonomische Barrieren, die mit beachtet werden müssen. Aufgrund der hohen Leistungsanforderungen und der besonderen Energiebedarfe für große Reichweiten setzen die über Jahrzehnte optimierten Lkw-Motoren Grenzen für die Kraftstoffsubstitution. Das betrifft auch die bestehende Versorgungsinfrastruktur (Tankstellen, Raffinerien, Pipelines etc.) für alternative Antriebs- und Kraftstoffkonzepte (z. B. gas- oder strombetriebene Motoren). Bei der Suche nach Lösungsansätzen für die THG-Verringerungen sind solche sogenannten Lock-in-Effekte verschiedener Technologien und der hiermit verbundenen Infrastruktur mit zu bedenken.

Da aus Algen Kraftstoffe erzeugt werden können, die als Dieselsubstitute in reiner Form oder mit fossilem Diesel gemischt ohne große Anpassung der Infrastruktur in Lkws genutzt werden könnten, würde dies interessante Möglichkeiten eröffnen, die momentan vorhandene Abhängigkeit des Lkw-Verkehrs von fossilen Kraftstoffen zu mindern.

Ziel und Aufbau des Berichts

Der Deutsche Bundestag hat das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) beauftragt, eine Untersuchung mit dem Titel »Nachhaltige Potenziale der Bioökonomie – Biokraftstoffe der 3. Generation« durchzuführen. Der Fokus der Studie liegt auf der Produktion von Biokraftstoffen aus Algen und ihrer möglichen Rolle für den Lkw-Fernverkehr. Durch diesen Fokus soll eine Lücke geschlossen werden, die das Umweltbundesamt (UBA 2015) in seiner Studie zur postfossilen Energieversorgung im Verkehr aufgezeigt hat. Laut UBA bleibt die Frage nach einer klaren Option einer postfossilen Energieversorgung für den Lkw-Fernverkehr bislang offen. Ungeachtet der Fokussierung auf Algenkraftstoffe werden im vorliegenden Bericht bis zu einem gewissen Grad auch andere Kraftstoffe und ihre jeweiligen Antriebssysteme angesprochen. Das ist notwendig, um die potenzielle Rolle von Algenkraftstoffen für Lkw im Hinblick auf die THG-Verminderungen im Verkehr in Relation zu diesen anderen Technologiepfaden besser abwägen zu können.

Hierzu wird eruiert, ob bzw. welche Menge algenbasierten Biokraftstoffs umweltverträglich zur Verfügung gestellt werden könnte. Zudem wird dargelegt, ob forschungs- und wirtschaftspolitische Strategien und Instrumente zur Verfügung stehen oder ggf. notwendig wären, um dieses Potenzial zu heben und algenbasierte Biokraftstoffe in absehbarer Zeit marktreif zu machen.

Zur Beantwortung dieser Fragen wurde vorhandenes Wissen systematisch zusammengetragen und aufgearbeitet sowie Wissenslücken identifiziert, um darauf aufbauend mögliche Handlungsoptionen identifizieren zu können. Durchgeführt wurde eine Analyse der technischen, ökologischen und ökonomischen Vor- und Nachteile bzw. Stärken und Schwächen spezifischer Algenproduktions- und Kraftstoffherzeugungsverfahren, insbesondere auch im Hinblick auf Zielkonflikte zu Belangen des Umwelt- und Naturschutzes. Daneben wurden für die Kraftstoffversorgung im Lkw-Verkehr exemplarisch der Zusammenhang von Antriebstechnik und Mobilität behandelt, um besser die zukünftige Bedeutung von Biokraftstoffen der 3. Generation für einen THG-neutralen Verkehr abschätzen zu können.

Der Bericht ist wie folgt gegliedert: Zu Beginn erfolgen eine Einordnung der Untersuchungsfragen, eine Klärung grundsätzlicher Begrifflichkeiten und eine skizzenhafte Darstellung der wesentlichen regulatorischen Rahmenbedingung für die Produktion von Biokraftstoffen (Kap. 2). Anschließend wird dargelegt, wie sich die Algenproduktionstechnologie aktuell darstellt, voraussichtlich weiterentwickeln wird und welche Produktionspotenziale bestehen (Kap. 3). Weiter wird der Frage nachgegangen, welche technischen Optionen zur Verfügung stehen, aus den Algen Kraftstoffe bzw. Energie für Lkw-Antriebe zu gewinnen, und welche Menge und welche Art von algenbasierten Biokraftstoffen zur Verfügung gestellt werden können (Kap. 4). Schließlich werden die Nachhaltigkeitswirkungen einer möglichen Substitution fossiler Kraftstoffe bzw. bereits jetzt etablierter Biokraftstoffe auf Basis pflanzenbasierter Biomasse durch Algenkraftstoffe dargestellt (Kap. 5). Auf Grundlage dieser Betrachtungen wird analysiert, welche Rolle algenbasierte Kraftstoffe für die Gestaltung eines THG-neutralen Lkw-Fernverkehrs spielen können (Kap. 6). Dazu werden die Potenziale verschiedener Kraftstoff- und Antriebsalternativen erläutert sowie eine vergleichende Modellrechnung angestellt. Im Kapitel 7 werden auf Basis der zuvor entwickelten Einschätzungen zum Potenzial algenbasierter Biokraftstoffe für den Lkw-Verkehr Handlungsoptionen abgeleitet.

Gutachten und Danksagung

Im Rahmen des TAB-Projekts »Nachhaltige Potenziale der Bioökonomie – Biokraftstoffe der 3. Generation« wurden zwei Gutachten zu spezifischen Themenbereichen erstellt:

- Evaluation des Potenzials von Algen als Biomasse für Biokraftstoffe der 3. Generation. Michael Kröger, Stefan Majer, Franziska Müller-Langer, DBFZ – Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig
- Lkw-Fernverkehr – welche Rolle können Algenkraftstoffe spielen? Patrick R. Schmidt, Werner Weindorf, Dr. Werner Zittel, Hubert Landinger, Jan Michalski, Reinhold Wurster, Tetyana Raksha, LBST – Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn

Diese Gutachten bilden die Basis, deren Ergebnisse neben den eigenen Recherchen, Literaturlauswertungen und Analysen in die Erstellung dieses Berichts eingeflossen sind. Aus ihnen wurden Informationen, Abbildungen, Tabellen und Textteile entnommen, überarbeitet, neu zusammengestellt, ergänzt und zu dem vorliegenden Bericht synthetisiert. Die Entwürfe der einzelnen Kapitel und der Gesamtfassung wurden von den Autoren des

Berichts sowie von den beauftragten Gutachtern in mehreren Runden gelesen, kritisch kommentiert und überarbeitet. Die Verantwortung für die Auswahl, Strukturierung und Verdichtung des Materials liegt bei den Verfassern dieses Berichts.

Den Gutachterinnen und Gutachtern sei für ihre Arbeit und Diskussionsbereitschaft sehr herzlich gedankt, ebenso Tina Lehmann für die Aufbereitung der Abbildungen sowie die Erstellung des Endlayouts.

2 Biokraftstoffe zur Reduzierung der THG-Emissionen des Verkehrs

2.1 Bioökonomie, Klimawandel und internationale Verpflichtungen zum Klimaschutz

Die Bioökonomie wird in Deutschland und der EU als Chance gesehen, eine überwiegend auf fossilen Rohstoffen basierende Wirtschaft zu einer auf erneuerbaren Ressourcen beruhenden rohstoffeffizienten Wirtschaft zu transformieren (BMEL 2014; EK 2012). In der »Nationalen Politikstrategie Bioökonomie« werden dafür weitreichende Zielsetzungen angeführt. So sollen (BMEL 2014; O'Brien et al. 2015):

- landwirtschaftliche Flächen, Wälder, Gewässer und Meere nachhaltig genutzt,
- innovative Technologien und Produkte, die zugleich wissens- als auch biobasiert sind, hervorgebracht,
- der Verbrauch von Rohstoffen (regenerative und nichterneuerbare) allgemein reduziert und Rohstoffe künftig möglichst effizient (z. B. in Nutzungskaskaden) verwertet,
- bei konkurrierenden Landnutzungen die Ernährung unter Berücksichtigung ökologischer Aspekte vorrangig gesichert und insbesondere bei letzterem auch der internationale Kontext (vorrangig ist hier die Ernährungssicherung) berücksichtigt werden.

Diesen anspruchsvollen Zielsetzungen liegt ein umfassendes Verständnis von Nachhaltigkeit zugrunde. Das gilt insbesondere für die Gewinnung von Biomasse, dem zentralen Rohstoff der Bioökonomie.

Den Bestrebungen zu mehr Nachhaltigkeit sind auch die internationalen und nationalen Anstrengungen zum Klimaschutz zuzuordnen. Deutschland hat sich bereits im Jahr 2010 verpflichtet, die THG-Emissionen über alle Sektoren hinweg bis zum Jahr 2050 um 80 bis 95 % gegenüber 1990 zu senken (BMWi/BMU 2010). Am 5. Oktober 2016 wurde das Übereinkommen von Paris (Paris Agreement; UN 2015) von Deutschland ratifiziert. Dort verpflichten sich die Unterzeichnerstaaten, ihren jeweiligen Beitrag zu leisten, um die globale Klimaerwärmung deutlich unter 2° C gegenüber der vorindustriellen Zeit zu halten. Das Bekenntnis zu Engagement und Verantwortung Deutschlands wurde mit dem »Klimaschutzplan 2050« unterstrichen (BMUB 2016). Dort wird ein weitgehend THG-neutrales Deutschland als Leitbild beschrieben.

In der Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung, die 2015 verabschiedet wurde, hat sich Deutschland auch auf eine Reihe von Entwicklungszielen (Sustainable Development Goals [SDGs]) verpflichtet (Vereinte Nationen 2015). Die SDGs adressieren die Herausforderungen der Einhaltung der planetaren Grenzen in Bezug auf klimatische Veränderungen, den Schutz der biologischen Vielfalt und der natürlichen Ressourcen und die Befriedigung von sich verändernden gesellschaftlichen Bedürfnissen. Mit der Neuauflage der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie (Bundesregierung 2017) hat Deutschland die SDGs durch nationale Zielstellungen und Indikatoren unterfüttert und operationalisiert. Danach greift ein ausschließlicher Fokus auf eine Reduzierung der THG-Emissionen ohne dabei den Schutz der biologischen Vielfalt, Landnutzungskonflikte durch Flächenverbrauch oder der Beeinträchtigung der Wasserressourcen einzubeziehen, zu kurz. Wie schwierig es bei den dabei auftretenden Zielkonflikten ist, Priorisierungen und Entscheidungen zu treffen, haben die Diskussionen um die Beimischungsquoten von Biokraftstoffen gezeigt (Dauber et al. 2012; EK 2016; OECD/FAO 2007). Sie finden auch Niederschlag in der wiederholten Anpassung des regulatorischen Rahmens zur Etablierung von Biokraftstoffen als Teil der Klimaschutzbemühungen im Verkehrssektor (Kap. 2.3).

2.2 Klassifizierung von Biokraftstoffen

Bei den Anstrengungen zur Reduzierung der THG-Emissionen des Verkehrs wurde Biokraftstoffen als Substitute fossiler Kraftstoffe von Beginn an eine wesentliche Rolle zugesprochen. Grundidee ist, nachwachsende Rohstoffe als Ausgangsbasis für die Erzeugung von Kraftstoffen zu nutzen. Biokraftstoffe können dabei aus verschiedenen Formen der Biomasse und auf Basis unterschiedlicher technologischer Verfahren erzeugt werden (Abb. 2.1).

Auf der Ebene der Prozesstechnik werden drei wesentliche Pfade unterschieden, die unterschiedliche Produkte hervorbringen (Kaltschmitt et al. 2009):

- physikalisch-chemische Konversionsverfahren: z. B. Biodiesel aus Pflanzenöl (z. B. Raps- oder Sojaöl) oder Pflanzenölrinkraftstoffe (also die direkte Verwendung von Pflanzenölen ohne Umwandlung zu Biodiesel),
- biochemische Konversionsverfahren: z. B. Kraftstoffe wie Bioethanol, das aus zucker- und stärkehaltigen Pflanzen (z. B. Zuckerrüben, Getreide) gewonnen wird, oder zu Biomethan aufbereitetes Biogas,
- thermochemische Konversionsverfahren: z. B. Biomass to Liquid (BtL) oder Bio-Synthetic Natural Gas (Bio-SNG), bei denen sogenanntes Synthesegas durch thermische Zersetzung von Biomasse erzeugt wird, aus dem anschließend Kraftstoffe hergestellt werden. Diese Verfahren befinden sich derzeit überwiegend im Demonstrationsstadium.

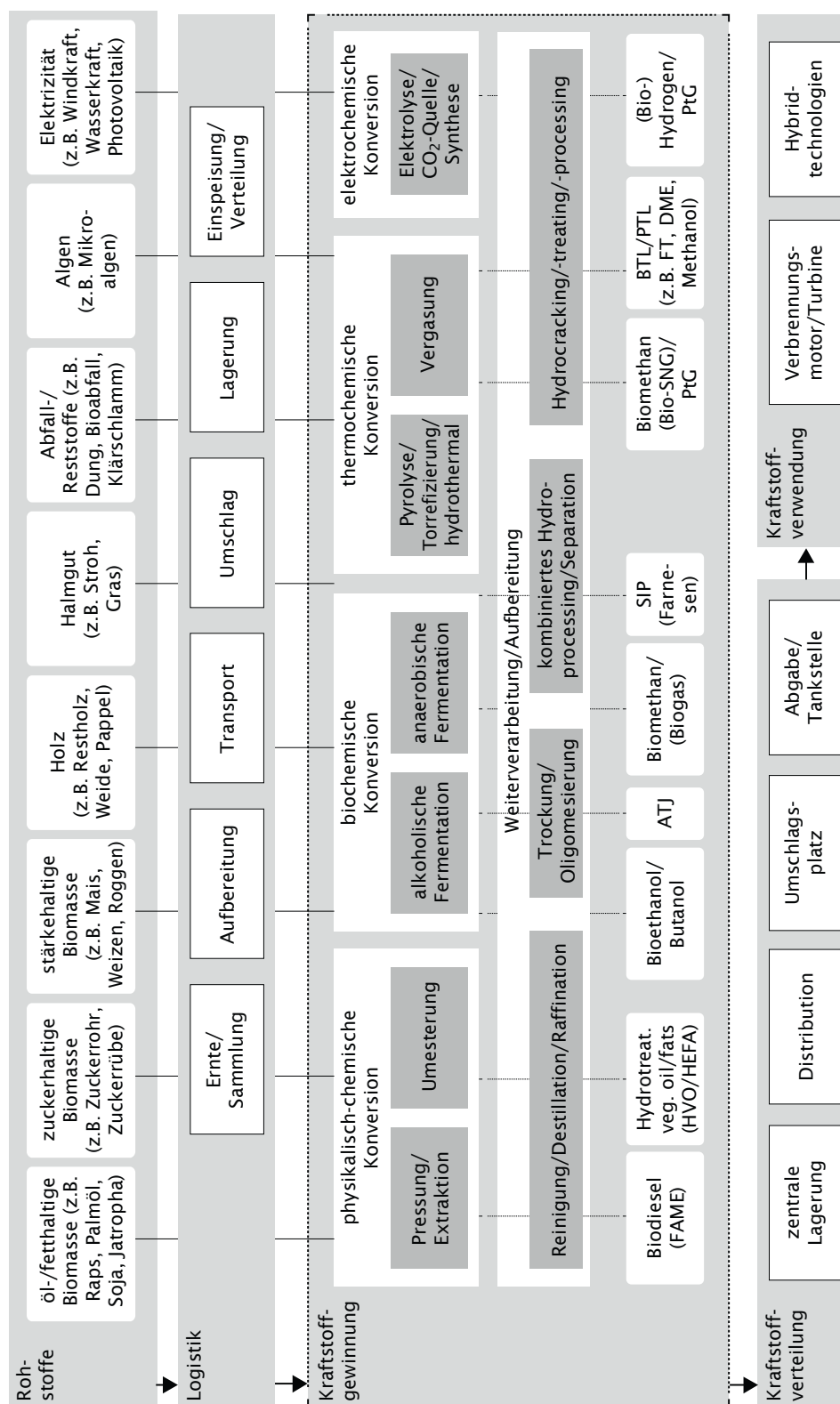
Biokraftstoffe werden oft verschiedenen Klassen zugeordnet und als Biokraftstoffe der ersten, zweiten oder dritten Generation bezeichnet. Diese Klassifizierungen sind jedoch häufig nicht eindeutig und überschneidungsfrei.² Für die Zwecke dieses Berichts wird der verbreitet genutzten Definition der European Biofuels Technology Platform (EBTP 2016) gefolgt, die die Quelle des eingesetzten Kohlenstoffes als zentrales Unterscheidungskriterium für Biokraftstoffe heranzieht:

- 1. Generation: Die Kraftstoffproduktion erfolgt auf Basis von Zucker, Lipiden oder Stärke, die aus Biomasse extrahiert werden, die speziell zu diesem Zweck angebaut wird. Die so gewonnene Biomasse steht potenziell in Konkurrenz mit einer Produktion von Nahrungsmitteln.
- 2. Generation: Der Kohlenstoff zur Kraftstoffproduktion wird aus Cellulose, Hemicellulose, Lignin oder Pektin z. B. auf der Basis von Roh- und Reststoffen aus der Land- und Forstwirtschaft bzw. aus Energiepflanzen gewonnen, die nicht mit der Nahrungsmittelproduktion in Konkurrenz stehen (z. B. Hölzer aus Kurzumtriebsplantagen oder Energiegräser).
- 3. Generation: Der Kohlenstoff zur Kraftstoffproduktion stammt von aquatischer, autotropher³ Biomasse (z. B. Algen). Die Biomasseproduktion erfolgt unter Nutzung von Licht, Kohlenstoffdioxid und Nährstoffen. Es sind keine organischen Kohlenstoffverbindungen beteiligt, um Biomasse aufzubauen.

2 Für die Klassifizierungen in Generationen werden verschiedene Kriterien – oft in Kombination – wie z. B. die verwendete Biomasse, das technologische Verfahren der Kraftstoffproduktion bzw. der Entwicklungsstand der Technik (Marktreife) oder auch die Kompatibilität zur bestehenden Infrastruktur (z. B. Beimischungsfähigkeit, Verwendbarkeit der Verbrennungs- und Verteilungsinfrastruktur etc.) herangezogen (z. B. Rocca et al. 2015).

3 Unter Autotrophie wird in der Biologie die Fähigkeit von Lebewesen verstanden, ihre Baustoffe ausschließlich aus anorganischen Stoffen aufzubauen. Die dazu benötigte Energie wird z. B. durch Photosynthese gewonnen. Demgegenüber nutzen heterotrophe Organismen bereits vorhandene organische Verbindungen für ihren Stoffwechsel. Bei Algen sind beide Ernährungsweisen möglich (Kap. 3.2.1).

Abb. 2.1 Bereitstellungsoptionen für Biokraftstoffe



Quelle: Kröger et al. 2016, S. 8

2.3 Regulatorischer Rahmen für Biokraftstoffe

Entwicklung und Einsatz von Biokraftstoffen sind geprägt von der rahmengebenden europäischen und nationalen Gesetzgebung zum Klimaschutz und der Förderung erneuerbarer Energien. Neben das Ziel, die THG-Emissionen des Verkehrs durch den verstärkten Einsatz von Biokraftstoffen zu senken, treten auch Nachhaltigkeitsforderungen an die zum Einsatz kommenden Biokraftstoffe. Damit reagiert der Gesetzgeber auf die negativen Begleiterscheinungen der Erzeugung von Biokraftstoffen der 1. Generation (Stichwort Tank-Teller-Debatte). Für algenbasierte Biokraftstoffe bestehen dabei keine spezifischen Regelungen.

2.3.1 Regelungen auf europäischer Ebene

Die klimapolitischen Zielsetzungen der EU sehen vor, die THG-Emissionen allgemein bis zum Jahr 2050 um 80 bis 95 % schrittweise gegenüber dem Referenzjahr 1990 zu verringern (EK 2011a). Von diesen Plänen ist auch der Verkehrssektor betroffen. Das »Weißbuch zum Verkehr« der Europäischen Kommission (EK 2011b) nennt als Langfristziel, die THG-Emissionen im Verkehr (über alle Verkehrsarten hinweg) bis zum Jahr 2050 um 60 % gegenüber dem Ausgangsjahr 1990 zu verringern. Dazu wurden grundsätzliche Zielgrößen für die Nutzung von erneuerbaren Energien und Biokraftstoffen im Verkehrssektor in der Richtlinie 2003/30/EG⁴, der Richtlinie 2009/28/EG⁵ sowie der Richtlinie 2009/30/EG⁶ aufgeführt.

Nach der Richtlinie 2009/28/EG, mit der die Richtlinie 2003/30/EG abgelöst wurde, soll der Anteil der erneuerbaren Energien im Verkehrssektor in den Mitgliedstaaten auf 10 % im Jahr 2020 gesteigert werden. Dieser Wert bezieht sich auf alle erneuerbaren Energien (Biokraftstoffe, erneuerbarer Strom, erneuerbarer Wasserstoff etc.) im gesamten Verkehrssektor (Straße, Schiene, Binnenschifffahrt), allerdings ohne den Flugverkehr. Für die Anrechnung auf die Zielerreichung 2020 stehen den Mitgliedstaaten verschiedene Optionen zur Verfügung:

- max. 7 % Biokraftstoffe aus Getreide und sonstigen Kulturpflanzen mit hohem Stärkegehalt, Zuckerpflanzen, Ölpflanzen und aus als Hauptkulturen vorrangig für die Energiegewinnung auf landwirtschaftlichen Flächen angebauten Pflanzen (Biokraftstoffe der 1. Generation);
- 0,5 % fortschrittliche erneuerbare und Biokraftstoffe aus Rohstoffen des Anhang IX Teil A (Abfall- und Reststoffe, Algen und Bakterien, synthetische Kraftstoffe, keine Altspeisefette und tierischen Fette);
- 2-fache Anrechnung von erneuerbaren und Biokraftstoffen aus Rohstoffen des Anhang IX (Abfall- und Reststoffe, Algen und Bakterien, synthetische Kraftstoffe sowie Altspeisefette und tierische Fette);
- 2,5-fache (Schienenverkehr) bzw. 5-fache (Straßenverkehr) Anrechnung von Elektrizität aus erneuerbaren Energiequellen.

Das Erneuerbare-Energien-Ziel wird seitens der Mitgliedstaaten aller Voraussicht nach zum Großteil durch Biokraftstoffe erfüllt werden (BMUB 2018). Algenbasierte Biokraftstoffe fallen unter die Kategorie der sogenannten fortschrittlichen Biokraftstoffe und können entsprechend doppelt auf die Zielerreichung angerechnet werden.

Laut Richtlinie 2009/28/EG darf aus Biokraftstoffen gewonnene Energie nur dann für die Zielerreichung berücksichtigt werden, wenn sie über ihren ganzen Lebenszyklus, d. h. beginnend mit der Förderung der Rohstoffe, Weiterverarbeitung, über den Transport bis hin zu ihrer Verbrennung, zu einer Minderung der THG-Emissionen von mindestens 35 %, ab dem Jahr 2017 von mindestens 50 % (60 % für Neuanlagen, die ab 2016 den Betrieb aufnehmen) gegenüber fossilen Kraftstoffalternativen führt. Ebenfalls dürfen nur solche Rohstoffe verwandt werden, die aus einem nachhaltigen Anbau stammen, wofür unter dem Gesichtspunkt des Natur- und

4 Richtlinie 2003/30/EG zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor

5 Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG.

6 Richtlinie 2009/30/EG zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Spezifikationen für Otto-, Diesel- und Gasölkraftstoffe und die Einführung eines Systems zur Überwachung und Verringerung der Treibhausgasemissionen sowie zur Änderung der Richtlinie 1999/32/EG des Rates im Hinblick auf die Spezifikationen für von Binnenschiffen gebrauchte Kraftstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 93/12/EWG

Umweltschutzes detaillierte Vorgaben gemacht werden (siehe auch die Umsetzung in Deutschland in Kap. 2.3.2).

Zudem sieht die Richtlinie 2009/30/EG vor, die THG-Intensität aller in der EU eingesetzten Kraftstoffe bis zum Jahr 2020 um mindestens 6 % gegenüber dem EU-Durchschnitt des Jahres 2010 zu reduzieren. Das Minderungsziel soll insbesondere durch den Einsatz von Biokraftstoffen, Strom, weniger THG-intensiven gasförmigen fossilen Kraftstoffen sowie eine Verminderung des Abfackelns und Abblasens bei der Produktion der Rohstoffe erreicht werden. Dem Ziel liegt der Gedanke zugrunde, dass es für die angestrebte Klimaschutzwirkung unerheblich ist, an welcher Stelle im Lebenszyklus des Kraftstoffs die Verminderung der THG stattfindet. Auch dieses Ziel wird in Deutschland im Wesentlichen durch die Erhöhung der Anteile an Biokraftstoffen an den insgesamt eingesetzten Kraftstoffen erfüllt werden (BMUB 2018).

Schließlich wird auf EU-Ebene versucht, die THG-Emissionen des Verkehrs durch die Vorgabe sogenannter Flottenzielwerte für Emissionen/km zu reduzieren und somit die Fahrzeugeffizienz zu steigern. Davon sind bislang jedoch lediglich Pkw (von heute durchschnittlich 120 g/km auf 95 g/km CO₂-Äq. im Jahr 2021 in der in der EU angebotenen Flotte) und Lieferfahrzeuge (147 g CO₂-Äq./km in 2020 in der in der EU angebotenen Flotte) betroffen. Für schwere Lkw hat die EU bisher keine km-bezogenen Zielwerte festgelegt. Eine entsprechende Verordnung wird nicht vor dem Jahr 2020 erwartet (BMW 2016).

2.3.2 Regelungen in Deutschland

Das klimapolitische Langfristziel Deutschlands entspricht dem der EU und sieht eine Reduzierung der gesamten THG-Emissionen bis zum Jahr 2050 um 80 bis 95 % gegenüber dem Referenzjahr 1990 vor (BMUB 2016). Für den Verkehrssektor strebt der Klimaschutzplan der Bundesregierung das ambitionierte Ziele an, die THG-Emissionen bis zum Jahr 2030 um 40 bis 42 % zu verringern (BMUB 2016). Getragen durch den europäischen Regelungsrahmen spielt der Einsatz erneuerbarer Energien und insbesondere von Biokraftstoffen eine herausragende Rolle für die Erfüllung dieser Minderungsziele.

Durch die Novellierung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes⁷ vom April 2015 wurde die Richtlinie 2009/30/EG umgesetzt und gleichzeitig die bisherige Förderung des Einsatzes von Biokraftstoffen durch das Biokraftstoffquotengesetz⁸ aus dem Jahr 2006 abgelöst. Dabei wurde die bis dahin geltende Verpflichtung, Biokraftstoffe zu einem bestimmten Prozentsatz konventionellen Kraftstoffen beizumischen (Biokraftstoffquote) aufgegeben⁹. Stattdessen gilt nun ein generelles THG-Minderungsziel (THG-Quote) für die Gesamtmenge der im Verkehr eingesetzten Kraftstoffe und zwar um 6 % bis zum Jahr 2020.

Dieses Minderungsziel muss gegenüber einem Referenzwert erreicht werden, der auf Grundlage der Annahme eines vollständigen Einsatzes fossiler Kraftstoffe errechnet wird. Die Minderungsquote kann also nach wie vor durch die Verwendung von reinen Biokraftstoffen oder ihrer Beimischung zu konventionellen Kraftstoffen erreicht werden, da diese geringere THG-Emissionen verursachen als fossile Kraftstoffe. Es ist nun aber auch möglich, erhöhte THG-Minderungen aus verbesserten Erzeugungsverfahren von Biokraftstoffen anzurechnen. Während also nach der früheren Regelung die Quote der THG-Minderung nur über einen gesteigerten Verbrauch von Biokraftstoffen erreicht werden konnte, ist es nun auch möglich, die Verpflichtungen mit weniger Biokraftstoff, aber höheren THG-Minderungen, zu erfüllen.

7 Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG)

8 Gesetz zur Einführung einer Biokraftstoffquote durch Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes und zur Änderung energie- und stromsteuerrechtlicher Vorschriften (Biokraftstoffquotengesetz – BioKraftQuG)

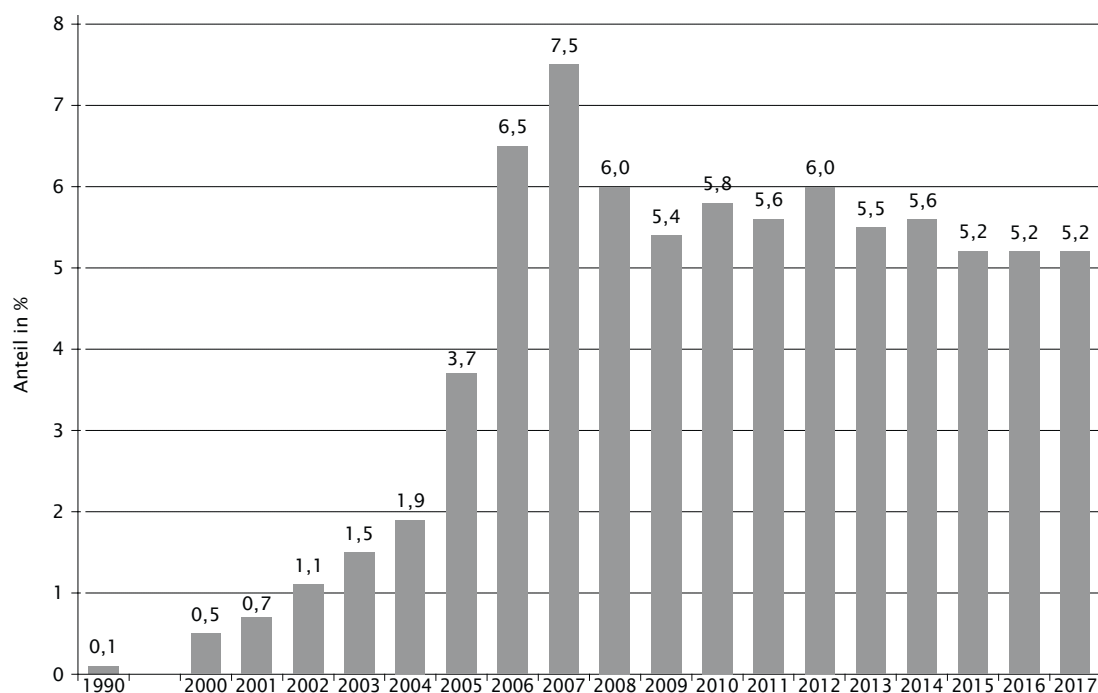
9 Nach dem Biokraftstoffquotengesetz von 2006 sollte der Anteil von Biokraftstoffen bis 2015 schrittweise bis auf 8 % der Gesamtkraftstoffmenge erhöht werden. Mit dem Gesetz zur Änderung der Förderung von Biokraftstoffen aus dem Jahr 2009 wurde diese ursprüngliche Quote nach unten korrigiert. Der Mindestanteil von Biokraftstoff an der Gesamtmenge des in Verkehr gebrachten Otto- und Dieselmotorkraftstoffs sollte nunmehr im Jahr 2009 5,25 % und in den Jahren 2010 bis 2014 jeweils 6,25 % betragen.

Zur Erreichung der durch die Richtlinie 2009/28/EG geforderten Umweltverträglichkeit von Biokraftstoffen hat die Bundesregierung die Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung¹⁰ erlassen. Danach gelten Biokraftstoffe nur dann als nachhaltig hergestellt, wenn sie – unter Einbeziehung der gesamten Herstellungs- und Lieferkette – im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen mindestens 35 %, seit 2017 mindestens 50 % (60 % für Neuanlagen) an THG einsparen. Des Weiteren dürfen zum Anbau der Pflanzen für die Biokraftstoffherstellung keine Flächen mit hohem Kohlenstoffgehalt (z. B. Torfmoore) oder mit hoher biologischer Vielfalt genutzt werden.

2.4 Gegenwärtige Lage auf dem Biokraftstoffmarkt

Im Verkehrssektor entfallen etwa 98 % des Verbrauchs an Endenergie auf Kraftstoffe und rund 2 % auf Strom. Erneuerbare Energien hatten im Jahr 2017 einen Anteil von 5,2 % des gesamten Endenergieverbrauchs (BMWi 2018). Ihr Anteil lag damit auf dem Niveau der Vorjahre und noch erheblich vom Zielwert der EU, den Anteil erneuerbarer Energien am Gesamtendenergieverbrauch des Verkehrs auf 10 % bis zum Jahr 2020 zu steigern, entfernt (Abb. 2.2).

Abb. 2.2 Anteil erneuerbarer Energien am Gesamtenergieverbrauch des Verkehrssektors in Deutschland

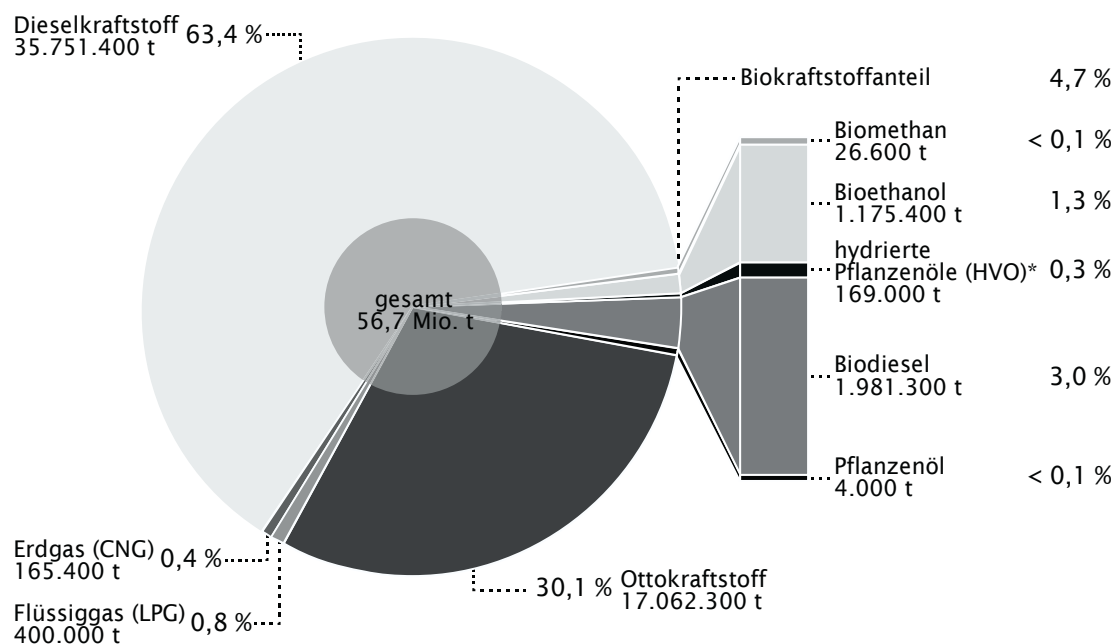


Quelle: BMWi 2018

Innerhalb der im Verkehr eingesetzten erneuerbaren Energien entfielen knapp 88 % auf Biokraftstoffe (knapp 4,6 % des gesamten Endenergieverbrauchs des Verkehrs) und gut 12 % auf Strom (etwa 0,6 % der gesamten Endenergie). Bei den Biokraftstoffen dominiert der Biodiesel mit über 60 % Anteil an der insgesamt im Verkehr eingesetzten erneuerbaren Energie, gefolgt von Bioethanol mit gut 24 % und Biomethan mit gut 1 %. Bezogen auf den eingesetzten Kraftstoff im Verkehrssektor in Deutschland betrug der Anteil von Biokraftstoffen 2016 rund 4,7 % (Abb. 2.3).

¹⁰ Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Herstellung von Biokraftstoffen (Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung – Biokraft-NachV)

Abb. 2.3 Anteil von Biokraftstoffen am Gesamtkraftstoffverbrauch in Deutschland 2016



* Schätzung auf Basis des Werts von 2015

CNG = Compressed Natural Gas; HVO = Hydrotreated Vegetable Oils;
LPG = Liquefied Petroleum Gas (Propan und Butan)

Prozentangaben bezogen auf den Energiegehalt

Quelle: nach FNR 2017a

Die Abbildung 2.4 bietet einen Überblick über den Biokraftstoffmarkt in Deutschland und zeigt die Produktion und Nutzung verschiedener Biokraftstoffe seit dem Jahr 2007. Die Gesamtproduktionsmenge ging zunächst zurück und stieg erst ab dem Jahr 2013 wieder über das Ausgangsniveau des Jahres 2007 an. Auch die Menge der genutzten Biokraftstoffe nahm zunächst sprunghaft ab und fluktuierte auf einem gegenüber 2007 deutlich niedrigeren Niveau. Durch die zunehmende Verwendung von Biokraftstoffen mit günstiger THG-Bilanz konnte trotz einer nahezu gleichbleibenden Menge an Biokraftstoffen eine größer werdende THG-Minderung erreicht werden.

Folgende Kraftstofftypen, die bislang fast ausschließlich fossilen Kraftstoffen beigemischt werden, haben besonderes Gewicht (Naumann et al. 2016) (zu technischen Details der Kraftstoffherstellung siehe Kap. 4):

- FAME steht für Biodiesel, der aus der Ver- bzw. Umesterung von pflanzlichen und tierischen Ölen und Fetten gewonnen wird. Nach einer Konsolidierung des Marktes übersteigt die inländische Produktion (2015 waren es etwa 109 PJ; maßgeblich aus Rapsöl sowie Altspeiseölen oder -fetten hergestellt) die Nachfrage (2015 rund 71 PJ). Die überschüssigen Mengen werden vor allem ins europäische Ausland exportiert.
- HVO/HEFA¹¹ stehen für Kraftstoffe, die unter Einsatz von Wasserstoff aus pflanzlichen und tierischen Ölen und Fetten hergestellt werden. HVO/HEFA sind aufgrund besserer Kraftstoffeigenschaften im Vergleich zu FAME in der Nutzung zunehmend relevant, werden jedoch aufgrund nicht vorhandener inländischer Produktionskapazitäten ausschließlich importiert (2015 etwa 14 PJ).

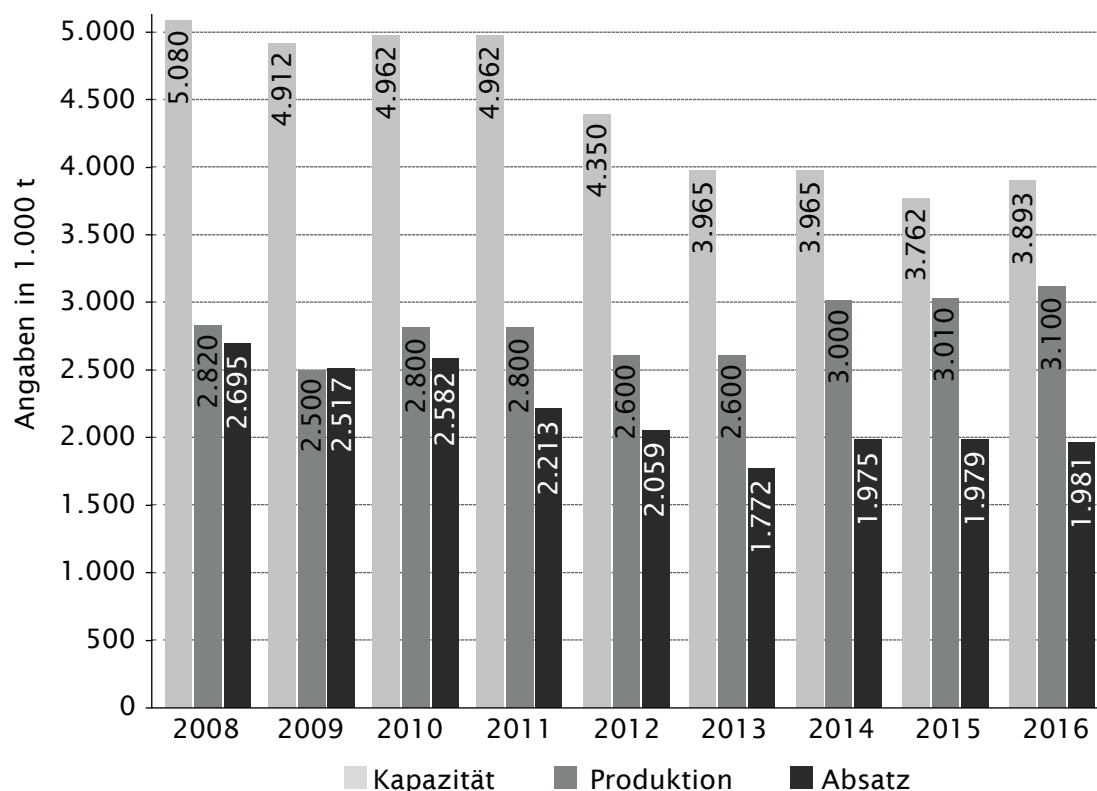
11 Die Abkürzungen HVO und HEFA beziehen sich auf dasselbe Produkt und werden beide in der Literatur verwendet. Die Bezeichnung HVO wurde von der Neste Corporation, HEFA von der American Society for Testing and Materials (ASTM) eingeführt.

- Bioethanol wird mithilfe der alkoholischen Fermentation von zucker- und stärkehaltigen Pflanzenbestandteilen produziert. Der Mehrbedarf zur inländischen Produktion (2015 etwa 20 PJ) wird importiert und kommt als Benzinsubstitut zum Einsatz (2015 rund 28 PJ).
- Biomethan wird aus der anaeroben Vergärung unterschiedlicher Rohstoffe gewonnen. Die inländisch produzierte Menge an Biomethan (2015 rund 27 PJ) kommt derzeit nur zu geringen Anteilen im Verkehr zum Einsatz (2015 etwa 2 PJ) und wird maßgeblich aus Rest- und Abfallstoffen gewonnen.

Insgesamt bleibt der Einsatz von erneuerbaren Energien und insbesondere von Biokraftstoffen im Verkehr hinter den gesteckten Zielen zurück. Der Verbrauch von Biokraftstoffen nahm zuletzt sogar eher ab als zu. Diese Entwicklung konnte nicht mit dem Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien für die wachsende Elektromobilität kompensiert werden (BMWi 2016).

Da das THG-Minderungsziel für die im Verkehr eingesetzten Kraftstoffe kontinuierlich bis 2020 auf 6% steigt, dürfte zukünftig eine erhöhte Beimischung von Biokraftstoffen erforderlich werden. Aufgrund der Bedenken hinsichtlich einer sozial- und umweltverträglichen Erzeugung der Biomasse für Biokraftstoff insbesondere in bestimmten Drittländern besteht eine Begrenzung für konventionelle Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse auf 7% am Kraftstoffmix, sodass nach alternativen Ausgangsstoffen für die Erzeugung von Biokraftstoffen gesucht werden muss. Neben der verstärkten Nutzung von Rest- und Abfallstoffen für die Biokraftstofferzeugung würden dafür prinzipiell auch algenbasierte Kraftstoffe als Biokraftstoffe der 3. Generation infrage kommen. Daher werden im folgenden Kapitel 3 zunächst die Optionen zur Gewinnung von Algenbiomasse als Grundlage für die Erzeugung von Biokraftstoffen und in Kapitel 4 die möglichen Konversionspfade der Algenbiomasse hinzu verschiedenen Kraftstoffen dargestellt. Eine Einordnung der Nachhaltigkeitswirkungen algenbasierter Biokraftstoffe, insbesondere vor dem Hintergrund der geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen für Biokraftstoffe, erfolgt in Kapitel 5.

Abb. 2.4 Produktion und Nutzung von Biokraftstoffen in Deutschland



ohne hydrierte Pflanzenöle (HVO)

Quelle: FNR 2017b

3 Algen als Rohstoff für Biokraftstoffe

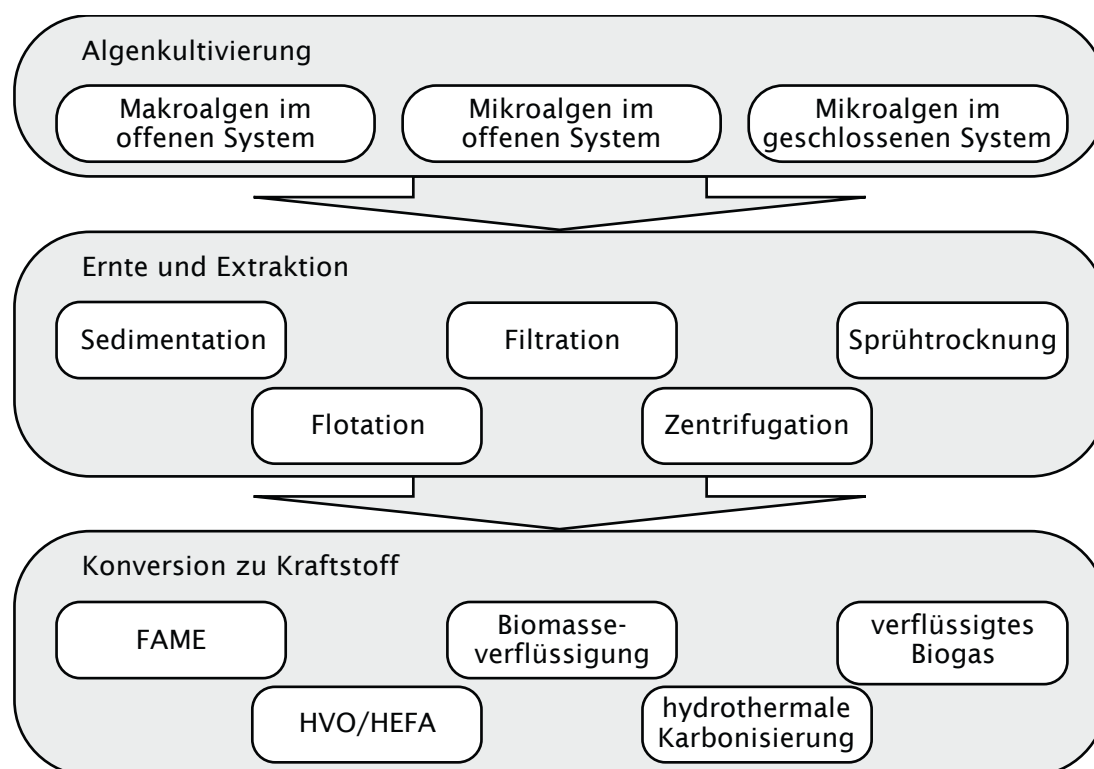
Bei der Suche nach alternativen Wegen der Bereitstellung von Biomasse wird unter anderem die Produktion von Algen als Lösungsweg diskutiert. Folgende Hoffnungen verbinden sich mit der Verwendung von Algen als Ausgangsstoff für die Produktion von Biokraftstoffen:

- Algen können auf Flächen produziert werden, die landwirtschaftlich nicht nutzbar sind (z. B. versiegelte Flächen, Meer, Binnengewässer) und somit nicht zu einer direkten Konkurrenz mit der Nahrungsmittelerzeugung beitragen.
- Der Aufbau von Algenbiomasse kann bis zu 10-mal höher liegen als die von pflanzenbasierter Biomasse (Hill/Feinberg 1984)¹². Diese höhere Produktivität eröffnet die Möglichkeit, Biomasse schneller und in höherem Umfang bereitzustellen, als durch pflanzenbasierte Biomasse.
- Bestimmte Algenarten weisen einen hohen Prozentsatz an Lipiden bzw. Ölen auf, im Idealfall bis zu 80 Masseprozent. Diese Bestandteile sind für die Kraftstoffkonversion besonders günstig und machen Algen zu einem grundsätzlich sehr geeigneten Ausgangsstoff für die Kraftstoffproduktion (Demirbas/Fatih Demirbas 2011).
- Bei der Herstellung von Biokraftstoffen können sogenannte Kuppelprodukte wie Proteine anfallen. Diese können für weitere Prozesse, z. B. die Futtermittelproduktion, verwendet werden (Subhadra 2010).

Die hier aufgeführten grundsätzlichen Vorzüge der Algen als Ausgangsbiomasse für die Weiterverarbeitung müssen jedoch differenziert betrachtet werden. Zum Beispiel können nicht alle aufgeführten Vorteile gleichzeitig in vollem Umfang erreicht werden. So lassen sich die maximalen Wachstumsraten gerade nicht mit jenen Algenarten erzielen, die den höchsten Gehalt an Lipiden oder Ölen aufweisen und damit am besten für die Erzeugung von Kraftstoffen geeignet sind. Die Wachstumsraten der Algen hängen auch von Faktoren wie Nährstoffversorgung, Lichtintensität, Wasserdargebot oder Kohlendioxidversorgung ab. Optimale Produktionsbedingungen finden sich nur an Orten, in denen alle Faktoren in ausreichender Menge und kostengünstig zur Verfügung stehen. Hier gibt es Trade-offs, z. B. steht am Standort eines Kohlekraftwerks Kohlendioxid in großen Mengen zur Verfügung, die anderen Produktionsfaktoren (z. B. Nährstoffe, Sonneneinstrahlung oder Wasser) aber nicht zwingend. Wo intensive ganzjährige Sonneneinstrahlung gegeben ist, fehlt oft Wasser in ausreichender Menge. Im Meer wiederum sind Nährstoffe oft der limitierende Faktor für das Algenwachstum. Ihre künstliche Zugabe wäre kostentreibend und könnte zu Umweltproblemen führen.

¹² Grundsätzlich ist zwischen der Biomasseproduktivität einer Fläche (Wasser oder Land) und der Produktivität eines Organismus (Landpflanze oder Alge) zu unterscheiden. Unter optimaler Nährstoff- und Lichtversorgung kann eine (einzellige) Alge deutlich schneller Biomasse aufbauen als eine Landpflanze.

Abb. 3.1 Prozessschritte der Erzeugung algenbasierter Kraftstoffe



Eigene Darstellung

Die stoffliche wie auch energetische Nutzung von Algen wird zwar seit rund 80 Jahren erforscht (Burlew 1953). Dennoch steht die Technologie der Algenproduktion für die Kraftstofferzeugung noch am Anfang. Der Fokus der Forschung lag lange vor allem auf der Nutzung von Algen als Lebens- oder Nahrungsergänzungsmittel, in den letzten 5 bis 10 Jahren ist jedoch international eine spürbare Zunahme wissenschaftlicher Publikationen zum Thema Algenkraftstoffe zu erkennen (Bauen et al. 2014). Auch in Deutschland und der EU wurden verschiedene größere Forschungsprojekte zur Herstellung von Biokraftstoffen aus Algen initiiert¹³. Aus diesen Vorhaben sind Erkenntnisse zur Wirtschaftlichkeit und ökologischen Aspekten wie THG-Emissionen und weiteren Umwelteffekten zu erwarten. Insgesamt bestehen jedoch erhebliche Wissenslücken in Bezug auf die Erzeugung algenbasierter Biokraftstoffe.

Um aus Algen Biokraftstoffe zu gewinnen, lassen sich die Phasen der Kultivierung der Algen, der Ernte und Extraktion der relevanten Inhaltsstoffe und der Konversion der gewonnen Inhaltsstoffe in Kraftstoffe unterscheiden (Abb. 3.1). Die Frage, wie groß der Beitrag von Biokraftstoffen aus Algen für die Reduktion der THG-Emissionen im Verkehr künftig sein könnte, ist von den Potenzialen und Nachhaltigkeitswirkungen in allen drei Phasen abhängig.

Im Folgenden wird zunächst die Produktion von Algenbiomasse näher erläutert. Dazu erfolgt eine Darstellung der Vielfalt der Algenarten (Kap. 3.1) und ihrer Kultivierungsmöglichkeiten (Kap. 3.2). Anschließend wird auf die Möglichkeiten der Ernte der Algenbiomasse und der Extraktion der gewünschten Inhaltsstoffe eingegangen (Kap. 3.3). Zum Schluss werden vorliegende Schätzungen zu den Produktionskosten von Algenbiomasse erörtert (Kap. 3.5). Die Optionen der Konversion der Algeninhaltsstoffe zu verschiedenen Kraftstoffen werden in Kapitel 4 dargestellt.

¹³ Aus dem 7. Rahmenprogramm der EU können hier Projekte wie »Biofuels from Algae Technologies« (BIOFAT), »All-Gas«, »InteSusAl« oder »Fuel4ME« sowie das vom BMEL geförderte Projekt »AUFWIND« beispielhaft angeführt werden.

3.1 Definition und Diversität

Unter den Sammelbegriff Algen wird eine Vielzahl von Organismen gefasst, die im Wasser leben und (überwiegend) Photosynthese betreiben. Algen werden nach Makro- und Mikroalgen unterschieden. Makroalgen sind ehemalige Landpflanzen, die sich im Laufe der Evolution wieder im wässrigen Medium etabliert haben. Makroalgen besitzen gut erkennbare Stängel sowie Blätter und sind oft verwurzelt. Zu ihnen zählen größere Wasserpflanzen (z. B. Wasserhyazinthen). In Asien werden Makroalgen schon seit Jahrtausenden angebaut (Buck/Buchholz 2004). Makroalgen werden zumeist im Lebensmittelbereich genutzt oder auch in der kosmetischen Industrie stofflich verwertet (FAO 2014).

Mikroalgen sind ein- oder wenigzellig, divers und anpassungsfähig. Ihre Größe bewegt sich im Nano- bis Millimeterbereich. Sie werden traditionell unterteilt in Eukaryonten, deren Zellen über einen Zellkern verfügen (z. B. Grünalgen), und in photosynthetisch aktive Bakterien oder Prokaryonten (Lebewesen ohne Zellkern), den sogenannten Blaualgen. Selbst konservative Schätzungen gehen von mehr als 70.000 Mikroalgenarten aus (Guiry 2012).

Zwei wichtige Gattungen von Mikroalgen, die bereits im industriellen Maßstab angebaut werden,¹⁴ sollen an dieser Stelle die Eigenschaften von solchen Mikroalgen exemplarisch illustrieren, die für die Produktion von Biomasse bedeutsam sind:

- Die Gattung *Chlorella* (*Chlorella* sp.)¹⁵ ist eine einzellige Grünalge, die 2 bis 10 Mikrometer groß wird und im Süßwasser vorkommt (Huntley/Redalje 2007). Sie ist die erste in Reinkultur angebaute Mikroalge. *Chlorella* sp. weist eine sehr große Varianz in der chemischen Zusammensetzung und im äußeren Erscheinungsbild auf. So kann in Abhängigkeit vom Nährstoffangebot und weiteren Umgebungsbedingungen das Protein- und Lipidverhältnis zwischen 8,7 % Protein- bei 86 % Lipidgehalt und 58 % Protein- bei 4,5 % Lipidgehalt schwanken (Huntley/Redalje 2007). *Chlorella* sp. kann Drücken bis 10 MPa standhalten (Salecker 2009). Damit kann die Alge mit den meisten herkömmlichen Pumpen ohne Beschädigung befördert werden. Das Wachstum ist sehr dynamisch. Kulturen dieser Grünalge lassen sich deshalb kaum durch andere Lebewesen verdrängen. Eine weitere Besonderheit der Algengattung ist die Fähigkeit zur mixotrophen Ernährung. So kann z. B. Zucker als zusätzliche Kohlenstoffquelle in das Kulturmedium eingebracht werden, um die Produktivität zu steigern.
- *Spirulina* sp. ist ein photosynthetisch aktives Bakterium (Blaualge) und wird seit Jahrzehnten in großem Maßstab hauptsächlich für Nahrungsergänzungsmittel bzw. Fischfutter für Aquarien angeboten. Die einzelnen Zellen können einen Durchmesser von bis zu fünf Mikrometer und eine Länge von bis zu einem Millimeter erreichen. In Habitaten mit hoher Salinität ist sie als Salzwasser-alge die vorherrschende Art. Damit können in Zuchtanlagen Lebensbedingungen geschaffen werden, die für potenzielle Konkurrenten nicht geeignet sind. Hohe Salinität und relativ hohe Temperaturen wirken sich zugleich nicht negativ auf das Wachstum der Blaualge selbst aus. Diese Eigenschaften kommen der Betriebsweise von Open Ponds (offene Becken) sehr entgegen, wo die Wassertemperatur nur über Verdunstung geregelt ist. Durch die Salztoleranz muss das Algenmedium nicht ständig erneuert werden, wodurch die bei der Produktion anfallende Abwassermenge relativ klein bleibt. Das optimale Algenwachstum hängt insbesondere von der Versorgung mit Kohlendioxid ab.

Die enorme Diversität von Algen hat zu großen Forschungsanstrengungen geführt, nutzbare Algen zu finden. So wurden im Rahmen des »Aquatic Species Program« des U.S. Department of Energy (DOE) zwischen 1978 und 1996 rund 3.000 Algenspezies analysiert und katalogisiert, von denen 300 in die engere Auswahl genommen wurden (Barry et al. 2016). Die Überlegung, Kraftstoffe aus Algen zu produzieren, war expliziter Bestandteil des Forschungsprogramms.

Mikroalgen können selbst unter vergleichbaren (natürlichen) Bedingungen und innerhalb einer Art eine große Variabilität der biochemischen Zusammensetzung aufweisen (Tab. 3.1), und sie reagieren sensibel auf die Um-

14 Außer den zwei hier beschriebenen Gattungen werden weitere Mikroalgen in größeren Anlagen angebaut. Zu erwähnen sind hier *Dunaliella salina*, die in Australien der Produktion von Betacarotin dient und in Salzwasser wächst (Spolaore et al. 2006). *Nannochloropsis* sp. wiederum zeichnen sich durch einen hohen Lipidgehalt aus (Chisti 2007). Die Alge *Haematococcus pluvalis* dient der Produktion von Astaxanthin, einem rötlich-violetten Farbstoff (Bowles et al. 2007).

15 Die Nomenklatur bei Algen besteht aus der Gattung (Species = sp.) und ggf. Unterarten der Gattung. Die Bezeichnung *Chlorella* sp. bezieht sich somit auf die Gattung *Chlorella* mit all ihren Unterarten.

gebungsverhältnisse (Unkefer et al. 2017). Eine Algenart, die unter Laborbedingungen hervorragende Wachstumsergebnisse liefert, kann sich deshalb unter leicht veränderten Bedingungen (z. B. andere Licht- oder Strömungsverhältnisse) ganz anders verhalten. Vielfalt und Varianzen der Grün- und Blaualgenarten legen nahe, dass weitere Algenarten mit spezifischen und nützlichen Eigenschaften zu entdecken sind. Gleichzeitig erscheinen Versuche, technischer Optimierungen mithilfe von genetischen Modifikationen wenig sinnvoll. Dagegen sprechen unter anderem die sehr kurzen Reproduktionszyklen und die hohe Anpassungsfähigkeit von Mikroalgen an die jeweiligen Umweltbedingungen. Gentechnisch modifizierte Algen müssten entsprechend ständig dahingegen überprüft werden, ob sich in diesen dynamischen Prozessen die besonderen und gentechnisch hervorgebrachten Eigenschaften nicht sehr schnell wieder verflüchtigen (Cotton et al. 2015; Shurin et al. 2013).

Tab. 3.1 Typische Varianzen biochemischer Zusammensetzungen verschiedener Algenarten

	Proteine Masseprozent TM	Kohlenhydrate Masseprozent TM	Lipide Masseprozent TM
<i>Chlorella vulgaris</i>	51–58	12–17	14–22
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50–56	10–17	12–14
<i>Spirulina platensis</i>	46–63	8–14	4–9

TM = Trockenmasse; unter natürlichen Wachstumsbedingungen

Quelle: Becker 1994

3.2 Die Kultivierung von Algen

3.2.1 Stoff- und Energiewechsel: photo-, hetero- und mixotrophe Nährmedien

Für ihr Wachstum benötigen Algen Energie, Wasser, Kohlenstoff und eine Reihe von Nährstoffen (unter anderem Stickstoff, Phosphor, Eisen). Verschiedene Algenarten betreiben dabei unterschiedliche Arten des Stoffwechsels: Phototrophe Algen nutzen mithilfe von Chlorophyllpigmenten das Sonnenlicht (oder auch eine künstliche Beleuchtung) als Energiequelle und Kohlendioxid (CO₂) als Kohlenstoffquelle. Heterotrophe Algen verstoffwechseln organischen Kohlenstoff – bzw. Energiequellen (z. B. Saccharide oder Abwässer mit organischen Bestandteilen). Schließlich können einige Algenarten auch mixotroph ernährt werden (also in Kombination der Nutzung des Sonnenlichts und organischer Energiequellen). Damit die Photosynthese gut funktioniert, müssen die Behälter für die Algenkultivierung lichtdurchlässig sein (z. B. transparente Röhren mit geringen Durchmessern, jedoch keine tiefen Becken etc.) und das Kultivierungsmedium in Bewegung bleiben, damit eine gleichmäßige Beleuchtung gewährleistet wird und sich keine Algen absetzen. Die Strömungsgeschwindigkeit darf jedoch auch nicht zu groß sein, sonst könnten Scherkräfte die Algen schädigen. Bei einer phototrophen Produktion von Algen wird das Medium, in dem sich die Algen befinden, in der Regel mit Kohlendioxid begast und in geschlossenen Systemen der entstehende Sauerstoff abgeführt, um optimale Wachstumsbedingungen zu gewährleisten.

Heterotrophe Algen nutzen organische Energie- und Kohlenstoffquellen. Die Kultivierung ist mit einer Fermentation vergleichbar. Dafür kommen Produktionsanlagen zum Einsatz, deren Design weniger kompliziert ist als bei phototrophen Algen, denn es spielt keine Rolle, dass alle Algen in gleicher Weise einer optimalen Lichteinstrahlung ausgesetzt werden. Ein weiterer Vorteil von heterotrophen Produktionsverfahren ist die Unabhängigkeit von Wettereinflüssen (z. B. Sonneneinstrahlung), somit ist die Produktion kontrollierbarer. Zudem ist bei heterotroph hergestellten Algen der Lipidgehalt (hier vor allem der Gehalt an Triglyceriden) im Vergleich zu phototroph produzierten Algen wesentlich höher. Es ist deshalb einfacher, aus heterotroph hergestellten Algen Biokraftstoffe zu produzieren (Kröger/Müller-Langer 2011; Lowrey et al. 2015). Nachteilig ist, dass für optimale Wachstumsraten die Energie- und Kohlenstoffquellen künstlich und kostenaufwendig zugeführt werden müssen. Bei der ebenso möglichen Verwendung von Abwässern ist der Ertrag häufig nicht so hoch und weniger konstant. So lassen Industrieabwässer der immer selben Qualität andere Produktivitäten und Produktqualitäten

zu als z. B. kommunale Abwässer, die sich in ihrer Zusammensetzung ständig ändern. In Extremfällen können die Abwässer auch zu Kontamination der Algenkultur durch andere Organismen oder dem Absterben der Algen führen.

In mixotrophen Verfahren können Algen sowohl phototrophe (auf Sonnenlicht und CO₂-basierende) als auch heterotrophe (auf organischen Quellen basierende) Stoffwechselprozesse nutzen. Die Vorteile dieses Verfahrens sind ein oft höherer und qualitativ gleichmäßiger Ertrag als bei einer ausschließlich phototrophen Produktion. Die mixotrophe wie auch heterotrophe Produktion von Algen spielen bislang vor allem in der stofflichen Nutzung von Algen eine Rolle und wird bereits im industriellen Maßstab betrieben (Kröger et al. 2016, S.35).

Zur Optimierung der Algenproduktion für die Kraftstofferzeugung müssen gegenläufige Abhängigkeiten ausbalanciert werden: Um optimale Produktionsraten zu erreichen, müssen die jeweils benötigten Nährstoffe im richtigen Verhältnis zueinander vorhanden sein. Stickstoff ist dabei neben Phosphor und Kalium ein wichtiger Nährstoff für die Algenproduktion. Denn der Anteil an Stickstoff ist im Algenorganismus wesentlich höher als bei terrestrischen Pflanzen, woraus sich für das Wachstum ein höherer Stickstoffbedarf ableitet (Kröger et al. 2016, S.40). Andererseits reagieren viele Mikroalgen auf ein verringertes Stickstoffangebot im Nährmedium mit einer steigenden Produktion von für die Kraftstoffherstellung relevanten Lipiden – allerdings auf Kosten des Biomassewachstums (Illman et al. 2000; Converti et al. 2009; Barry et al. 2016). Ein weiterer potenzieller Zielkonflikt besteht hinsichtlich der Herkunft der Nährmedien, ihrer Erzeugung und Bereitstellung am Ort der Algenproduktion. Die kann aus ökologischer oder klimatischer Perspektive problematisch sein und die Vorteile einer Substitution fossiler Ausgangsstoffe oder von Biomasse der 1. und 2. Generation für die Kraftstoffherstellung konterkarieren (Kap. 3.4).

Schließlich werden je nach Produktionssystem unterschiedliche Methoden angewendet, um eine größtmögliche Einheitlichkeit des Endprodukts zu erreichen. Extremophile Mikroalgen, die an extreme Bedingungen, wie einen hohen Salzgehalt des Nährmediums angepasst sind, kommen gerne bei offenen Systemen zum Einsatz (Salecker 2009). Das soll verhindern, dass unerwünschte Algen oder Organismen in Konkurrenz zu den Mikroalgen treten, die für die Produktion vorgesehen sind. Dennoch kann es insbesondere bei offenen Systemen zu Kontaminationen kommen, die den Ertrag mehr oder weniger stark schmälern. Die sehr kurzen Reproduktionszyklen und die hohe Anpassungsfähigkeit von Mikroalgen an Veränderungen hinsichtlich Nährstoffversorgung, Temperatur, Strahlungsparametern, chemischer Zusammensetzung des Mediums oder Fließgeschwindigkeit, lassen grundsätzlich keine Biomasse mit stets gleichförmigen Eigenschaften erwarten.

3.2.2 Produktion von Makroalgen off-shore

Makroalgen werden grundsätzlich in offenen natürlichen Gewässern produziert, d. h. in Seen und vor allem im Meer. Die Versorgung mit Nährstoffen ist in Meeren oftmals der limitierende Faktor für das Algenwachstum (Fernand et al. 2017). Es sind deshalb vor allem jene Küstengebiete geeignet, die sich durch beste Wachstumsbedingungen, z. B. höhere Nährstofffrachten an Flussmündungen, auszeichnen. Eine Düngung von natürlichen Gewässern wäre kostenaufwendig, könnte aquatische Ökosysteme negativ beeinflussen und wäre zudem aufgrund von Strömungen in der Regel ineffizient (Kröger et al. 2016, S.14).

Die Bandbreite der Produktivität in natürlichen Gewässern ist entsprechend groß. Die Nettoprimärproduktion im offenen Meer schwankt zwischen 0,002 und 0,4 kg Biomasse/m²/a). In Küstennähe (Flussmündungen, Riffe etc.) kann sie bis zu 4 kg/m²/a erreichen (Bick 1998). 2012 wurden rund 23,8 Mio. t (nass¹⁶) Makroalgen produziert und vollständig stofflich genutzt (FAO 2014).

Inwieweit Makroalgen für Biokraftstoffe nutzbar wären, wird derzeit wissenschaftlich erforscht (Alvarado-Morales et al. 2013). Da Makroalgen so gut wie keine Lipide enthalten, kommen nur solche Kraftstoffrouten infrage, die Kohlenhydrate nutzen wie z. B. die Produktion von Biogas oder Ethanol (Roesijadi et al. 2010) sowie thermochemische Verfahren. Ein Anstieg der Nachfrage nach Makroalgen für die Kraftstoffproduktion würde allerdings den Konkurrenzdruck in den produktiven Küstengebieten erhöhen. Die Nutzung von Makroalgen für die Kraftstoffgewinnung würde deshalb wohl zu ähnlichen Problemen und Konflikten führen wie bei der Produktion von Kraftstoffen aus landbasierter Biomasse. Im vorliegenden Bericht wird daher auf die Produktion von Mikroalgen für die Kraftstoffherstellung fokussiert. Für Mikroalgen sprechen neben der geringeren Konfliktrichtigkeit auch die höhere Effizienz und die größere technische Kontrollierbarkeit. Für die Produktion

16 Zahlen zum TM-Anteil von geernteten Makroalgen sind nur schwer zu finden. Gao/McKinley (1994) gingen von einem Nass-zu-trocken-Verhältnis von 5:1 aus. Damit läge die produzierte Menge in 2012 bei 4,76 Mio. t TM und der durchschnittliche Makroalgenpreis bei rund 1.345 US-Dollar/t TM.

von Mikroalgen gibt es eine unübersichtliche Anzahl an Systemvariationen. Grundsätzlich können offene (Open Ponds) und geschlossene Produktionssysteme (Photobioreaktoren) unterschieden werden.

3.2.3 Produktion von Mikroalgen in offenen Systemen

Bei Open Ponds wird das Kulturmedium aus Wasser und Nährstoffen in der Regel in einem etwa 20 bis 30 cm tiefen Becken umgewälzt. Die geringe Wassertiefe soll sicherstellen, dass das natürliche Licht alle Algen erreicht. Ein Schaufelrad gewährleistet Durchmischung und Weitertransport und verhindert, dass sich Algen am Grund absetzen. Die Versorgung mit Kohlendioxid und Nährstoffen erfolgt kontinuierlich. Die gesamte Anlage wird entweder chargenweise (im sogenannten Batchbetrieb) gefahren (d. h., die Becken werden immer wieder in Gänze abgeerntet), die Algen können aber auch kontinuierlich abgezogen werden (Moreno-Garcia et al. 2017).

In Open Ponds werden fast ausschließlich Algenarten kultiviert, die tolerant gegenüber hohen Salzgehalten oder extremen pH-Werten sind (Salecker 2009). Es werden also Umgebungsbedingungen geschaffen, in denen andere Organismen nicht lebensfähig sind. So können eine relativ hohe Sortenreinheit der Mikroalgen und relativ gleichbleibende Qualität der Biomasse erreicht werden. Die Qualität der produzierten Algen ist in hohem Maße von der Nährstoffzufuhr abhängig. Optimierte Nährstoffmischungen können für gute und gleichförmige Produktqualität sorgen, wirken sich aber meist negativ auf Kosten und THG-Bilanzen aus.

Vorteile der Open Ponds 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. Letztere führt dazu, dass sich die Konzentration gelöster Stoffe kontinuierlich erhöht. Um die Bedingungen für die Mikroalgen im optimalen Bereich zu halten, müssen deshalb Teile des Kulturmediums immer wieder ausgetauscht werden. Eine weitere Herausforderung besteht in der Gefahr von Kontaminationen, die durch Einträge von Abgasen oder Verunreinigung durch Mikroorganismen, Insekten, Vögel und andere Tiere entstehen können (Chisti 2007; Schmack et al. 2008).

Weltweit stammen derzeit mehr als 80 % der insgesamt produzierten Algenbiomasse aus offenen Systemen. Kommerziell genutzte Anlagen stehen hauptsächlich in Nordamerika und Asien (TMRA 2016).

3.2.4 Produktion von Mikroalgen in geschlossenen Systemen

In geschlossenen Systemen wird das Kulturmedium meist vorbehandelt (d. h., CO₂ wird zugegeben und Sauerstoff entzogen), bevor es in den eigentlichen Photobioreaktor (PBR) gelangt. Der Reaktor besteht in der Regel aus langen transparenten Röhren mit Durchmessern von ca. 2,5 bis 40 cm (tubulärer PBR). Die Algen können aber auch in flachen, vertikal errichteten Platten gezüchtet werden (Flat-Plate-PBR). Zusätzlich können die PBR mit Membranen ausgestattet sein, die das permanente Ernten der Algenbiomasse ermöglichen (Moreno-Garcia et al. 2017). In PBR ist die Balance zwischen Kohlendioxid- und Sauerstoffgehalt ein maßgeblicher Faktor für die erzielbaren Erträge (Chisti 2007; Schmack et al. 2008).

Damit alle Algenzellen dem Sonnenlicht optimal ausgesetzt werden und die Röhren nicht zusetzen, muss das Medium turbulent durch die Röhren strömen. Die Turbulenzen sollten aber nicht zu groß sein, um schädigende Scherspannungen zu vermeiden und den Energieverbrauch für die Pumpen möglichst klein zu halten. In PBR liegt die Konzentration der Algenbiomasse bei rund 1,5 bis 2,4 g/l (Brennan/Owende 2010; Christenson/Sims 2011).

Es gibt verschiedene Variationen des PBR-Modells. Dazu zählen neben den erwähnten Flat-Plate-PBR (Rodolfi et al. 2009) auch Low-Cost-Reaktoren, die z. B. aus Kunststoffbeuteln bestehen (Zitelli et al. 2013). Im Labormaßstab werden auch sogenannte Biocoil-PBRs eingesetzt, deren Röhren sich spiralförmig um eine zusätzliche künstliche Lichtquelle winden (Tredici 2007).

Mit geschlossenen Reaktoren ist es möglich, Temperatur- und Strahlungsschwankungen (z. B. wegen saisonal unterschiedlicher Wärme- und Lichtverhältnisse) auszugleichen. Ein weiterer Vorteil von PBR liegt darin, dass Kontaminationen vermieden werden. Durch die kontrollierten Bedingungen können Algen in hoher Reinheit produziert werden. Die PBR beanspruchen weniger Grundfläche und durch die bessere Lichtausnutzung in den Röhren ist die Produktivität (volumetrische und flächenspezifisch) in der Regel höher als in offenen Systemen (Pulz 2001; Chisti 2007). Nachteilig sind die aufwendigere und kostenintensivere Technik. Neben der Temperaturregulierung werden auch Aggregate für die Mischung und den Gaseintrag benötigt. Es wird geschätzt, dass

gängige Reaktoren bereits etwa 20 % der aus der Algenbiomasse gewinnbaren Energie als elektrische Hilfsenergie allein für das Mischen und den Gaseintrag benötigen (Rosello Sastre/Posten 2010). Dabei sind weitere Energiebedarfe für den Betrieb der Reaktoren (z. B. zur Temperaturregulierung) und die Gewinnung der Algenbiomasse (Kap. 3.3) noch nicht berücksichtigt.

Weltweit gibt es mehrere geschlossene Produktionsanlagen. Mit 1,2 ha Kultivierungsfläche befindet sich die größte PBR-Anlage in Klötze (Sachsen-Anhalt). Dort werden unter anderem vitaminhaltige Nahrungsergänzungsmittel produziert (Kröger et al. 2016, S.31).

3.3 Ernte, Entwässerung und Extraktion von Inhaltsstoffen

Die Ernte der Mikroalgen ist aufgrund der geringen Zelldichte in der Nährlösung sehr aufwendig und energieintensiv. Die Effizienz dieses Prozesses stellt eine kritische Herausforderung für die ökologisch und ökonomisch sinnvolle Herstellung von Algenkraftstoffen dar (Ummalyma et al. 2017). In offenen Systemen kann in der Nährlösung selbst eine maximale Dichte von 1,6 g/l erreicht werden, in geschlossenen Systemen bis zu 2,4 g/l (Kröger et al. 2016, S.35). Um die Algen vom Wasser zu trennen, sind technisch aufwendige Verfahren notwendig. Zur Anwendung gelangen insbesondere Sedimentation, Flotation, Filtration, Zentrifugation und Sprühtrocknung (Milledge/Heaven 2013).

Bei der Sedimentation kommen Flockungsmittel wie Aluminium- und Eisensalze oder bestimmte Polymere zur Anwendung (Chatsungnoen/Chisti 2016). Der Bedarf an Flockungsmittel kann bei hohen Ionenkonzentrationen (z. B. Salzwasser) im Medium stark ansteigen. Das erschwert die Wiederverwendung des Mediums, da die Flockungsmittel das Algenwachstum negativ beeinflussen können (Kröger et al. 2016, S.36) und teilweise umweltgefährdend sind (Slade/Bauen 2013). Für die Sedimentation ist ein erheblicher Flächenbedarf notwendig. Es lässt sich damit eine Feststoffkonzentration von bis etwa 5 % erreichen. Für die Weiterverarbeitung muss dieser Anteil weiter erhöht werden. Eine andere Möglichkeit stellt die Flockung durch Ultraschall dar (Bosma et al. 2003). Neben dem hohen technischen und energetischen Aufwand hat dieses Verfahren bislang allerdings auch den Nachteil, dass der Algenproduktionsprozess unterbrochen werden muss. Forschungen, die auf einen Einsatz der Ultraschalltechnik in einem kontinuierlichen Prozess ermöglichen, stehen erst am Anfang (Hincapié Gómez/Marchese 2015).

Bei der Flotation werden elektrolytisch oder mechanisch erzeugte Bläschen in die Algensuspension eingeleitet. Die Bläschen haften an den Zellen und ziehen sie an die Oberfläche, wo sie abgeschöpft werden können. Mit der Flotation konnten gute Trennergebnisse erreicht werden (bis 95 % Abtrennung der extrazellulären Flüssigkeit). Flotation kann nur in Verbindung mit dem Einsatz von Flockungsmitteln effektiv sein. Das Verfahren ist zudem mit hohem technischen Aufwand und Energieeinsatz verbunden (Schmack et al. 2008).

Für Filtration kommen vor allem Trommel- und Bandfilter infrage (Chisti 2007). Bei größeren Mikroalgen können damit gute Ernteergebnisse erzielt werden. Bei Mischkulturen ist allerdings nachteilig, dass oft kleinere Algenarten von den Filtern nicht erfasst werden (Schmack et al. 2008). Zudem sind insbesondere die Unterhaltungskosten einer Filteranlage sehr hoch (Mata et al. 2010).

Die Zentrifugation wird wegen ihres Energiebedarfs meist als sekundäres Trennverfahren eingesetzt, d. h., die Biomassekonzentration wird zunächst (z. B. durch Sedimentation) erhöht, bevor das Medium in die Zentrifuge gelangt. Verschiedene Zentrifugen wie Kammerzentrifugen, Plattenseparatoren oder Dekanter werden eingesetzt (Milledge/Heaven 2013). Die Leistungen dieser Verfahren weisen große Bandbreiten auf. Vorteil der Zentrifugation ist der geringe Platzbedarf bei einem hohen Durchsatz. Wegen der geringen Größe der Mikroalgen und des kleinen Dichteunterschieds zwischen Algen und Medium sind hohe Beschleunigungen von mehreren Tausend g (g: Erdbeschleunigung) notwendig, die das Verfahren energieaufwendig machen (Bharathiraja et al. 2015). Dennoch bleibt oft die Trennung der Phasen unvollständig, sodass ein erheblicher Anteil der Algen in der flüssigen Phase verbleibt (Kröger et al. 2016, S.37).

Bei der Sprühtrocknung wird die Algensuspension in einen heißen Luftstrom eingesprüht. Durch die Wärme verdunstet das Wasser. Um den insgesamt hohen Energieaufwand in Grenzen zu halten, kommt die Sprühtrocknung nur nach einer primären Entwässerung bei Produkten mit hohen Qualitäts- und Reinheitsanforderungen zum Einsatz (Brennan/Owende 2010). Das Verfahren eignet sich zur Erhaltung empfindlicher Inhaltsstoffe wie Vitamine und Proteine (Milledge/Heaven 2013).

Der Energiebedarf für Ernte und Entwässerung ist vom jeweiligen Verfahren und der Algenkonzentration im Medium abhängig. Für jedes Kultursystem muss hier das optimale Verfahren ermittelt werden. Die Tabelle 3.2 gibt einen Überblick über die angesprochenen Verfahren mit Einschätzungen der spezifischen Energiebedarfe.

Auch hierbei sind die Angaben nicht als allgemein gültige Standarddaten zu interpretieren, da der Energieaufwand durch verschiedene Faktoren beeinflusst wird, die in den Studien unterschiedlich ausgeprägt waren. Hierzu gehören die technischen Spezifika der untersuchten Anlage (z. B. die Geschwindigkeit und entsprechende Fliehkräfte bei Zentrifugen), die Ausgangskonzentration der Algensuspension, die Besonderheiten der verwendeten Mikroalgen (z. B. Widerstandsfähigkeit der Zellwände) oder die Prozesstemperaturen (Danquah et al. 2009; Uduman et al. 2010). Es wird jedoch deutlich, dass insbesondere die Zentrifugation und die Sprühtrocknung einen hohen Energieeinsatz erfordern (Chen et al. 2011).

Tab. 3.2 Vergleich wichtiger Parameter verschiedener Verfahren der Algenernte und Entwässerung

Verfahren	Eingangskonzentration in Masseprozent	max. Konzentrationsfaktor	max. Endkonzentration in %	Energieaufwand pro m ³ Medium in MJ	Energieaufwand pro kg TM in MJ	Quelle
Sedimentation	0,1–2	50	5	0,1	0,1	Weissman/Goebel 1987
Flotation	0,1	34	3,4	1,7	1,7	Sim et al. 1988
Filtration (Bandfilter)	0,05	60	3,0	1,5	2,9	Sim et al. 1988
Mikrofiltration	0,4	48	20	1,4	0,33	Razon/Tan 2011
Zentrifugation	0,5	48	22	28,8	–	Danquah et al. 2009
Zentrifugation	–	20–150	2–15	3,24	–	Molina Grima et al. 2003
Sprühtrocknung	bis 30	–	100	–	13	Kröger et al. 2016; Petrick et al. 2013

Eigene Zusammenstellung nach Ketzer et al. 2018; Kröger et al. 2016, S. 37 f.

Je nach geplanter Verwendung der Algenbiomasse muss diese getrocknet und die gewünschten Inhaltsstoffe müssen extrahiert werden. Dies gilt insbesondere für die Gewinnung der für die Kraftstofferzeugung relevanten Inhaltsstoffe wie Öle oder Lipide. Die Trocknung der Algen ist ein energieaufwendiger Schritt. In einer Studie von Kröger et al. (2013) wird der notwendige Energieeinsatz mit 5.300 kJ/kg (rund 1,5 kWh/kg) Algenbiomasse berechnet. Für eine großskalige und kosteneffiziente Biomasseproduktion ist sie daher wenig geeignet. Dieser hohe Energieeinsatz belastet die Wirtschaftlichkeit von algenbasierten Biokraftstoffen erheblich, auch die Nachhaltigkeitswirkungen einer Substitution fossiler durch algenbasierte Kraftstoffe werden dadurch geschmälert (Kap. 3.4).

Die Effizienz der Extraktion der gewünschten Inhaltsstoffe hängt stark von der Algenart und den Produktionsbedingungen ab. Im Vergleich zur Extraktion (mittels Pressen) von z. B. Rapsöl ist jedoch in jedem Fall ein erhöhter Aufwand zu betreiben. Oft ist nach dem Aufschluss der Algenzellen durch Pressen eine Lösemittelextraktion notwendig. Bei schlechter Qualität bzw. niedriger Selektivität des Extraktionsmittels ist eine weitere Aufreinigung des Extrakts durchzuführen. Der Ertrag an für die Biodieselproduktion geeigneten Lipidanteilen

(Triglyceriden) hängt nicht nur vom Gehalt in der Alge, sondern auch von der genutzten Algenart (Shen et al. 2009) und der eingesetzten Extraktionsmethode ab (Doucha/Lívanský 2008).

Die aufwendige Trocknung der Algenbiomasse kann in hydrothermalen Verfahren der Energieträgererzeugung (sogenannte hydrothermale Karbonisierung, Verflüssigung oder auch Vergasung im wässrigen Medium) entfallen (Kap. 4.1.3). Bei diesen Verfahren wird die gesamte Alge genutzt und das enthaltene Wasser dient als Reaktionsmedium. Diese Verfahren befinden sich derzeit im Forschungs- und Versuchsstadium, kommerziell arbeitende Anlagen existieren bislang noch nicht (Kröger et al. 2016, S. 56).

3.4 Mögliche Produktionsmengen von Mikroalgen

Für eine Abschätzung der theoretisch erzeugbaren Menge an Mikroalgen stellen sich zwei Herausforderungen auf unterschiedlichen Ebenen. Zunächst ist in einem ersten Schritt die Produktivität unterschiedlicher Algenarten in verschiedenen Produktionssystemen (offen oder geschlossen) zu ermitteln (Kap. 3.4.1). In einem zweiten Schritt ist zu klären, welche Gesamtmengen an Algenbiomasse sich auf geeigneten Standorten in verschiedenen Anbauregionen auf Grundlage dieser Produktivitätsschätzungen einzelner Anlagen erzeugen ließen (Kap. 3.4.2).

3.4.1 Produktivität verschiedener Produktionssysteme

Betrachtet man zunächst das Produktionssystem, so lassen sich aus den genannten Spezifika folgende Schlüsse ziehen (Tab. 3.3): Offene Systeme zur phototrophen Mikroalgenproduktion lassen sich zwar kostengünstiger einrichten und betreiben, sind jedoch stärker für äußere Einflüsse anfällig und erzielen geringere Produktionsraten.

Aufgrund der aufwendigeren Bauweise verursachen PBR höhere Kosten für die Anlagenerstellung und weisen höhere Energieverbräuche im Betrieb auf, gewährleisten aber durch die besser kontrollierbaren Wachstumsbedingungen auch höhere Erträge. Gleichzeitig besteht bei Verwendung organischer Energie- bzw. Kohlenstoffquellen, z. B. Abwässer die Gefahr von Kontaminationen des Algenmediums (Kröger et al. 2016, S. 35; Richardson et al. 2014).

Tab. 3.3 Charakteristika von Mikroalgenkultivierungssystemen

Stoffwechsel	Energiequelle	Kohlenstoffquelle	Zelldichte	Anlagentyp	Kosten	Herausforderungen
phototroph	Licht	anorganisch, z. B. Emissionen von Kraftwerken	gering	offen oder PBR	gering	geringe Erträge; Kosten für Ernte und Entwässerung
heterotroph	organisch	organisch, z. B. Abwässer	hoch	Fermenter	mittel	Kontaminationen; Kosten für Nährstoffe
mixotroph	Licht und organisch	anorganisch und organisch	mittel	PBR	hoch	Kontaminationen; hohe Anlagenkosten; Kosten für Nährstoffe
photoheterotroph	Licht	organisch	mittel	PBR	hoch	Kontaminationen; hohe Anlagenkosten; Kosten für Nährstoffe

Quelle: Chen et al. 2011

In den bislang vorliegenden Studien werden teils sehr unterschiedliche Werte für die Erträge verschiedener Algenproduktionsverfahren ermittelt (Tab. 3.4). Eine tiefergehende Analyse macht deutlich, welche Schwierigkeiten bestehen, tatsächlich vergleichbare Ertragsdaten zu erheben, darzustellen und zu interpretieren (Kenny/Flynn 2017).

Ein erstes, grundlegendes Problem besteht darin, dass sich die verfügbaren Daten zur Produktivität häufig aus der Extrapolation von Daten aus Laboranlagen, teilweise auf Daten von Pilotanlagen beziehen, die jedoch (noch) nicht in einem Maßstab betrieben werden, der für die Kraftstofferzeugung relevant wäre. Zudem werden Algen bislang vor allem für Anwendungszwecke jenseits der Verwertung als Kraftstoff kultiviert. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Produktion anderer Inhaltsstoffe, z. B. für Nahrungsergänzungsmittel oder Kosmetika. Somit kann nicht sichergestellt werden, dass die im Kleinstbetrieb erreichbaren Produktionsbedingungen und Produktivität auch in einem für die Kraftstofferzeugung notwendigen industriellen Maßstab erreicht werden können.

Tab. 3.4 Produktivität verschiedener Algenproduktionssysteme

Produktivität g/m ² /d g/m ³ /d		Algenspezies	Bemerkungen	Quelle
<i>Produktionssystem offen</i>				
2,9-10,5		k. A.	Standorte in den USA	Wigmosta et al. 2011
20		k. A.		Sun et al. 2011
13,6		Chlorella vulgaris	Durchschnitt 22 verschiedener Standorte in den USA	Yang et al. 2011
15,3		k. A.	Standort in New Mexico	Rogers et al. 2013
5,4	18	Chlamydomonas globosa, Chlorella minutissima, Scenedesmus bijuga	Mischkultur mit 30 cm Tiefe; Nährmedium unbehandelte Abwässer	Chinnasamy et al. 2010
7,5	92	Chlamydomonas globosa, Chlorella minutissima, Scenedesmus bijuga	Mischkultur mit 20 cm Tiefe; Nährmedium unbehandelte Abwässer	Chinnasamy et al. 2010
9,2	51	Chlamydomonas globosa, Chlorella minutissima	Mischkultur mit 18 cm Tiefe; Nährmedium unbehandelte Abwässer	Chinnasamy et al. 2010
24,75		Chlorella vulgaris	30 cm Tiefe, Standort südliche EU, hohe Stickstoffversorgung	Lardon et al. 2009
19,25		Chlorella vulgaris	30 cm Tiefe, Standort südliche EU, reduzierte Stickstoffversorgung	

Produktivität g/m ² /d	Algenspezies	Bemerkungen	Quelle
<i>Produktionssystem geschlossen PBR</i>			
11,4	Nannochloropsis	Durschnitt von 10 Standorten in den USA	Batan et al. 2013
40	k.A.	Hochrechnung experimenteller Ergebnisse	Slade/Bauen 2013
65–86	Botryococcus braunii	Standorte in Japan, Nutzung von Abwässern	Wang et al. 2013
360	Nannochloropsis	Versuchsdauer 1 Woche im Sommer	Rodolfi et al. 2009
4,4–14,8	Nannochloropsis	Durschnitt von 864 Standorten in den USA	Quinn et al. 2012

Eigene Zusammenstellung nach Béchet et al. 2014; Kröger et al. 2016, S. 33 f.; Schmidt et al. 2016a, S. 31 ff.

Ein zweites Problem besteht bei den Maßangaben zur Produktivität. Für offene Produktionssysteme wird in der Regel die Produktivität als erzeugte Biomasse pro Fläche und Zeit (g/m²/d) dargestellt, während für geschlossene Verfahren die Menge der erzeugten Biomasse oft auch pro Volumen und Zeit (g/m³/d) angegeben wird. Nicht immer werden bei Angaben zur Produktivität einer Anlage beide Werte genannt. Darüber hinaus ist nicht standardisiert, was zur zugrundeliegenden Einheit der Produktionsanlage hinzugerechnet wird (bei Flächen nur die jeweilige Beckenfläche oder auch Ernte- und Trocknungsflächen, bei Volumen z. B. nichtbeleuchtete Begasungsbehälter). Häufig ist dies in den entsprechenden Publikationen nicht explizit und nachvollziehbar dargestellt.

Ein dritter Schwachpunkt einiger Studien ist das Fehlen von Angaben, in welchen saisonalen Zeitabschnitten ein bestimmter Ertrag erreicht wurde. Insbesondere bei offenen Produktionssystemen können deshalb Ergebnisse über die Produktivität zu Fehleinschätzungen führen, wenn etwa die weniger produktiven Wintermonate nicht Bestandteil der Untersuchung waren und die Ergebnisse der Sommermonate unkritisch auf das ganze Jahr extrapoliert werden. Fehlerquellen ergeben sich auch aus der unrealistischen Übertragung von Umweltparametern (insbesondere der Dauer und Strahlungsintensität des Sonnenlichts) von Versuchsstandorten auf andere Räume.

Jenseits der methodischen Schwierigkeiten in der Bestimmung vergleichbarer und übertragbarer Produktivitätsangaben zeigt sich, dass die Ergebnisse je nach Algenart, der spezifischen Ausgestaltung des jeweiligen Produktionsverfahrens oder den getroffenen Modellierungsannahmen (z. B. Beckentiefe in offenen Systemen, Variationen in der Nährstoffzufuhr und des Nährmediums, oder auch Anteil des photosynthetisch nutzbaren Sonnenlichts) stark schwanken. Ein direkter Vergleich zwischen Produktionssystemen erweist sich vor diesem Hintergrund mit den verfügbaren Daten als hoch problematisch, und die Ergebnisse in Tabelle 3.4 geben daher nur eine grobe Orientierung hinsichtlich der produzierbaren Algenbiomasse.

Als vorsichtige Schätzung unter den klimatischen Bedingungen in Deutschland kann im Mittel von 10 bis 15 g/m²/d für offene und von 1 bis 30 g/m²/d für geschlossene Produktionssysteme ausgegangen werden (Kröger et al. 2016, S. 44). Diese Bandbreiten ergeben mittlere Jahreserträge von ca. 30 bis 50 t Trockensubstanz/ha in offenen Systemen und 30 bis 100 t/ha in geschlossenen Systemen. Dies liegt in einem ähnlichen Rahmen wie die für ein früheres TAB-Projekt ermittelten durchschnittlichen Jahreserträge. Dabei wurde für die Produktion von Mikroalgen in offenen Systemen ein Ertrag zwischen 3,5 und 37 t/ha/a geschätzt, für geschlossene Systemen zwischen 60 und 100 t/ha/a (TAB 2012, S. 53). In wissenschaftlichen Metastudien verschiedener Autoren werden Erträge höher als 60 t/ha/a selbst in Regionen mit hoher Sonneneinstrahlung für unwahrscheinlich gehalten (Chisti 2013; Lundquist et al. 2010; Rocca et al. 2015).

Ähnlichen Bandbreiten unterliegen die Schätzungen zum Lipidgehalt der Algenbiomasse, der neben dem Jahresertrag entscheidenden Größe für die Ausbeute an Biokraftstoffen (Kap. 4). Häufig werden dabei in der Literatur schwer vergleichbare Annahmen getroffen, da nicht alle der in der Algenbiomasse enthaltenen Lipide für die Kraftstoffherzeugung genutzt werden können (Kröger/Müller-Langer 2011). Zwar werden in einigen Studien

Lipidgehalte bestimmter Algen von über 60 % der Trockenmasse (TM) ermittelt (Rodolfi et al. 2009). Davon kann aber nur etwa 70 % für die Kraftstoffherstellung genutzt werden (Williams/Laurens 2010). Daher werden für Vergleichsrechnungen häufig nutzbare Lipidgehalte von 25 bis 30 % der erzeugten Algenbiomasse angesetzt (z. B. Sun et al. 2011; Davis et al. 2012). Auf Grundlage dieser Annahmen und der zuvor erwähnten Schätzung kann angenommen werden, dass sich etwa 7,5 bis max. 30 t biokraftstoffrelevante Algenlipide/ha erzeugen lassen.

Wie lassen sich diese Schätzungen gegenüber der Produktion pflanzlicher Anbaubiomasse einordnen? Für den Anbau von Raps, der in Deutschland mit Abstand bedeutendsten Ölpflanze, wird in Beispielrechnungen häufig von einem mittleren Jahresertrag von 3,5 t/ha ausgegangen. Dies deckt sich in etwa mit vorläufigen Ergebnissen des Bundesverbandes Erneuerbarer Energien, der 2017 im Bundesdurchschnitt einen Ertrag von knapp 3,3 t/ha ermittelte (BMEL 2017). Bei einem Standardölgehalt von 40 % (Funk/Mohr 2010) lassen sich so etwa 1,2 t Rapsöl (etwas mehr als 1.300 l) pro ha erzeugen. Mit Algen könnte in etwa die 6- bis 25-fache Menge Rohstoff produziert werden als mit Raps. Diese groben Schätzungen verdeutlichen das grundsätzliche Potenzial von Algen als Ausgangsrohstoff für die Kraftstofferzeugung.

3.4.2 Hochrechnungen zu Produktionspotenzialen für Algenbiomasse

Da derzeit keine Produktionsanlage für Algenbiomasse existiert, die im industriellen Maßstab Algenbiomasse für die Kraftstoffherstellung erzeugen kann, basieren Aussagen zu den global oder in bestimmten Regionen erzeugbaren Produktionsmengen auf Hochrechnungen der Annahmen zur Produktivität, wie sie im Kapitel 3.4.1 dargestellt wurden.

Moody et al. (2014) errechnen das Algenproduktionspotenzial für mehr als 4.300 Standorte weltweit. Grundlage sind Wachstumsmodelle für die Kultivierung der Algenart *Nannochloropsis* in geschlossenen PBR, die mittels realer Wetterdaten für verschiedene Standorte angepasst wurden. *Nannochloropsis* ist aufgrund ihres hohen Lipidgehalts besonders gut für die Herstellung von Biokraftstoffen geeignet. Die Modellierung zeigt, dass an Standorten mit geringerer Sonnenlichtintensität und geringeren Durchschnittstemperaturen geringere Erträge erzielt werden können, als z. B. in mittleren Breiten. Gleichzeitig sind äquatornahe Gebiete ebenfalls nicht ideal, da Wolkenbildung und Niederschlagshäufigkeit die Vorteile einer stabilen Temperatur und Lichtintensität überkompensieren. Auf Basis ihrer Modellannahmen schätzen Moody et al. (2014), dass es z. B. für Brasilien, Kanada, die Vereinigten Staaten und China theoretisch möglich wäre, etwa 30 % ihres gegenwärtigen Erdölverbrauchs für die Kraftstoffherstellung durch Algenbiomasse zu ersetzen.

Skarka (2015) hat eine ähnliche Schätzung des Algenproduktionspotenzials für die EU-27-Staaten vorgelegt. Dabei wurden zunächst geeignete Standorte für Algenproduktionssysteme identifiziert. Natur- und Landschaftsschutzgebiete wurden hierbei genauso ausgeschlossen wie landwirtschaftlich genutzte Flächen sowie Standorte mit ungünstigen topografischen Eigenschaften (insbesondere zu steile Hanglagen). Bei den etwa 5.500 ermittelten Standorten in der EU 27 handelt es sich daher überwiegend um bislang ungenutzte Marginalstandorte. Für die Abschätzung des Algenproduktionspotenzials wurden dann durchschnittliche Erträge angesetzt, die mit einer für die standörtlichen Gegebenheiten (Strahlungsintensität, Temperaturen) angepassten Algenart erzeugbar sind. So wurde für Deutschland eine durchschnittliche Produktivität von knapp 17 g/m²/d angesetzt. Dies entspricht einer Jahresproduktion von etwa 60 t/ha/a und setzt damit für die Produktionsbedingungen in Deutschland recht positive Annahmen. Auf diesem Wege wurde für Europa ein Algenbiomasseproduktionspotenzial in Höhe von rund 41 Mio. t/a ermittelt (Skarka 2015). Zum Vergleich: 2014 wurden in Europa knapp 29 Mio. t Rapssaat produziert (FAO 2017), in Deutschland 6,2 Mio. t (BMEL 2014).

Mediterrane Länder wie Zypern, Spanien, Portugal, Griechenland und Italien weisen die höchsten Flächenertragswerte für die Algenproduktion auf. Die größten Flächenreserven wiederum werden in Spanien und Schweden mit 2.679 km² respektive 2.263 km² gesehen. Aus der Verbindung von Flächenverfügbarkeit und Flächenproduktivität folgt, dass allein in Spanien knapp 70 % des Potenzials für die Produktion von Mikroalgen der EU 27 vermutet werden (Skarka 2015, S. 55). In Deutschland könnten demnach auf ca. 97 km² (entspricht 97.000 ha) verfügbaren Flächen knapp 500.000 t Algenbiomasse erzeugt werden¹⁷. Legt man die zuvor erwähnten durchschnittlichen Lipidgehalte der Algenbiomasse (25 bis 30 % der TM) zugrunde, ließen sich auf dieser Fläche zwischen 125.000 und 150.000 t Algenlipide gewinnen.

Demgegenüber wurden im Jahr 2017 etwa 4,3 Mio. t Raps erzeugt (BMEL 2017). In den vergangenen Jahren wurde auf etwa der Hälfte der Rapsanbaufläche, Raps für die technische oder energetische Nutzung angebaut.

17 Für die Hochrechnung der produzierbaren Algenbiomasse ist berücksichtigt, dass nicht die gesamte identifizierte Fläche produktiv genutzt werden kann, sondern teilweise durch die nötige Produktionsinfrastruktur (Anlagen, Zuwegung etc.) belegt ist.

Hiervon finden über 80 % Verwendung als Ausgangsbasis für Biokraftstoffe (FNR 2017c). Auf Grundlage dieser Angaben kann geschätzt werden, dass etwa 1,8 Mio. t der in Deutschland erzeugten Menge Raps für die Herstellung von Biokraftstoffen verwendet wurden. Bei einem Standardölgehalt von Raps (40 %) entspricht dies etwa 720.000 t Rapsöl. Auf Standorten in Deutschland produzierte Algenbiomasse könnte also bestenfalls eine ergänzende Rolle für die Kraftstoffversorgung des Verkehrs spielen.

3.5 Mögliche Produktionskosten von Mikroalgen

Angesichts der zahlreichen Prozessparameter bei der Erzeugung von Algenbiomasse, des frühen Technologiestadiums und der vor allem für Zwecke jenseits der Kraftstoffherzeugung vorangetriebenen Algenselektion und Prozessoptimierung verwundert es nicht, dass die Schätzungen für die Produktionskosten erhebliche Bandbreiten aufweisen.

Für die Produktion von Algenbiomasse aus Open Ponds wird geschätzt, dass die Kosten zwischen 0,50 und 20 Euro/kg TM (500 bis 20.000 Euro/t) liegen (Sun et al. 2011; Norsker et al. 2011; Benemann 2013; Kröger et al. 2016, S. 29). Bei geschlossenen Produktionssystemen ergeben sich Produktionskosten zwischen 0,70 und 4,20 Euro/kg TM (Norsker et al. 2011; Kröger et al. 2016, S. 32). Bei der Algenart *Haematococcus* liegen die Kosten sogar bei 100 US-Dollar/kg TM (Benemann 2013). Dies ergibt eine Bandbreite der Kosten von 500 bis 100.000 Euro/t Algen-TM. Im Vergleich dazu liegt das Erzeugerpreisniveau für die Biomasse zur Herstellung bei den Biokraftstoffen der 1. Generationen mindestens um den Faktor 3 bis 4 darunter. Für Raps liegen die Produktionskosten bei rund 330 Euro/t TM und bei Weizen bei etwa 170 Euro/t TM (Thrän et al. 2015).

Entscheidend für die weitere Verarbeitung der Biomasse zu Kraftstoffen sind darüber hinaus die Konzentration der gewünschten Inhaltsstoffe in der Biomasse und die Kosten für ihre Extraktion. Die Konzentration der Inhaltsstoffe, z. B. der Ölgehalt, ist von der jeweils produzierten Algenart und der gewählten Nährstoffversorgung abhängig. Dabei treffen die in der Literatur verfügbaren Studien recht unterschiedliche Annahmen über die Produktivität der Algen, die erzielbaren Konzentrationen an Algenlipiden und den Kosten für Erzeugung der Biomasse und Extraktion der Lipide (vgl. die Übersichten in Chen et al. 2011 oder Ketzer et al. 2018). Ein direkter Vergleich der verfügbaren Studien ist aufgrund der zahlreichen Parameter kaum möglich.

Dieses Defizit soll durch Metastudien ausgeglichen werden, in denen verschiedene Prozessparameter vereinheitlicht werden, z. B. Annahmen zum Wachstum oder dem Lipidgehalt der Algenbiomasse, aber auch zum Energiebedarf und den Energiekosten. Diese vereinheitlichten Annahmen werden dann für die Neukalkulation der Ergebnisse einzelner Studien herangezogen, um eine bessere Vergleichbarkeit zu erzielen.

Eine solche Studie wurde z. B. von Sun et al. (2011) vorgelegt. In ihrer Untersuchung wurden verschiedene Produktions- und Extraktionsverfahren miteinander verglichen und eine Bandbreite von Kosten für die Extraktion der Algenlipide zur Kraftstoffproduktion abgeleitet. Dabei wurde sowohl Algenbiomasse aus dem Anbau in offenen Systemen als auch in geschlossenen Reaktoren einbezogen, jedoch stammen die Daten aus Modellierungen bzw. Hochrechnungen kleinskaliger Pilotanlagen und nicht aus tatsächlich betriebenen Produktionsstätten. Nach dieser Metastudie liegen die Kosten für die Erzeugung von biokraftstoffrelevanten Algenlipiden zwischen 2,10 und 2,60 Euro/l (Sun et al. 2011).

Allerdings gibt es je nach Annahmen und mit in die Berechnung einbezogenen Kosten divergierende Studienergebnisse. So ermitteln z. B. Richardson et al. (2014) Kosten von über 15 Euro/l für die Erzeugung von Algenlipiden in offenen Systemen und mehr als 10 Euro/l in Reaktorsystemen. Dabei stellt die Investition in die Kultivierungsanlage den größten Kostenblock dar; die daraus resultierenden Finanzierungskosten haben wiederum erheblichen Anteil an den Gestehungskosten der Algenlipide. Betrachtet man nur die Kosten der Algenkultivierung und Extraktion der Lipide (ohne Finanzierungskosten) belaufen sich die Kosten dennoch auf rund 8 Euro/l in offenen und rund 5,10 Euro/l in geschlossenen Produktionssystemen (Tab. 3.5).

Im Vergleich dazu lag der Preis für fossiles Rohöl in den letzten 10 Jahren (2008 bis 2017) zwischen unter 0,20 Euro/l (Anfang des Jahres 2016) und knapp 0,80 Euro/l (in den Jahren 2011/2012). Ende 2017 lag der Preis bei ungefähr 0,40 Euro/l.¹⁸ Der Preis für Rapsöl schwankte im selben Zeitraum zwischen 0,55 Euro/l (im Jahr 2009) und knapp 1 Euro/l (Anfang des Jahres 2011) und lag Ende 2017 bei knapp unter 0,70 Euro/l.¹⁹ Die Kosten für die Erzeugung von Algenlipiden würden also derzeit mindestens um den Faktor 3 bis 4 höher liegen,

18 Daten von <https://www.boerse.de/chart-tool/Brent-Rohoel-Euro/XC0009677409> (6.2.2018)

19 Auf Basis der Daten des Internationalen Währungsfonds über <https://www.indexmundi.com/de/rohstoffpreise/?ware=rapsol&monate=120&waehrung=eur&ware=erdol> (6.2.2018)

angesichts der Unsicherheiten in den vorliegenden Analysen und Preisschätzungen ggf. auch noch darüber. Aus ökonomischer Sicht wäre daher für die Kraftstofferzeugung aus Algenbiomasse in absehbarer Zukunft lediglich eine Nischenrolle vorstellbar.

Im Vergleich der möglichen Algenkultivierungssysteme weisen die einfacheren und kostengünstig erstell- und betreibbaren offenen Produktionssysteme deutliche ökonomische Vorteile auf (Resurreccion et al. 2012). Da Biokraftstoffe als Massenprodukt nur eine vergleichsweise geringe ökonomische Wertschöpfung ermöglichen, können die in geschlossenen Produktionssystemen möglichen höheren Wachstumsraten die deutlich höheren Kosten für Errichtung und Betrieb der PBR nicht überkompensieren (Ketzer et al. 2018).

Es existieren verschiedene Ansatzpunkte zur Senkung der Produktionskosten von Algenlipiden (Chisti 2013), bei denen erheblicher Forschungsbedarf besteht. Eine kurzfristige Option, Kostensenkungen zu realisieren, ist die kombinierte Nutzung von Algen. Ein Teil der Inhaltsstoffe wird dabei für höherwertige Verwendungen, z. B. in der Kosmetik oder Lebensmittelerzeugung genutzt, während der verbleibende Rest als Ausgangsstoff für die Kraftstofferzeugung genutzt werden kann (Singh et al. 2011). Auch die Verwendung von Abwässern zur Algenzucht ist ökonomisch interessant, da die Kosten für die Algenkultivierung durch die Erträge der Abwasserreinigung (mindestens zum Teil) gedeckt werden könnten (Handler et al. 2014; Lowrey et al. 2015). Schließlich wird in die Verwertung von Algenbiomasse in Bioraffinerien, die eine umfangreiche und vielfältige Verwertung anstreben, große Hoffnung gesetzt (Laurens et al. 2017; Roux 2017; Trivedi et al. 2015). Gemein ist diesen kombinierten Produktionsstrukturen, dass Kraftstoff hier nur als Nebenprodukt hergestellt wird. Somit sind die produzierbaren Mengen begrenzt und für einen energiewirtschaftlich relevanten Beitrag zur Kraftstoffproduktion nicht ausreichend.

Tab. 3.5 Kosten der Algenlipidproduktion in offenen und geschlossenen Produktionssystemen

Kostenfaktor	offenes Produktionssystem in Euro/l	geschlossenes Produktionssystem in Euro/l
Investitionsausgaben	4,90	5,20
davon:		
Bau der Anlage	4,10	5,00
Equipment Ernte	0,80	0,20
Equipment Ölextraktion	> 0,01	> 0,01
Betriebsausgaben für die Erzeugung der Algenlipide	8,00	5,10
davon:		
Algenkultivierung	4,90	3,80
Ernte	1,62	0,65
Lipidextraktion	1,48	0,65
übrige Betriebsausgaben (Zinsen, Versicherungen und Steuern)	7,30	6,40

Quelle: umgerechnet und gerundet nach Richardson et al. (2014)

Eine weitere Option wird in der Weiterentwicklung von Herstellungsverfahren für Kraftstoffe gesehen, die nicht nur bestimmte Inhaltsstoffe, sondern die ganze Alge nutzen und bei der die energie- und kostenintensiven Schritte der Trocknung und Extrahierung der Algenlipide mindestens reduziert werden oder sogar ganz entfallen können. Diese Verfahren sind allerdings noch überwiegend in einem frühen Entwicklungsstadium (Kap. 4.1.3).

4 Kraftstoffherstellung aus Algenbiomasse

Dieses Kapitel widmet sich den Optionen zur Weiterverarbeitung von Algenbiomasse zu Biokraftstoffen. Dazu steht eine Reihe unterschiedlicher Konversionspfade zur Verfügung (Kap. 4.1). Einige der Verfahren sind im industriellen Maßstab etabliert und müssen lediglich für Algenbiomasse angepasst werden, z. B. die Herstellung von Biodiesel. Andere Verfahren befinden sich noch in einem weitgehend experimentellen Stadium. Dementsprechend sind die Wissensbestände und Datengrundlagen bei den verschiedenen Kraftstoffherstellungsverfahren von sehr unterschiedlicher Qualität. Dies spiegelt sich in der Verlässlichkeit der Einschätzungen zu den Vor- und Nachteilen, insbesondere den Kosten (Kap. 4.2) der verschiedenen Verfahren und den erzeugbaren Mengen (Kap. 4.3) wider.

4.1 Konversionspfade für algenbasierte Kraftstoffe

Algen und die aus ihnen gewonnenen Inhaltsstoffe lassen sich durch eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren zu Biokraftstoffen umwandeln (Abb. 4.1). Die verschiedenen Konversionstechnologien erfordern spezifische Eigenschaften von Algen bzw. ihren Inhaltsstoffen. Nicht jede Alge eignet sich deshalb für jede Kraftstofftechnologie. Bevor Details der einzelnen Kraftstoffherstellungsverfahren vorgestellt werden, ist es sinnvoll, die Diversität der Kraftstoffarten zu betrachten, für die Algen als Biomasse infrage kommen.

Die aus Sicht der bestehenden Lkw-Antriebstechnik und der vorhandenen Infrastruktur der Kraftstoffversorgung naheliegende Variante wäre die Produktion eines algenbasierten Dieselsubstitutes. Dieses könnte als Drop in Fuel mit fossilem Diesel gemischt werden oder herkömmlichen Diesel zur Gänze ersetzen. Entsprechende Produkte können aus Algenbiomasse zum einen durch eine Umsetzung der in Algen enthaltenen Lipide zu FAME (Kap. 4.1.1) gewonnen werden. Obwohl dieses Verfahren schon mehrere Jahrzehnte entwickelt wird (Sheehan et al. 1998), gibt es derzeit keine kommerziell produzierenden Anlagen für die Herstellung von Kraftstoffen aus Algen. Der Einstieg in die großmaßstäbliche Produktion könnte aber über vorhandene Betriebe zur Biodieselproduktion (insbesondere über sogenannte Multi-Feedstock-Anlagen, die verschiedene Ausgangsstoffe zur Biodieselproduktion verwenden können) erfolgen.

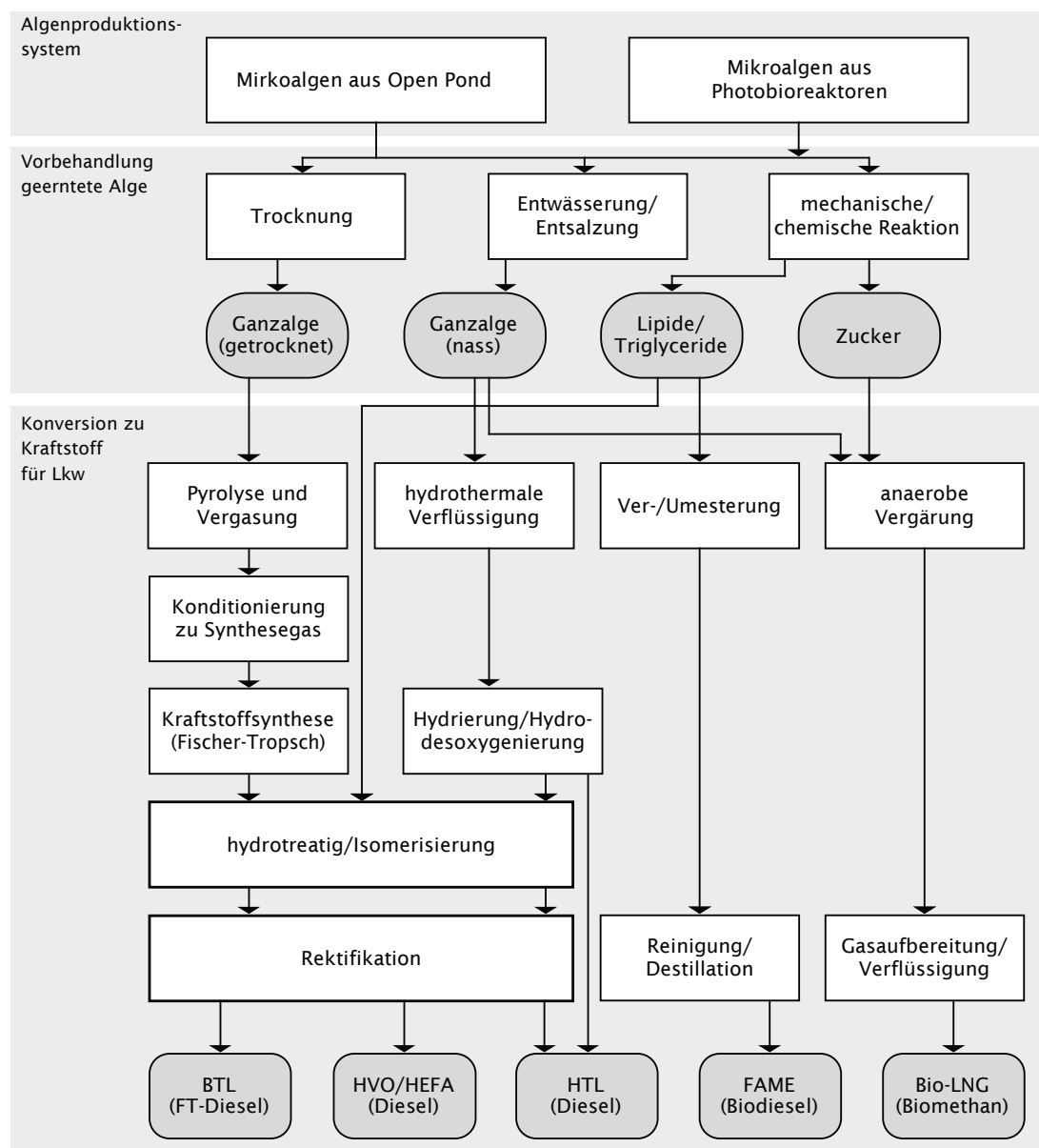
Zum anderen lassen sich Dieselsubstitute durch die Hydrierung von Ölen oder Lipiden (HVO/HEFA) (Kap. 4.1.2) herstellen. Das Verfahren wird mit anderen pflanzlichen Ölen schon produktiv eingesetzt. Bei Algen ist der Prozess im Forschungsstadium (Bundesregierung 2014).

Während die Kraftstoffherzeugung mit den bislang genannten Verfahren – wenn auch mit anderen Ausgangsstoffen – bereits im industriellen Maßstab praktiziert wird, sind zwei alternative Ansätze noch in einer frühen Entwicklungsphase. Dieselsubstitute können zum einen auch mittels einer hydrothermalen Verflüssigung der Algenbiomasse (Hydrothermal Liquefaction [HTL]) (Kap. 4.1.3), zum anderen über eine sogenannte Biomasseverflüssigung (BtL) synthetisch hergestellt werden (Kap. 4.1.4).

Statt Dieselsubstituten wären auch gasförmige Kraftstoffe für den Lkw-Antrieb möglich. An den Verbrennungsmotoren würde sich grundsätzlich nicht viel ändern, allerdings wären andere Tanksysteme notwendig. Ein hierfür nutzbarer Kraftstoff ist verflüssigtes Biogas. In Anlehnung an Flüssigerdgas (Liquefied Natural Gas [LNG]) wird der Kraftstoff auch als (Bio-)LNG bezeichnet.

Als dritte Option bietet sich ein elektrischer Antrieb für Lkw an. Hierfür wären allerdings innovative Speichersysteme (Batterien) oder Stromübertragungssysteme (z. B. Oberleitungen) notwendig. Theoretisch wäre vorstellbar, dabei Strom aus mit Algen betriebenen Biogasanlagen zu nutzen. Allerdings stehen für die Stromversorgung elektrischer Antriebe deutlich kostengünstigere regenerative Energien zur Verfügung, z. B. Windkraft. Eine vereinfachte Darstellung der nachfolgend charakterisierten algenbasierten Kraftstoffrouten zeigt die Abbildung 4.1.

Abb. 4.1 Konversionspfade für algenbasierte Biokraftstoffe



Quelle: Kröger et al. 2016, S. 48

4.1.2 Biodiesel durch Umesterung

Biodiesel auf der Basis der physikalisch-chemischen Ver- bzw. Umesterung pflanzlicher und tierischer Öle und Fette zählt zu den etablierten Verfahren. Derzeit werden weltweit rund 25 Mio. t FAME-Diesel produziert (Naumann et al. 2016). In dem Prozess werden meist Pflanzenöle bei Temperaturen von etwa 60° C mithilfe eines Katalysators und durch Hinzufügung von Methanol umgewandelt. Damit der chemische Ablauf gut funktioniert, muss das für die Ver- bzw. Umesterung verwendete Öl zu einem möglichst großen Anteil aus Triglyceriden bestehen. Triglyceride sind dreifache Ester des Glycerins, an dem drei Fettsäuremoleküle unterschiedlicher Länge hängen. Im Biodieselprozess wird die Verbindung der Fettsäuren aufgebrochen und diese werden mit Methanol zu einem Fettsäuremethylester (FAME) umgeestert. Als Nebenprodukt fällt reines Glycerin an (Kaltschmitt et al. 2009).

Ein hoher Anteil an Triglyceriden ist derzeit nur bei Mikroalgen zu erreichen, die mit großem Aufwand (vor allem eine gezielte Nährstoffversorgung mit spezifischen Nährlösungen) produziert werden. Algen aus Open Ponds weisen meist einen zu niedrigen Triglyceridanteil aus. Selbst für geschlossene PBR sind die Qualitätsanforderungen sehr hoch, sodass sie nur durch großen Aufwand und Kosten zu erreichen sind. Um die geeigneten Algenlipide zu erhalten, müssen die Algen getrocknet und die Lipide extrahiert werden (Kap. 3.3).

Die FAME-Technologie an sich ist kommerziell etabliert. Für die Umwandlung von Algenlipiden als Rohstoff ist eine Demonstrationsanlage in Österreich geplant, deren Fertigstellung allerdings noch nicht terminiert ist. Hinsichtlich der selektiven Algenlipidextraktion besteht noch erheblicher Forschungsbedarf (Kröger et al. 2016, S. 51).

80 bis 90 % der Gestehungskosten des mittels FAME erzeugten Biokraftstoffs können auf die Bereitstellung der Lipide bzw. Öle zurückgeführt werden (Kröger et al. 2016, S. 51). Die Kostenschätzungen einschlägiger Studien schwanken in einer großen Bandbreite und liegen bei 26 bis weit über 200 Euro/GJ (Sun et al. 2011, Salecker 2009). Die Investitionen in die FAME-Anlage spielen anteilig an den Gestehungskosten eine vergleichsweise vernachlässigbare Rolle. Die Produktion von Algenlipiden ist derzeit verglichen mit anderen Ausgangsstoffen für die Umesterung, z. B. Palm- oder Rapsöl, sehr teuer (Details zu den Produktionskosten der Algenlipide siehe Kap. 3.5).

4.1.3 Kraftstofferzeugung durch Hydrierung

Unter Einsatz von Wasserstoff können pflanzliche und tierische Öle sogenannten Hydrierungsprozessen zugeführt werden, um einen qualitativ höherwertigen Kraftstoff zu produzieren. Je nach Reaktionsbedingungen lassen sich mittels einer katalytischen Umwandlung verschiedene Kraftstofffraktionen (Diesel, Kerosin oder Naphtha) erzeugen. Die Anteile der einzelnen Kraftstofffraktionen können durch die eingestellten Prozessbedingungen in gewissen Grenzen variiert werden. Weltweit wurden 2015 rund 3 Mio. t HEFA-Kraftstoffe aus pflanzlichen und tierischen Ölen produziert.

Beim HVO/HEFA-Prozess müssen die Algenlipide zunächst gereinigt und entwässert und können je nach Verfahren auch noch verestert werden. Anschließend werden die vorhandenen Doppelbindungen mithilfe von Wasserstoff gesättigt und bei Bedarf überzählige Sauerstoffatome entfernt. Dem folgt das sogenannte Hydrocracking, bei dem die Kohlenwasserstoffe unter Wasserstoffeinbindung in kleinere Ketten gespalten (Cracken) und Methan (CH₄), Propan (C₃H₈) und Wasser als Nebenprodukte entstehen. Zuletzt werden die einzelnen Produkte voneinander mittels thermischer Fraktionierung voneinander getrennt.

Wie im FAME-Prozess sind Algen mit einem hohen Lipidgehalt nötig, um Kraftstoffe zu erzeugen. Die Qualität der extrahierten Algenlipide muss allerdings nicht so gut sein wie beim FAME-Prozess. Das bedeutet, der Extrakt muss nicht ausschließlich aus Triglyceriden bestehen, sondern kann auch freie Fettsäuren oder andere Arten von Lipiden enthalten. Bei niedrigerer Qualität der extrahierten Algenlipide erhöht sich jedoch der Aufwand für die Entfernung von z. B. Heteroatomen (Stickstoff, Phosphor) bzw. Sauerstoff und für das Hydrocracking.

Die Reifegrade der Technologie unterscheiden sich je nach Rohstoff und Prozessschritt. Für den Einsatz von konventionellen Pflanzenölen ist die gesamte Prozesskette bereits ausgereift und wird kommerziell betrieben. Im Falle des Einsatzes von Algen als Lipidlieferant ist nur das Ende der Prozesskette ausgereift. Die Algenkultivierung in der benötigten Größenordnung sowie die Algenlipidextraktion befinden sich in einem vergleichsweise frühen Entwicklungsstadium (Kap. 3.2 u. 3.3).

Ähnlich wie im FAME-Verfahren sind etwa 80 bis 90 % der Gestehungskosten auf die Bereitstellung der Lipide bzw. Öle zurückzuführen, während die Investitionen in die HEFA-Anlage selbst eine eher untergeordnete Rolle spielen. Die Bandbreiten schwanken dabei zwischen knapp 18 und 170 Euro/GJ (Kap. 4.2).

An der effizienteren Verwendung von algenbasierten Ölen zur Produktion von HEFA wird derzeit noch geforscht (z. B. EU-Projekt »Fuel4ME«²⁰ bzw. in Deutschland seit 2013 im Vorhaben »AUFWIND«²¹). Bereits 2010 wurde auf der Internationalen Luftfahrtausstellung jedoch durch den Flug mit HEFA-Kerosin aus Algenbiomasse demonstriert, dass die HEFA-Produktion grundsätzlich auch mit Algen funktioniert (Wetzel 2010).

20 <http://fuel4me.eu>

21 www.fz-juelich.de/ibg/ibg-2/DE/Projekte/_bund/AUFWIND/_node.html (15.7.2019)

4.1.4 Kraftstoffe via hydrothermale Verflüssigung

Bei hydrothermalen Verfahren handelt es sich um thermochemische Verfahren, die nach der Zusammensetzung des Einsatzstoffes unterschieden werden können. Ein großer Vorteil ist die Möglichkeit, feuchte Biomasse einzusetzen und den energie- und kostenaufwendigen Trocknungsprozess des Algensubstrats zu vermeiden oder mindestens zu verringern. Man unterscheidet die Prozessvarianten zur Herstellung von organischen Feststoffen (hydrothermale Karbonisierung), von Flüssigkeiten (hydrothermale Verflüssigung) und von Gasen (hydrothermale Vergasung). Zur Herstellung von Kraftstoffen bietet sich vor allem die hydrothermale Verflüssigung an.

Als Input können sowohl ganze Algen als auch Reststoffe aus einer vorhergehenden Nutzung der Algen eingesetzt werden. Bei der hydrothermalen Verflüssigung wird das Algenwasser als Reaktionsmedium genutzt. Die Algendichte muss jedoch auf Massenanteile von 15 bis 30 % konzentriert werden. Da die Entwässerung mechanisch (z. B. mit Dekantern) erfolgen kann, wird im Vergleich zu einer Trocknung der Biomasse, die für andere Kraftstoffverfahren notwendig ist, wesentlich weniger Energie benötigt. Nach einer Vorbereitung (Zerlegung der Algenzellen und Zellwände) wird das Algenmedium bei Drücken von 120 bis 180 bar auf 300 bis 350° C erhitzt. So kann der überwiegende Teil der Algenbiomasse in flüssige Bestandteile zerlegt werden. Es entsteht ein Gemisch aus teilweise hydrophoben (d. h. sich nicht mit Wasser mischenden), aber auch hydrophilen (d. h. wasseranziehenden) organischen Flüssigkeiten. Der organische Anteil wird Biocrude genannt (Vardon et al. 2012). Ein höherer Anteil an Lipiden kann den Biocrudeertrag erhöhen (Biller/Ross 2011; Jones et al. 2014). Das flüssige Biocrude wird konzentriert – indem der wässrige Anteil reduziert wird – und kann anschließend in erdölverarbeitenden Raffinerien eingesetzt werden (Liu et al. 2013). Damit ist die Herstellung verschiedener Kraftstoffqualitäten möglich.

Nach der Separation können für verschiedene Algenarten und Produktionsbedingungen Erträge von 10 bis über 60 % (bezogen auf die Masse) Biocrude nachgewiesen werden (Jones et al. 2014). Eine Erhöhung des Anteils an in den Algen enthaltenen Lipiden kann die Produktivität des Verfahrens erhöhen (Biller/Ross 2011; Jones et al. 2014). Im Gegensatz zu Biodiesel aus Algensubstrat kann die ganze Alge in ihrer jeweiligen Zusammensetzung zur Herstellung genutzt werden. Das Verfahren ist damit auch für Algen geeignet deren Eigenschaften und Zusammensetzung nicht genau spezifiziert sind (Vardon et al. 2012). Es können also auch Algen verwendet werden die z. B. im Zuge der Abwasserreinigung entstehen. Aufgrund der thermochemischen Natur des Prozesses sind biologische Kontaminationen unproblematisch. Ebenso sind Verklumpungen, die z. B. bei der Ernte oder der Aufkonzentration der Algen entstehen, kein Problem im Prozess. Es werden aufgrund der Prozessbedingungen (hohe Temperatur und hoher Druck) alle Zellen und Makromoleküle in ihre Bestandteile zerlegt.

Im Verfahren können je nach Prozessparameter auch brennbares Gas oder feste Bestandteile (sogenannte Pflanzenkohle) entstehen, die energetisch verwertet werden können, um damit den Umfang der von außen zuzuführenden Energie zu reduzieren.

Hydrothermale Prozesse zur Kraftstoffproduktion werden schon seit über 25 Jahren erforscht und entwickelt. Mehrere Konzepte wurden in Pilotanlagen getestet (Elliott et al. 1999; Liu et al. 2013). Eine kommerziell arbeitende Anlage wurde jedoch bis jetzt noch nicht realisiert. Sapphire Inc. hat einen zweistufigen hydrothermalen Prozess entwickelt und mit selbstproduzierten Algen ein Vorprodukt hergestellt, welches in klassischen Raffinerien genutzt werden kann. In Deutschland arbeiten das KIT bzw. die Uni Hohenheim und das DBFZ im Projekt »Febio@H₂O« an der HTL-Technologie (DBFZ 2017).

Es besteht noch Entwicklungsbedarf über die gesamte Prozesskette hinweg. Zudem fehlen Erfahrungen mit der Skalierung auf größere Produktionsmengen. Vorliegende Schätzungen für die Gestehungskosten beruhen daher auf Modellannahmen. So berechnen Jones et al. (2014) Gestehungskosten von knapp 1,30 US-Dollar/l (entspricht knapp 30 Euro/GJ), allerdings auf optimistischen Annahmen für zukünftig erreichbare Kosten der Erzeugung der Algenbiomasse. Kröger (2006) berechnete eine mögliche Bandbreite für die Gestehungskosten von unter 16 bis knapp 70 Euro/GJ (Kap. 4.2).

4.1.5 Synthetische Kraftstoffe

Zur Herstellung qualitativ hochwertiger Kraftstoffe wird das BtL-Verfahren erforscht, das im Kern eine Kraftstoffsynthese beinhaltet. Für die Herstellung von BtL-Diesel können diverse Rohstoffe eingesetzt werden, wobei bislang lignocellulosehaltige Biomasse (z. B. Holz, Stroh) als Rohstoff im Vordergrund stand. Die Biomasse wird zunächst im Zuge einer thermochemischen Vergasung in ein Synthesegas verwandelt. Das geschieht in

einem Reaktor mithilfe von Wärme, Druck und Reaktionsmitteln (z. B. Methan oder Kohlenmonoxid und Wasserstoff) unter Ausschluss von Sauerstoff. Das entstehende Synthesegas wird danach von schädlichen Gasen (z. B. Schwefel- und Stickstoffverbindungen) gereinigt und der Wasserstoffanteil erhöht. Die anschließende Kraftstoffsynthese verarbeitet das Gas zu langkettigen flüssigen Kohlenwasserstoffen. Je nach Art der Synthese und Zusammensetzung des Rohproduktgemisches erfolgt die Kraftstoffaufbereitung über die konventionellen Verfahren Hydrocracking bzw. Destillation und Rektifikation.

Für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe kann theoretisch die ganze Alge verwertet werden. Ein hoher Anteil an Stickstoff, Sauerstoff oder Schwefel kann den Syntheseprozess jedoch beeinflussen bzw. die Qualität des Kraftstoffes senken. Für die meisten Vergasungsprozesse ist derzeit ein trockener Einsatzstoff notwendig, was bei Algenbiomasse einen entsprechenden Aufwand für Ernte und Trocknung erfordert. Im Regelfall fallen bei der Kraftstoffsynthese mehrere Produkte an, z. B. Biodiesel als Hauptprodukt sowie Naphtha und Abwärme.

Auf Basis von Kohle und Erdgas sind diese Verfahren bereits im kommerziellen Einsatz. Für Biomasse (d. h. Lignocellulose) bestehen Pilotanlagen, bei denen sowohl die Vorbehandlung als auch die Vergasung noch technische Herausforderungen darstellen. Die Produktion von BtL-Kraftstoffen ist daher insgesamt noch im Demonstrationsstadium. Erste Versuche mit der Vergasung von Algenbiomasse (z. B. durch Solena, USA) wurden nicht weiterverfolgt. In Deutschland beschäftigen sich folgende Akteure mit BtL-Technologie: Air Liquid, Chemieanlagenbau Chemnitz, Karlsruher Institut für Technologie, thyssenkrupp; wobei keiner von ihnen die Verarbeitung von Algenbiomasse über den vergasungsbasierten Syntheseweg explizit vorantreibt.

Für BtL-Diesel aus Lignocellulosebiomasse zeigen Untersuchungen Gesteungskosten in einer Bandbreite von ca. 16,70 bis 56,40 Euro/GJ (Kröger et al. 2016, S. 55); dabei entfallen im Gegensatz zu anderen Verfahren nur etwa 30 % auf die Rohstoffkosten. Für Algen-BtL sind keine Veröffentlichungen bekannt, allerdings dürften hier die Rohstoffkosten, insbesondere durch die notwendige Trocknung der Ausgangsbiomasse erheblich höher sein (Kap. 4.2).

4.1.6 Verflüssigtes Biogas

Die Produktion von Biomethan erfolgt in zwei Verfahrensschritten. Der erste Schritt besteht in der Erzeugung von Biogas. Dazu wird in einer Biogasanlage die Biomasse mittels anaerober Prozesse hauptsächlich zu Methan, Kohlenstoffdioxid und Wasser abgebaut. Neben nachwachsenden Rohstoffen können auch Abwässer oder organische Rückstände genutzt werden. Der anaerobe Abbau selbst kann wiederum in drei Teilschritte gegliedert werden, für die jeweils andere Bakteriengruppen verantwortlich sind. Das Rohbiogas entsteht im letzten Schritt. Es enthält zwar noch einen hohen Anteil an CO₂, kann aber schon zur Energieerzeugung, z. B. in Blockheizkraftwerken, verwendet werden.

Die Aufbereitung zu gasförmigem Kraftstoff geschieht in einer zweiten Phase. Zuerst wird der Schwefelanteil aus dem Rohbiogas entfernt. Dann wird das Kohlendioxid ausgewaschen und Biomethan (CH₄) bleibt mit einer Konzentration von über 99 % zurück. Für eine Anwendung im herkömmlichen Lkw-Verkehr ist eine Verflüssigung zu Bio-LNG anzuschließen. Dies kann auch in Kombination mit der Gasaufbereitung erfolgen.

Der Biogasprozess stellt nur geringe Anforderungen an die eingesetzte Biomasse. Daher können Algen aus allen Produktionsverfahren verwendet werden. Eine Alternative zur Vergärung der gesamten Biomasse ist die Nutzung der Reststoffe aus der Lipidextraktion (Ehimen et al. 2009 u. 2011). Aufgrund des hohen Stickstoffgehaltes weisen Mikroalgen jedoch nicht das für die Biogaserzeugung optimale Verhältnis von Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor auf. Der in den Gärprozessen hauptsächlich zu Ammonium und Ammoniak umgesetzte Stickstoff kann die Biogasbildung hemmen (Kaltschmitt et al. 2009; Yen/Brune 2007).

Besonders in der Schifffahrt nimmt die Nutzung von verflüssigtem Erdgas als Kraftstoff zu (Reuß 2011). In den Niederlanden wird der Einsatz von Bio-LNG für Lkw bereits erfolgreich praktiziert. Gleiches gilt für die Bereitstellung von Bio-LNG in Schweden und Norwegen (Kröger et al. 2016, S. 58).

Für die Gesteungskosten relevant ist die Tatsache, dass die Vergärung von Biomasse aus landbasierten Pflanzen in Biogasanlagen bereits industriell genutzt wird und technisch verhältnismäßig ausgereift ist. Aufgrund des hohen Stickstoffgehalts von Algen ist eine Vergärung gemeinsam mit anderen Substraten vorteilhaft. Damit können typische Biogasanlagen für die Produktion von Biomethan aus Algen herangezogen werden. Zukünftige Kostenreduktionen sind daher vor allem über geringere Kosten für die gewählten Einsatzstoffe möglich. Entsprechend sollten hier eingesetzte Algen durch die Nutzung z. B. in einer Abwasserreinigung bereits einen Mehrwert erzielt haben. Dies ist der Ansatz von Maga (2016) – hier werden die Kosten einer algenbasierten Abwasserbehandlung mit anschließender Nutzung der Algenbiomasse zur Erzeugung von Biomethan abgeschätzt. Maga (2016) geht von möglichen Erlösen von 1,61 Euro/kg bzw. 32,20 Euro/GJ Biomethan aus. Bei

der Abschätzung dieser Größenordnungen wurden als weitere Wertschöpfungskomponenten die Wasseraufbereitung und die Nutzung des Gärrestes als Dünger berücksichtigt, um mit dem Verkauf dieser Leistungen und Produkte zu handelsüblichen Preisen zu einer Kostendeckung des Gesamtprozesses zu kommen.

4.2 Produktionskosten algenbasierter Kraftstoffe

Derzeit existieren für die Kraftstoffherstellung aus Algen keine kommerziell produzierenden Anlagen. Produktionssysteme von Algenbiomasse und -kraftstoffen werden in nationalen, europäischen und internationalen Forschungsprojekten untersucht und entwickelt. Die Produktionskosten von Algenkraftstoffen lassen sich vor dem Hintergrund der vielen offenen Fragen nur grob abschätzen. Vergleiche zwischen verschiedenen Systemen bzw. Prozessketten sind aufgrund der Diversität der Eingangsdaten und zugrundeliegenden Annahmen vorliegender Studien nur schwer zu erstellen. Gerade die Verknüpfung von noch nicht praxisreifen Prozessschritten (Algenselektion und -kultivierung, Ernte, Extraktion der Inhaltsstoffe, Kraftstoffherzeugung) kann zu Ergebnissen führen, die weder verlässlich reproduzierbar sind noch auf Anlagen größeren Maßstabs übertragen werden können. Die Gefahr ist groß, dass eine Fehleinschätzung in nur einem der Prozessschritte (z. B. nicht korrekt betrachteter Lipidgehalt oder das Wachstum einer Alge) sich in der nachfolgenden Prozesskette zu irreführenden Gesamtergebnissen kumuliert (Kröger et al. 2016, S. 11).

In Tabelle 4.1 finden sich die Ergebnisse vorliegender Studien, in denen die Produktionskosten verschiedener algenbasierter Kraftstoffe geschätzt wurden. Dabei wird zum einen deutlich, dass sich die Gestehungskosten von algenbasierten Kraftstoffen je nach Konversionsverfahren unterscheiden, dass aber auch innerhalb des gleichen Konversionsverfahrens große Bandbreiten auftreten können. Die ermittelten Kosten reichen von rund 20 Euro/GJ bis zu 265 Euro/GJ. Wie sehr die Produktionsverfahren der Algenbiomasse in die Kostenstrukturen hineinspielen, macht das Beispiel des FAME-Diesels klar (Salecker 2009), wo sich auf die Kraftstoffkosten je nach Art des Systems zwischen rund 65 und 265 Euro/GJ bewegen.

Tab. 4.1 Geschätzte Produktionskosten von Algenkraftstoffen

Kraftstoffart	Gestehungskosten in Euro/GJ (2015)*	Quelle
FAME	26,18–75,85	Sun et al. 2011
	64,30–265,50	Salecker 2009
HVO/HEFA	17,90–59,80	Endres et al. 2012
	67,30–76,70	Davis et al. 2012
	172,50	Klein-Marcuschamer et al. 2013
Algen-BtL	k. A.	
Algen-HTL	29,32	Jones et al. 2014
	67,50	Delrue et al. 2013
Bio-LNG	32,20	Maga 2016

* Gestehungskosten für alle Verfahren jeweils normalisiert auf Euro im Basisjahr 2015 mit Wechselkursen und Inflation aus Eurostat (2015).

Quelle: erweitert auf Basis von Kröger et al. 2016, S. 50 ff.

Zum Vergleich: Die Gestehungskosten von 1 GJ Energie aus fossilem Diesel liegen derzeit bei knapp 11,70 Euro und damit mindestens um den Faktor 2 geringer als optimistische Annahmen für algenbasierte Kraftstoffe. Die Analysen aus den vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass beim gegenwärtigen Stand der Technik die Herstellung von Algenkraftstoffen wirtschaftlich unrentabel ist und erhebliche Kostensenkungen in der Erzeugung der Algenbiomasse und der Extraktion der kraftstoffrelevanten Algeninhaltsstoffe nötig sind,

um einer wirtschaftlichen Rentabilität näher zu kommen (Lundquist et al. 2010; Resurreccion et al. 2012; Richardson et al. 2014; Slade/Bauen 2013; Sun et al. 2011).

Die verfügbaren Studien zeigen zudem, dass die wesentlichen Kostentreiber auf Seiten der Algenproduktion liegen. Die Kostenstruktur von Algenkraftstoffen ist unabhängig vom Verfahren grundsätzlich mit denen anderer Biokraftstoffe vergleichbar. Obwohl auch für die Kraftstoffproduktionsanlage ein hohes Anfangsinvestment notwendig ist, machen die Kosten für den Einsatzstoff, also die Inputbiomasse, mit 70 bis 90 % den größten Anteil an den Herstellungskosten aus (Kröger et al. 2016, S. 63). Die aktuellen Preise für Öl aus Algenbiomasse (Kap. 3.5) lassen derzeit eine wirtschaftliche Herstellung von Kraftstoffen nicht zu. Die zentrale Herausforderung liegt damit in der Senkung der Produktionskosten für die Algenbiomasse. Neben Kosten für die Produktion bzw. den Bau von Algenproduktionssystemen sind Kosten für Prozessenergie (vor allem elektrische Energie) sowie die Nährstoffversorgung die wesentlichen Kostenparameter. Die Frage zukünftiger Kostensenkungspotenziale in der Algenproduktion wird daher entscheidend von der Entwicklung der Kosten für diese Parameter abhängen (Kröger et al. 2016, S. 63).

4.3 Erzeugbare Algenkraftstoffmengen

Wie zuvor erwähnt, gibt es derzeit keine wirtschaftlich arbeitende Anlage zur Kraftstofferzeugung aus Algenbiomasse. Limitierender Faktor ist dabei in erster Linie die fehlende ökonomische Rentabilität, um entsprechende Kapazitäten zur Kultivierung von Algen in einem für die Kraftstoffherstellung angemessenen Maßstab aufzubauen. Hingegen ist die grundsätzliche technische Machbarkeit der Algenkraftstofferzeugung geklärt und die Etablierung der Infrastruktur für die Kraftstoffherstellung selbst eher eine nachgelagerte Herausforderung.

Die Produktion von Algen für die Kraftstoffherstellung bedeutet die Etablierung eines neuen Nutzungspfades mit deutlich höheren Anforderungen an Produktionsmengen als aktuelle stoffliche Nutzungspfade. Für eine zeitliche Prognose der Produktionsmengen von Algenbiomasse für die Kraftstofferzeugung ist daher die Frage entscheidend, wie sich die Märkte für Produkte aus Mikroalgen insgesamt entwickeln.

In den letzten Jahrzehnten wurden Algen hauptsächlich für hochpreisige Produkte, z. B. Kosmetika oder Nahrungsergänzung produziert. In jüngerer Vergangenheit gibt es nun den Trend, Algen auch für die Herstellung von Biochemikalien, Futtermittel bzw. als Futtermittelergänzung einzusetzen (Enzing et al. 2014). Der neue Markt für Futtermittel, der unter anderem durch die Schaffung von gesetzlichen Rahmenbedingungen und die Aufnahme in die Positivliste der EU Normenkommission für Einzelfuttermittel geschaffen wurde (Lognone 2003), kann als nächster Schritt zur Etablierung von größeren Algenproduktionskapazitäten interpretiert werden (Kröger et al. 2016, S. 62 f.).

Große Hoffnung auf eine weitere Steigerung der ökonomischen Attraktivität der Algenbiomasseerzeugung wird in die Verwirklichung eines Bioraffinerieansatzes gesetzt (Laurens et al. 2017; Roux 2017; Trivedi et al. 2015; Yen et al. 2013). Hierbei ist die Idee, gleichzeitig möglichst viele Inhaltsstoffe der Algen zur Erzeugung verschiedener Rohstoffe und Produkte zu nutzen. Solche Raffinerien sollen beispielsweise hochpreisig vermarktbar Nahrungsergänzungsmittel erzeugen (z. B. Omega-3-Fettsäuren) und verbleibende Inhaltsstoffe zu anderen, teilweise weniger hochpreisig vermarktbar Produkten weiterverarbeiten (z. B. Futtermittel oder auch Biodiesel) (Subhadra 2010). Dies, so die Hoffnung, wird einerseits die Nachfrage nach Algenbiomasse als nachwachsendem Rohstoff erhöhen und damit andererseits zu einer Kostensenkung bei der Erzeugung der Algenbiomasse und der gewünschten Inhaltsstoffe beitragen. Die meisten Typen von Bioraffinerien befinden sich gegenwärtig noch in der Entwicklungs- und Erprobungsphase, eine seriöse Prognose über den Zeitpfad einer industriellen Umsetzung kann daher nicht gegeben werden (TAB 2016).

Studien zur theoretisch erzeugbaren Biomasse aus Mikroalgen, schätzen alleine innerhalb der EU-27-Staaten mit gut 40 Mio. t pro Jahr ein durchaus beachtliches Potenzial ab (Skarka 2015) (Kap. 3.4). Wesentliches Hindernis zur Erschließung dieser Potenziale ist jedoch die Produktion von Algen zu wettbewerbsfähigen Kosten (Kap. 3.5). Realistisch kann nicht davon ausgegangen werden, dass in absehbarer Zeit Algenreaktoren finanziert und aufgebaut werden, durch die mehrere 10.000 t Kraftstoff pro Jahr produziert werden (Kröger et al. 2016, S. 45). Der Aufbau entsprechender Kapazitäten ist aus betriebswirtschaftlicher Sicht für die Marktakteure nicht attraktiv. Ein erster kleinskaliger Einstieg in die Produktion algenbasierter Kraftstoffe könnte über bestehende Anlagen zur Biodieselproduktion (insbesondere über die sogenannten Multi-Feedstock-Anlagen) oder zur HVO/HEFA-Produktion erfolgen. Entsprechende Anlagenkapazitäten sind in begrenztem Umfang in Deutschland bzw. Europa vorhanden (Kröger et al. 2016, S. 46).

5 Nachhaltigkeitsaspekte algenbasierter Kraftstoffe

Im Hinblick auf die Zielstellung einer postfossilen Energieversorgung des Verkehrs spielen nachwachsende Rohstoffe für die Erzeugung von Biokraftstoffen eine wichtige Rolle (Kap. 2.3). Kraftstoffe aus Algen werden hierbei als eine mögliche Zukunftsoption genannt: Sie basieren auf nachwachsender Biomasse und können damit grundsätzlich die negativen Klimawirkungen von Kraftstoffen auf Basis fossiler Energieträger vermeiden. Gleichzeitig, so die Hoffnung, entfallen potenziell viele der negativen Nachhaltigkeitswirkungen aus dem Anbau konventioneller Energiepflanzen, mit denen ebenfalls Substitute für fossile Kraftstoffe erzeugt werden können. Dieses Kapitel legt den Wissenstand bezüglich der Nachhaltigkeitswirkungen einer Substitution fossiler Rohstoffe oder landbasierter Biomasse durch Algenbiomasse für die Kraftstoffproduktion dar. Dabei wird auf den Flächenbedarf (Kap. 5.1), die Energiebilanz (Kap. 5.2), die eng damit verbundene THG-Bilanz (Kap. 5.3) sowie den Wasserverbrauch und die Auswirkung auf die Wasserqualität eingegangen (Kap. 5.4).

In der Literatur finden sich zahlreiche Ökobilanzen zu Biokraftstoffen. Insbesondere algenbasierte Kraftstoffe sind häufig Gegenstand der Untersuchung (z. B. Collet et al. 2014; Gnansounou/Raman 2016; Kendall/Yuan 2013; Kröger et al. 2013; Lardon et al. 2009; Quinn et al. 2014; Rocca et al. 2015; Sander/Murthy 2010; Zhu et al. 2013). Dabei zeigt sich eine große Bandbreite für die Ergebnisse einzelner Umweltwirkungskategorien wie THG-Emissionen, Primärenergieverbrauch etc. für die verschiedenen Technologiepfade. Wesentliche Gründe für die Größe der Ergebnisbandbreiten liegen neben methodischen Unterschieden für die Bewertung (z. B. unterschiedliche Systemgrenzen, unterschiedliche Untersuchungsfragen) vor allem in der Art der verwendeten Datensätze. Da Erfahrungswerte aus einer langjährigen kommerziellen Algenproduktion für die energetische Nutzung nicht vorliegen, basieren vorliegende Ökobilanzen zumeist auf Forschungsergebnissen aus jeweils eigenen Studiendesigns und Fragestellungen. Zusätzlich ist zu beachten, dass Kraftstoffe aus Algen grundsätzlich auf Basis sehr unterschiedlicher Prozesse zu Kraftstoffen umgewandelt werden können. Dabei sind nicht alle Algen (und somit alle Algenproduktionssysteme) für alle Kraftstofftechnologien geeignet. Sämtliche Einschätzungen und Schlussfolgerungen stehen dabei unter der Einschränkung, dass die Angaben zur Produktion algenbasierter Kraftstoffe aufgrund des noch frühen Technologiestadiums mit hohen Unsicherheiten verbunden sind.

5.1 Flächenbedarf für die Biomasseerzeugung

Eine wesentliche Herausforderung für eine Produktion von Biokraftstoffen ergibt sich aus dem Flächenbedarf. Insbesondere landbasierte Pflanzenbiomasse (Biokraftstoffe der 1. Generation) gerät aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit geeigneter landwirtschaftlicher Flächen in Konflikt mit anderen gesellschaftlichen Zielstellungen (Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion, Naturschutz, Gewässerschutz etc.). Die durch die Nachfrage nach Biomasse für die Energiegewinnung und Kraftstoffherzeugung induzierten Landnutzungsänderungen sind Gegenstand intensiver wissenschaftlicher Diskussionen um die Nachhaltigkeit nachwachsender Rohstoffe (Carneiro et al. 2017; Correa et al. 2017; Fritsche et al. 2010).

Direkte Landnutzungsänderungen bezeichnen dabei die Umnutzungen von landwirtschaftlichen Flächen für den Anbau von Rohstoffen für die Biokraftstoffproduktion (z. B. verstärkter Weizenanbau zur Ethanolgewinnung auf Kosten des Anbaus anderer Feldfrüchte oder Umbruch von Dauergrünland). Da diese Umnutzungen mit deutlichen Änderungen des Kohlenstoffbestandes der jeweiligen Fläche verbunden sein können, haben diese direkten Landnutzungsänderungen potenziell auch Einfluss auf die THG-Bilanz des aus der angebauten Biomasse gewonnenen Kraftstoffes (Naturkapital Deutschland 2014, Kap. 5.3) und auf Stoffeinträge in Gewässer (Kap. 5.4).

Indirekte Landnutzungsänderungen werden ausgelöst, wenn die Nachfrage nach Biomasse nicht durch Intensivierung und Ertragssteigerung auf den vorhandenen Landwirtschaftsflächen gedeckt werden kann, sondern neue Anbauflächen erschlossen werden. Im Idealfall werden dabei Brachen (Marginalstandorte, Brachland, degradierte Flächen etc.) in Nutzung genommen, die für eine anderweitige Nutzung (z. B. zur Nahrungsmittelproduktion, aber auch für den Naturschutz oder als Siedlungsfläche) bislang nicht infrage kamen. Es ist allerdings zu befürchten, dass auch naturnähere Flächen in Anspruch genommen werden, z. B. durch Rodung von Wäldern

oder Entwässerung von Mooren. Dies kann zu erheblichen Folgewirkungen für THG-Emissionen²², Auswirkungen auf die Gewässerqualität oder zu Konflikten mit dem Naturschutz führen (Kap. 5.3 u. 5.4).

Vor diesem Hintergrund haben die Europäische Union und die Bundesregierung Nachhaltigkeitsanforderungen an die Produktion von Biomasse formuliert. Biokraftstoffe können nur dann zur Erreichung der Klimaschutzpolitischen Ziele im Verkehrssektor angerechnet werden, wenn zur Erzeugung der Biomasse keine Flächen mit hohem Kohlenstoffgehalt (z. B. Torfmoore) oder mit hoher biologischer Vielfalt genutzt werden. Gleichzeitig wurde der Anteil von Biokraftstoffen aus Getreide und sonstigen Kulturpflanzen mit hohem Stärkegehalt, Zuckerpflanzen, Ölpflanzen und aus als Hauptkulturen vorrangig für die Energiegewinnung auf landwirtschaftlichen Flächen angebaute Pflanzen auf 7 % begrenzt (Kap. 2.3).

Die Produktion von Algen kann auf Flächen erfolgen, die für die Landwirtschaft nicht geeignet sind (Kröger et al. 2016, S. 45). Weder in offenen noch in geschlossenen Systemen ist die Produktion von der Bodenqualität abhängig. Wird die Kultivierung der Algen zudem auf degradierte Standorte (z. B. Brachen oder Konversionsflächen) begrenzt, würden auch geringere Auswirkungen auf die biologische Vielfalt entstehen, als bei pflanzenbasierter Biomasseproduktion (Wiens et al. 2011). Es wird daher angenommen, dass die Produktion von Algen kaum indirekte Landnutzungsänderung, also die Verdrängung landwirtschaftlicher Flächennutzung auf bislang naturnahen Standorten, auslöst (Fritsche et al. 2010).

Zudem kann bei der Algenproduktion eine höhere Flächenproduktivität erreicht werden, als bei pflanzenbasierter Biomasseerzeugung. In verschiedenen Studien werden der Flächenbedarf für Biokraftstoffe der 1. Generation (z. B. aus Palmöl) und algenbasierte Biokraftstoffe verglichen. Es zeigt sich, dass die Produktivität der Algen um den Faktor 7 bis 30 höher liegen kann (Correa et al. 2017; Demirbas/Fatih Demirbas 2011) (Kap. 3.4). Die begrenzte Produktivität pflanzenbasierter Biomasse stellt eine Grenze für die Substitution fossiler Kraftstoffe durch Biokraftstoffe (aber auch für die stoffliche Verwendung im Rahmen der Bioökonomie) dar²³. Durch die Verwendung von Algen als Grundlage von Biokraftstoffen würde insgesamt weniger Fläche für die Produktion der gleichen Energiemenge benötigt (Clarens et al. 2010; Miller 2010). Die Produktivität ist jedoch von Faktoren wie Sonneneinstrahlung, Nährstoffzufuhr, Temperatur oder Flächenneigung abhängig (Skarka 2015). Dies macht die Algenproduktion insbesondere in Regionen, in denen beste Wachstumsbedingungen für Algen herrschen, zu einer attraktiven Strategie für die Erzeugung nachwachsender Energiequellen (Correa et al. 2017). Unter den klimatischen Bedingungen in Deutschland ist die Produktivität hingegen geringer und das Potenzial zur Algenkultivierung auf wenige geeignete Standorte begrenzt (Skarka 2015) (Kap. 3.4). In abgelegenen Regionen und auf landwirtschaftlich unproduktiven Böden stellt zudem die Versorgung mit Faktoren wie Wasser, Energie, Kohlendioxid eine Herausforderung dar. Damit sind in der Regel auch Kosten verbunden, die sich auf die Produktionskosten der Algenbiomasse auswirken (Kap. 3.5).

Somit kann geschlussfolgert werden, dass die höhere Produktivität bei der Erzeugung der Algenbiomasse und die Möglichkeit, auch Flächen zu nutzen, die nicht für die landwirtschaftliche Produktion geeignet sind, den Flächenbedarf für die Erzeugung von Biokraftstoffen reduzieren würde. Für Deutschland könnten algenbasierte Kraftstoffe von heimischen Standorten jedoch nur einen geringen Anteil am Energiebedarf des Verkehrs abdecken.

5.2 Energieeinsatz und -verbrauch

Für Nachhaltigkeitserwägungen von algenbasierten Biokraftstoffen muss der Energieeinsatz für die Algenproduktion betrachtet werden. In vielen wissenschaftlichen Studien wird sich mit der Abschätzung der Nettoenergiebilanz, d. h. dem Verhältnis aus Energiemenge des Algenkraftstoffs im Verhältnis zur während der Algenproduktion und Kraftstoffherstellung eingesetzten Energie, beschäftigt. In letzter Zeit sind zudem einige Metaanalysen erschienen, die eine Harmonisierung der in den Einzelanalysen getroffenen Annahmen vornehmen, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen (z. B. Ketzer et al. 2018; Quinn et al. 2014; Slade/Bauen 2013; Sills et al. 2013; Handler et al. 2012).

22 Die Berücksichtigung von THG-Emissionen aus direkten Landnutzungsänderungen auf der Basis von IPCC-Inventartabellen ist im Rahmen der Ökobilanzierungen (Lebenszyklusanalysen) bzw. der THG-Bilanzierung mittlerweile etabliert. Dagegen stellen indirekte Landnutzungsänderungen und die mit ihnen verknüpften THG-Emissionen aufgrund der komplexen globalen Zusammenhänge immer noch ein methodisches Problem für die Berechnung der THG-Bilanz eines Biokraftstoffes dar.

23 So errechnet Chisti (2007) für die USA, dass mehr als 60 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche für den Anbau von Energiepflanzen benötigt würde, um den Biodieselbedarf zu decken.

Insgesamt zeigt sich in der überwiegenden Mehrheit der vorliegenden Studien, dass Algen unter den gegenwärtigen plausiblen Annahmen hinsichtlich Produktivität, Lipidkonzentration und Aufwand zur Extraktion der Lipide zur Gewinnung der Ausgangsrohstoffe der Kraftstofferzeugung eine negative Nettoenergiebilanz aufweisen (Tab. 5.1, alle Studien mit einer Nettoenergiebilanz kleiner 1). Demnach wird für die Erzeugung der Algenlipide mehr Energie benötigt, als letztlich in den aufbereiteten Lipiden enthalten ist, die zu Kraftstoffen weiterverarbeitet werden können. Aus der Übersicht werden aber auch die teilweise erheblichen Unterschiede in den Studienergebnissen deutlich, die ihren explorativen Charakter und das frühe Technologiestadium des Anbaus von Algen für die Kraftstofferzeugung unterstreichen. So finden sich in einigen Untersuchungen positive Nettoenergiebilanzen, die in der Wahl besonderer Annahmen im Prozess der Algenlipiderzeugung begründet liegen (Ketzer et al. 2018). Campbell et al. (2011) nehmen vergleichsweise hohe Algenwachstumsraten an und senken die aufzuwendende Energie für den Ernteprozess der Algen durch die Verwendung chemischer Flockungsmittel, die allerdings erhebliche Schadstoffwirkung haben. Liu/Ma (2009) setzen voraus, dass ein Großteil der Energie für die Trocknung der Algen durch Sonneneinstrahlung gewonnen wird.

Frank et al. (2013) nehmen an, dass bei der Kraftstofferzeugung durch eine hydrothermale Verflüssigung der Algenbiomasse energiereiche gasförmige Nebenprodukte entstehen, die energetisch genutzt werden können. Dadurch kann die für Algenwachstum und Ernte eingesetzte Energie reduziert werden.

Tab. 5.1 Nettoenergiebilanz der Erzeugung von Algenlipiden für die Kraftstoffherstellung

Energie- ertrag in MJ/kg TM	Energieeinsatz in MJ/kg TM				Netto- energie- bilanz (Ertrag/ Einsatz)	Quelle
	Kulti- vierung	Ernte	Extrak- tion	gesamt		
<i>Produktionssystem offen</i>						
16,43	2,27	0,005	2,62	4,90	3,35	Campbell et al. 2011
21,90	17,27	12,17	5,12	32,06	0,68	Clarens et al. 2010
9,37	4,54	0,38	5,12	10,04	0,93	Collet et al. 2011
9,01	9,93	0,94	1,79	12,66	0,71	Khoo et al. 2011
14,75	5,41		24,08	29,49	0,50	Lardon et al. 2009
6,70	10,37		23,89	34,27	0,20	
9,24	0,83	1,15	2,60	4,59	2,01	Liu/Ma 2009
9,62	54,04	142,8	49,85	246,7	0,04	Razon/Tan 2011
11,91	0,18	34,78	29,26	64,22	0,19	Sander/Murthy 2011
14,73	20,93	2,47	4,18	27,57	0,53	Stephenson et al. 2010
12,00	5,76		41,13	46,89	0,26	Yanfen et al. 2012
4,51	7,92	0,45	44,28	52,65	0,09	Resurrecion et al. 2012
5,90	8,56	0,20	32,24	41,01	0,14	
8,95	2,18	0,15	0,08	2,41	3,72	Frank et al. 2013
14,32	6,77	1,92	10,38	19,07	0,75	Bennion et al. 2015

Energie- ertrag in MJ/kg TM	Energieeinsatz in MJ/kg TM				Netto- energie- bilanz (Ertrag/ Einsatz)	Quelle
	Kulti- vierung	Ernte	Extrak- tion	gesamt		
<i>Produktionssystem geschlossen</i>						
8,78	829,93	6,21	2,62	838,86	0,01	Sevigné Itoiz et al 2012
8,78	94,94	8,00	2,62	105,6	0,09	
11,55	9,01	7,24	1,78	18,02	0,64	Jorquera et al. 2010
22,20	25,18	2,27	2,62	30,07	0,74	Tredici et al. 2015
9,02	7,44	0,32	31,72	39,48	0,23	Resurrecion et al. 2012
11,10	7,84	0,19	20,29	28,33	0,39	

Quelle: Ketzer et al. 2018

Vergleicht man die verschiedenen Produktionssysteme, so schneiden die offenen Anlagen besser ab als die geschlossenen Systeme (Ketzer et al. 2018; Resurreccion et al. 2012). In geschlossenen Systemen muss das Algenmedium beständig durch die Behältnisse gepumpt und gekühlt werden, damit die örtlich und jahreszeitlich spezifische Sonneneinstrahlung für das Algenwachstum optimal genutzt werden kann. Damit sind oft höhere Erträge möglich, die aber durch den Mehraufwand an Energie überkompensiert werden (Stephenson et al. 2010; Schmidt et al. 2016a, S. 25). So wurde bei einem aktuellen Demonstrationsvorhaben (AUFWIND) alleine für die Algenkultivierung ein Stromverbrauch von 2.920 bis 37.220 MJ/kg Algenöl verzeichnet, der umgerechnet den Energieinhalt des gewonnenen Algenöls um etwa das 80- bis 1.000-Fache übertrifft (Behrendt 2018, S. B-64). Zudem ist die Errichtung der geschlossenen Systeme deutlich energieintensiver als die Anlage offener Teiche (Resurreccion et al. 2012).

Mit Blick auf den Energieverbrauch unterschiedlicher Produktionsschritte zeift sich, dass neben der Kultivierung auch die Extraktion der Algenlipide wesentlich zur negativen Nettoenergiebilanz beiträgt. So finden Khoo et al. (2011) in ihrer Untersuchung, dass etwa 13 % der insgesamt benötigten Energie für die Produktion der Algenbiomasse aufgewendet werden, etwa 85 % für die Lipidextraktion und nur 2 % für die Weiterverarbeitung zu Biodiesel. Dementsprechend sind die Entwicklung energiesparender Extraktionsverfahren oder Kraftstoffherzeugungsverfahren, die die ganze Alge nutzen können, wichtige Ansätze, um die Energiebilanz algenbasierter Kraftstoffe zu verbessern (Handler et al. 2014; Liu et al. 2013; López Barreiro et al. 2013; Naraharisetti et al. 2017; Roux et al. 2017).

Im Vergleich mit anderen Biokraftstoffen stellt sich deren Nettoenergiebilanz positiv dar: für Bioethanol (durchschnittliche Nettoenergiebilanz von 5, d. h., der Energiegehalt des Kraftstoffs ist 5-mal höher als die zur Herstellung aufgewendete Energie) etwas höher als für konventionellen, also nicht algenbasierten Biodiesel (durchschnittliche Nettoenergiebilanz von 2) (Hall et al. 2014).

Vor dem Hintergrund der hier zusammengetragenen Erkenntnisse kann geschlossen werden, dass die Produktion von Kraftstoff aus Algen unter den derzeit als plausibel angenommenen Rahmenbedingungen aus energetischer Sicht nicht sinnvoll ist. Für die Erzeugung der Ausgangsstoffe für die Kraftstoffherstellung muss mehr Energie investiert werden, als letztlich gewonnen wird. Anknüpfungspunkte für die Verbesserung der Energiebilanz sind identifiziert und entsprechende Forschungen laufen. Eine seriöse Einschätzung ob und wann algenbasierte Kraftstoffe eine günstige Energiebilanz erreichen werden, ist derzeit aber nicht möglich.

5.3 THG-Emissionen und Klimarelevanz

Grundsätzlich zeichnen sich Biokraftstoffe durch eine deutlich bessere THG-Bilanz aus, als fossile Kraftstoffe, da nachwachsende Rohstoffe (Anbau- oder Algenbiomasse) für die Kraftstoffherstellung eingesetzt werden. Dennoch sind auch Biokraftstoffe nicht vollständig THG-neutral. So verursachen beispielsweise die Produktion (Vorkette, Herstellung) und Nutzung (Lachgasemissionen durch die biochemische Umwandlung von N-Düngemittel zu N_2O) von Stickstoffdüngemitteln sowie die Nutzung von fossilen Kraftstoffen für landwirtschaftliche Produktionsprozesse (Majer et al. 2009; O'Keeffe et al. 2016) THG-Emissionen.

Zwar entfallen aufgrund der Produktionsweise in aquatischen Systemen die üblicherweise in der Landwirtschaft relevanten N_2O -Emissionen, jedoch benötigen Algen genau wie alle anderen Organismen neben der Energie des Sonnenlichts und einer Kohlenstoffquelle auch Wasser und Nährstoffe in einem für das Wachstum möglichst optimalen Verhältnis (Kap. 3.2.1). Die mit der Bereitstellung dieser Stoffe verbundenen THG-Emissionen sind daher neben den zuvor beschriebenen Energiebedarfen zur Erzeugung der Algenbiomasse relevant, wenn die THG-Bilanz algenbasierter Kraftstoffe ermittelt wird.

Zur Betrachtung der Kohlenstoffquelle der Algenzucht soll an die in Kapitel 3.2 dargestellte Unterscheidung in photo- und heterotrophe Kultivierung hingewiesen werden. Phototrophe Algen werden zur Verbesserung der Wachstumsleistungen mit höher als in Luft konzentriertem CO_2 begast. Das benötigte CO_2 kann aus fossilen (d. h. Abgasen aus der Verbrennung z. B. von Kohle) oder regenerativen Quellen, z. B. der Biogasherstellung, stammen. Für die Klimabilanz des Algenkraftstoffes ist dies allerdings irrelevant, da mit der Bereitstellung des Kohlenstoffs für die Algenzucht in der Regel keine zusätzlichen CO_2 -Emissionen verbunden sind. Für die Gesamtklimawirkung (also unter Einbezug der verkehrsbezogenen Emissionen und der Emissionen aus der Energiegewinnung aus Kohle oder Biogas) gilt dies natürlich nicht, da die zwischenzeitlich im Algenkraftstoff gebundenen Emissionen aus der Kohleverbrennung letztlich doch in die Atmosphäre gelangen.

Heterotrophe Algen beziehen den für das Wachstum notwendigen Kohlenstoff aus organischem Material, z. B. Zucker aus Zuckerrüben oder Zuckerrohr. Mit der Bereitstellung von Zucker als Kohlenstoffquelle sind (landwirtschaftliche) THG-Emissionen verbunden. Zusätzlich entsteht ein Flächenbedarf für den Anbau, der zu Lasten der Flächenproduktivität der Algenproduktion geht.

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor für die THG-Bilanz von Algenkraftstoffen sind die mit der Herstellung der benötigten Nährstoffe verbundenen Emissionen. Insbesondere der Stickstoffbedarf von Algen ist deutlich höher als bei pflanzenbasierter Biomasse für die Kraftstoffherstellung, z. B. Raps (Clarens et al. 2010; Miller 2010) (Kap. 3.2.1). Je nach Quelle und Verwertung hat Stickstoff einen mehr oder weniger starken negativen Effekt auf die Klimabilanz der Algenproduktion (Majer/Oehmichen 2010).

Eine zunehmend diskutierte Option ist die Nutzung von Abwässern als Nährstoffquelle. Clarens et al. (2010) zeigen in ihrer Analyse, dass damit eine erhebliche Reduzierung der negativen Umweltwirkungen der Algenproduktion realisiert werden könnte. Da dabei die Kosten für die Algenkultivierung bereits durch die Erträge der Abwasserreinigung gedeckt werden, könnten solche Algenkultivierungssysteme auch eher kostendeckend arbeiten (Handler et al. 2014; Lowrey et al. 2015; Pittmann et al. 2012). Allerdings ist die Verwertung von Algenbiomasse für die Kraftstoffherzeugung nur Nebenprodukt und sowohl die geringen produzierbaren Mengen als auch die unstetige Qualität der Algenbiomasse sind für einen großskaligen Einsatz in der Kraftstoffproduktion unzureichend (Kröger et al. 2016, S. 35).

Neben der Untersuchung einzelner Einflussgrößen existieren auch Studien, die eine Gesamt-THG-Bilanz von Algenbiokraftstoffen abschätzen. Dabei sind die ermittelten Bandbreiten aufgrund zahlreicher Annahmen hinsichtlich der Produktionssysteme, Nährstoffquellen, des Energiebedarfs und der Quellen der Energieversorgung groß. Unterschiede resultieren dabei auch daraus, ob Nebenprodukte (z. B. Rückstände nach Pressung und Extrahierung der Algenlipide) zur energetischen Verwertung oder zur Substitution von Futter in der Tierhaltung Verwendung finden würden und dort THG-intensive Produkte substituieren könnten (Collet et al. 2014). In Einzelfällen werden daher sogar negative THG-Bilanzen ermittelt, d. h., die Herstellung von Algenkraftstoffen würde zu einer Nettoentlastung mit THG führen. In einer Metastudie von Collet et al. 2014 wurden 15 Lebenszyklusanalysen einbezogen und für eine bessere Vergleichbarkeit mit harmonisierten Annahmen nachkalkuliert (Tab. 5.2).

Wie sensitiv die Analysen in Bezug auf die Änderung bestimmter Annahmen sind, zeigt Tabelle 5.3, die aus Angaben der Studie von Stephenson et al. (2010) basiert.

Unter Annahme einer Produktivität von 100 t Algen-TM/ha/a mit einem verwertbaren Lipidgehalt von 40 % lässt sich algenbasierter Biodiesel mit einer THG-Bilanz von etwa 19,2 g CO_2 -Äq./MJ erzeugen. Würde der

Ertrag bei sonst gleichen Produktionsbedingungen nur etwa 10 t Lipide/ha/a, was für hiesige Verhältnisse realistisch erscheint (Kap. 3.4.1), stiegen die THG-Emissionen auf 81,3 g CO₂-Äq./MJ Algenkraftstoff. Dieser Betrag liegt nahe den THG-Emissionen von konventionellem Diesel. Für dessen Bereitstellung und Nutzung für Verbraucher in der EU wurden etwa 88,7 g CO₂-Äq./MJ Diesel errechnet (Edwards et al. 2014). Auch Davis et al. (2012) ermitteln für einen Algenanbau in den USA Werte von rund 64 bis 78 g CO₂-Äq./MJ Biodiesel, die ebenfalls nahe am Referenzwert für fossilen Diesel liegen.

Tab. 5.2 THG-Bilanz von Algenkraftstoffen

THG-Emissionen in g CO ₂ -Äq./MJ	Endprodukt	Quelle
0,1	Strom	Kadam 2002
59,9	Biodiesel	Lardon et al. 2009
18,5	Biodiesel	Baliga et al. 2010
-75,3	Biodiesel	Batan et al. 2010 (verschiedene Szenarien)
-1,3	Biodiesel	
56,8	Biomasse	Clarens et al. 2010
-18,0	Biodiesel	Sander/Murthy 2010
13,6	Biodiesel	Stephenson et al. 2010
534,0	Biodiesel	Brentner et al. 2011 (verschiedene Szenarien)
80,5	Biodiesel	
-0,7	Biodiesel	Campbell et al. 2011
48,7	Strom	Clarens et al. 2011
61,0	Methan	Collet et al. 2011
15,0	Biodiesel	Hou et al. 2011
310,0	Biodiesel	Khoo et al. 2011

Quelle: Collet et al. 2014

Tab. 5.3 Sensitivität der THG-Bilanz von Algenkraftstoffen

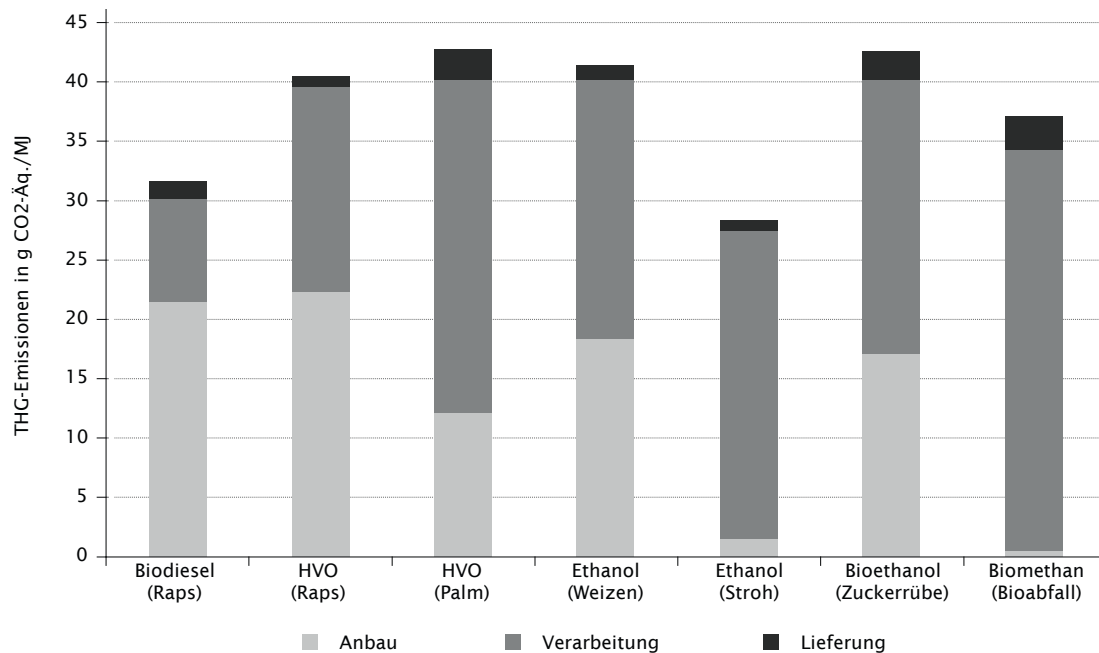
Kraftstoffart	Lipidertrag in t/ha/a	THG-Emissionen in g CO ₂ -Äq./MJ
Biodiesel (aus Algen)	40	19,2
	10	81,3
Diesel (fossil)		88,7

Eigene Zusammenstellung nach Daten von Stephenson et al. 2010

Zur weiteren Einordnung zeigt Abbildung 5.1 die THG-Emissionen verschiedener Biokraftstoffe aus pflanzenbasierter Biomasse. Biodiesel aus Raps sowie Ethanol aus Stroh kann demnach mit THG-Emissionen um 30 g CO₂-Äq./MJ hergestellt werden, andere gängige Biokraftstoffe verursachen THG-Emissionen von rund 40 g CO₂-Äq./MJ. Zumindest für die klimatischen Bedingungen in Deutschland sind weitere Fortschritte bei der Senkung der Energiebedarfe bei der Erzeugung von algenbasierten Biokraftstoffen nötig, um auf Augenhöhe

mit pflanzenbasierten Biokraftstoffen zu gelangen. In anderen Regionen ist dies bereits der Fall, doch auch dort zeigt sich, dass die deutlich höhere Produktivität der Algen nicht automatisch zu einer erheblich besseren THG-Bilanz führt (Slade/Bauen 2013; Handler et al. 2012; Liu et al. 2012).

Abb. 5.1 THG-Emissionen verschiedener Biokraftstoffe



Quelle: Naumann et al. 2016, S. 117

Aus den Ausführungen kann geschlussfolgert werden, dass Kraftstoffe aus Algen bei gegenwärtig plausiblen Annahmen zur technologischen Entwicklung absehbar kaum zur angestrebten THG-Minderung für den Verkehr beitragen können (Schmidt et al. 2016a, S. 141). Dazu die nach jetzigem Wissensstand erzielbaren THG-Einsparungen besonders im Vergleich zu anderen Biokraftstoffoptionen zu gering.

5.4 Wasserverbrauch und Wasserverschmutzung

Eine ausreichende Wasserversorgung ist unverzichtbare Voraussetzung der Algenproduktion (Chisti 2013; Slade/Bauen 2013). Die Höhe des Wasserverbrauchs ist bei jedem Produktionssystem unterschiedlich. Sie hängt z. B. davon ab,

- ob die Algen in einer Nährlösung aus Meerwasser, Frischwasser oder Abwässern hergestellt werden,
- ob und wie viel Wasser verdunsten kann (offene Teiche),
- ob Wasser zur Kühlung der Produktionsanlage benötigt wird,
- ob im Algenmedium Konzentrationen oder Kontaminationen auftreten, die einen häufigen Wasseraustausch nötig machen,
- inwieweit Wasser, das bei der Ernte von der Biomasse abgetrennt wird, wieder verwendet werden kann.

Neben dem Verbrauch von Wasser spielen auch Umfang und Art der Abwässer eine große Rolle, die im Lauf der Produktion anfallen und ggf. gereinigt werden müssen. Dort können z. B. chemische Substanzen für die Flockung gelöst sein, die nicht in die Umwelt entlassen werden sollten (Slade/Bauen 2013).

Tab. 5.4 Wasserbedarf verschiedener Algenproduktionssysteme

Produktionssystem	Standort	Wasserverbrauch in l/MJ Biodiesel	Quelle
offen (Salzwasser)	New Mexico	18,7	Correa et al. (2017)
offen (Salzwasser)	Perth	12,6	
hybrid (Frischwasser)	Hawaii	32,6	
geschlossen (gekühlt)	Italien	8,6	
geschlossen (gekühlt)	Niederlande	2,7	
geschlossen (gekühlt)	Frankreich	9,4	Yang et al. (2011)
geschlossen (gekühlt)	Algerien	23,1	
offen (Frischwasser ohne Wiedernutzung)	USA	100,7	
offen (Frischwasser mit Wiedernutzung)	USA	16,0	
offen (Frischwasser)	Großbritannien	0,1	Stephenson et al. (2010)
geschlossen (gekühlt)	Großbritannien	0,4	
offen (Frischwasser)	Mittelmeerraum	2,7	
geschlossen (gekühlt)	Mittelmeerraum	12,5	

Eigene Zusammenstellung

Die genaue Höhe des Wasserverbrauchs ist vom Standort und dem jeweiligen Produktionssystem abhängig (Tab. 5.4). Auf Basis der Angaben in der Literatur kann die Bandbreite von deutlich unter 1 l/MJ Energiegehalt des Kraftstoffes bis zu über 100 l/MJ reichen. Wie wichtig die Aufbereitung und Wiederverwendung der Nährlösung ist, zeigt dabei die Studie von Yang et al. (2011) wo im direkten Vergleich ein Wasserverbrauch von 16 l/MJ mit Wiedernutzung ermittelt wurde und über 100 l/MJ ohne (Tab. 5.4). Auch Davis et al. (2012), die in ihrer Metastudie mehrere Lebenszyklusanalysen für die Produktion von Algenlipiden in offenen Teichen in den USA verglichen haben, kommen zu einer ähnlich hohen Bandbreite von 5,8 l/MJ bis zu knapp 50 l/MJ Energiegehalt.

In Tabelle 5.5 beinhaltet Vergleichsangaben zum Wasserverbrauch für die Erzeugung von Biodiesel aus pflanzenbasierter Biomasse. Der Wassereinsatz für die Erzeugung von Bioethanol ist demnach geringer als der für Biodiesel (Gerbens-Leenes et al. 2009), liegt aber deutlich über dem für Algenbiomasse. Raps benötigt etwa 400 l Wasser für die Erzeugung von Biodiesel mit einem Energiegehalt von einem MJ. Das ist mindestens um den Faktor 4 höher als selbst unter ungünstigen Annahmen für Algenbiomasse aufgewendet werden muss.

Tab. 5.5 Wasserverbrauch pflanzenbasierter Biomasse für die Biokraftstofferzeugung

Quelle der Biomasse	Endprodukt	Wasserverbrauch in l/MJ Biodiesel
Sojabohne	Biodiesel	370–400
Raps	Biodiesel	400
Sorghum	Biodiesel	414
Jatropha	Biodiesel	600
Zuckerrübe	Bioethanol	59
Kartoffeln	Bioethanol	101
Zuckerrohr	Strom/Bioethanol	106
Mais	Strom	109

Eigene Zusammenstellung nach Dominguez-Faus et al. 2009; Gerbens-Leenes et al. 2009; Yang et al. 2011

Für eine begründete Bewertung der Nachhaltigkeit in Bezug auf den Wasserbedarf müssen regionspezifische Faktoren zur Wasserverfügbarkeit berücksichtigt werden. Dies ist an Standorten mit ansonsten idealen Verhältnissen (hohe Strahlungsintensität, warm, für landwirtschaftliche Produktion zu trocken etc.) nicht immer optimal und kann zur Verstärkung von Wasserknappheit beitragen (Adenle et al. 2013; Ryan 2009).

5.5 Fazit

Bei der Betrachtung der Nachhaltigkeitswirkungen algenbasierter Biokraftstoffe zeigt sich auf der einen Seite das theoretische Potenzial dieser Technologie. Die höhere Flächenproduktivität gegenüber der Erzeugung pflanzenbasierter Rohstoffe und die Möglichkeit auf Standorten zu produzieren, die nicht in Konkurrenz zur Erzeugung von Nahrungsmitteln stehen, sind sehr günstige Eigenschaften. Gegenüber fossilen Rohstoffen ist zudem eine vorteilhafte THG-Bilanz zu erwarten. Zusätzlich zeichnen sich algenbasierte Biokraftstoffe durch einen deutlich geringeren Wasserbedarf gegenüber anderen gängigen Biokraftstoffen aus.

Andererseits ist deutlich, dass unter den gegenwärtig plausiblen Annahmen zur Technologieentwicklung von algenbasierten Kraftstoffen keine wesentlichen Beiträge zur Erreichung eines neutralen Verkehrs ausgehen werden. Dies liegt zum einen an der derzeit überwiegend negativen Energiebilanz von Algenkraftstoffen, die vor allem aus dem hohen energetischen Aufwand für die Aufbereitung der Algenlipide resultiert. Zum anderen führen die immer noch frühe Phase der Technologieentwicklung und die hohen Kosten der Kraftstoffe dazu, dass für die mittlere Frist kaum mit dem Aufbau von industriellen Produktionsstrukturen für Algenkraftstoffe zu rechnen ist. Für Deutschland ist zudem das potenzielle Angebot an Flächen für die Algenproduktion und auch die Produktivität der Algen unter den hier herrschenden klimatischen Bedingungen eingeschränkt.

Zur Verbesserung der Nachhaltigkeitswirkungen bestehen auf allen Ebenen der Prozesskette Optimierungspotenziale für die Erzeugung von Algenkraftstoffen. Die wesentlichen Treiber für Kosten und Emissionen und damit auch die ersten Ansatzpunkte für Verbesserungen befinden sich im Bereich der Algenproduktion, weniger auf der Seite der Kraftstoffproduktionstechnologie (Kröger et al. 2016, S. 61). Wesentliche Ansätze zur Reduktion von Emissionen und damit zur Erhöhung der THG-Minderungsleistung ist der Einsatz von erneuerbaren Energien sowie die Verwendung von Nährstoffquellen mit möglichst geringen Vorkettenemissionen (z. B. Abwässer statt synthetische Stickstoffdüngemittel). Auch die (Weiter-)Entwicklung von Kraftstoffrouten, die die ganze Alge und vorzugsweise in nassem Zustand nutzen, sind Voraussetzungen um die Energie- und Klimabilanz der Algenkraftstoffe zu verbessern.

6 Zur Rolle algenbasierter Biokraftstoffe für einen THG-neutralen Lkw-Fernverkehr

Der Verkehrssektor muss einen erheblichen Beitrag zur Reduktion der THG-Emissionen leisten, will man die gesetzten Klimaschutzziele erreichen. Mit einem derzeitigen Anteil von etwa 35 % der THG-Emissionen des Verkehrs insgesamt steht auch der Straßengüterverkehr in der Pflicht (BMUB 2016; UBA 2014).

Dem Fernverkehr (Strecken über 150 km) kommt dabei eine wichtige Rolle zu. Sein Anteil am gesamten von deutschen Lkw (mit einem zulässigen Gesamtgewicht von mehr als 6 t) erbrachten Transportvolumen lag im Jahr 2015 zwar mit 640 Mio. t von insg. knapp 3.500 Mio. t nur bei einem Anteil von weniger als 20 % (BMVI 2017). Doch aufgrund der dabei zurückgelegten langen Transportwege lag die Transportleistung des Lkw-Fernverkehrs im Jahr 2016 mit mehr als 217 Mrd. tkm bei einem Anteil von knapp 70 % der insgesamt 315 Mrd. tkm durch inländische Lkw erbrachten Transportleistung (KBA 2017c).²⁴

Im Fernverkehr kommen vor allem schwere Lkw und insbesondere Sattelzugmaschinen zum Einsatz, die fast ausschließlich mit Dieselmotoren ausgerüstet sind. Alternativ angetriebene Fahrzeuge sind zwar erhältlich, ihr Anteil bei den schweren Lkw und Sattelzugmaschinen beträgt allerdings weniger als 1 % (Adolf et al. 2016).

Die Herausforderungen, im Lkw-Fernverkehr THG-Minderungen zu erreichen, sind umso größer, als einerseits eine Zunahme des Straßengüterverkehrs prognostiziert wird und andererseits die Leistungsanforderungen an alternative Kraftstoff- und Antriebssysteme hoch sind. Denn bei Jahresfahrleistungen von 80.000 bis 150.000 km werden Zuverlässigkeit der Antriebssysteme und hohe Reichweiten erwartet. Daher wird ein Kraftstoff mit hoher Energiedichte benötigt, der möglichst mit der bewährten Dieselantriebstechnik kompatibel ist (Schmidt et al. 2016a, S. 1).

Vor diesem Hintergrund soll dargelegt werden, ob Algenkraftstoffe sowohl den technischen Leistungsanforderungen gerecht werden als auch dazu beitragen können, die gesteckten THG-Ziele zu erreichen. Dabei sollen einerseits technische Entwicklungen in der Lkw-Antriebstechnik berücksichtigt und andererseits alternative, insbesondere regenerative Kraftstoffe zum Vergleich für die Biokraftstoffe auf Algenbasis herangezogen werden. Im Folgenden wird daher erörtert,

- wie sich das Verkehrsaufkommen für den Straßengütertransport darstellt und künftig weiterentwickeln wird (Kap. 6.1),
- welche Innovationen bei der Antriebstechnik zu erwarten sind, die sich auf den voraussichtlichen Kraftstoffbedarf auswirken werden (Kap. 6.2),
- welche Antriebs- und Kraftstoffalternativen zur Verfügung stehen (Kap. 6.3),
- welchen Beitrag diese Alternativen (insbesondere auch der Einsatz von algenbasierten Kraftstoffen) für das Ziel eines THG-neutralen Lkw-Fernverkehrs bis zum Jahr 2050 leisten können (Kap. 6.4), und
- welche Herausforderungen für eine Umstellung des Lkw-Fernverkehrs auf regenerative Antriebssysteme verbunden sind (Kap. 6.5).

24 Die Datenlage über tatsächlichen Fahrleistungen von Lkw im Fernverkehr – und davon abgeleitet dem Kraftstoffverbrauch sowie den THG-Emissionen – ist unübersichtlich. Dazu tragen statistische Unschärfen wie auch eine Vielzahl inkonsistenter Klassifizierungen bei. Zudem hat die Güterverkehrsleistung ausländischer Lkw auf deutschen Straßen in den letzten Jahren kontinuierlich zugenommen und betrug im Jahr 2015 bereits 170 Mrd. tkm (BMVI 2017). Damit erbringen im Ausland angemeldete Lkw mehr als ein Drittel der Leistung des Straßengüterverkehrs in Deutschland.

6.1 Verkehrsaufkommen und Infrastruktur im Lkw-Fernverkehr

Um zukünftige Entwicklungen besser einschätzen zu können, soll zunächst der gegenwärtige Bestand der im Straßengüterverkehr eingesetzten Fahrzeuge und das Verkehrsaufkommen näher beleuchtet werden. Tabelle 6.1 zeigt die Strukturen der deutschen Lkw-Landschaft. Schwere Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht (zGG) über 12 t machen nur gut 7% aller im Straßengüterverkehr eingesetzten Lkw aus. Haupteinsatzgebiet dieser schweren Lkw als Lastzugkombination mit Zugfahrzeug und Anhänger ist der Güterfernverkehr (Adolf et al. 2016).

Tab. 6.1 Lkw-Bestand in Deutschland zum 1.1.2017

zulässiges Gesamtgewicht in t	bis 3,5	3,5 bis 12	über 12	gesamt
Bestand	1.187.089	1.516.977	207.798	2.911.907
Anteil in %	40,8	52,1	7,1	100

Quelle: KBA 2017a

Zweites Standbein des Straßengüterfernverkehrs sind Sattelzugmaschinen (SZM), bei denen die Güter in einem Sattelanhänger transportiert werden. Anfang 2017 waren in Deutschland mehr als 200.000 SZM zugelassen. Gemeinsam mit den schweren Lkw machen sie allerdings weniger als 1% aller in Deutschland zugelassenen Kraftfahrzeuge aus (Tab. 6.2).

Tab. 6.2 Bestand an schweren Lkw und Sattelzugmaschinen in Deutschland zum 1.1.2017

Fahrzeugklasse	Lkw über 12 t zGG	Sattelzug- maschine	zusammen	Gesamtbestand Kfz
Bestand	207.798	201.984	409.782	55.568.268
Anteil in %	0,4	0,4	0,7	100

Quelle: KBA 2017a

Tabelle 6.3 zeigt die Jahresfahrleistungen des Jahres 2016 deutscher Kraftfahrzeuge nach verschiedenen Kraftfahrzeugarten.

Tab. 6.3 Gesamte und durchschnittliche Jahresfahrleistungen deutscher Kfz 2016 und Veränderungen zum Vorjahr

Kraftfahrzeugart	Gesamt- fahrleistung in 1.000 km	Veränderung zum Vorjahr in %	Durch- schnittliche Fahrleistung in km/a	Veränderung zum Vorjahr in %
Krafträder	9.658.493	0,5	2.268	-1,5
Personenkraftwagen	625.534.604	1,1	14.015	-0,4
Lkw bis 3,5 t zGG	44.679.190	5,0	19.393	-
Lkw von 3,5 bis 6 t zGG	3.558.921	0,6	18.393	-2,8
Lkw über 6 t zGG	13.251.048	3,3	37.833	-3,7
landwirt. Zugmaschinen	710.731	-5,2	389	-6,3
Sattelzugmaschinen	19.053.415	1,9	98.809	-2,1
sonstige Zugmaschinen	456.662	3,8	3.783	2,6
Omnibusse	4.515.140	3,1	58.615	2,3
sonstige Kfz	4.405.701	-4,6	9.868	0,6
Kfz insgesamt	725.823.904	1,4	13.341	-0,3

Quelle: KBA 2017b

Zu erkennen ist ein Wachstum der Fahrleistungen der Lkw für den Straßengüterverkehr, insbesondere bei leichten Lkw bis 3,5 t zGG. Die durchschnittliche jährliche Fahrleistung je Fahrzeug hat hingegen über fast alle Kraftfahrzeugarten abgenommen.

Tabelle 6.4 zeigt eine Abschätzung des Endenergieverbrauchs des durch in Deutschland zugelassene Fahrzeuge geleisteten Straßengüterfernverkehrs. Dabei wurde zur Vereinfachung angenommen, dass die Verkehrsleistung der schweren Lkw und der Sattelzugmaschinen ausschließlich im Fernverkehr durch dieselgetriebene Fahrzeuge erbracht wird. Demnach betrug der Endenergieverbrauch im Fernverkehr im Jahr 2016 mehr als 400 PJ und damit einem Anteil von 60 % am Gesamtenergiebedarf des Straßengüterverkehrs²⁵. Die Fern-Lkw bilden deshalb eine kritische Größe für die Energiewende im Straßenverkehr und für die Reduktion der THG-Emissionen.

25 Dies dürfte eher eine Unterschätzung darstellen, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass auch Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht unter 6 t für Fahrten im Straßengüterfernverkehr eingesetzt wurden. Zudem gibt die Studie von Adolf et al. (2016) an, dass schwere Lkw und Sattelzugmaschinen für 79 % des Endenergieverbrauchs des Straßengüterverkehrs verantwortlich sind, allerdings ohne diese Angabe näher herzuleiten.

Tab. 6.4 Abschätzung des Endenergieverbrauchs des Straßengüterfernverkehrs durch deutsche Kraftfahrzeuge 2016

Fahrzeugart	Gesamtfahrleistung in 1.000 km	Verbrauch Diesel in l/100 km	Energie- gehalt Diesel in MJ/l	Endenergie- verbrauch in PJ
Lkw über 6 t zGG	13.251.048	34,5	37,4	171
Sattelzugmaschinen	19.053.415	34,5	37,4	246
Summe	32.304.463			417
Straßengüterverkehr gesamt	80.542.574			690
Anteil Fernverkehr in %	40			60

Eigene Berechnung auf Grundlage von BMVI 2017 und KBA 2017b

Tabelle 6.5 zeigt die Beförderungsleistung von Lkw im Straßengüterverkehr in tkm, deren Anzahl sich aus der gefahrenen Strecke multipliziert mit der Masse transportierter Güter ergibt. Hier wird die überragende Bedeutung des Fernverkehrs sichtbar. Obwohl im Fernverkehr weniger als 20 % der Masse aller im Straßengüterverkehr bewegten Güter transportiert wird (in 2016 ca. 560 Mio. t von insg. knapp 3 Mrd. t Transportmenge) (KBA 2017b), ergibt sich aus den hohen Transportdistanzen ein Anteil des Fernverkehrs an der Beförderungsleistung des Straßengüterverkehrs von knapp 70 %. Hinzu kommt die Transportleistung von im Ausland zugelassenen Lkw in Deutschland. Diese Größe wird in der Statistik separat erfasst. Allerdings ist anzunehmen, dass ein Großteil dieser Beförderungsleistung ebenfalls dem Fernverkehr zuzurechnen ist. Berücksichtigt man die durch ausländische Lkw in Deutschland erbrachte Beförderungsleistung, erreicht der Fernverkehr sogar einen Anteil von 80 % an der gesamten Beförderungsleistung auf deutschen Straßen.

Tab. 6.5 Beförderungsleistung im Straßengüterverkehr und Anteil des Fernverkehrs 2016

Verkehrsart	Mio. tkm
Binnenverkehr, davon	271.676
Nahbereich (bis 50 km)	32.539
Regionalbereich (50 bis 150 km)	63.960
Fernbereich (über 150 km)	175.176
grenzüberschreitender Verkehr	42.271
Kabotage	1.822
Beförderungsleistung deutscher Lkw gesamt	315.769
davon Fernverkehr (Fernbereich und grenzüberschreitender Verkehr)	217.447
Anteil Fernverkehr (deutsche Lkw) in %	69
Beförderungsleistung ausländischer Lkw	173.000
Beförderungsleistung im Fernverkehr (alle Lkw)	488.769
davon Fernverkehr (deutscher und ausländischer Lkw)	390.447
Anteil Fernverkehr (alle Lkw) in %	80

Quelle: KBA 2017c

Die Beförderungsleistung des Straßengüterverkehrs insgesamt und auch im Fernverkehr hat in den letzten Jahren kontinuierlich zugenommen (Tab. 6.6). Der Anteil der im Fernverkehr erzielten Beförderungsleistung lag dabei beständig bei etwa 80% der gesamten Beförderungsleistung. Auffällig ist das Wachstum der durch ausländische Lkw in Deutschland realisierten Beförderungsleistung, während der grenzüberschreitende Verkehr deutscher Lkw in den letzten Jahren an Bedeutung verloren hat.

Verschiedene Akteure haben in den letzten Jahren Szenarien und Prognosen entworfen, wie sich der Straßengüterverkehr in Deutschland entwickeln wird (Abb. 6.1). Der Balken links zeigt für den Ausgangspunkt der meisten Szenarien (Jahr 2010) die tatsächliche Beförderungsleistung des Straßengüterverkehrs des Jahres 2009 von 415,6 Mrd. tkm (BMVI 2017). Die den verschiedenen Kurvenverläufen zugrundeliegenden Studien unterscheiden sich in ihren Annahmen und zeigen prognostizierte Entwicklungen bis 2050, wenn Deutschland einen THG-neutralen Verkehr realisiert haben will.

Tab. 6.6 Beförderungsleistung im Straßengüterverkehr und Anteil des Fernverkehrs 2012 bis 2016

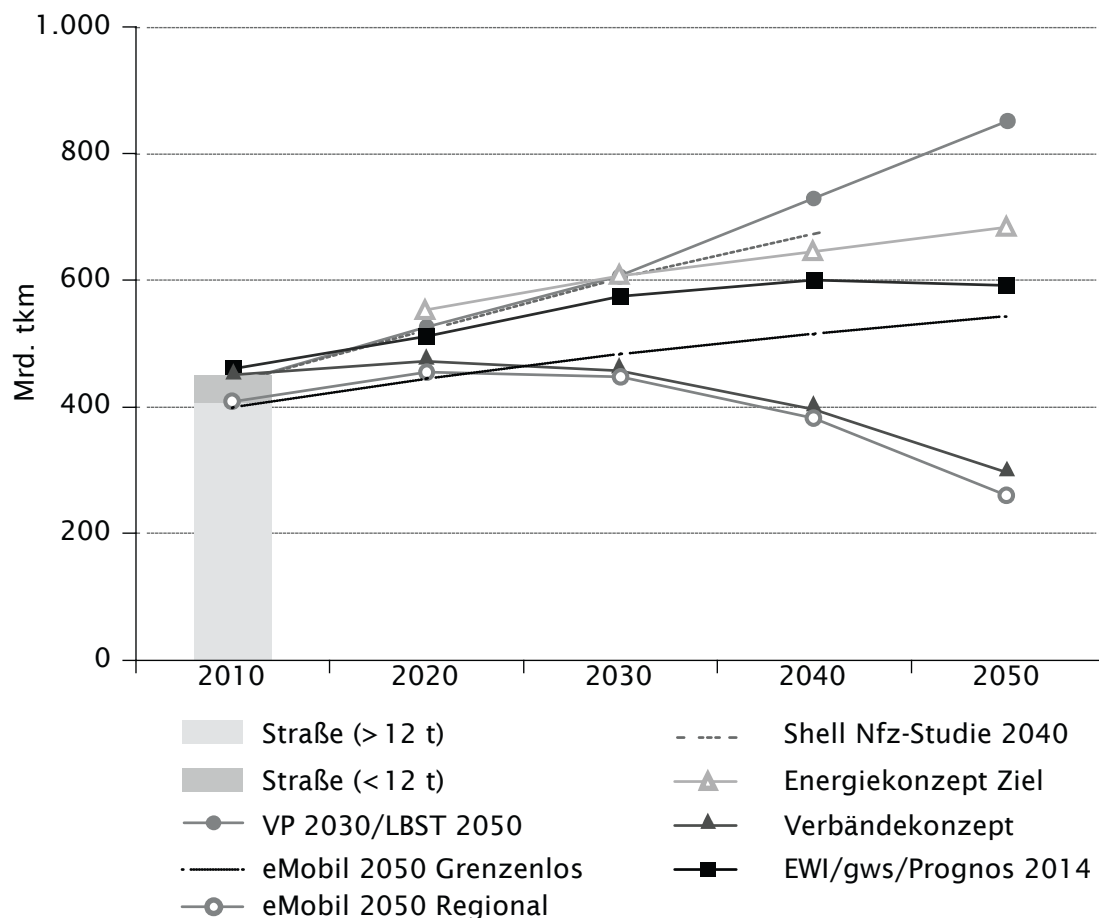
Verkehrsart	Beförderungsleistung in Mio. tkm				
	2012	2013	2014	2015	2016
Beförderungsleistung deutscher Lkw, davon	307.106	305.781	310.142	314.816	315.769
Binnenverkehr deutscher Lkw im Fernbereich (über 150 km)	168.995	168.760	170.155	175.650	175.176
grenzüberschreitender Verkehr	50.851	47.280	45.348	43.374	42.271
Verkehrsleistung ausländischer Lkw	152.000	163.000	167.000	170.000	173.000
Beförderungsleistung gesamt (alle Lkw)	459.106	468.781	477.142	484.816	488.769
davon Fernverkehr (deutsche und ausländische Lkw)	371.846	379.039	382.503	389.024	390.447
Anteil Fernverkehr (alle Lkw) in %	81	81	80	80	80

Quelle: KBA 2017c

Eine Abnahme der Transportleistungen wird in den Szenarien »eMobil 2050 Regional« (Hacker et al. 2014) und im »Verbändekonzept« (Erhard et al. 2014) angenommen. Diese Szenarien dienen explizit zur Abschätzung der Machbarkeit und möglicher Folgen der Umsetzung der klimapolitischen Zielsetzungen im Straßengüterverkehr und zeigen daher recht positive Annahmen hinsichtlich der möglichen Entwicklung der zukünftigen Transportleistung.

Bei den übrigen Szenarien und Prognosen wird hingegen von einer zukünftig steigenden Transportleistung ausgegangen. Die Verkehrsprognose 2030 (»VP 2030«) (Schubert et al. 2014) war eine Grundlage für den geplanten Bundesverkehrswegeplan im Jahr 2015 und stellt eine langfristige Prognose des Personen- und des Güterverkehrs dar. Dabei wird angenommen, dass die Transportleistung im Straßengüterverkehr im Zeitraum zwischen den Jahren 2010 und 2030 um knapp 40 % steigt. Mit dem Szenario »LBST 2050« (Schmidt et al. 2016b) wird auf dieser Prognose aufgebaut und unterstellt, dass sich die Transportleistungen auch nach 2030 erhöhen und sich bis 2050 gegenüber dem Basisjahr 2010 nahezu verdoppeln. Beim Szenario »eMobil 2050 Grenzenlos« (Hacker et al. 2014) wird eine einfache Fortschreibung der Entwicklungen der letzten Jahre angenommen. Nach der Prognose von Adolf et al. (2016) steigt die Gütertransportleistung auf der Straße bis 2040 über 40 %.

Abb. 6.1 Szenarien zur Beförderungsleistung des Straßengüterverkehrs für Deutschland



Quelle: Schmidt et al. 2016a, S. 97

Das Szenario »Energiekonzept Ziel« (Schlesinger et al. 2010) war ein Teil der Grundlagen für die Entwicklung des Energiekonzepts der Bundesregierung im Jahr 2010, bei dem von einem moderaten aber stetigen Wachstum der Transportleistung ausgegangen wird. Von Schlesinger et al. (2014) stammt auch die Energiereferenzprognose »EWI/gws/Prognos«. Dabei handelt es sich um eine Abschätzung der energiewirtschaftlichen Entwicklung bis 2030, ergänzt um ein Trendszenario bis 2050. Hier wird nach einem Anstieg in den kommenden Jahrzehnten um ca. 25 % mit einem leichten Rückgang der Transportleistung ab 2040 gerechnet.

Aus den Szenarien und Prognosen in Abbildung 6.1 lässt sich ablesen, dass die Erwartungen, wie sich die Transportleistungen im Straßengüterverkehr in den nächsten Jahrzehnten entwickeln werden, weit auseinandergehen. Die große Differenz hat damit zu tun, dass die unterstellten Entwicklungen von vielen Variablen abhängig sind. Bei den Annahmen spielt insbesondere die Frage eine wichtige Rolle, inwieweit davon ausgegangen wird, dass sich klimapolitische Zielsetzungen auf Maßnahmen im Güterverkehr spürbar auswirken. Die Unsicherheit der Prognosen wird außerdem dadurch vergrößert, dass sich viele Faktoren für die Abschätzung künftiger Transportleistungen kontinuierlich ändern. In den letzten Jahren fallen hier verschiedene Trends auf. Die durchschnittliche Ladekapazität der Lkw nimmt zu, d. h., eine steigende Zahl größerer Fahrzeuge insbesondere in der oberen Gewichtsklasse ist auf den Straßen unterwegs. Gleichzeitig nimmt die Auslastung ab (KBA 2015). Es finden sich auch immer mehr Lkw im deutschen Straßengüterverkehr, die im Ausland gemeldet sind. Betrug der Anteil dieser Lkw im Jahr 1997 nur 78,6 Mrd. tkm bzw. 35 % der Verkehrsleistung der in Deutschland angemeldeten Lkw, so stieg er über 150 Mrd. tkm bzw. 52 % im Jahr 2006 auf 178 Mrd. tkm bzw. 62 % (Schmidt et al. 2016a, S. 99).

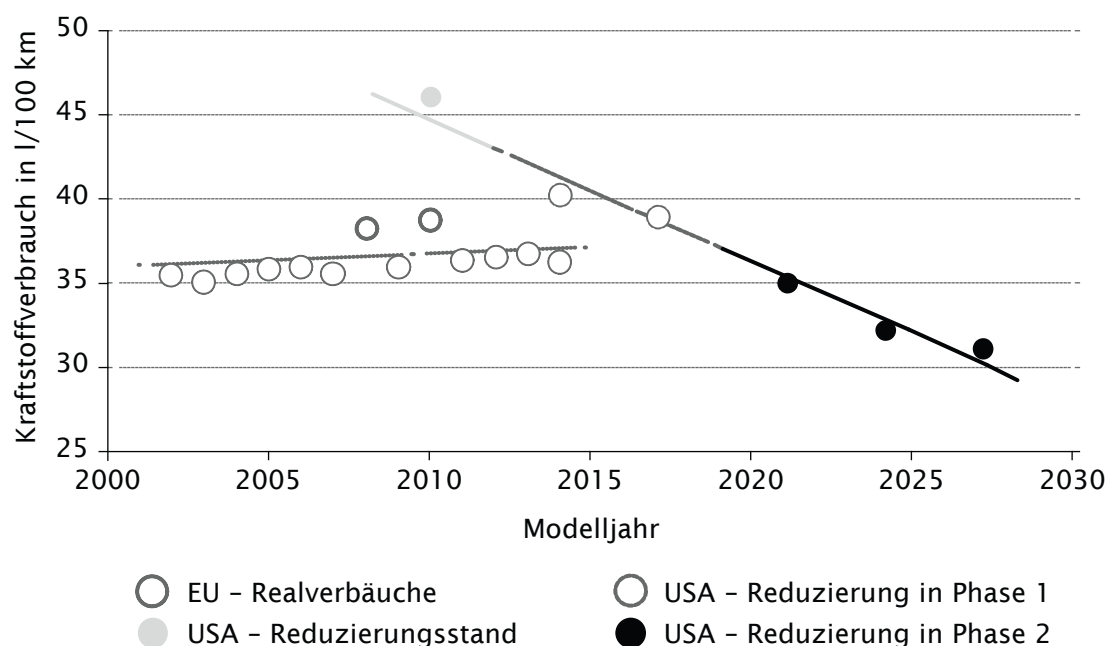
Für die weiteren Betrachtungen werden die beiden kontrastierenden Szenarien »Mobil 2050 Regional« (Hacker et al. 2014) als untere Grenze und die »VP 2030« (Schubert et al. 2014) und ihre Extrapolation bis 2050 durch »LBST 2050« als obere Grenze verwendet (Kap. 6.4). Allerdings sollten die hier angesprochenen Unsicherheiten in Bezug auf Prognosen über zukünftige Transportleistungen und damit verbundene Kraftstoffbedarfe bei der Interpretation der im Folgenden dargestellten Ausführungen im Auge behalten werden.

6.2 Kraftstoffverbrauch von Lkw: technische Entwicklungen und Einsparmöglichkeiten

Ungefähr 95 % aller Nutzfahrzeuge fahren mit Dieselantrieben und über 99 % des Energieverbrauchs von Lkw und Bussen ist Dieselmotorkraftstoff (Adolf et al. 2016). Der spezifische Kraftstoffverbrauch hängt neben Antriebstechnik und Gewicht auch stark von Fahrverhalten, Fahrzyklus und der Topografie der Strecke ab (Flachland, Berge). In Abbildung 6.2 ist die Entwicklung der Realverbräuche schwerer Lkw von 2002 bis 2014 im jeweiligen Modelljahr (Neufahrzeuge) dargestellt. Zum Vergleich sind die regulatorischen Vorgaben für die Kraftstoffverbräuche schwerer Nutzfahrzeuge in den USA ab 2010 dargestellt. Die US-amerikanischen Vorgaben für die 2. Phase (dunkle Punkte) befanden sich bei der Erstellung dieses Berichts noch in Diskussion.

Die in Abbildung 6.2 gezeigten Realverbräuche schwerer Lkw zeigen, dass es gelungen ist, den Kraftstoffverbrauch weitgehend konstant zu halten, obwohl die gesetzlichen Anforderungen im Hinblick auf die Minderung von Schadstoffemissionen stark gestiegen sind. Verbesserungen an den Antriebssystemen konnten den höheren Aufwand für die Abgasnachbehandlung nahezu kompensieren. Maßnahmen, die die Effizienz darüber hinaus steigern würden, sind technisch denkbar, aber zunehmend aufwendiger, mit höheren Kosten und auch mit Einschränkungen in der Nutzung verbunden (z. B. Geschwindigkeitsbegrenzung, aerodynamische Einschränkungen etc.; Abb. 6.4). Für die Frage, wo die geeigneten Bereiche (z. B. Reifen, Antriebssystem, Aerodynamik) liegen, in denen die Effizienz noch gesteigert werden könnte, gilt es zunächst zu analysieren, wie der Kraftstoffverbrauch bei einem Sattelzug im Fernverkehr auf die genannten Bereiche verteilt ist. Abbildung 6.3 skizziert eine solche Verteilung modellhaft (Fernverkehr) und im Vergleich zu den Verbräuchen bei im regionalen bzw. städtischen Verkehr eingesetzten Fahrzeugen.

Abb. 6.2 Kraftstoffverbrauch schwerer Lkw: Deutschland versus US-Regulatorik

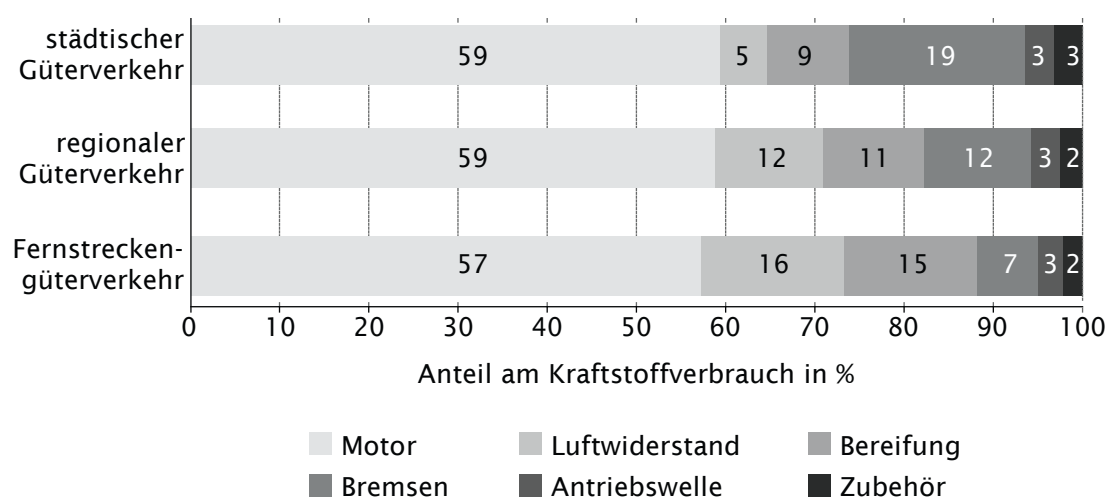


USA – Phase 2 noch in Diskussion

Quelle: nach Delgado/Muncrief 2016, eigene Übersetzung

Wie in Abbildung 6.3 zu erkennen ist, sind die Motoren zu rund 60 % für den Kraftstoffverbrauch verantwortlich. Weitere wichtige Faktoren sind mit je 15 % die Reifen und der Luftwiderstand der Lkw. Grundsätzlich können alle Fahrprofile (Fern-, Regional- und Stadtverkehr) von Verbesserungen bei den Motoren (z. B. höhere Aufladung, geringere Reibungsverluste) profitieren, jedoch nicht immer in gleicher Weise. Zum Beispiel entfalten bei Lkw im Fernverkehr selbst scheinbar marginale Verbesserungen um den Nennbetriebspunkt des Motors große Wirkungen beim Verbrauch, da die Motoren auf Langstrecken viel in diesem Bereich laufen. Bei Fahrten im Stadtverkehr ergäbe die gleiche Motorenverbesserung jedoch weit geringere Reduktionen des Kraftstoffverbrauchs.

Abb. 6.3 Verteilung der Kraftstoffverbräuche verschiedener Güterverkehrstypen



Quelle: nach Delgado et al. 2017, S. 25; eigene Übersetzung

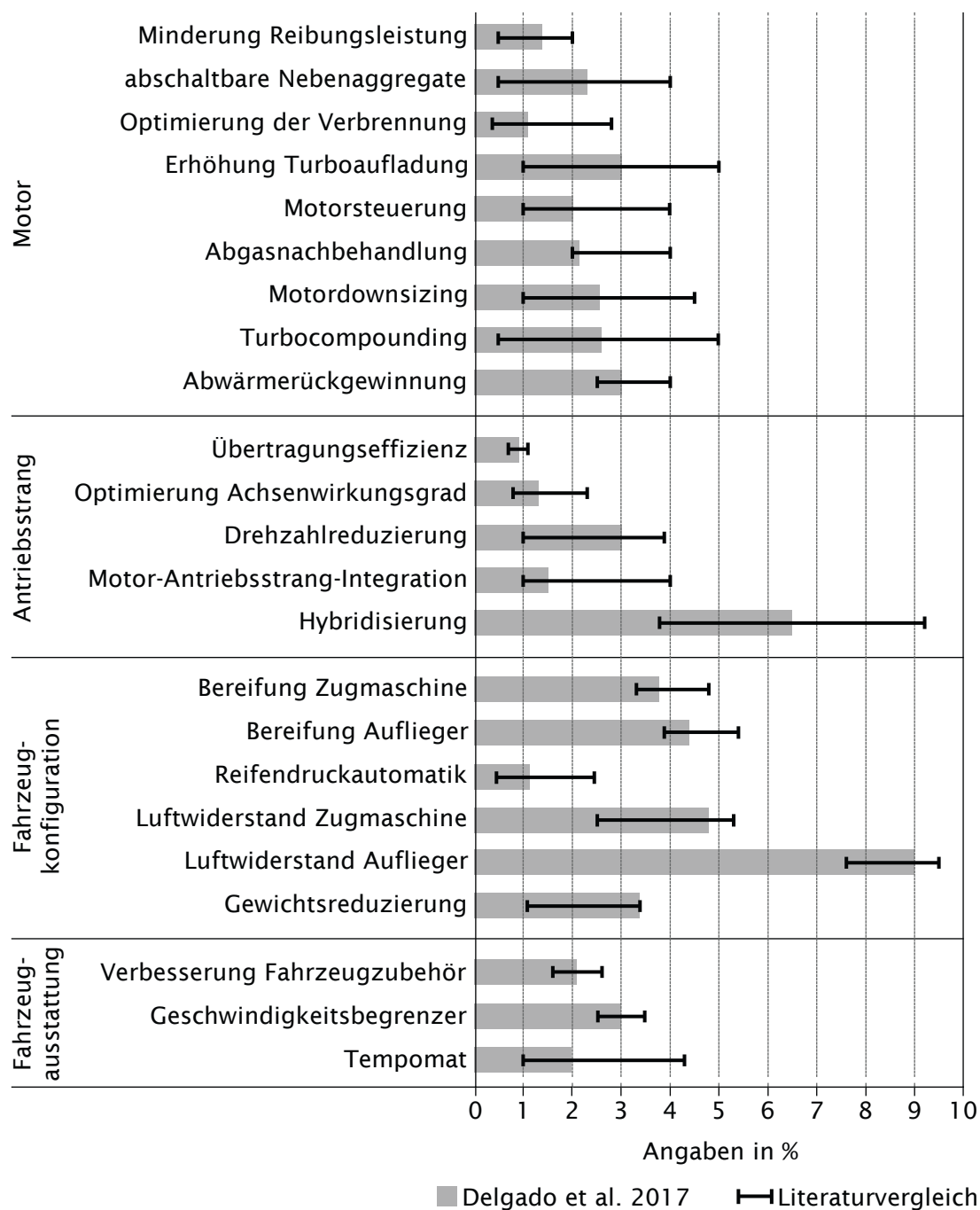
In Abbildung 6.4 sind die Potenziale verschiedener Technologiebereiche aus Delgado et al. (2017) und die Ergebnisse einer Literaturstudie dieser Autoren für weitere Verminderungen des Kraftstoffverbrauchs dargestellt. Dabei wurden Technologieoptionen berücksichtigt, die spätestens im Zeitraum von 2020 bis 2025 verfügbar sein könnten.

Bezüglich des Motors wird in der Nutzung von Abwärme das größte Verbrauchsreduktionspotenzial gesehen. Bei der Kraftübertragung (von der Motorwelle bis zur Radnabe) ist es der Einsatz verbesserter, automatisierter Schaltgetriebe und insbesondere die Hybridisierung des Antriebsstrangs eine interessante Option.²⁶ Das gilt selbst für den Langstreckeneinsatz. Beim Gespann liegen wesentliche Verbesserungspotenziale in der Anhänger-aerodynamik.

Die in Abbildung 6.4 genannten Optionen, den Verbrauch zu reduzieren, können jedoch nicht einfach in ihren Wirkungen addiert werden. Es wurden deshalb zueinander stimmige und gestufte Technologiepakete zusammengefasst, mit denen der Verbrauch künftig gemindert werden kann. Modelliert man diese Technologiepakete mit dem Simulationsmodell VECTO, so ergeben sich die in Abbildung 6.5 gezeigten technischen Potenziale zur Verbrauchsreduktion im Lkw-Fernverkehr (Delgado/Muncrief 2016).

26 Von Hybridisierung wird gesprochen, wenn ein Antriebssystem aus mindestens zwei Antriebsquellen besteht, z. B. Verbrennungsmotor und Elektromotor(en). Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor wird eine Hybridisierung mit batterieelektrischem Antrieb meist auch zugleich genutzt, um die Bremsenergie in Strom rückzugewinnen, den gewonnenen Strom in Batterien zu speichern und diesen beim nächsten Beschleunigungsvorgang wieder zu verwenden (Rekuperation).

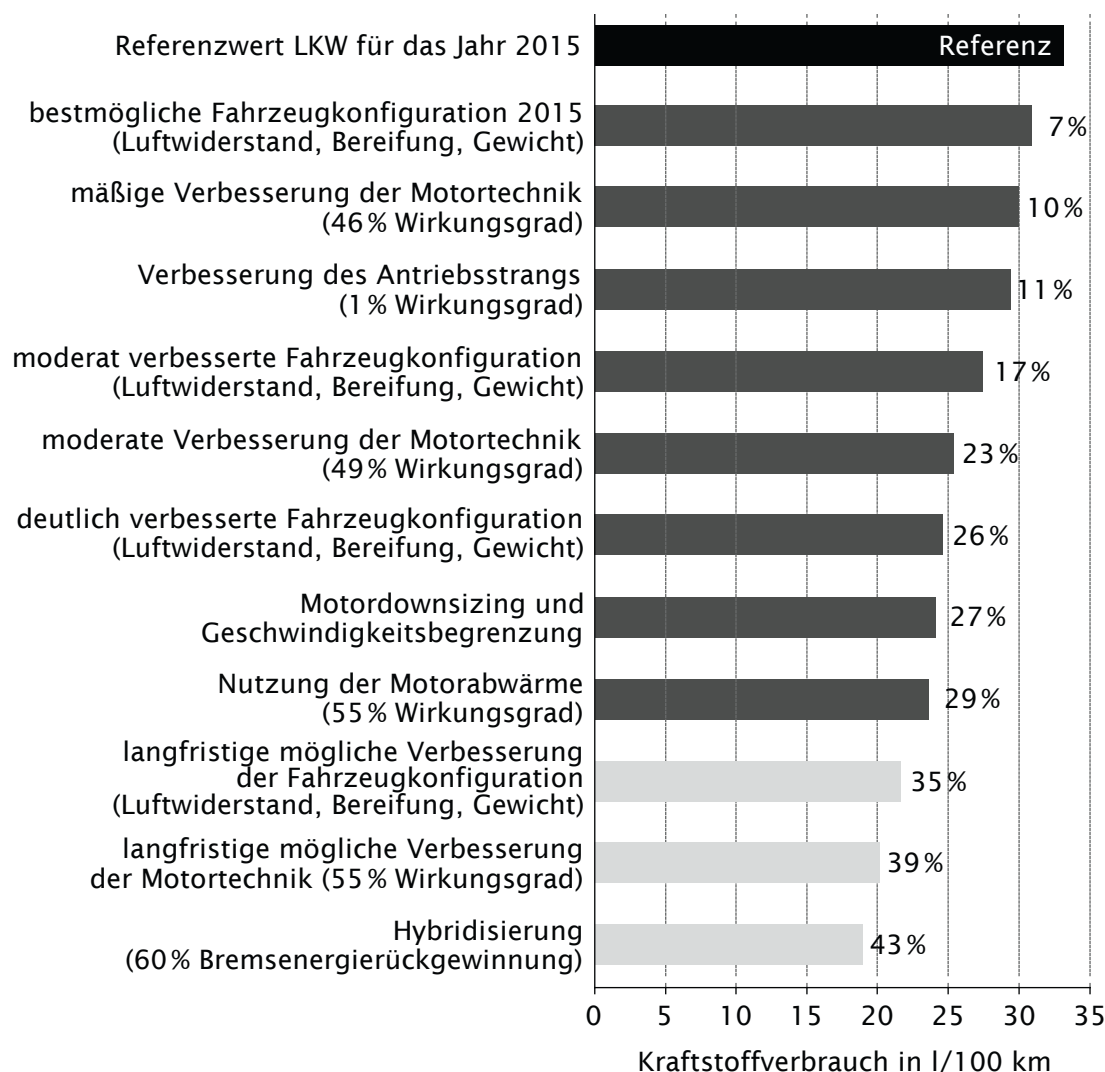
Abb. 6.4 Technologien und Potenziale zur Reduktion von Kraftstoffverbräuchen bei Sattelzugmaschinen im Fernverkehr



Quelle: nach Delgado et al. 2017, S. 48; eigene Übersetzung

Wie in Abbildung 6.5 zu erkennen, könnte der Verbrauch zeitnah (2020-2025, dunkle Balken) gegenüber heute um bis zu 29 % reduziert werden. Dazu müssten an Aerodynamik, Rollwiderstand, Gewicht (Leichtbau), Motor und Wärmerückgewinnung sowie beim Fahrverhalten (niedrigere Fahrgeschwindigkeit) Verbesserungen vorgenommen werden. Mit weiteren Entwicklungen bei der Aerodynamik, beim Motor (in besondere Hybridisierung des Antriebs) könnten auf längere Sicht (2030, helle Balken) sogar bis zu 43 % Kraftstoffeinsparung erreicht werden (Delgado et al. 2017).

Abb. 6.5 Modellierte Verbrauchsreduktionspotenziale verschiedener Technologiepakete zur Effizienzsteigerung im Lkw-Fernverkehr



Quelle: nach Delgado et al. 2017, S. 49; eigene Übersetzung

Zu beachten ist, dass dies technische Angaben zu Reduktionspotenzialen sind, die sich in der Praxis nicht voll verwirklichen lassen werden. Denn es gibt gegenläufige technische Wechselwirkungen bei der Optimierung des Kraftstoffverbrauchs, die z. B. auf Schadstoffemissionen zurückschlagen. Allen voran lässt sich ein verbesserter Wirkungsgrad der Dieselmotoren durch die Erhöhung der Verbrennungstemperatur realisieren. Das verbessert einerseits den Wirkungsgrad, führt aber unvermeidlich zu vermehrter NO_x -Bildung. Die höhere NO_x -Bildung kann durch Einsatz einer Harnstofflösung (AdBlue) reduziert werden. Allerdings entspricht der Energieaufwand für die Herstellung der Harnstofflösung dem Energieäquivalent von etwa 1,2% des Kraftstoffverbrauchs und damit verbundene THG-Emissionen entsprechen etwa 1% der CO_2 -Emissionen aus der Verbrennung des Dieselmotors im Lkw. Aus Klimaschutzpolitischer Sicht macht die Erhöhung der Verbrennungstemperatur daher nur sehr begrenzt Sinn (Schmidt et al. 2016a, S. 78).

Zusätzlich ist darauf hinzuweisen, dass die in den Abbildungen 6.4 und 6.5 angesprochenen technischen Minderungspotenziale ökonomische Aspekte nicht berücksichtigen. Die skizzierten Potenziale werden sich wohl nur bei hohen Kraftstoffkosten bzw. strengen regulatorischen Rahmensetzungen heben lassen. Dies vorausgesetzt, könnte der Kraftstoffverbrauch von heute 11,1 MJ/km (bei einem angenommenen Durchschnittsverbrauch von

Fern-Lkw von 31 l Diesel/100 km) auf 7,9 MJ/km (bei dann 22 l Diesel/100 km) im Jahr 2050 sinken (Kreyenberg et al. 2015). Das entspräche einer Reduktion von etwa 29 %.

Jenseits der Optimierung des Verbrauchsverhaltens der Motoren werden zwei weitergehende Ansatzpunkte zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs von Fern-Lkw diskutiert: der Einsatz von sogenannten Lang-Lkw und die Fortentwicklung von Automatisierungs- und Assistenzsystemen. Lang-Lkw ermöglichen eine deutliche Steigerung des Transportvolumens. Derzeit liegen die maximal zulässigen Gesamtlängen bei 18,75 m für einen Lastzug (Lkw mit Anhänger) bzw. 16,50 m für ein Sattelkraftfahrzeug. Die Gesamtlänge des Gespanns bei Lang-Lkw soll bis zu 25,25 m betragen. Sie dürfen aber nicht schwerer sein als konventionelle Lkw (maximal zulässiges Gesamtgewicht von 40 t bzw. im kombinierten Verkehr von Containern bis zu 44 t). In einem kürzlich abgeschlossenen Feldexperiment (BASt 2016) wurde ermittelt, dass der Einsatz von Lang-Lkw Kraftstoffersparnisse zwischen 15 und 25 % ermöglichen würde. Da mit zwei Fahrten eines Lang-Lkws in etwa die Transportleistung von drei Fahrten konventioneller Lkw übernommen werden könnte, würde eine vermehrte Einsatz der Lang-Lkw auch zu einer insgesamt geringeren (oder je nach Verkehrsnachfrage geringer steigenden) Anzahl an Lkw-Fahrten führen. Es wurde weiter geschätzt, dass das Potenzial für den Einsatz von Lang-Lkw etwa 3 % aller Fahrzeugkilometer entspricht, die 2014 in Deutschland von Lkw zurückgelegt wurden (BASt 2016). Bezogen auf den Gesamtkraftstoffverbrauch des Straßengüterverkehrs wären die Kraftstoffeinsparungen durch Lang-Lkw somit überschaubar (Schmidt et al. 2016a, S. 79).

Automatisierungs- und Assistenzsysteme reduzieren den Kraftstoffbedarf beim Lkw-Betrieb. Diese können unterschiedliche Funktionen übernehmen und Automatisierungsgrade umfassen. Tempomaten sind bei Fern-Lkw mittlerweile Standard. Zunehmend kommen auch adaptive Tempomaten mit GPS und Kartendaten zum Einsatz, die ihre Schaltstrategie vorausschauend an die Topologie der Route anpassen. Dabei wird bei Anstiegen eine geringere Sollgeschwindigkeit zugelassen sowie aus Gefällen heraus der Schwung im Rahmen definierter Höchstgeschwindigkeiten mitgenommen. Damit gehen leicht verringerte Durchschnittsgeschwindigkeiten einher. Im Praxistest zweier Lkw mit GPS-unterstützten Tempomaten ermittelte Lastauto Omnibus (2016, Heft 9, S. 18–25) im Standardmodus eine Verbrauchsreduktion von 7 bis 9 % bei einer um ca. 1 % niedrigeren Durchschnittsgeschwindigkeit gegenüber herkömmlichen Sollgeschwindigkeitstempomaten. Im Ökomodus sank der Verbrauch um weitere 5,7 bis 7,5 % gegenüber dem Standardmodus unter Inkaufnahme einer um weitere ca. 1 % geringeren Durchschnittsgeschwindigkeit. Der Praxistest erfolgte auf einem bergigen Autobahnteilstück der A81, sodass die erzielten Reduktionen eher das obere Ende mit adaptiven Tempomaten typisch erzielbaren Verbrauchsreduktionen darstellen (Schmidt et al. 2016a, S. 79).

Heute in Ansätzen bereits technisch im Rahmen von Fahrerassistenzsystemen im Lkw implementiert ist das sogenannte Platooning (Kolonnenfahren). Dabei folgt der Lkw sensorgestützt einem vorausfahrenden Lkw. Durch die Automatik könnte mit reduzierten Sicherheitsabständen gefahren werden. So sind ganze Kolonnen von Lkw denkbar, vergleichbar einem Güterzug auf der Autobahn. Die Fahrt im Windschatten eines voranfahrenden Lkws kann den Kraftstoffverbrauch um bis zu 11 % reduzieren; auch beim ersten und letzten Lkw in der Kolonne führt das zu Verbrauchsreduktionen, wenn auch deutlich geringer (Adolf et al. 2016). Von signifikant darüber hinaus gehenden Verbrauchsreduktionen durch (hoch)automatisiertes und vernetztes Fahren kann derzeit nicht ausgegangen werden (Schmidt et al. 2016a, S. 80).

6.3 Antriebs- und Kraftstoffalternativen für Fern-Lkw

Dieses Kapitel widmet sich den potenziellen Antriebs- und Kraftstoffalternativen für Fern-Lkw, die derzeit unter anderem vor dem Hintergrund der angestrebten Reduzierung der THG-Emissionen des Straßengüterverkehrs diskutiert werden. Dazu werden verschiedene Motorenkonzepte steckbriefartig vorgestellt. Dem vorherrschenden Dieselmotor (Kap. 6.3.1) werden der gasbetriebene Ottomotor (zur Nutzung mit algenbasiertem Methan Kap. 6.3.2) und die Antriebsalternativen Brennstoffzellen-Lkw (Kap. 6.3.3) und Lkw mit Elektromotor (Kap. 6.3.4) gegenübergestellt. Die Abschätzung der möglichen Beiträge dieser Antriebs- und Kraftstoffalternativen zur Verwirklichung eines THG-neutralen Lkw-Fernverkehrs wird in Kapitel 6.4 dargestellt.

6.3.1 Dieselmotor

Wie zuvor erwähnt, werden ungefähr 95 % aller Nutzfahrzeuge von Dieselmotoren angetrieben (Adolf et al. 2016). Tabelle 6.7 zeigt die technischen und ökonomischen Daten für heutige Diesel-Lkw auf Basis von Angaben in Lastauto Omnibus (2015) und Hendricks (2015). Der heutige Kraftstoffverbrauch beträgt zwischen 31 und 37 l Diesel/100 km Fahrstrecke, damit sind THG-Emissionen von gut 83 g CO₂-Äq./km verbunden.

Tab. 6.7 Steckbrief dieselbetriebener Fern-Lkw (Sattelzug)

Merkmal	Diesel/Dieselmotor
zulässiges Gesamt(zug)gewicht	30–44 t
Antriebssystem	Dieselmotor
Motorleistung	210–552 kW (285–750 PS)
Drehmoment	1.200–3.550 Nm
Kraftstoffverbrauch	31–37 l Diesel/100 km 11,1–13,1 MJ/km
THG-Emissionen	834 g CO ₂ -Äq./km
Reichweite je Tankfüllung	1.600–2.700 km*
Emissionsklasse	Euro VI
Investition (Mittelwert)	83.000–130.000 Euro

Quelle: Schmidt et al. 2016a, S. 81

Tab. 6.8 Annahmen zukünftiger Kraftstoffverbräuche und THG-Emissionen eines Dieselmotor-Lkws

Dieselmotor-Lkw		heute	2020	2030	2040	2050
Kraftstoffverbrauch	l/100 km	31,0	27,9	24,5	23,4	22,0
	MJ/km	11,1	10,0	8,8	8,4	7,9
THG-Emissionen	g CO ₂ -Äq./km	834	752	664	635	598

Quelle: Schmidt et al. 2016a, S. 81

Für die Fortschreibung bis 2050 wurden wahrscheinliche zukünftige Kraftstoffverbräuche aus Schmidt et al. (2016b) und Kreyenberg et al. (2015) entnommen. Tabelle 6.8 zeigt diese Modellannahmen. Demnach sinken der Kraftstoffverbrauch auf 22 l Diesel/100 km Fahrstrecke und die THG-Emissionen auf gut 600 g CO₂-Äq./km.

6.3.2 Gasbetriebener Ottomotor

Für mit Methan betriebene Lkw werden Gasmotoren eingesetzt. Gasmotoren basieren auf dem Ottozyklus und haben einen niedrigeren Wirkungsgrad und somit einen energiebezogenen Mehrverbrauch gegenüber Dieselmotoren.

Der Lkw-Hersteller IVECO bietet mit komprimiertem Erdgas (Compressed Natural Gas [CNG]) und Flüssigerdgas (Liquefied Natural Gas [LNG])²⁷ betriebene Varianten an. Messungen aus dem Betrieb einer Flotte von 120 Lkw ergab einen durchschnittlichen Verbrauch von 28 kg LNG pro 100 km, das vergleichbare Modell mit

27 Die Verflüssigung des Erdgases erfolgt durch starke Komprimierung oder Abkühlung auf -161 bis -164° C (112 bis 109 K). LNG weist nur etwa ein Sechshundertstel des Volumens von gasförmigem Erdgas auf.

Dieselmotor verbrauchte 31 l Dieselkraftstoff pro 100 km (Hendrickx 2015). Die THG-Emissionen liegen bei knapp 800 g CO₂-Äq./km.

Tab. 6.9 Steckbrief gasbetriebener Fern-Lkw mit Ottomotor

Merkmal	Methan/Ottomotor
zulässiges Gesamt(zug)gewicht	40 t
Antriebssystem	Ottomotor
Motorleistung	243 kW (330 PS)
Drehmoment	1.300 Nm
Kraftstoffverbrauch	28 kg Methan/100 km 13,8 MJ/km
THG-Emissionen	799 g CO ₂ -Äq./km
Reichweite je Tankfüllung	750–1.400 km (LNG)/300 km (CNG)
Emissionsklasse	Euro VI
Investition	125.000 Euro (LNG) 110.000–142.000 Euro (CNG)

Quelle: Schmidt et al. 2016a, S. 83

Die Variante, die mit CNG betrieben wird, kann an Bord der Zugmaschine 84 kg CNG speichern. Zusätzlich gibt es die Option, etwa 180 kg CNG im Sattelaufleger unterzubringen (TRUCKER ONLINE 2013). Die Reichweitenvorteile des LNG-betriebenen Lkw liegen im deutlichen geringeren Volumen von LNG verglichen mit CNG begründet. Tabelle 6.9 zeigt die technischen und ökonomischen Daten für heutige CNG-Lkw. Die Bandbreite für den Investitionsbedarf bei CNG-Lkw resultiert aus der Bandbreite für die Anzahl der CNG-Drucktanks.

Für die Fortschreibung bis 2050 wurden wahrscheinliche zukünftige Kraftstoffverbräuche aus Schmidt et al. (2016b) und Kreyenberg et al. (2015) entnommen. Tabelle 6.10 zeigt diese Modellannahmen. Demnach könnte bis 2050 der Kraftstoffverbrauch auf 20 kg Methan je 100 km Fahrstrecke und die THG-Emissionen auf gut 600 g CO₂-Äq./km sinken.

Tab. 6.10 Annahmen zukünftiger Kraftstoffverbräuche und THG-Emissionen eines gasbetriebenen Ottomotor-Lkws

Ottomotor-Lkw		heute	2020	2030	2040	2050
Kraftstoffverbrauch	kg CH ₄ /100 km	28	25	21	21	20
	MJ/km	13,8	12,1	10,2	10,1	10,0
THG-Emissionen	g CO ₂ -Äq./km	799	707	602	597	591

Quelle: Schmidt et al. 2016a, S. 84

6.3.3 Brennstoffzelle

In einer Brennstoffzelle reagiert Wasserstoff mit Sauerstoff unter Energiefreisetzung zu Wasser. Als Energiequelle muss daher Wasserstoff zur Verfügung stehen. Als Rohstoffe können Erdgas (bes. Methan), andere Kohlenwasserstoffe, Biomasse, Wasser und andere wasserstoffhaltige Verbindungen eingesetzt werden. Da die zur Wasserstofferzeugung notwendige Energie aus erneuerbaren Quellen zugeführt werden kann, ist theoretisch ein Nullemissionsbetrieb von Brennstoffzellenfahrzeugen möglich (Schmidt et al. 2016a, S. 87).

Erste Prototypen von Brennstoffzellen-Lkw mit einem zulässigen Gesamtzuggewicht von 36 t wurden in den USA gebaut (GNA 2012; US Hybrid 2015). In einer Studie aus den Niederlanden (den Boer et al. 2013) zu Nullemissionsfahrzeugen wurden unter anderem Brennstoffzellen-Lkw untersucht. Für 2012 wurde der Kraftstoffverbrauch für einen Brennstoffzellen-Lkw mit 2,92 kWh Wasserstoff pro km (8,76 kg Wasserstoff/100 km) angegeben.²⁸ Da angenommen wird, dass der Wasserstoff THG-neutral bereitgestellt wird, fallen keine THG-Emissionen an. Tabelle 6.11 zeigt weitere Daten für Brennstoffzellen-Lkw auf Basis von Herstellerangaben (US Hybrid 2015) und der Studie von den Boer et al. (2013).

Der prognostizierte zukünftige Kraftstoffverbrauch der Brennstoffzellentechnologie ist in Tabelle 6.12 dargestellt. Wie bei den Diesel-Lkw kann der Kraftstoffverbrauch durch bessere Aerodynamik und rollwiderstandsärmere Reifen gesenkt werden (Kreyenberg et al. 2015; Schmidt et al. 2016b).

Tab. 6.11 Steckbrief Brennstoffzellen-Lkw

Merkmal	Brennstoffzellen-Lkw (US Hybrid 2015)		Brennstoffzellen-Lkw (den Boer et al. 2013)
	Standard	Option	
zulässiges Gesamt(zug)gewicht	36 t		40 t
Leistung Brennstoffzelle	80 kW		300 kW
Leistung Elektromotor	320 kW/435 PS		350 kW/476 PS
Kraftstoffverbrauch	6,0 kg H ₂ /100 km		8,8 kg H ₂ /100 km
	7,2 MJ/km		10,5 MJ/km
H ₂ -Speicherkapazität	19,29 kg	38,56 kg	87,6 kg
Reichweite	320 km	640 km	1000 km
Investition	210.000 Euro	240.000 Euro	440.000 Euro

Quelle: Schmidt et al. 2016a, S. 86, auf Basis von US Hybrid 2015 und den Boer et al. 2013

²⁸ Der Kraftstoffverbrauch eines vergleichbaren Diesel-Lkw wurde mit 35 l Diesel/100 km angenommen, was etwa 350 kWh/100 km entspricht.

Tab. 6.12 Annahmen zukünftiger Kraftstoffverbräuche und THG-Emissionen eines Brennstoffzellen-Lkw

Brennstoffzellen-Lkw		heute	2020	2030	2040	2050
Kraftstoffverbrauch	kg H ₂ /100 km	6,2	6,0	5,8	5,4	4,9
	MJ/km	7,4	7,2	7,0	6,5	5,9
THG-Emissionen	g CO ₂ -Äq./km	0	0	0	0	0

Quelle: nach Schmidt et al. 2016a, S. 87

6.3.4 Elektromotor

Elektromobilität wird als wesentliche Komponente eines THG-neutralen Verkehrs angesehen (z. B. SRU 2017). Im Gegensatz zu elektrisch betriebenen Pkw ergeben sich für batterieelektrische Fahrzeuge mit ausreichenden Reichweiten für den Güterfernverkehr (mindestens 600 bis 800 km) aufgrund der benötigten Batteriekapazität, die mit hohen Kosten und einem hohen Zusatzgewicht einhergeht, außer in Sonderanwendungen allerdings keine praktikable Fahrzeugkonfiguration (Kasten et al. 2016). Daher entstanden Vorschläge, Oberleitungen über Autobahnen zu bauen, um schwere Lkw mit Elektromotoren zu betreiben.

Im Bergbau werden elektrisch betriebene, über Oberleitung mit Strom versorgte schwere Nutzfahrzeuge schon seit Jahrzehnten eingesetzt. Minenfahrzeuge haben dabei Antriebsleistungen von 2.000 bis 6.500 kW. In Schweden wurde darüber hinaus die Machbarkeit einer 160 km langen Oberleitungsstrecke zu einem Eisenerzbergwerk untersucht, um Eisenerz zu transportieren (den Boer et al. 2013). Jahrzehntelange Erfahrungen gibt es auch bei Oberleitungsbussen.

Im Rahmen von Pilotprojekten im Hafengebiet von Los Angeles und Long Beach wurde der Einsatz von Oberleitungs-Lkw für die Hafenlogistik getestet (GNA 2012). Auch in Deutschland existiert eine Teststrecke, die im Rahmen des Forschungsprojekts »eHighway« von Siemens gebaut wurde. Siemens, Scania und Volvo entwickeln Oberleitungs-Lkw. Der Oberleitungs-Lkw von Siemens ist mit einem Dieselmotor mit 350 kW für Fahrten außerhalb des Oberleitungsnetzes, mit einem Elektromotor mit 200 kW und Kondensatoren als Kurzzeitspeicher ausgerüstet. Es handelt sich folglich um ein Hybridfahrzeug. Da angenommen wird, dass der zugeführte Strom aus erneuerbaren Energien stammt, ist der elektrische Betrieb der Fahrzeuge emissionsfrei (den Boer et al. 2013). Tabelle 6.13 zeigt die technisch-ökonomischen Daten.

Tab. 6.13 Steckbrief elektrisch-betriebener Oberleitungs-(Diesel-Hybrid-)Lkw

Merkmale	Elektro-Diesel-Hybrid-Lkw
zulässiges Gesamt(zug)gewicht	40 t
Leistung Dieselmotor	300 kW (408 PS)
Leistung Elektromotor	200 kW (272 PS)
Speicherkapazität Batterie	166 kWh
Kraftstoffverbrauch im Dieselbetrieb	34 l/100 km 12,7 MJ/km
THG-Emissionen im Dieselbetrieb	822 CO ₂ -Äq./km
Stromverbrauch im Strombetrieb	2,21 kWh/km 8,0 MJ/km
Investition	190.000 Euro

Quelle: nach Schmidt et al. 2016a, S. 88, mit Daten von den Boer et al. 2013

Für die Abschätzung zukünftiger Kraftstoffverbräuche wird wie bei den Diesel-Lkw angenommen, dass der Endenergieverbrauch durch bessere Aerodynamik und rollwiderstandsärmere Reifen zukünftig gesenkt werden kann. Zudem wird angenommen, dass der Lkw für Fahrten außerhalb des Oberleitungsnetzes zukünftig über eine Batterie mit Strom versorgt werden kann. Die Batterie kann an einer Ladestation für Elektrofahrzeuge aufgeladen werden. Es ist folglich kein Dieselmotor mehr installiert und der Betrieb erfolgt vollständig emissionsfrei (Schmidt et al. 2016a, S. 88). Die Prognosen zum zukünftigen Energieverbrauch von Oberleitungs-Lkw auf Basis von Kreyenberg et al. (2015) sind in Tabelle 6.14 dargestellt.

Tab. 6.14 Annahmen zukünftiger Energieverbräuche und THG-Emissionen eines Oberleitungs-Lkw

Oberleitungs-Lkw		heute	2020	2030	2040	2050
Energieverbrauch	kWh/km	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
	MJ/km	5,0	4,7	4,4	4,2	3,9

Quelle: Schmidt et al. 2016a, S. 88

6.4 Modellierung verschiedener Antriebs- und Kraftstoffalternativen für einen THG-neutralen Lkw-Verkehr

Im Rahmen des TAB-Projekts führten Schmidt et al. (2016a, S. 114 ff.) eine umfangreiche Modellierung verschiedener Kraftstoff- und Antriebsalternativen für Fern-Lkw durchgeführt. Dabei wurde unter anderem der Einsatz von algenbasiertem Biodiesel in Dieselmotoren und von Algenmethan in gasbetriebenen Ottomotoren in die Untersuchung einbezogen. Zusätzlich wurden alternative strombasierte Energieversorgungsoptionen berücksichtigt, die synthetischen Kraftstoff erzeugen. Dabei können unter Energieeinsatz Diesel und Methan gewonnen werden (Kap. 4.1.4 zur Biomass-to-Liquid-Kraftstoffen, die nach ähnlichem Prinzip erstellt werden). Folglich werden sie als Power-to-Liquid-Diesel (PtL-Diesel) oder Power-to-Gas-Methan (PtG-Methan) bezeichnet. Da die notwendige Energie aus erneuerbaren Quellen stammen kann, kann zumindest die Synthese der Kraftstoffe THG-neutral erfolgen. In der Verbrennung der Kraftstoffe im Fahrzeug fallen allerdings THG-Emissionen und weitere Schadstoffemissionen an. Als weitere Optionen wurden Brennstoffzellen-Lkw, die mit Power-to-Gas-Wasserstoff (PtG-Wasserstoff) betrieben werden und durch erneuerbare Energien betriebene Oberleitungs-Lkw in die Analyse einbezogen.

Die Modellierung soll den Umfang an THG-Minderungen abschätzen, der durch den (steigenden) Einsatz der verschiedenen Antriebs- und Kraftstoffalternativen bis zum Jahr 2050 möglich wäre (Kap. 6.4.3). Zusätzlich werden der für das Versorgungsniveau im Jahr 2050 nötige Flächenbedarf für die Algenanlagen oder die Installation für Windenergie und Photovoltaikanlagen zur Gewinnung der erneuerbaren Energie für Kraftstoffsynthese oder Oberleitungsstrom dargestellt.

6.4.1 Grundannahmen der Modellierung

Für die Abschätzung des Energiebedarfs für den Lkw-Fernverkehr im Jahr 2050 wird auf die in Kapitel 6.1 vorgestellten Szenarien zurückgegriffen. Dabei wird das Szenario der höchsten Transportleistung (»LBST 2050« nach Schmidt et al. 2016b) und das Szenario mit der geringsten Transportleistung (»eMobil 2050« nach Hacker et al. 2014) herangezogen. Tabelle 6.15 zeigt die für die Jahre 2020 und 2050 zu bewältigende Transportleistung. Dabei wurden die Angaben von Tonnenkilometer in Streckenkilometer umgerechnet (Schmidt et al. 2016a, S. 98).

Tab. 6.15 Prognosen der Transportleistung im Straßengüterverkehr für die Modellierung

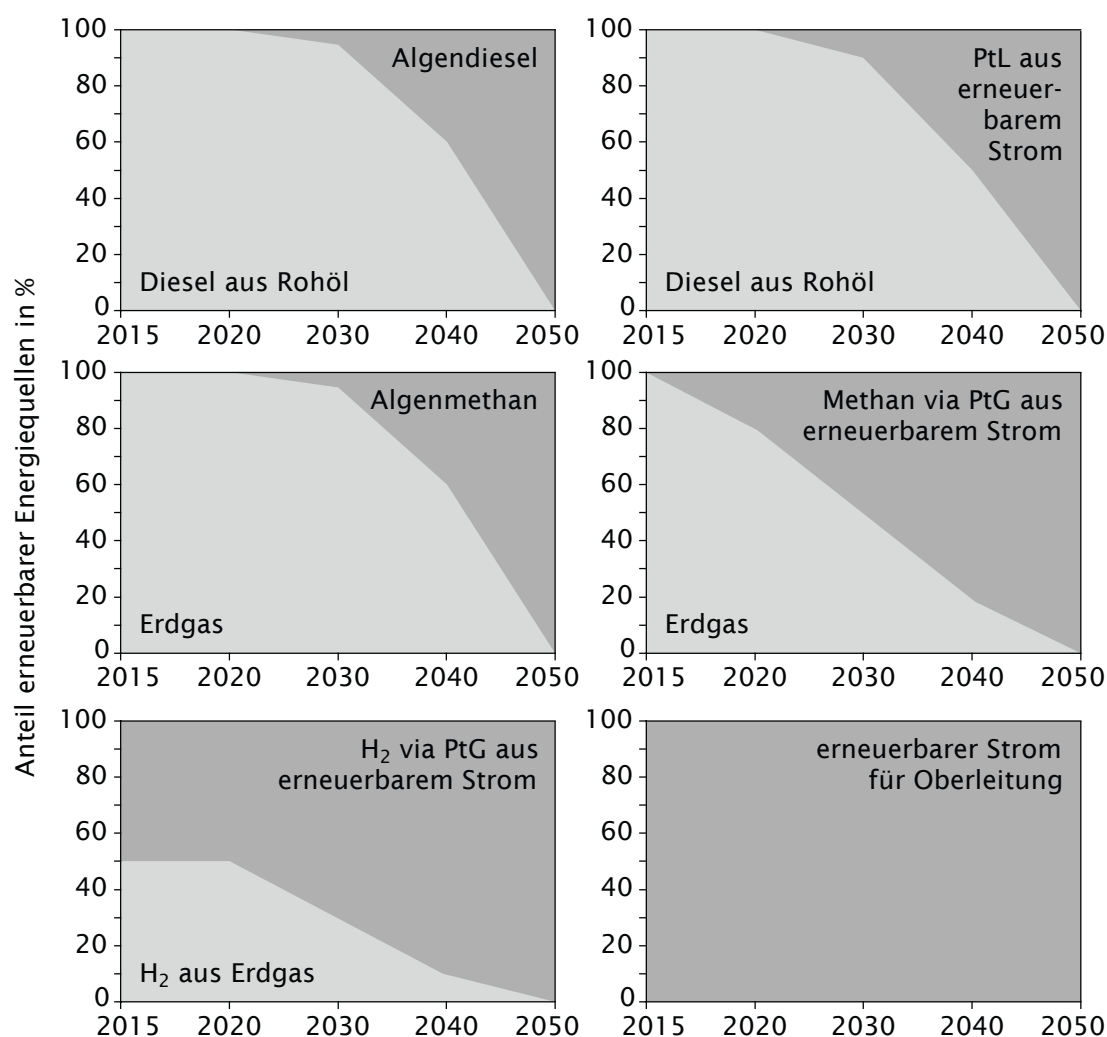
Transportleistung	2020	2050
e-Mobil 2050	18,6 Mrd. km	9,9 Mrd. km
LBST 2050	21,4 Mrd. km	32,5 Mrd. km

Eigene Zusammenstellung nach Schmidt et al. 2016a, S. 98

Die Kraftstoffnachfrage wird in der Zukunft zunehmend durch Kraftstoffe auf Basis erneuerbarer Energiequellen gedeckt. Ziel ist eine auf 100 % erneuerbarer Energiequellen basierende Kraftstoffversorgung im Jahr 2050. Abbildung 6.6 zeigt den zeitlichen Verlauf der Einführung der hier betrachteten verschiedenen erneuerbaren Kraftstoffe. Je nach Kraftstoff ist die gegenwärtige erreichte Technologiereife und verfügbare Produktionskapazität unterschiedlich.

Um die Potenziale der einzelnen Kraftstoffpfade separat analysieren zu können, wurde jeweils angenommen, dass die Einführung von Algendiesel, Algenmethan und PtL-Diesel nach 2020 beginnt, um 2050 einen Anteil von 100 % am Energiebedarf des Lkw-Fernverkehrs zu erreichen. Dies ist vor dem Hintergrund des zuvor beschriebenen frühen Stands der Technologieentwicklung bei der Gewinnung von Algenlipiden zur Kraftstoffherstellung eine optimistische Annahme. Bei PtG-Methan sind bereits heute erste Anlagen in Betrieb. Für das Szenario mit PtG-Methan wurde daher angenommen, dass ab heute Anlagen zugebaut werden, bis 2050 ein Anteil von 100 % am Methanbedarf der schweren Lkw erreicht wird. Bei Wasserstoff wird bereits heute mindestens 50 % aus erneuerbaren Energiequellen bezogen. Für das Szenario wird angenommen, dass beginnend mit einem Anteil von 50 % der Anteil von PtG-Wasserstoff am Wasserstoffbedarf für den Verkehr auf 100 % im Jahr 2050 gesteigert wird. Der Anteil von Wasserstoff aus Erdgas sinkt von heute 50 % auf null bis 2050. Bei Strom für Oberleitungs-Lkw wird angenommen, dass dieser zu 100 % erneuerbar erzeugt wird, da die anfänglich nachgefragten Strommengen gering sind und prinzipiell ohne Weiteres von Anfang an durch Zubau von EE-Stromerzeugungsanlagen gedeckt werden können.

Abb. 6.6 Annahmen zu den Zeitpfaden der Einführung alternativer Kraftstoffe



Quelle: nach Schmidt et al. 2016a, S. 126

6.4.2 Annahmen zu einzelnen erneuerbaren Kraftstoffalternativen

Für die Abschätzung der durch den Einsatz verschiedener Antriebs- und Kraftstoffalternativen möglichen THG-Minderungen wurden durch LBST (2016, S. 18 ff.) auf Grundlage der verfügbaren Literatur Annahmen hinsichtlich der Entwicklung der THG-Emissionen getroffen.

Algenbasierter Dieselkraftstoff

Für algenbasierten Dieselkraftstoff sind die entsprechenden Annahmen in Tabelle 6.16 dargestellt. Für die Modellierung wurde auf Daten der Metastudie von Davis et al. (2012) zurückgegriffen, in der mehrere Lebenszyklusanalysen für die Produktion von Algenlipiden in Open Ponds in den USA und deren Weiterverarbeitung zu HEFA-Diesel (Kap. 4.1.2) verglichen wurden. Dabei sind zwei verschiedene Varianten unterschieden worden: einmal ein Betrieb über 9 Monate im Jahr, der die Wintermonate auslässt und einmal ein Betrieb über das ganze Jahr. Zwar könnte mit Winterbetrieb der Anlage eine höhere Jahresproduktion realisiert werden, dies geht aber zu Lasten der THG-Bilanz des erzeugten Kraftstoffes.

Tab. 6.16 Annahmen zur THG-Bilanz, Energieverbrauch und Flächenertrag der Produktion von algenbasiertem Diesel

Variante	kein Winterbetrieb	mit Winterbetrieb
Jahresproduktionskapazität	125.000 t HEFA-Diesel	142.000 t HEFA-Diesel
Energieeinsatz		
erneuerbar (Algenbiomasse)	2,55 MJ/MJ Diesel	2,55 MJ/MJ Diesel
erneuerbar (Prozessenergie)	0,17 MJ/MJ Diesel	0,21 MJ/MJ Diesel
nichterneuerbar (Prozessenergie)	0,68 MJ/MJ Diesel	0,83 MJ/MJ Diesel
THG-Bilanz	63,9 g CO ₂ -Äq./MJ	78,1 g CO ₂ -Äq./MJ
Flächenertrag	231 GJ Diesel/ha/a	263 GJ Diesel/ha/a

Quelle: nach Schmidt et al. 2016a, S. 36, auf Grundlage von Davis et al. 2012

Für die Abschätzung der zukünftigen THG-Bilanz von Algendiesel wurde angenommen, dass künftig die gesamte benötigte Prozessenergie aus erneuerbaren Quellen stammt. Die verbleibenden THG-Emissionen resultieren dann nur noch aus der Bereitstellung von Düngemitteln, Prozesschemikalien und von Transporten, bei denen noch fossile Brennstoffe eingesetzt werden (z. B. mit Schiffen) sowie den Methanverlusten aus der Biogasanlage bei der Herstellung des Algendiesels über diesen Prozessweg (Tab. 6.16). Tabelle 6.17 zeigt die der Modellierung zugrundeliegenden Annahmen.

Tab. 6.17 Annahmen zukünftiger Energieverbräuche und THG-Emissionen von Algendiesel

Algendiesel	2020	2030	2040	2050
Verbrauch erneuerbarer Energien	2,61 MJ/MJ Diesel	2,95 MJ/MJ Diesel	2,95 MJ/MJ Diesel	2,95 MJ/MJ Diesel
Verbrauch nichterneuerbarer Energien	0,79 MJ/MJ Diesel	0,17 MJ/MJ Diesel	0,17 MJ/MJ Diesel	0,17 MJ/MJ Diesel
THG-Emissionen	63,9 CO ₂ -Äq./MJ	20,0 CO ₂ -Äq./MJ	20,0 CO ₂ -Äq./MJ	20,0 CO ₂ -Äq./MJ

Quelle: Schmidt et al. 2016a, S. 38

Algenmethan

Als Vergleichsvariante wurde zudem die Erzeugung von Methan aus (Makro-)Algenbiomasse in die Modellierung einbezogen. Dabei wurde auf Angaben der Analyse von Alvarado-Morales et al. (2013) zur Nutzung von Seegrass zurückgegriffen, um den Energiebedarf und die THG-Emissionen für die Bereitstellung von Algenmethan abzuleiten. Die Studie fokussiert auf die Nutzung von Makroalgen, da diese unter den klimatischen Bedin-

gungen im Betrachtungsgebiet (Dänemark) eine energetisch interessante Alternative zur Verwendung von Biomasse aus Mikroalgen darstellt.²⁹ Betrachtet wurde die Produktion von Strom mit einem Gasmotor-Blockheizkraftwerk, das Biogas aus Algen als Brennstoff verwendet.

Nach der Anzucht der Algen unter kontrollierten Bedingungen in einer speziellen Anlage an Land erfolgt die Produktion der Algenbiomasse danach an im Meer aufgespannten Seilen. Die abgeerntete Algenbiomasse wird über Schiff und dann Lkw zum Standort der Biogasanlage transportiert. Die nach anaerober Vergärung zu Biogas verbleibende Biomasse wird als Dünger verwendet.

Tabelle 6.18 zeigt die Annahmen der für die Erzeugung von Algenmethan aufzuwendenden Energie und der THG-Bilanz, die in die Modellierung eingeflossen sind. Die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der Algenmethanerzeugung ist aufgrund der äußerst geringen Verfügbarkeit entsprechender wissenschaftlicher Literatur nur mit stark vereinfachenden Annahmen möglich. Im Zuge der LBST-Modellierung wurden die THG-Emissionen für die Erzeugung von Algenmethan auf den laut Richtlinie 2009/28/EG notwendigen THG-Wert von 33,5 g CO₂-Äq./MJ festgelegt (Tab. 6.19).

Tab. 6.18 Annahmen zur THG-Bilanz, Energieverbrauch und Flächenertrag der Produktion von algenbasiertem Biomethan

Variante	kein Winterbetrieb
Methanausbeute	133 m ³ /t Trockensubstanz
Energieeinsatz	
erneuerbar (Algenbiomasse)	6,55 MJ/MJ CH ₄
erneuerbar (Prozessenergie)	0,14 MJ/MJ CH ₄
nichterneuerbar (Prozessenergie)	1,19 MJ/MJ CH ₄
THG-Bilanz	87,2 g CO ₂ -Äq./MJ
Flächenertrag	132 GJ Diesel/ha/a

Quelle: nach Schmidt et al. 2016a, S. 41, auf Grundlage von Alvarado-Morales et al. 2013

Tab. 6.19 Annahmen zukünftiger Energieverbräuche und THG-Emissionen von Algenmethan

Algenmethan	2020	2030	2040	2050
Verbrauch erneuerbarer Energien	6,99 MJ/MJ CH ₄	7,06 MJ/MJ CH ₄	7,06 MJ/MJ CH ₄	7,06 MJ/MJ CH ₄
Verbrauch nichterneuerbarer Energien	1,19 MJ/MJ CH ₄	0,88 MJ/MJ CH ₄	0,88 MJ/MJ CH ₄	0,88 MJ/MJ CH ₄
THG-Emissionen	96,7 CO ₂ -Äq./MJ	33,5 CO ₂ -Äq./MJ	33,5 CO ₂ -Äq./MJ	33,5 CO ₂ -Äq./MJ

Quelle: Schmidt et al. 2016a, S. 43

²⁹ Die Zucht von Makroalgen im Meer ist allerdings umstritten. Einerseits werden erhebliche Risiken mit Blick auf eine Störung der Meeresökosysteme durch das Einbringen teils gentechnisch veränderter Algen vermutet (Katsanevakis et al. 2016), andererseits machen die nur schwer kontrollierbaren Wachstumsbedingungen im Meer (Temperatur, Nährstoffangebot) eine systematische Nutzung der Algenbiomasse schwer kalkulierbar (Kap. 3.2.2).

Strombasierte Kraftstoffe

Für die strombasierten Kraftstoffe (PtL-Diesel, PtG-Methan, Wasserstoff für Brennstoffzellen-Lkw, Strom für Oberleitungs-Lkw) erfolgt hier nur eine gestraffte Darstellung hinsichtlich der zu erwartenden THG-Minderungen (Tab. 6.20). Details sind dem Gutachten von LBST (2016, S.43 ff.) zu entnehmen.

Tab. 6.20 Annahmen zukünftiger Energieverbräuche und THG-Emissionen von strombasierten Kraftstoffalternativen

strombasierte Kraftstoffalternative	2020	2030	2040	2050
<i>PtL-Diesel</i>				
Verbrauch erneuerbarer Energien	2,16 MJ/MJ	1,92 MJ/MJ	2,25 MJ/MJ	2,25 MJ/MJ
Verbrauch nicht-erneuerbarer Energien	0,01 MJ/MJ	0,01 MJ/MJ	0,01 MJ/MJ	0,01 MJ/MJ
THG-Emissionen	1,0 CO ₂ -Äq./MJ	0,9 CO ₂ -Äq./MJ	0,7 CO ₂ -Äq./MJ	0,6 CO ₂ -Äq./MJ
<i>PtG-Methan</i>				
Verbrauch erneuerbarer Energien	2,05 MJ/ MJ CH ₄	1,82 MJ/ MJ CH ₄	1,91 MJ/ MJ CH ₄	1,92 MJ/ MJ CH ₄
Verbrauch nicht-erneuerbarer Energien	0,04 MJ/ MJ CH ₄	0,02 MJ/ MJ CH ₄	0,01 MJ/ MJ CH ₄	0,01 MJ/ MJ CH ₄
THG-Emissionen	2,6 CO ₂ -Äq./MJ	1,7 CO ₂ -Äq./MJ	0,8 CO ₂ -Äq./MJ	0,4 CO ₂ -Äq./MJ
<i>Wasserstoff</i>				
Verbrauch erneuerbarer Energien	1,86 MJ/MJ	1,74 MJ/MJ	1,64 MJ/MJ	1,64 MJ/MJ
Verbrauch nicht-erneuerbarer Energien	0,03 MJ/MJ	0,03 MJ/MJ	0,03 MJ/MJ	0,03 MJ/MJ
THG-Emissionen	0,2 CO ₂ -Äq./MJ	0,2 CO ₂ -Äq./MJ	0,2 CO ₂ -Äq./MJ	0,2 CO ₂ -Äq./MJ
<i>Oberleitungsstrom</i>				
Verbrauch erneuerbarer Energien	1,28 MJ/MJ	1,28 MJ/MJ	1,28 MJ/MJ	1,28 MJ/MJ
Verbrauch nicht-erneuerbarer Energien	0 MJ/MJ	0 MJ/MJ	0 MJ/MJ	0 MJ/MJ
THG-Emissionen	0 CO ₂ -Äq./MJ	0 CO ₂ -Äq./MJ	0 CO ₂ -Äq./MJ	0 CO ₂ -Äq./MJ

Quelle: Schmidt et al. 2016a, S. 53, 59, 60 u. 63

Bei PtL-Diesel und PtG-Methan handelt es sich um synthetische Kraftstoffe, die aus erneuerbarem Strom und Kohlendioxid (CO₂) hergestellt werden. Für die Modellierung wurde angenommen, dass hierzu aus erneuerbarem Strom zunächst über Wasserelektrolyse Wasserstoff erzeugt wird. Anschließend wird der erzeugte Wasserstoff mit CO₂ zu den gewünschten flüssigen oder gasförmigen Kohlenwasserstoffen umgesetzt. Für die Herstellungsverfahren wird eine im Zeitverlauf zunehmend günstigere THG-Bilanz unterstellt. Geringfügige THG-

Emissionen resultieren auch aus dem Betrieb der Tankstelle, deren Strombedarf mit Strom aus dem Stromnetz gedeckt wird.

Auch für den beim Brennstoffzellenbetrieb notwendigen Wasserstoff wird angenommen, dass dieser über die Elektrolyse von Wasser gewonnen wird. Besonderheit ist dabei, dass die Wasserstofferzeugung vor Ort an der Tankstelle erfolgt und damit ein Transport des Kraftstoffs nicht erforderlich ist. Für den Betrieb der Elektrolyseanlage und der Tankstelle wird ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energiequellen verwendet. Geringfügige THG-Emissionen resultieren aus der Bereitstellung von Hydrauliköl für die Kompressoren, das in regelmäßigen Abständen gewechselt werden muss.

Wie in Kapitel 6.3.4 dargestellt, wird für die Versorgung mit Strom über Oberleitung angenommen, dass die benötigte Energie vollständig aus erneuerbaren Quellen bereitgestellt wird. Für den notwendigen Infrastrukturausbau wird angenommen, dass bis 2020 10 % der Autobahnen in Deutschland elektrifiziert sind und für 2050 das gesamte Autobahnnetz in Deutschland. Tabelle 6.20 fasst die Annahmen für die Modellierung zu den verschiedenen strombasierten Kraftstoffalternativen zusammen.

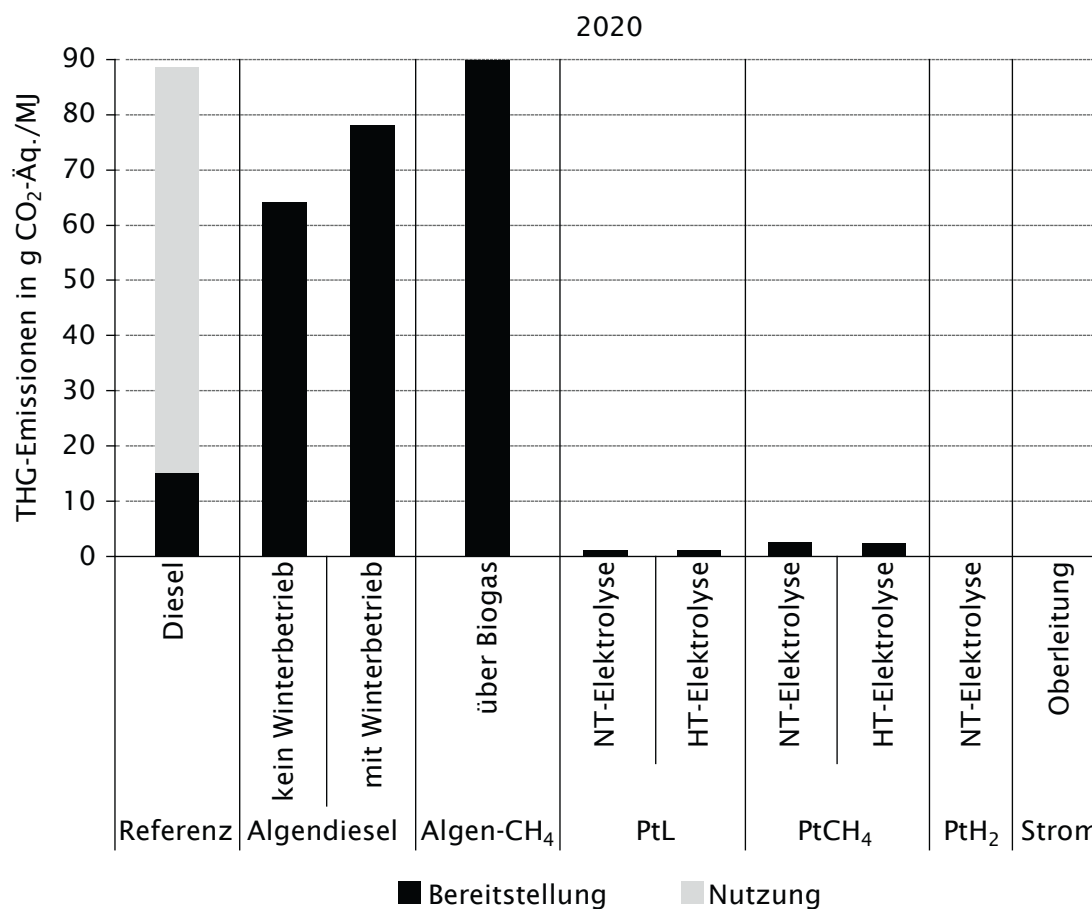
Grafischer Vergleich der THG-Emissionen einzelner Antriebs- und Kraftstoffalternativen

Die Abbildungen 6.7 und 6.8 zeigen grafisch die THG-Emissionen aus der Bereitstellung und Nutzung (Verbrennung) verschiedener erneuerbarer Kraftstoffe im Vergleich zu Diesel aus konventionellem Rohöl für die Zeithorizonte 2020 und 2050.

Die Verbrennung erneuerbarer Kraftstoffe ist THG-neutral, da nur so viel THG emittiert werden, wie bei der Bereitstellung aus der Atmosphäre entzogen wurde. Daher sind nur die THG-Emissionen aus der Bereitstellung relevant. Wie bereits zu den Nachhaltigkeitswirkungen algenbasierter Kraftstoffe (Kap. 5.3) gezeigt, würden Algenkraftstoffe derzeit nur geringe THG-Minderungen gegenüber fossilem Diesel bieten (Abb. 6.7). 2050 würden im günstigsten Fall erhebliche THG-Minderungen möglich sein (Abb. 6.8). Dies verdeutlicht nochmal das grundsätzliche Potenzial algenbasierter Kraftstoffe, unterstreicht aber die Notwendigkeit weiterer technologischer Fortschritte. Algenbasierter Diesel schneidet im Vergleich zu Algenmethan für beide Zeithorizonte besser ab.

Ein THG-neutraler Lkw-Fernverkehr kann mit Algenkraftstoffen in dieser Modellierung aber nicht erreicht werden, da insbesondere die Herstellung der notwendigen Düngemittel bzw. die Ernte der Makroalgen für die Methanerzeugung per Schiff weitere THG-Emissionen verursacht. Hier schneiden die strombasierten Kraftstoffalternativen deutlich besser ab, da unterstellt wird, dass sämtliche Energie zur Kraftstoffsynthese, Wasserstoffgewinnung bzw. Stromerzeugung nahezu THG-neutral aus erneuerbaren Quellen gewonnen werden kann. Aufgrund des im Vergleich zum Dieselmotor höheren Wirkungsgrads von elektrischen Antrieben (Brennstoffzellen-Lkw und Oberleitungs-Lkw) liegt der Primärenergieeinsatz nochmals unter dem von mit PtL-Diesel bzw. PtG-Methan betriebenen Lkw. Zudem ergeben sich in den Verbrennungsmotoren Emissionen von Methan und Stickstoffoxiden, die die THG-Bilanz schmälern.

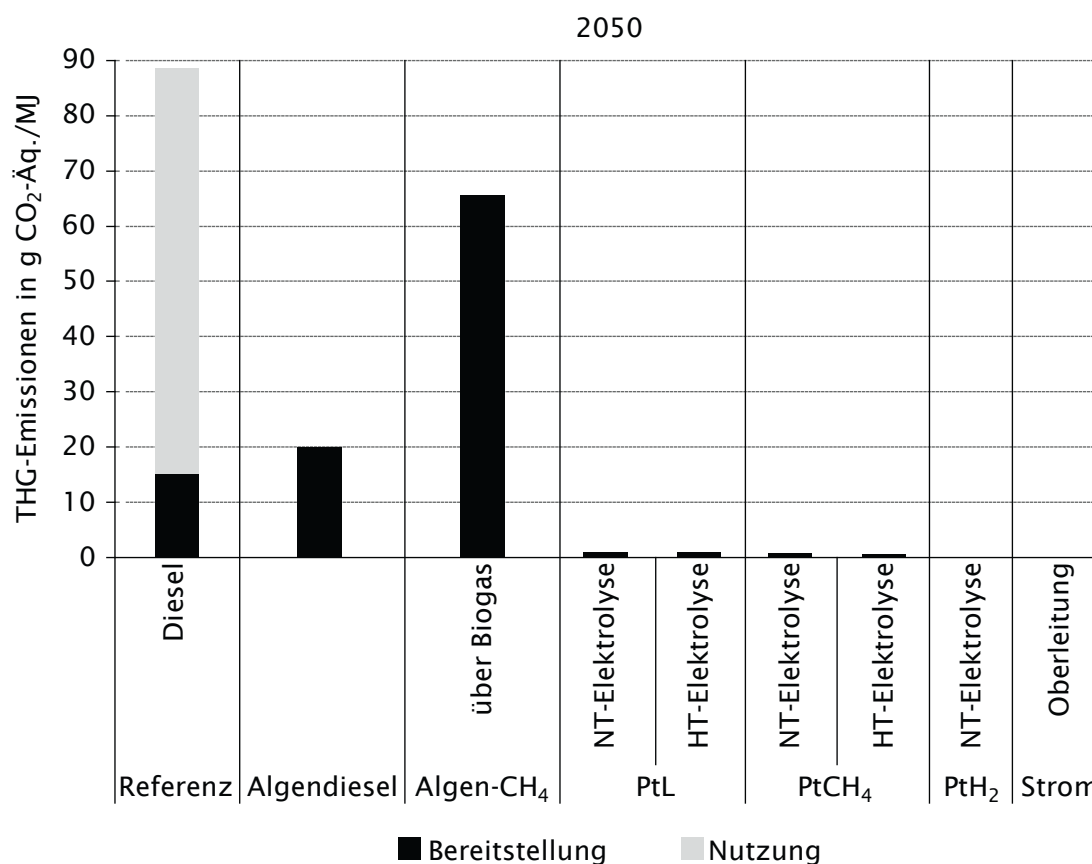
Abb. 6.7 THG-Emissionen aus der Bereitstellung und Nutzung verschiedener Kraftstoffe 2020



HT = Hochtemperatur; NT = Niedertemperatur; PtL = Power to Liquid;
 PtCH₄ = Power to Methane; PtH₂ = Power to Hydrogen;
 Verbrennung Biokraftstoff = CO₂-neutral

Quelle: nach Schmidt et al. 2016a, S. 66

Abb. 6.8 THG-Emissionen aus der Bereitstellung und Nutzung verschiedener Kraftstoffe 2050



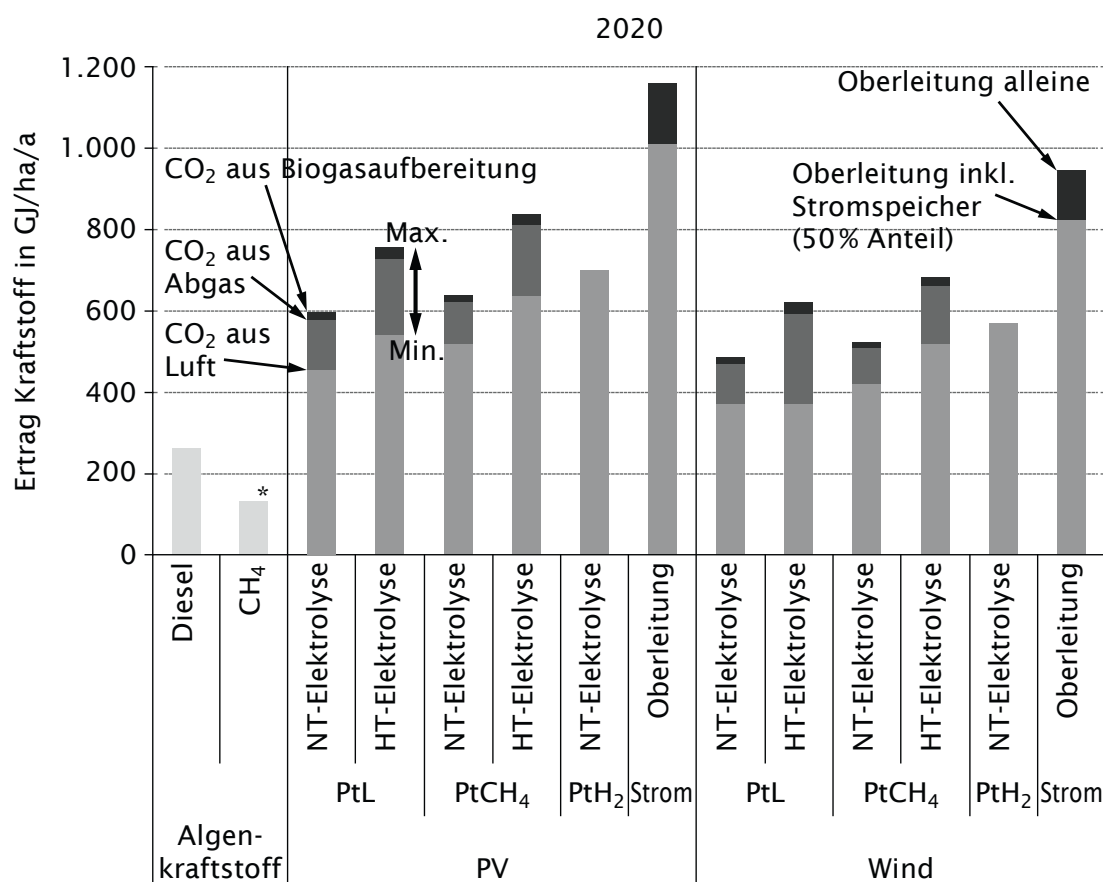
HT = Hochtemperatur; NT = Niedertemperatur; PtL = Power to Liquid;
 PtCH₄ = Power to Methane; PtH₂ = Power to Hydrogen;
 Verbrennung Biokraftstoff = CO₂-neutral

Quelle: verändert nach Schmidt et al. 2016a, S. 67

Grafischer Vergleich des Flächenbedarfs einzelner Antriebs- und Kraftstoffalternativen

Die Abbildungen 6.9 und 6.10 zeigen den Kraftstoffenergieertrag pro ha und Jahr in den Jahren 2020 und 2050. Bei den strombasierten Kraftstoffalternativen wurde zudem danach unterschieden, ob die benötigte Energiemenge aus Photovoltaikanlagen (PV) oder Windkraft (Wind) gewonnen würde. Aufgrund der höheren flächenspezifischen Energieerzeugung durch Photovoltaikanlagen ist der Kraftstoffenergieertrag höher, als beim Einsatz von Windenergie.

Abb. 6.9 Kraftstofferträge pro ha und Jahr 2020



* Fläche im Meer

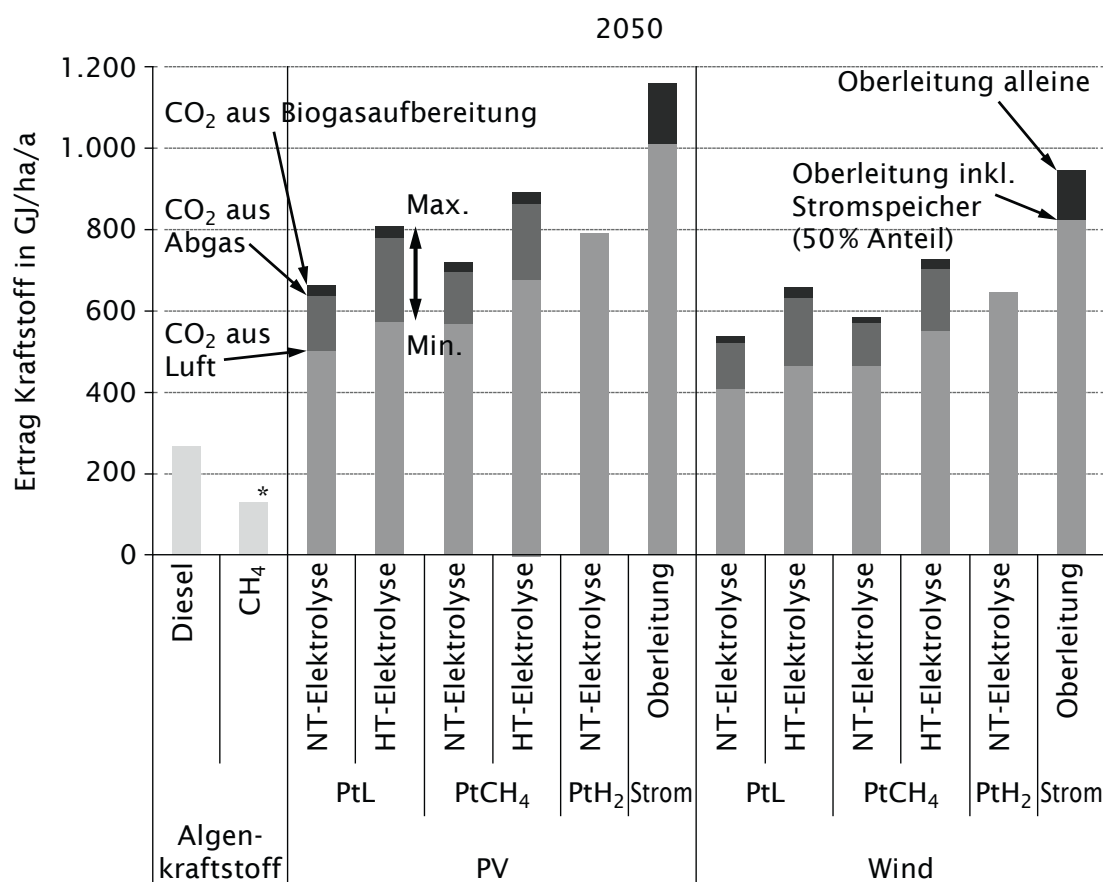
HT = Hochtemperatur; NT = Niedertemperatur; PtL = Power to Liquid;

PtCH₄ = Power to Methane; PtH₂ = Power to Hydrogen; Erträge für Algendiesel für Standort in sonnenreichen Regionen, z.B. Südspanien, ohne Berücksichtigung des Strombedarfs für die Alganlage

Quelle: nach Schmidt et al. 2016a, S. 69

Es zeigt sich, dass algenbasierte Kraftstoffe trotz ihrer gegenüber Biokraftstoffen der 1. Generation deutlich höheren Flächenproduktivität (Kap. 5.1) den strombasierten Alternativen unterlegen sind. Dies gilt für beide Zeitschnitte und auch unabhängig davon, welche Art der Energie für die Erzeugung der strombasierten Kraftstoffe verwendet wird.

Abb. 6.10 Kraftstofferträge pro ha und Jahr 2050



* Fläche im Meer

HT = Hochtemperatur; NT = Niedertemperatur; PtL = Power to Liquid;
PtCH₄ = Power to Methane; PtH₂ = Power to Hydrogen; Erträge für Algendiesel für Standort in sonnenreichen Regionen, z.B. Südspanien, ohne Berücksichtigung des Strombedarfs für die Algenanlage

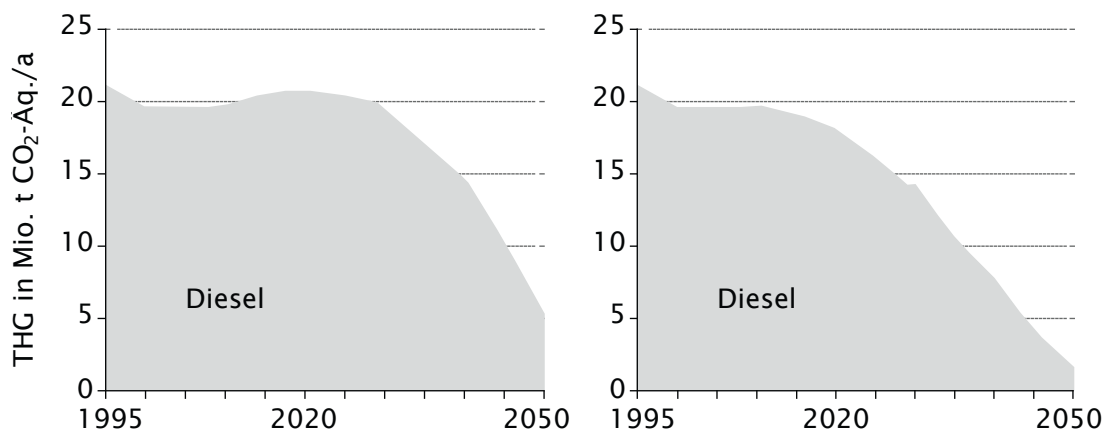
Quelle: Schmidt et al. 2016a, S. 70

6.4.3 THG-Minderungsleistung durch Einsatz der Antriebs- und Kraftstoffalternativen im Jahr 2050

Verbindet man nun die zuvor getroffenen Annahmen zur Entwicklung der Verkehrsnachfrage mit den Szenarien zur Technologiedurchsetzung (Kap. 6.4.1) und den eben beschriebenen Annahmen hinsichtlich des THG-Minderungspotenzials der einzelnen Kraftstoffalternativen (Kap. 6.4.2) lassen sich Abschätzungen anstellen, inwieweit durch einzelne Antriebs- und Kraftstoffalternativen eine THG-neutrale Gestaltung des Lkw-Fernverkehrs möglich wäre (Schmidt et al. 2016a, S. 127 ff.).

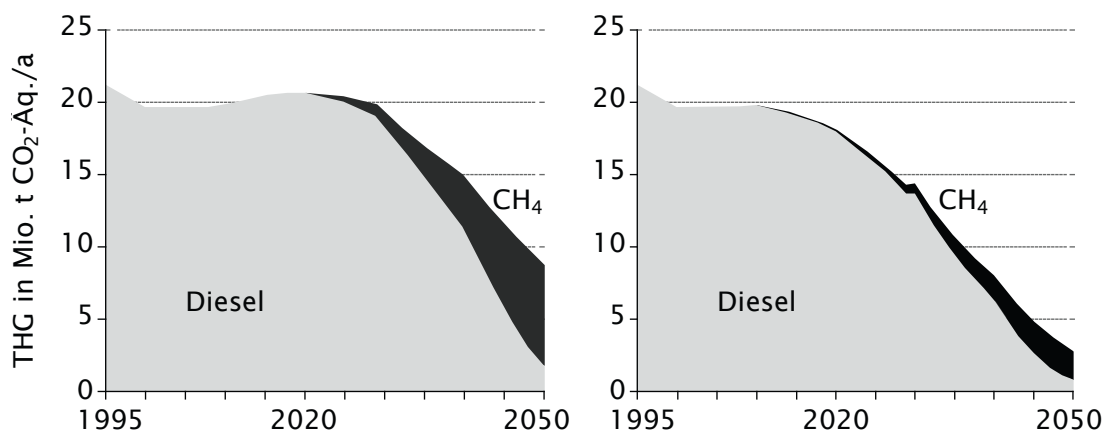
Die Abbildung 6.11 zeigt die möglichen THG-Minderungen aus der Einführung von algenbasiertem Diesel für die Szenarien »hohe Verkehrsnachfrage« (links) und »niedrige Verkehrsnachfrage« (rechts). Dabei zeigt sich, dass insbesondere in der Zeit nach Beginn der angenommenen Etablierung der Algenkraftstoffproduktion im Jahr 2020 die verfügbaren Mengen nicht ausreichen, um die THG-Bilanz des Fernverkehrs zu verbessern.

Abb. 6.11 Reduzierung der THG-Emissionen bis 2050 bei der Einführung algenbasierten Diesels und unterschiedlicher Verkehrsnachfrage



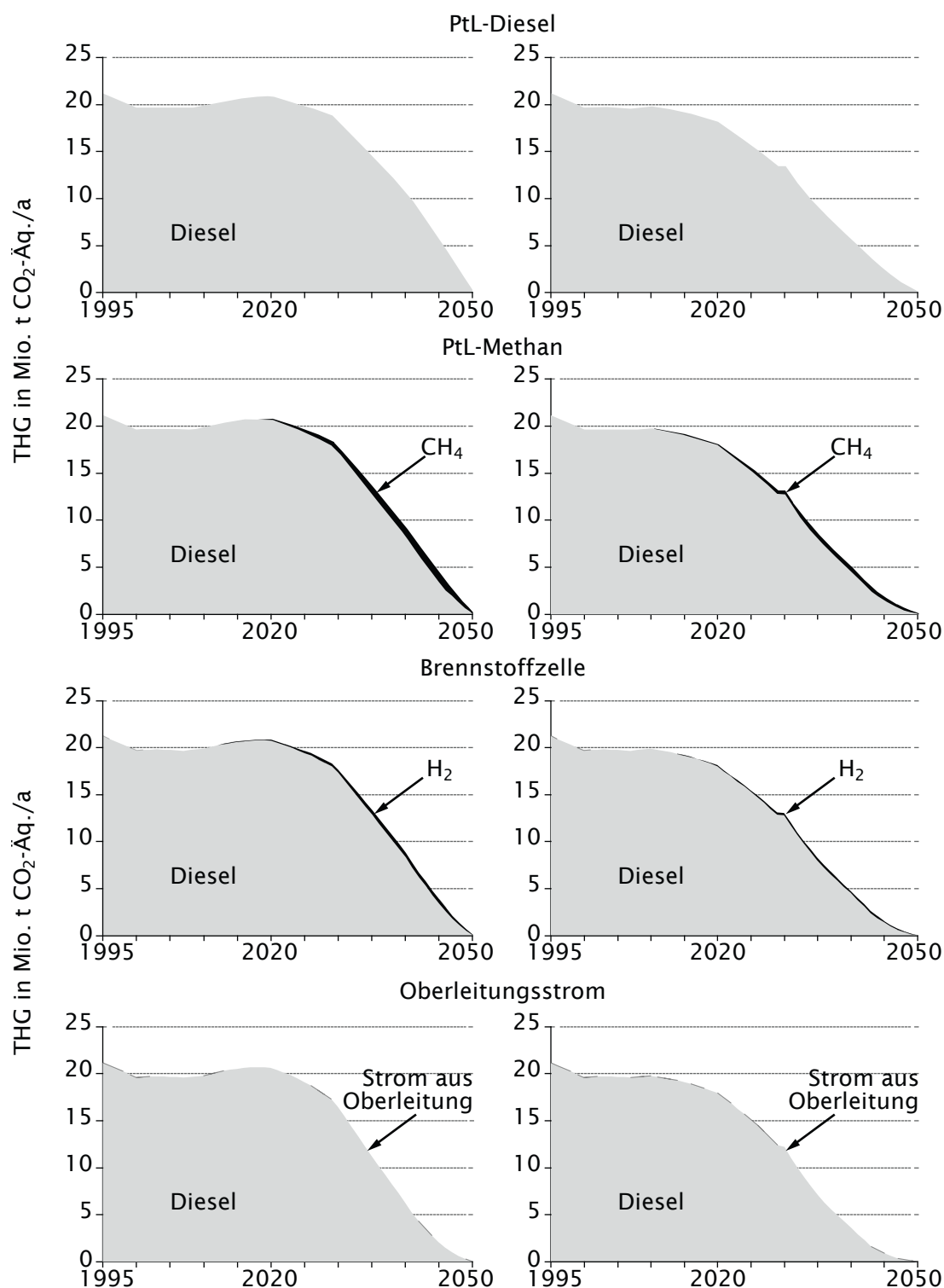
Quelle: nach Schmidt et al. 2016a, S. 128

Abb. 6.12 Reduzierung der THG-Emissionen bis 2050 bei der Einführung von Algenmethan und unterschiedlicher Verkehrsnachfrage



Quelle: nach Schmidt et al. 2016a, S. 129

Abb. 6.13 Reduzierung der THG-Emissionen bis 2050 bei der Einführung strombasierter Kraftstoffe und unterschiedlicher Verkehrsnachfrage



Quelle: Schmidt et al. 2016a, S. 130-133

Die über die Algenkraftstoffe eingesparten THG-Emissionen werden durch den Anstieg der Verkehrsleistung überkompensiert. Für den weiteren Zeitablauf bis 2050 wird zudem deutlich, dass keine THG-Neutralität erreicht werden kann: Bei hoher Verkehrsnachfrage wäre mit Algendiesel eine Reduktion der THG-Emissionen um etwa 73 % gegenüber heute möglich, bei niedriger Verkehrsnachfrage um etwa 92 %.

Die Abbildung 6.12 zeigt die mögliche Reduktion der THG-Emissionen des Verkehrs bei der Einführung von Algenmethan. Hier befindet sich auch 2050 noch ein gewisser Anteil an Diesel-Lkw auf dem Markt, da die Umstellung auf gasbetriebene Ottomotor-Lkw nur zeitverzögert erfolgt. Für die Berechnung wurde davon ausgegangen, dass die Diesel-Lkw 2050 mit algenbasiertem Diesel betrieben werden. Bei hoher Verkehrsnachfrage ist mit den Algenkraftstoffen nur eine Reduktion der THG-Emissionen um etwa 55 % gegenüber heute möglich, bei niedriger Verkehrsnachfrage immerhin um 87 %. Die im Vergleich zum Dieselszenario (Abb. 6.11) insgesamt niedrigere Reduktion an THG-Emissionen resultiert aus dem höheren spezifischen Kraftstoffverbrauch der gasbetriebenen Lkw.

Die Abbildung 6.13 zeigt die modellierte THG-Minderung bis 2050, wenn strombasierte Kraftstoffe zum Einsatz kommen. Gemeinsam ist allen Alternativen, dass eine vollständige THG-Neutralität bis 2050 erreicht werden kann. Die Geschwindigkeit der Anpassung ist unterschiedlich, da die verschiedenen Alternativen unterschiedlich schnell in den Markt eingebracht werden können. Dies lässt sich auf das zeitliche Wachstum der bereitstellbaren Kraftstoffmengen, der Notwendigkeit zum Austausch der Fahrzeuge (z. B. statt Diesel-Lkw gasbetriebene oder Brennstoffzellen-Lkw) und Anforderungen des Infrastrukturausbaus (z. B. Oberleitungen, Tankstellen) zurückführen. Auch ist zu erkennen, dass bei allen Kraftstoffalternativen im Szenario mit hoher Verkehrsnachfrage zunächst eine Erhöhung der THG-Emissionen stattfindet.

6.5 Herausforderungen für die Umstellung des Lkw-Fernverkehrs auf alternative Antriebe bzw. Kraftstoffe

Wie zuvor gezeigt, ist es theoretisch möglich, den Lkw-Fernverkehr bis zum Jahr 2050 THG-neutral zu gestalten. Für die Einführung alternativer Kraftstoffe gerade für Lkw bestehen aber erhebliche technische und ökonomische Barrieren, die überwunden werden müssen. Aufgrund der besonderen Energiebedarfe für große Reichweiten setzen die über Jahrzehnte optimierten Lkw-Motoren Grenzen für die Kraftstoffsubstitution. Das betrifft auch die bestehende Versorgungsinfrastruktur (Tankstellen, Raffinerien, Pipelines etc.) für alternative Antriebs- und Kraftstoffkonzepte (z. B. gas- oder strombetriebene Motoren). Bei der Suche nach Lösungsansätzen für die THG-Verringerungen sind solche sogenannte Lock-in-Effekte verschiedener Technologien und der mit ihr verbundenen Infrastruktur mit zu bedenken.

Fernverkehr-Lkw-Fahrer tanken oftmals an eigenen Betriebstankstellen oder entlang ihrer Fahrtroute an Autobahntankstellen oder Autohöfen³⁰. Das Netz der Bundesautobahnen verfügt über rund 350 Autobahntankstellen (bei ca. 14.000 Tankstellen in Deutschland insgesamt) (Statista 2016) sowie etwa 65 Autohöfe. Basierend auf einer Autobahngesamtlänge von rund 13.000 km (Statista 2016) besteht damit im Mittel alle 31 km eine Betankungsmöglichkeit für den Fernverkehr. Bei flüssigen Kraftstoffen (Algendiesel und synthetisch erzeugter PtL-Diesel) kann auf diese existierende Infrastruktur zurückgegriffen werden. Auch die Anschlussfähigkeit an die Infrastruktur im Ausland ist hier gegeben. Bei Methan, Wasserstoff und Strom für Oberleitungs-Lkw sieht es anders aus. Die anfänglichen Kosten für die Markterschließung für alternative Kraftstoffinfrastrukturen sind hoch. In jedem Fall birgt der Aufbau bedarfsgerechter Infrastrukturen für nicht im Massenmarkt etablierte Kraftstoffe erhebliche Risiken für diejenigen, die als sogenannte First Mover investieren (BMVBS 2013).

Zahlreiche Untersuchungen beschäftigen sich mit verfügbaren Kraftstoffalternativen für den Straßengüterverkehr. In den 2000er Jahren lag der Schwerpunkt der Diskussion um alternative Kraftstoffe beim (schweren) Lkw insbesondere auf Biodiesel/FAME. Anfang der 2010er Jahre rückten zwei andere Technologielines stärker in den Fokus: zum einen die Elektrifizierung von Antriebssystemen auch beim schweren Lkw, zum anderen der Einsatz von verflüssigtem Methan. Mittlerweile wurden Kraftstoff- und Antriebsoptionen für den schweren Lkw untersucht. Die Gemengelage an Vor- und Nachteilen der verschiedenen Optionen ist für den schweren Lkw im Fernverkehr recht heterogen, dass sich derzeit noch kein klares Bild abzeichnet. Allerdings wird klar, dass es inzwischen einige plausible Alternativen zu etablierten Antriebs- und Kraftstoffsystemen gibt. Tabelle 6.21 schätzt vor diesem Hintergrund die technische Eignung verschiedener Antriebs- und Kraftstoffalternativen für Fahrzeuge des Straßengüterverkehrs ein.

Ohne den zügigen Aufbau einer leistungsfähigen Tank- bzw. Ladeinfrastruktur für alternative Kraftstoffe wird die Energiewende im Verkehrsbereich nicht gelingen. Die Umsetzung der Richtlinie 2014/94/EU³¹ dient dem notwendigen Infrastrukturhochlauf (BMVI 2016). Angesichts der Verflechtungen auf dem europäischen Markt und des Anteils ausländischer Lkw an der Transportleistung in Deutschland wird die Kompatibilität der deut-

30 <https://www.autohof.de/ueber-die-veda.html>

31 Richtlinie 2014/94/EU über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe

schen Kraftstoffinfrastruktur mit der Lkw-Struktur auch der europäischen Nachbarstaaten an Bedeutung gewinnen. Umgekehrt wird die Einführung eines klimaneutralen Kraftstoffes umso bedeutender, je besser auch ausländische Fahrzeuge hierfür gerüstet sind.

Tab. 6.21 Technische Eignung alternativer Antriebe und Kraftstoffe im Straßenverkehr

Kraftstoff	Antrieb	Straßengüterverkehr		
		urban	regional	fern
Strom	Oberleitung	+	--	+
	Batterie	+	-	--
Wasserstoff	Brennstoffzelle	++	++	0
Benzin/Diesel	Verbrennungsmotor	++	++	++
Methan (gasförmig)	Verbrennungsmotor	++	++	+
Methan (flüssig)	Verbrennungsmotor	0	+	++

++ sehr gut geeignet, + gut geeignet, 0 prinzipiell geeignet, - wenig geeignet, -- nicht geeignet

Quelle: Schmidt et al. 2016a, S. 20, aufbauend auf Rumpke et al. 2011

Die Richtlinie 2014/94/EU macht nur für flüssiges Erdgas (LNG) klare Vorgaben für eine europäisch einheitliche Tankinfrastruktur auch für Lkw. Das BMVI (2016) kündigt in seinem nationalen Strategierahmen über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe an, die Initiierung eines LNG-Tankstellengrundnetzes entlang des Transeuropäischen Verkehrs-Kernnetzes zu unterstützen. So soll mit wenigen Standorten ein paneuropäischer Verkehr von LNG-Lkw ermöglicht werden.

Für komprimiertes Erdgas und elektrisches Laden werden in der Richtlinie 2014/94/EU für den grenzüberschreitenden Betrieb zwischen den EU-Mitgliedstaaten nur Pkw und leichte Nutzfahrzeuge verbindlich adressiert. Für Wasserstoff wird die grenzüberschreitende Kompatibilität nur zwischen den EU-Mitgliedstaaten gefordert, die für Wasserstoff als Fahrzeugkraftstoff optieren und ist – wie im Fall CNG – nur auf leichte Fahrzeuge beschränkt. Dass für CNG, E-Laden und Wasserstoff keine schweren Nutzfahrzeuge genannt werden, liegt vermutlich daran, dass sich die Ersteller dieses Regelwerks einen solchen Einsatz noch nicht vorstellen konnten. Auch für elektrischen leitungsgebundenen Schwerlastverkehr (z. B. Oberleitungs-Lkw) ist in der Richtlinie nichts vorgesehen.

Würde die Richtlinie 2014/94/EU nur so umgesetzt, wie bisher angedacht, wäre schrittweise nur flüssiges Erdgas (LNG) als Kraftstoff für Lkw EU-weit verfügbar. Derzeit ist davon auszugehen, dass angesichts ihrer anfänglichen Unterauslastung und ohne einen verpflichtenden Rahmen absehbar keine alternativen Kraftstoffinfrastrukturen für eine Deutschland- und EU-weite Fahrfähigkeit privatwirtschaftlich errichtet werden. Dies würde sowohl den grenzüberschreitenden Betrieb von CNG- als auch Wasserstoffbrennstoffzellen-Lkw unmöglich machen. Da nicht auszuschließen ist, dass künftig auch Lkw mit diesen Kraftstoffen und ausreichenden Reichweiten betrieben werden können, besteht hier perspektivisch Änderungsbedarf dieser Richtlinie.

6.6 Fazit

Schwere Lkw mit hohen Fahrleistungen stellen einen potenziell großen Hebel dar, einen wichtigen Beitrag zur Energiewende im Verkehrssektor zu leisten. Es handelt sich um vergleichsweise wenige Fahrzeuge, was innovative Technologiewechsel erleichtert. Mit einem derzeitigen Anteil von etwa 35 % der THG-Emissionen des Verkehrs insgesamt ist der Straßengüterverkehr auch wesentlich im Kontext der Klimaneutralität bis 2050.

Nach den hier dargelegten Untersuchungsergebnissen lässt sich sagen, dass eine Reduktion der THG-Emissionen um mehr als 95 % bei den betrachteten Pfaden nur mit strombasierten Kraftstoffen möglich ist. Obgleich

für den Betrieb der Algenanlagen erneuerbarer Strom und erneuerbare Wärme eingesetzt wurden, erreichen die betrachteten Algenpfade nur eine Reduktion der THG-Emissionen um 55 bis 87 %. Sollen höhere THG-Minderungen erzielt werden, so müssten bei Algenkraftstoffen darüber hinaus auch die Bereitstellung der Düngemittel bzw. der Betrieb der Schiffe für die Ernte der Meeresalgen vollständig auf Basis erneuerbarer Energien erfolgen.

Aufgrund des im Vergleich zu Biokraftstoffen höheren Wirkungsgrads bei der Kraftstoffherzeugung und des damit verbundenen niedrigen Flächenbedarfs weisen strombasierte Kraftstoffe auch das größte Mengenpotenzial auf. Bei PtL-Diesel kann auf die existierende Tankstelleninfrastruktur für Dieselkraftstoff zurückgegriffen werden. Bei PtL-Diesel sind jedoch wie bei Methan keine Nullemissionsantriebe möglich. Auch ist der Bereitstellungsnutzungsgrad von PtL-Diesel niedriger als bei PtG-Methan und PtG-Wasserstoff.

Der höchste Wirkungsgrad ließe sich durch eine direkte Nutzung von Strom im Oberleitungs-Lkw erzielen. Das trifft auch dann noch zu, wenn angenommen wird, dass für Fahrten außerhalb des Oberleitungsnetzes ein Teil des Stroms in Batterien zwischengespeichert wird. Man benötigt jedoch eine aufwendige Oberleitungsinfrastruktur an Autobahnen, die exklusiv nur für Fern-Lkw und eventuell Fernbusse verwendet werden kann.

Je niedriger die zukünftige Entwicklung der Verkehrsnachfrage, umso weniger hoch können die Anforderungen an die spezifische THG-Minderung alternativer Kraftstoffe ausfallen. Je höher das Verkehrswachstum ausfällt, desto höher müssen auch die spezifischen THG-Minderungen der eingesetzten alternativen Kraftstoffe ausfallen. Ist THG-Neutralität das erklärte Ziel, so kommen hierfür nur Kraftstoffoptionen infrage, die robust (d. h. hinsichtlich Quantität und Qualität) THG-neutral hergestellt werden können. Sind hierfür neue Antriebssysteme notwendig (Oberleitung, Batterie, Brennstoffzelle), so ist deren Einführung zeitnah zu beginnen und konsequent über die Zeit zu verfolgen, da anderenfalls die Herausforderungen größer werden, eine vollständige Flottendurchdringung zu einer gegebenen Zeit (z. B. bis 2050) zu erreichen.

7 Resümee und Handlungsoptionen

Für die Erreichung der Klimaschutzziele Deutschlands ist eine substanzielle Verringerung der CO₂-Emissionen unumgänglich. Auch der Verkehrssektor muss hierzu seinen Beitrag leisten. Neben veränderten Mobilitätskonzepten sind daher Kraftstoff- und Antriebsalternativen erforderlich, die benötigte Verkehrsleistungen mit reduzierten THG-Emissionen ermöglichen. Vor diesem Hintergrund wurde sich mit dem Potenzial von Mikroalgen als Ausgangsstoff für die Produktion von Biokraftstoffen zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs beschäftigt.

Erzeugung und Nutzung von Mikroalgen für die Biokraftstoffproduktion befinden sich zumeist noch in einer frühen Forschungs- und Entwicklungsphase. Abschätzungen zu potenziell erzeugbaren Mengen von algenbasierten Biokraftstoffen sowie den damit verbundenen Nachhaltigkeitswirkungen basieren auf daher nicht auf Erfahrungswerten, sondern auf modellgestützten Überlegungen oder der Hochrechnung der Ergebnisse kleinskaliger Pilotanlagen. Entsprechenden Unsicherheiten unterliegen die hier dargestellten Ergebnisse. Nichtsdestotrotz lässt sich eine Reihe von Schlussfolgerungen und Handlungsoptionen ableiten. Diese betreffen die Bedeutung algenbasierter Biokraftstoffe für die Energieversorgung des Straßengüterverkehrs mit Blick auf das Ziel eines weitgehend THG-neutralen Verkehrssektors in Deutschland bis zum Jahr 2050 (Kap. 7.1), die Nutzung von Algenbiomasse in Bioraffinerien (Kap. 7.2) sowie die vordringlichen Felder der Förderung von Forschung und Entwicklung (Kap. 7.3).

7.1 Bedeutung algenbasierter Biokraftstoffe für einen klimaneutralen Lkw-Verkehr

Biokraftstoffe aus Mikroalgen bieten das theoretische Potenzial, durch die Substitution von Dieselmotoren aus fossilen Ressourcen THG-Minderungen im Straßengüterverkehr zu ermöglichen. Gegenüber Biokraftstoffen aus ackerbaulich erzeugten Energiepflanzen (Biokraftstoffe der 1. Generation) zeichnen sich algenbasierte Biokraftstoffe durch eine Reihe potenzieller Vorzüge aus. So ließen sich Landnutzungskonflikte mit der Erzeugung anderer landwirtschaftlicher Produkte (z. B. Nahrungsmittel) vermeiden und Energie- und Kraftstoffherstellung auch auf nicht landwirtschaftlich nutzbaren Flächen (z. B. Brachen oder Konversionsflächen) realisieren. Zudem könnten durch eine bessere Nutzung und Umsetzung der zugeführten (Sonnen-)Energie und der Nährstoffe für das Wachstum der Algenbiomasse höhere Flächenproduktivitäten gegenüber der Biomasseerzeugung durch konventionelle Energiepflanzen realisiert werden. Dies könnte auch Konflikte mit anderen gesellschaftlichen Zielen wie dem Naturschutz abmildern.

Allerdings existieren derzeit keine Anlagen zur Erzeugung von Algenbiomasse in einem für die Kraftstoffproduktion relevanten Umfang. Auch zeigt die Analyse des Forschungsstandes, dass eine baldige großtechnische Realisierung der Erzeugung algenbasierter Kraftstoffe wenig wahrscheinlich ist. Abschätzungen zur THG-Bilanz von Algenkraftstoffen ergeben bei einer Bandbreite gegenwärtig plausibler Annahmen keine wesentliche Einsparung an CO₂-Emissionen gegenüber konventionellen fossilen Kraftstoffen. Klar ist, dass für eine großtechnische und aus Nachhaltigkeitsaspekten sinnvolle Realisierung der Erzeugung algenbasierter Kraftstoffe wesentliche Fortschritte insbesondere hinsichtlich deren Energie- und THG-Bilanz erforderlich sind. Die gezieltere Auswahl von Algenarten sowie Prozessinnovationen bei der Extrahierung der Inhaltsstoffe bzw. bei der Weiterverarbeitung zu Kraftstoffen sind hier Ansatzpunkte.

Der Vergleich mit anderen Kraftstoffen hat gezeigt, dass die Herausforderungen vor allem bei der Produktion der Algenbiomasse bestehen. In technischer Hinsicht gibt es zwar auch auf der Kraftstoffproduktionsseite noch spezifischen Entwicklungsbedarf für den Einsatz von aus Mikroalgen gewonnenen Ausgangsstoffen. Der eigentliche Engpass ist jedoch die für eine Kraftstoffproduktion notwendige Massenproduktion von Algen. Dabei zeigen Abschätzungen zu den theoretischen Produktionspotenzialen, dass mit der Menge an Algenbiomasse, die unter den in Deutschland herrschenden Bedingungen auf den zur Verfügung stehenden Flächen erzeugt werden könnte, lediglich ein geringer Anteil des Kraftstoffbedarfs in Deutschland gedeckt werden könnte.

Zusammenfassend kann daher festgehalten werden, dass ein spürbarer Beitrag zur Verbesserung der THG-Bilanz des Straßengüterverkehrs bis 2050 von algenbasierten Biokraftstoffen nicht erwartet werden kann.

Aus Sicht von Schmidt et al. (2016a) sind daher vielmehr strombasierte Antriebskonzepte für die Erreichung eines THG-neutralen Verkehrs unausweichlich. Entsprechend äußert sich auch der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen in seinem Verkehrsgutachten (SRU 2017). Die für die Einführung und Verbreitung strombasierter Mobilität notwendige (Weiter-)Entwicklung von Antriebs- und Energieversorgungssystemen (Oberlei-

tung, Batterie, Brennstoffzelle) ist zeitnah anzustreben, da andernfalls die Herausforderungen für eine vollständige Flottendurchdringung bis zum Zielzeitraum 2050 immer größer werden (Schmidt et al. 2016a, S. 134). Der Einsatz synthetischer Kraftstoffe sowie begrenzter Mengen nachhaltig erzeugter Biokraftstoffe sollte dagegen auf jene Einsatzbereiche beschränkt bleiben, in denen eine direkte Elektrifizierung technisch oder ökonomisch nicht realisierbar ist (z. B. im Luft- und Seeverkehr).

7.2 Entwicklung von Bioraffineriekonzepten

Angesichts der Bemühungen der Bundesregierung zur Etablierung einer Bioökonomie sind Algen als nachwachsende Ressourcen durch ihre potenziell hohe Produktivität und geringe Nutzungskonkurrenz mit landwirtschaftlichen Flächen auch jenseits einer Nutzung für Biokraftstoffe interessant. Um das grundsätzlich vorhandene Potenzial von Algen als nachwachsendem Rohstoff zu heben, wird zunehmend die Entwicklung kommerzieller Produktionsanlagen für Algen unabhängig von einer möglichen Kraftstoffproduktion diskutiert (Quinn/Davis 2015). Algenkraftstoffe wären dann eher Zusatzprodukt eines umfassenderen Bioraffinerieansatzes (Laurens et al. 2017; Roux et al. 2017; Yen et al. 2013). Bioraffinerien zeichnen sich durch ein integratives und multifunktionelles Gesamtkonzept aus, bei denen biologische Ressourcen als Rohstoffquelle für die nachhaltige Erzeugung unterschiedlicher Zwischen- und Endprodukte (Chemikalien, Werkstoffe, Bioenergie) unter möglichst vollständiger Verwendung aller Rohstoffkomponenten genutzt werden (TAB 2016).

Eine zentrale Herausforderung bei der Entwicklung von Bioraffineriekonzepten besteht darin, dass viele der zur Verfügung stehenden Verfahren und Technologien zur Konversion biogener Rohstoffe in wirtschaftlich konkurrenzfähige Produkte aktuell nicht wettbewerbsfähig sind. Bioraffinerien, die eine umfassende Verwertung biogener Rohstoffe, wie z. B. Algen, in ein breites Spektrum biobasierter Produkte erzielen und die in bestehende Prozess- und Wertschöpfungsketten etablierter Anwenderindustrien einfließen können, stehen erst am Anfang ihrer Entwicklung. Zur Etablierung und Marktdurchdringung integrierter Bioraffinerien sind umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig. Hierfür ist die öffentliche Förderung innovativer Anlagenkonzepte hilfreich, so wie sie nun durch die »Technologie-Initiative Bioraffinerien« im Rahmen der »Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030« des BMBF begonnen wurde (die Richtlinie wurde im August 2018 geändert und erweitert; <https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-1974.html>).

Mit Bezug auf die Wettbewerbsfähigkeit und die Erhöhung der Wertschöpfung von algenbasierten Bioraffineriekonzepten sollte der Fokus weiterhin auf die Inwertsetzung von Hochpreisprodukten aus Algen (z. B. für Lebensmittel, Nahrungsergänzungs- oder auch Kosmetikprodukte) – jedoch bei gleichzeitiger Verwertung der Nebenprodukte und Reststoffe für die Kraftstoffproduktion (z. B. bestimmte Algenöle oder andere Algenreststoffe nach Abtrennung wertschöpfender Produkte für den Hochpreissektor) – gelegt werden. Mit einem solchen Vorgehen wird die Hoffnung verbunden, dass durch steigende Produktionskapazitäten für Algenbiomasse auch Technologien zur Herstellung algenbasierter Biokraftstoffe vorangetrieben und Exportmöglichkeiten von deutschen Technologien und Anlagen für die Kultivierung, Gewinnung und Weiterverarbeitung von Mikroalgenbiomasse eröffnet werden (Kröger et al. 2016, S. 71).

7.3 Förderung von Forschung und Entwicklung

Die Prozesskette von der Algenproduktion bis zur Produktion des Kraftstoffes ist vielgliedrig und komplex. Das führt zu vielen unbekannten Variablen und in wissenschaftlichen Projekten oft dazu, sich auf Teilbereiche der Prozesskette zu konzentrieren (Kröger et al. 2016, S. 11). Dabei wird insbesondere die Schnittstelle zwischen Algenproduktion und Algenkonversion bei den Forschungen zu wenig berücksichtigt. Angesichts des noch frühen Technologiestadiums algenbasierter Biokraftstoffe besteht daher an vielen Stellen Forschungs- und Optimierungsbedarf, der die wirtschaftliche Rentabilität und die ökologischen Auswirkungen der Algenkraftstoffproduktion verbessern würde.

7.3.1 Kontinuierliche Förderung und Zugänglichkeit von Forschungsergebnissen

Forschungsförderungen und -projekte wie auch Technikentwicklungen zu Algen und anderen nachwachsenden Rohstoffen für die Kraftstoffproduktion waren bislang oft Zyklen ausgesetzt, die sich an den volatilen Rohölmärkten orientierten. Höhenflüge der Rohölpreise haben immer wieder zu Investitionen und Anstrengungen in Forschung und Entwicklung geführt, die dann aber schnell wieder zurückgefahren wurden, sobald die Energiepreise

sanken und damit Biokraftstoffe am Markt nicht mehr konkurrenzfähig waren.³² Dies führte oftmals dazu, dass wertvolles Know-how und Expertise verloren ging, die später mühsam wieder aufgebaut werden musste. Eine kontinuierliche und langfristig orientierte Forschungsförderung würde die Gefahr technologischer Fadenrisse bannen.

Dass in den bisherigen Forschungs- und Entwicklungsprojekten erhobene Daten bislang teilweise nicht oder nur eingeschränkt zugänglich sind, erweist sich als Hemmschuh für zukünftige Fortschritte.³³ Zumindest im Falle zukünftiger öffentlich geförderter Vorhaben sollten auch detaillierte Ergebnisse veröffentlicht werden, insbesondere die zugrundeliegenden Basisdaten wie Anlagenspezifikationen, Stoff- sowie Energieflüsse.³⁴

7.3.2 Algenselektion und genetische Modifikation

Schätzungen zufolge gibt es mehr als 70.000 Mikroalgenarten (Guiry 2012), von denen nur wenige Algenarten bislang wirtschaftlich genutzt werden. Nicht alle Algen können die Öle in Mengen und Qualitäten produzieren, die auch für die Biokraftstoffproduktion geeignet sind. Daher wird in der wissenschaftlichen Literatur oft ein erhebliches Potenzial für die Steigerung der Effizienz der Algenkraftstoffproduktion in der Selektion von Algenarten mit für die Kraftstoffherstellung besonders geeigneten Eigenschaften gesehen (Su et al. 2017).

Neben der Möglichkeit, neue Algenarten zu identifizieren und diese auf gewünschte Eigenschaften zu testen, besteht die Option zur genetischen Modifikation von Algen, die Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten ist (Ajjawi et al. 2017; Singh et al. 2016). Allerdings haben Algen aufgrund ihrer kurzen Reproduktionszyklen natürlicherweise eine starke genetische Variabilität und eine hohe Anpassungsfähigkeit an ihre Umgebung. Die Permanenz genetischer Modifikationen müsste daher ständig überprüft werden. Daher werden dem Einsatz genetisch modifizierter Algen eher geringe wirtschaftliche Erfolgsaussichten zugesprochen (Kröger et al. 2016, S. 25 f.). Zudem ist bei einer Produktion von gentechnisch veränderten Algen in großen Skalen davon auszugehen, dass ein dauerhaft sicherer Einschluss nicht gewährleistet werden kann und Risiken mit dem Inverkehrbringen dieser Organismen verbunden sind (TAB 2015).

7.3.3 Optimierung der Algenkultivierung

Wesentliche Treiber für Kosten und Emissionen bei der Produktion von Algenbiomasse sind der Energieverbrauch für die Kultivierung und Ernte sowie die eingesetzten Nährstoffe (Kröger et al. 2016, S. 45; Mu et al. 2017). Die Optimierung der Standortwahl (z. B. die Nähe zur Produktion erneuerbarer Energien zur Versorgung mit Prozessenergie oder die räumliche Nähe zu CO₂-Quellen für die Versorgung) sowie kosteneffiziente Lösungen zur Nährstoffversorgung (z. B. die Nutzung von Abwässern) sind daher relevante Forschungsansätze, die Energie- und Klimabilanz von Algenbiomasse, ggf. auch für die Biokraftstoffherstellung, zu verbessern (Collotta et al. 2016).

Erhöhte Aufmerksamkeit erfährt die Forschung zur Verwendung von Abwasser als Nährstoffmedium für die Algenproduktion. Aktuelle Studien belegen, dass mindestens ein Teil der benötigten Nährstoffe für das Algenwachstum aus Abwässern gewonnen werden könnte (Shurtz et al. 2017; Xin et al. 2016). Allerdings zeigt sich auch, dass ein Konflikt zwischen den Anforderungen an bestimmte Inhaltsstoffe der Algen, z. B. der Lipidgehalt für die Kraftstoffherstellung, und den Eigenschaften der Abwässer besteht (Lowrey et al. 2015; Roostaei/Zhang 2017). Bei einer Nutzung von Abwässern wäre die Qualität der Algen für eine Weiterverarbeitung nicht optimal, aber aufgrund der Doppelnutzung und des relativ niedrigen Kostenaufwands für die Produktion (z. B. in Open Ponds) könnte feuchte Biomasse zu geringen Kosten in großen Mengen hergestellt werden. Dies würde eine weitere Möglichkeit bieten, die Produktionskapazitäten zu erhöhen und eine energetische

32 Beispiele für diese Zusammenhänge liefern etwa Kröger et al. (2017, S. 15) sowie Veröffentlichungen aus dem »Aquatic Species Program«, das vom 1978 neu gegründeten U.S. Department of Energy im Nachhall der ersten Ölkrise ins Leben gerufen wurde, wie z.B. Sheehan et al. 1998; siehe auch Howell 2009, <https://archive.nytimes.com/www.nytimes.com/gwire/2009/07/14/14green-wire-exxon-sinks-600m-into-algae-based-biofuels-in-33562.html>)

33 Zwar existiert eine Vielzahl von Veröffentlichungen, allerdings werden zumeist nur einige ausgewählte Ergebnisse publiziert und die zugrundeliegenden Basisdaten oftmals nicht ausreichend offengelegt, um Dritten eine Analyse und Vergleich mit anderen Quellen zu ermöglichen.

34 Dies berücksichtigt z.B. die BMBF-Förderrichtlinie zu Bioraffinerien: »Wenn der Zuwendungsempfänger seine aus dem Forschungsvorhaben resultierenden Ergebnisse als Beitrag in einer wissenschaftlichen Zeitschrift veröffentlicht, so soll dies so erfolgen, dass der Öffentlichkeit der unentgeltliche elektronische Zugriff (Open Access) auf den Beitrag möglich ist.« (<https://www.bmbf.de/foerderung/bekanntmachung-1391.html>)

Nutzung von Algen zu implementieren. Offen sind dabei Fragen nach dem geeigneten Design der Algenkultivierungsanlage im Kontext des jeweiligen Standorts und des verwendeten Abwasser, sowie in Bezug auf effiziente Aufbereitungsverfahren der Algenbiomasse für die Kraftstoffherstellung (Kröger et al. 2016, S. 43).

7.3.4 Weiterentwicklung spezifischer Herstellungsverfahren für Algenkraftstoffe

Zwar existieren etablierte Herstellungspfade für Biokraftstoffe, diese erfordern aber in der Regel eine energieintensive Trocknung der Algenbiomasse und Extraktion der relevanten Algeninhaltsstoffe (Lipide, Öle). Dadurch wird die Energie- und THG-Bilanz algenbasierter Biokraftstoffe geschmälert. Daher liegt ein Forschungsschwerpunkt auf der Entwicklung spezieller Kraftstofferzeugungsverfahren, sogenannter hydrothermaler Prozesse, die die Nutzung feuchter Biomasse ermöglichen (Tian et al. 2017; Liu et al. 2013; Yu et al. 2011) (Kap. 4.1.3) und die weiterverfolgt werden sollten.

8 Literatur

8.1 In Auftrag gegebene Gutachten

Kröger, M.; Majer, S.; Müller-Langer, F. (2016): Evaluation des Potenzials von Algen als Biomasse für Biokraftstoffe der 3. Generation. DBFZ – Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig

Schmidt, P.; Weindorf, W.; Zittel, W.; Landinger, H.; Michalski, J.; Wurster, R.; Raksha, T. (2016a): Lkw-Fernverkehr – Welche Rolle können Algenkraftstoffe spielen? LBST – Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn/München

8.2 Weitere Literatur

Adenle, A., Haslam, G., Lee, L. (2013): Global assessment of research and development for algae biofuel production and its potential role for sustainable development in developing countries. In: Energy Policy 61, S. 182–195

Adolf, J.; Balzer, C.; Haase, F.; Lenz, B.; Lischke, A.; Knitschky, G. (2016): Shell Nutzfahrzeug-Studie: Diesel oder alternative Antriebe – womit fahren Lkw und Bus morgen? Fakten, Trends und Perspektiven bis 2040. Shell Deutschland Oil GmbH; DLR, Hamburg, www.shell.de/promos/media/shell-goods-vehicle-study/_jcr_content.stream/1466682556570/1afd5e893c3de49d60cc4ec8dc39e00ba649f691a23089a99a5b608b9039846b/shell-nutzfahrzeugstudie.pdf

Adolf, J.; Fehrenbach, H.; Fritsche, U.; Liebig, D. (2013): Welche Rolle können Biokraftstoffe im Verkehrssektor spielen? In: Wirtschaftsdienst 93(2), S. 124–131

Ajjawi, I., Verruto, J., Aquí, M., Soriaga, L., Coppersmith, J., Kwok, K., Peach, L., Orchard, E., Kalb, R., Xu, W., Carlson, T., Francis, K., Konigsfeld, K., Bartalis, J., Schultz, A., Lambert, W., Schwartz, A., Brown, R., Moellering, E. (2017): Lipid production in *Nannochloropsis gaditana* is doubled by decreasing expression of a single transcriptional regulator. Nature Biotechnology 35, S. 647

Alvarado-Morales, M.; Boldrin, A.; Karakashev, D.; Holdt, S.; Angelidaki, I.; Astrup, T. (2013): Life cycle assessment of biofuel production from brown seaweed in Nordic conditions. In: Bioresource Technology 129, S. 92–99

Barry, A.; Wolfe, A.; English, C.; Ruddick, C.; Lambert, D. (2016): 2016 national algal biofuels technology review. U.S. Department of Energy. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Bioenergy Technologies Office. Washington, D.C., www.energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f33/national_algal_biofuels_technology_review.pdf

BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen) (2016): Feldversuch mit Lang-Lkw. Bergisch Gladbach, https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v1-lang-lkw/v-lang-lkw-abschluss.pdf;jsessionid=D756D42FA8BEB46FCBEA9D02597683B9.live21302?_blob=publicationFile&v=3

Batan, L.; Quinn, J.; Bradley, T. (2013): Analysis of water footprint of a photobioreactor microalgae biofuel production system from blue, green and lifecycle perspectives. In: Algal Research 2, S. 196–203

Batan, L.; Quinn, J.; Willson, B.; Bradley, T. (2010): Net Energy and Greenhouse Gas Emission Evaluation of Biodiesel Derived from Microalgae. In: Environmental Science & Technology 44, S. 7975–7980

Bauen, A.; von den Berg, M.; Chudziak, C.; Lehner, F.; Panchaksharam, Y.; Vuille, F.; Wurlod, G. (2014): Relevance and commercial prospects of algal energy for the Swiss Energy Strategy 2050. E4tech for Paul Scherrer Institute

- Béchet, Q., Shilton, A., Guieysse, B. (2014): Full-scale validation of a model of Algal productivity. *Environmental Science & Technology* 48, S. 13826–13833
- Becker, E. (1994): *Microalgae: Biotechnology and microbiology*. Cambridge
- Benemann, J. (2013). Microalgae for biofuels and animal feeds. In: *Energies* 6(11), S. 5869–5886
- Bennion, E.; Ginosar, D.; Moses, J.; Agblevor, F.; Quinn, J. (2015): Lifecycle assessment of microalgae to biofuel: Comparison of thermochemical processing pathways. In: *Applied Energy* 154, S. 1062–1071
- Behrendt, D. (Hg.) (2018): Schlussbericht zum Vorhaben AUFWIND – Algenproduktion und Umwandlung in Flugzeugtreibstoffe: Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit, Demonstration.
https://www.researchgate.net/publication/324758850_AUFWIND_Schlussbericht (9.7.2018)
- Bharathiraja, B.; Chakravarthy, M.; Ranjith Kumar, R.; Yogendran, D.; Yuvaraj, D.; Jayamuthunagai, J.; Praveen Kumar, R.; Palani, S. (2015): Aquatic biomass (algae) as a future feed stock for bio-refineries: A review on cultivation, processing and products. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47, S. 634–653
- Bick, H. (1998): *Grundzüge der Ökologie*. Stuttgart
- Biller, P.; Ross, A. (2011): Potential yields and properties of oil from the hydrothermal liquefaction of microalgae with different biochemical content. In: *Bioresource Technology* 102(1), S. 215–225
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) und BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2014): *Bioökonomie in Deutschland: Chancen für eine biobasierte und nachhaltige Zukunft*. Berlin/Bonn
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2014): *Nationale Politikstrategie Bioökonomie: Nachwachsende Ressourcen und biotechnologische Verfahren als Basis für Ernährung, Industrie und Energie*. BMEL. Bonn/Berlin, www.bmbf.de/files/BioOekonomiestrategie.pdf
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2017): *Ernte 2017: Mengen und Preise*. Berlin, www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/Markt-Statistik/Ernte2017Bericht.pdf?jsessionid=54171F7853DB39482E9EF93BF75150B0.1_cid358?__blob=publicationFile
- BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau- und Reaktorsicherheit) (2016): *Klimaschutzplan 2050: Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*.
https://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf
- BMUB (2018): *Biokraftstoffe*. www.bmub.bund.de/P704/
- BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) (2013): *Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS): Energie auf neuen Wegen*.
https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/mks-strategie-final.pdf?__blob=publicationFile
- BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) (2017): *Verkehr in Zahlen 2017/18*. 46. Jahrgang. DVV Media Group, Hamburg, www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-pdf-2017-2018.pdf?__blob=publicationFile
- BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) (2016): *Nationaler Strategierahmen über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe als Teil der Umsetzung der Richtlinie 2014/94/EU*. www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/mks-nationaler-strategierahmen-afid.pdf?__blob=publicationFile
- BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) (2017): *Verkehr in Zahlen 2017/2018*. Hamburg
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie) (2016): *Fünfter Monitoring-Bericht zur Energiewende. Die Energie der Zukunft. Berichtsjahr 2015*. Berlin

- BMWi (2018): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2017.pdf?__blob=publicationFile&v=15
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie); BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energiekonzept-2010,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf
- Bosma, R.; van Spronsen, W.; Tramper, J.; Wijffels, R. (2003): Ultrasound, a new separation technique to harvest microalgae. In: *Journal of Applied Phycology* 15(2), S. 143–153
- Bowles, D.; Carlsson, A.; van Beilen, J.; Möller, R.; Clayton, D. (2007): Micro- and macro-algae: Utility for industrial applications – Outputs from the EPOBIO project. University of York, www.biofuelstp.eu/downloads/epobio_aquatic_report.pdf
- Brennan, L.; Owende, P. (2010): Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(2), S. 557–577
- Buck, B.; Buchholz, C. (2004): The offshore-ring: A new system design for the open ocean aquaculture of macroalgae. In: *Journal of Applied Phycology* 16(5), S. 355–368
- Bundesregierung (2002): Perspektiven für Deutschland: Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. www.bundesregierung.de/Content/DE/StatischeSeiten/Breg/Nachhaltigkeit/2014-12-08-perspektiven-fuer-d.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- Bundesregierung (2014): Roadmap Bioraffinerien: Im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Rostock, BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz); BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung); BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit); BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) www.bmbf.de/pub/RoadmapBioraffinerien_2014_bf_1.pdf
- Bundesregierung (2016): Abschlussbericht der Bundesregierung über die G7-Präsidentschaft 2015. Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, Berlin https://www.g7germany.de/Content/DE/_Anlagen/G7_G20/2016-g7-abschlussbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- Bundesregierung (2017): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie: Neuauflage 2016. Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, Berlin https://www.bundesregierung.de/Content/Infomaterial/BPA/Bestellservice/Deutsche_Nachhaltigkeitsstrategie_Neuauflage_2016.html?view=trackDownload
- Burlew, J. (1953): *Algal culture: From laboratory to pilot plant*. Washington, D.C.
- Campbell, Peter K.; Beer, T.; Batten, D. (2011): Life Cycle Assessment of Biodiesel Production from Microalgae in Ponds. In: *Bioresource Technology*, Special Issue: Biofuels II: Algal Biofuels and Microbial Fuel Cells, 102 (1), S. 50–56
- Carneiro, M.; Pradelle, F.; Braga, S.; Gomes, M.; Martins, A.; Turkovics, F.; Pradelle, R. (2017): Potential of biofuels from algae: Comparison with fossil fuels, ethanol and biodiesel in Europe and Brazil through life cycle assessment (LCA). In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73, S. 632–653
- Chatsungnoen, T.; Chisti, Y. (2016): Harvesting microalgae by flocculation–sedimentation. In: *Algal Research* 13, S. 271–283
- Chen, C.; Yeh, K.-L.; Aisyah, R.; Lee, D.-J.; Chang, J.-S. (2011): Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. In: *Bioresource Technology* 102, S. 71–81

- Chinnasamy, S.; Bhatnagar, A.; Claxton, R.; Das, K. (2010): Biomass and bioenergy production potential of microalgae consortium in open and closed bioreactors using untreated carpet industry effluent as growth medium. In: *Bioresource Technology* 101(17), S. 6751–6760
- Chisti, Y. (2007): Biodiesel from microalgae. In: *Biotechnology Advances* 25(3), S. 294–306
- Chisti, Y. (2008): Biodiesel from microalgae beats bioethanol. In: *Trends in Biotechnology* 26(3), S. 126–131
- Chisti, Y. (2013): Constraints to commercialization of algal fuels. In: *Journal of Biotechnology* 167(3), S. 201–214
- Cho, K.; Lee, C.-H.; Ko, K.; Lee, Y.-J.; Kim, K.-N.; Kim, M.-K.; Chung, Y.-H.; Kim, D.; Yeo, I.-K.; Oda, T. (2016): Use of Phenol-Induced Oxidative Stress Acclimation to Stimulate Cell Growth and Biodiesel Production by the Oceanic Microalga *Dunaliella Salina*. In: *Algal Research* 17, S. 61–66
- Christenson, L.; Sims, R. (2011): Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts. In: *Biotechnology Advances* 29(6), S. 686–702
- Clarens, A.; Resurreccion, E.; White, M.; Colosi, L. (2010): Environmental Life Cycle Comparison of Algae to Other Bioenergy Feedstocks. In: *Environmental Science & Technology* 44, S. 1813–1819
- Collet, P., Spinelli, D., Lardon, L., Hélias, A., Steyer, J.-P., Bernard, O., (2014): Life-Cycle Assessment of Microalgal-Based Biofuels. In: Lee, D.-J.; Chisti, Y.; Soccol, C.: *Biofuels from Algae*. Amsterdam, S. 287–312
- Collet, P.; Hélias, A.; Lardon, L.; Ras, M.; Goy, R.-A.; Steyer, J.-P. (2011): Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production. In: *Bioresource Technology, Special Issue: Biofuels II: Algal Biofuels and Microbial Fuel Cells* 102 (1), S. 207–214
- Collet, P.; Hélias, A.; Lardon, L.; Steyer, J.-P.; Bernard, O. (2015) Recommendations for Life Cycle Assessment of Algal Fuels. In: *Applied Energy* 154, S. 1089–1102
- Collotta, M., Champagne, P., Mabee, W., Tomasoni, G., Alberti, M., Busi, L., Leite, G.B. (2016): Environmental Assessment of Co-location Alternatives for a Microalgae Cultivation Plant: A Case Study in the City of Kingston (Canada). In: *Energy Procedia* 95, S. 29–36
- Converti, A.; Casazza, A.; Ortiz, E.; Perego, P.; Del Borghi, M. (2009): Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* for biodiesel production. In: *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 48, S. 1146–1151
- Correa, D.F., Beyer, H.L., Possingham, H.P., Thomas-Hall, S.R., Schenk, P.M. (2017): Biodiversity impacts of bioenergy production: Microalgae vs. first generation biofuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74, S. 1131–1146
- Cotton, C.; Douglass, J.; De Causmaecker, S.; Brinkert, K.; Cardona, T.; Fantuzzi, A.; Rutherford, A.; Murray, J. (2015): Photosynthetic constraints on fuel from microbes. In: *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 3(36), S. 1–5
- Danquah, M.; Ang, L.; Uduman, N.; Moheimani, N.; Forde, G. (2009): Dewatering of microalgal culture for biodiesel production: Exploring polymer flocculation and tangential flow filtration. In: *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 84(7), S. 1078–1083
- Dauber, J.; Brown, C.; Fernando, A. L.; Finnan, J.; Krasuska, E.; Ponitka, J.; Styles, D.; Thrän, D.; Van Groenigen, K.; Weih, M.; Zah, R. (2012): Bioenergy from »surplus« land: Environmental and socio-economic implications. In: *BioRisk* 7, S. 5–50
- Davis, R.; Fishman, D.; Frank, E.; Wigmosta, M.; Aden, A.; Coleman, A.; Pienkos, P.; Skaggs, R.; Venteris, E.; Wang, M. (2012): Renewable diesel from algal lipids: An integrated baseline for cost, emissions, and resource potential from a harmonized model. Argonne National Laboratory; National Renewable Energy Laboratory; Northwest National Laboratory, Argonne u.a.O., www.nrel.gov/docs/fy12osti/55431.pdf

- DBFZ (Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH) (2017): 2. HTP-Fachforum »Biobasierte hydrothermale Prozesse – Technologien zur stofflichen und energetischen Nutzung« am 8./9. September 2016. DBFZ Tagungsreader, Nr. 6. Leipzig
- Delgado, O.; Muncrief, R. (2016): New study on technology potential for EU tractor-trailers. Road to Efficiency Workshop: Brussels, June 9, 2016. ICCT (The International Council on Clean Transportation).
www.transportenvironment.org/sites/te/files/2016_06_ICCT_tech_potential_EU_Tractor-Trailer_FINAL.pdf
- Delgado, O.; Rodríguez, F.; Muncrief, R. (2017): Fuel Efficiency Technology in European Heavy-Duty Vehicles: Baseline and Potential for the 2020–2030 Time Frame. International Council on Clean Transportation Europe White Paper, ICCT, Berlin u.a.O.
https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/EU-HDV-Tech-Potential_ICCT-white-paper_14072017_vF.pdf
- Delrue, F.; Li-Beisson, Y.; Setier, P.A.; Sahut, C.; Roubaud, A.; Froment, A.K.; Peltier, G. (2013): Comparison of various microalgae liquid biofuel production pathways based on energetic, economic and environmental criteria. In: Bioresource Technology 136, S.205–212
- Demirbas, A.; Fatih Demirbas, M. (2011): Importance of algae oil as a source of biodiesel. In: Energy Conversion and Management 52(1), S. 163–170
- den Boer, E.; Aarnink, S.; Kleiner, F.; Pagenkopf, J. (2013): Zero emissions trucks. An overview of state-of-the-art technologies and their potential. Delft
- Dominguez-Faus, R.; Powers, S.; Burken, J.; Alvarez, P. (2009): The Water Footprint of Biofuels: A Drink or Drive Issue? In: Environmental Science & Technology 43, S.3005–3010
- Doucha, J.; Lívanský, K. (2008): Influence of processing parameters on disintegration of Chlorella cells in various types of homogenizers. In: Applied Microbiology and Biotechnology 81(3), S.431
- EBTP (European Biofuels Technology Platform) (2016): Advanced Biofuels in Europe. Accessed July 18.
<http://www.biofuelstp.eu/advancedbiofuels.htm>.
- Edwards, R.; Larivé, J.-F.; Rieckard, D.; Hamje, H.; Godwin, S.; Hass, H.; Krasenbrink, A.; Lonza, L.; Maas, H.; Nelson, R.; Rose, K. (2014): Well-to-wheels report version 4.a: JEC well-to-wheels analysis: Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. European Commission. Luxembourg, JRC (Joint Research Centre of the European Commission); EUCAR (European Council for Automotive Research and Development Centre of the European Commission); CONCAWE (The oil companies' European association for environment, health and safety in refining and distribution). http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/sites/iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/files/documents/wtw_report_v4a_march_2014_final.pdf
- Ehimen, E.; Connaughton, S.; Sun, Z.; Carrington, G. (2009): Energy recovery from lipid extracted, transesterified and glycerol codigested microalgae biomass. In: GCB Bioenergy 1(6), S.371–381
- Ehimen, E.; Sun, Z.; Carrington, C.; Birch, E.; Eaton-Rye, J. (2011): Anaerobic digestion of microalgae residues resulting from the biodiesel production process. In: Applied Energy 88(10), S.3454–3463
- EK (Europäische Kommission) (2011a): Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaft bis 2050. KOM(2011) 112 endgültig, Brüssel
- EK (2011b): Weißbuch zum Verkehr: Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem. KOM(2011) 144 endgültig, Brüssel
- EK (2012): Innovating for sustainable growth: A bioeconomy for Europe. Luxemburg
- EK (2016): Eine europäische Strategie für emissionsarme Mobilität. COM(2016) 501 final, Brüssel

- Elliott, D.; Neuenschwander, G.; Phelps, M.; Hart, T.; Zacher, A.; Silva, L. (1999): Chemical processing in high-pressure aqueous environments. 6. Demonstration of catalytic gasification for chemical manufacturing wastewater cleanup in industrial plants. In: *Industrial & Engineering Chemistry Research* 38(3), S. 879–883
- Endres, C.; Falter, C.; Roth, A.; Riegel, F.; Sizmann, A. (2012): Renewable aviation fuels-assessment of three selected fuel production pathways. Deutsche Gesellschaft für Luft-und Raumfahrt-Lilienthal-Oberth e.V., Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2012, www.dglr.de/publikationen/2012/281191.pdf
- Enzing, C.; Ploeg, M.; Barbosa, M.; Sijtsma, L. (2014): *Microalgae-Based Products for the Food and Feed Sector: An Outlook for Europe*. Seville
- Erhard, J., Reh, W.; Treber, M.; Oeliger, D.; Rieger, D.; Müller-Görnert, M. (2014): *Klimafreundlicher Verkehr in Deutschland: Weichenstellungen bis 2050*. WWF Deutschland; BUND Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V.; Germanwatch e.V.; NABU Naturschutzbund Deutschland e.V.; Verkehrsclub Deutschland e.V., Berlin/Bonn, www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Verbaendekonzept_Klimafreundlicher_Verkehr.pdf
- Eurostat (2015): Consumer prices – inflation and comparative price levels. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Consumer_prices_-_inflation_and_comparative_price_levels#Further_Eurostat_information
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2014): *State of the world fisheries and aquaculture 2014: Opportunities and challenges*. Rom, www.fao.org/3/a-i3720e.pdf
- FAO (2017): *FAOSTAT Crops Production Quantity 2014*. www.fao.org/faostat/en/#data/QC
- Fargione, J.; Hill, J.; Tilman, D.; Polasky, S.; Hawthorne, P. (2008): Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt. In: *Science* 319 (5867), S. 1235–1238
- Fernand, F., Israel, A., Skjermo, J., Wichard, T., Timmermans, K.R., Golberg, A. (2017): Offshore macroalgae biomass for bioenergy production: Environmental aspects, technological achievements and challenges. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75, S. 35–45
- FNR (Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe) (2017a): *Aktuelle Marktsituation: Kraftstoffabsatz in Deutschland 2016*. <https://biokraftstoffe.fnr.de/kraftstoffe/aktuelle-marktsituation/>
- FNR (2017b): *Entwicklung Biodiesel-Produktion und -Absatz in Deutschland*. <https://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/bioenergie/biokraftstoffe/entwicklung-biodiesel-in-deutschland.html>
- FNR (2017c): *Basisdaten Bioenergie 2017*. www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/broschuere_basisdaten_bioenergie_2017_2.pdf
- Frank, E.; Elgowainy, A.; Han, J.; Wang, Z. (2013): Life cycle comparison of hydrothermal liquefaction and lipid extraction pathways to renewable diesel from algae. In: *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 18, S. 137–158
- Fritsche, U.; Sims, R.; Monti, A. (2010): Direct and indirect land-use competition issues for energy crops and their sustainable production – an overview. In: *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 4, S. 692–704
- Funk, H.; Mohr, R. (2010): *Die Rapsabrechnung*. Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen, Berlin, https://www.ufop.de/index.php/download_file/1025/659/
- Gao, K.; McKinley, K. R. (1994): Use of macroalgae for marine biomass production and CO2 remediation: A review. In: *Journal of Applied Phycology* 6(1), S. 45–60
- Gerbens-Leenes, W.; Hoekstra, A.Y.; van der Meer, T.H. (2009): The water footprint of bioenergy. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106, S. 10219–10223
- GNA (Gladstein, Neandross & Associates) (2012): *Zero-emission catenary hybrid truck market study*. Santa Monica

- Gnansounou, E.; Raman, J. K. (2016): Life Cycle Assessment of Algae Biodiesel and Its Co-Products. In: *Applied Energy* 161, S. 300–308
- Guiry, M.D. (2012): How many species of algae are there? In: *Journal of Phycology* 48, S. 1057–1063
- Hacker, F.; Blanck, R.; Hülsmann, F.; Kasten, P.; Loreck, C.; Ludig, S.; Mottschall, M.; Zimmer, W. (2014): eMobil 2050: Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz. Öko-Institut, Berlin, www.oeko.de/oekodoc/2114/2014-670-de.pdf
- Hall, C.A.S., Lambert, J.G., Balogh, S.B. (2014): EROI of different fuels and the implications for society. *Energy Policy* 64, S. 141–152
- Handler, R.; Canter, C.; Kalnes, T.; Lupton, F.; Kholiqov, O.; Shonnard, D.; Blowers, P. (2012): Evaluation of environmental impacts from microalgae cultivation in open-air raceway ponds: Analysis of the prior literature and investigation of wide variance in predicted impacts. In: *Algal Research* 1, S. 83–92
- Handler, R.; Shonnard, D.; Kalnes, T.; Lupton, F. (2014): Life cycle assessment of algal biofuels: Influence of feedstock cultivation systems and conversion platforms. In: *Algal Research* 4, S. 105–115
- Harun, R.; Singh, M.; Forde, G.; Danquah, M. (2010): Bioprocess Engineering of Microalgae to Produce a Variety of Consumer Products. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (3), S. 1037–1047
- Heasman, M.; Diemar, J.; O'Connor, W.; Sushames, T.; Foulkes, L. (2000): Development of extended shelf-life microalgae concentrate diets harvested by centrifugation for bivalve molluscs – a summary. In: *Aquaculture Research* 31(8–9), S. 637–659
- Hendricks, P. (2015): Die Nutzung von (Bio)LNG als Kraftstoff für schwere LKW in den Niederlanden. Rolande LCNG, Giessen
- Hill, A.; Feinberg, D. (1984): Fuel from microalgae lipid products. Solar Energy Research Institute, Golden, www.nrel.gov/docs/legosti/old/2348.pdf
- Hincapié Gómez, E.; Marchese, A. (2015): An ultrasonically enhanced inclined settler for microalgae harvesting. In: *Biotechnology Progress* 31, S. 414–423
- Howell, K. (2009): Exxon Sinks \$600M Into Algae-Based Biofuels in Major Strategy Shift. Greenwire, <https://archive.nytimes.com/www.nytimes.com/gwire/2009/07/14/14greenwire-exxon-sinks-600m-into-algae-based-biofuels-in-33562.html>
- Huntley, M.; Redalje, D. (2007): CO₂ mitigation and renewable oil from photosynthetic microbes: A new appraisal. In: *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12(4), S. 573–608
- Illman, A.; Scragg, A.; Shales, S. (2000): Increase in *Chlorella* strains calorific values when grown in low nitrogen medium. In: *Enzyme and Microbial Technology* 27, S. 631–635
- IRENA (International Renewable Energy Agency) (2016): Innovation outlook: Advanced liquid biofuels. Abu Dhabi
- Jones, S.; Zhu, Y.; Anderson, D.; Hallen, R.; Elliott, D.; Schmidt, A.; Albrecht, K.; Hart, T.; Butcher, M.; Drennan, C.; Snowden-Swan, L.; Davis, R.; Kinchin, C. (2014): Process design and economics for the conversion of algal biomass to hydrocarbons: Whole algae hydrothermal liquefaction and upgrading. Pacific Northwest National Laboratory; National Laboratory of Energy Efficiency & Renewable Energy, Oak Ridge/Springfield, www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-23227.pdf
- Jorquera, O.; Kiperstok, A.; Sales, E.; Embiruçu, M.; Ghirardi, M. (2010): Comparative Energy Life-Cycle Analyses of Microalgal Biomass Production in Open Ponds and Photobioreactors. In: *Bioresource Technology* 101(4), S. 1406–1413
- Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (2009): Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren. Berlin

- Kasten, P.; Mottschall, M.; Köppel, W.; Degünther, C.; Schmied, M.; Wüthrich, P. (2016): Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050. Umweltbundesamt, UBA-Texte 72/2016. Dessau-Roßlau
- Katsanevakis, S.; Tempera, F.; Teixeira, H. (2016): Mapping the impact of alien species on marine ecosystems: the Mediterranean Sea case study. In: Diversity and Distributions 22, S. 694–707
- KBA (Kraftfahrt-Bundesamt) (2015): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD): Verkehrsaufkommen Jahr 2014 – VD 1. Flensburg, www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Kraftverkehr/VD/2014/vd1_2014_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- KBA (2017a): Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern am 1. Januar 2017 nach Zulassungsbezirken. Flensburg, https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2017/fz1_2017_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- KBA (2017b): Verkehr in Kilometern der deutschen Kraftfahrzeuge im Jahr 2016. www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/verkehr_in_kilometern_node.html
- KBA (2017c): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge Januar bis Dezember 2016. www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/deutscherLastkraftfahrzeuge/Gesamtverkehr/2016_vd5_kurzbericht_quartal4_gentab.html?nn=667030
- KBA (2017d): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge Januar bis Dezember 2015. www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/deutscherLastkraftfahrzeuge/Gesamtverkehr/2015/2015_quartal4_vd5_kurzbericht_standard.html?nn=1640172
- KBA (2017e): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge im Dezember 2014. www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/deutscherLastkraftfahrzeuge/Gesamtverkehr/2014/2014_12_vd5_kurzbericht_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- KBA (2017f): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge im Dezember 2013. www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/deutscherLastkraftfahrzeuge/Gesamtverkehr/2013/2013_12_vd5_kurzbericht_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- KBA (2017g): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge im Dezember 2012. www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/deutscherLastkraftfahrzeuge/Gesamtverkehr/2012/2012_12_vd5_kurzbericht_pdf.html?nn=666704
- Kendall, A.; Yuan, J. (2013): Comparing Life Cycle Assessments of Different Biofuel Options. In: Current Opinion in Chemical Biology, Next generation therapeutics • Energy, 17 (3), S. 439–443
- Kenny, P.; Flynn, K. (2017): Physiology limits commercially viable photoautotrophic production of microalgal biofuels. In: Journal of Applied Phycology 29, S. 2713–2727
- Ketzer, F.; Skarka, J.; Rösch, C. (2018): Critical Review of Microalgae LCA Studies for Bioenergy Production. In: BioEnergy Research 11, S. 95–105
- Khoo, H.; Sharratt, P.; Das, P.; Balasubramanian, R.; Narahariseti, P.; Shaik, S. (2011): Life cycle energy and CO₂ analysis of microalgae-to-biodiesel: Preliminary results and comparisons. In: Bioresource Technology 102, S. 5800–5807
- Klein-Marcuschamer, D.; Turner, C.; Allen, M.; Gray, P.; Dietzgen, R. G.; Gresshoff, P. M.; Hankamer, B.; Heimann, K.; Scott, P. T.; Stephens, E.; Speight, R.; Nielsen, L. K. (2013): Technoeconomic analysis of renewable aviation fuel from microalgae, *Pongamia pinnata*, and sugarcane. In: Biofuels, Bioproducts and Biorefining 7(4), S. 416–428
- Kreyenberg, D.; Lischke, A.; Bergk, F.; Duennebeil, F.; Heidt, C.; Knörr, W.; Raksha, T.; Schmidt, P.; Weindorf, W.; Naumann, K.; Majer, S.; Müller-Langer, F. (2015): Erneuerbare Energien im Verkehr. Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und

- Energieverbrauch der Verkehrsträger. DLR, IFEU, LBST, DBFZ, Berlin,
www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/mks-kurzstudie-ee-im-verkehr.pdf?__blob=publicationFile
- Kröger, M. (2006): Techno-ökonomische Analyse der Produktion von Hydrothermal Upgrading Diesel im Vergleich zu Fischer-Tropsch Diesel auf der Basis von Biomasse. Institut für Energetik und Umwelt gemeinnützige GmbH, Leipzig
- Kröger, M.; Beckert, T.; Petrick, I.; Dombrowski, L.; Kuchling, T.; Kureti, S. (2013): Algae biorefinery – material and energy use of Algae. DBFZ Report No. 16, Leipzig
- Kröger, M.; Müller-Langer, F. (2011): Impact of heterotrophic and mixotrophic growth of microalgae on the production of future biofuels. In: *Biofuels* 2(2), S. 145–151
- Lam, M.; Lee, K. T.; Mohamed, A. (2010): Homogeneous, Heterogeneous and Enzymatic Catalysis for Transesterification of High Free Fatty Acid Oil (Waste Cooking Oil) to Biodiesel: A Review. In: *Biotechnology Advances* 28 (4), S. 500–518
- Lardon, L.; Hélias, A.; Sialve, B.; Steyer, J.-P.; Bernard, O. (2009): Life-Cycle Assessment of Biodiesel Production from Microalgae. In: *Environmental Science & Technology* 43 (17), S. 6475–6481
- Laurens, L.; Chen-Glasser, M.; McMillan, J. (2017): A perspective on renewable bioenergy from photosynthetic algae as feedstock for biofuels and bioproducts. In: *Algal Research* 24, S. 261–264
- Liu, J.; Ma, X. (2009): The analysis on energy and environmental impacts of microalgae-based fuel methanol in China. In: *Energy Policy* 37, S. 1479–1488
- Liu, X.; Saydah, B.; Eranki, P.; Colosi, L. M.; Mitchell, B. G.; Rhodes, J.; Clarens, A. (2013): Pilot-scale data provide enhanced estimates of the life cycle energy and emissions profile of algae biofuels produced via hydrothermal liquefaction. In: *Bioresource Technology* 148, S. 163–171
- Lognone, V. (2003): Algen in der Tierernährung. In: *Lohmann Info*, S. 1–4
- López Barreiro, D.; Prins, W.; Ronsse, F.; Brilman, W. (2013): Hydrothermal liquefaction (HTL) of microalgae for biofuel production: State of the art review and future prospects. In: *Biomass and Bioenergy* 53, S. 113–127
- Lowrey, J.; Brooks, M. S.; McGinn, P. (2015): Heterotrophic and mixotrophic cultivation of microalgae for biodiesel production in agricultural wastewaters and associated challenges – a critical review. In: *Journal of Applied Phycology* 27(4), S. 1485–1498
- Lundquist, T.; Woertz, I.; Quinn, N.; Benemann, J. (2010): A realistic technology and engineering assessment of algae biofuel production. Berkeley, CA, Energy Biosciences Institute, University of California
<https://hub.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/170093/mobile/realistic-technologyengineering-assessment-algae-biofuel-production.pdf>
- Maga, D. (2016): A methodology to assess the contribution of biorefineries to a sustainable bio-based economy (Dissertation). Umsicht-Schriftenreihe 73, Oberhausen
- Majer, S.; Mueller-Langer, F.; Zeller, V.; Kaltschmitt, M. (2009): Implications of biodiesel production and utilisation on global climate: A literature review. In: *European Journal of Lipid Science and Technology* 111(8), S. 747–762
- Majer, S.; Oehmichen, K. (2010): Approaches for Optimising the Green-house Gas Balance of Biodiesel Produced from Rapeseed. DBFZ, Leipzig,
www.ufop.de/files/9113/3940/7647/Uebersetzung_engl_Ansaetze_Optimierung_THG_Bilanz_von_RM_E.pdf
- Mata, T.; Martins, A.; Caetano, N. (2010): Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, S. 217–232
- Mercer, P.; Armenta, R. (2011): Developments in Oil Extraction from Microalgae. In: *European Journal of Lipid Science and Technology* 113 (5), S. 539–47

- Milledge, J.J., Heaven, S. (2013): A review of the harvesting of micro-algae for biofuel production. In: *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 12, S. 165–178
- Miller, S. (2010): Minimizing Land Use and Nitrogen Intensity of Bioenergy. In: *Environmental Science & Technology* 44, S. 3932–3939
- Molina Grima, E.; Belarbi, E.; Acien Fernández, F.; Robles Medina, A.; Chisti, Y. (2003): Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. In: *Biotechnology Advances* 20(7–8), S. 491–515
- Moody, J.; McGinty, C.; Quinn, J. (2014): Global evaluation of biofuel potential from microalgae. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111(23), S. 8691–8696
- Moreno-Garcia, L.; Adjallé, K.; Barnabé, S.; Raghavan, G. (2017): Microalgae biomass production for a biorefinery system: Recent advances and the way towards sustainability. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76, S. 493–506
- Mu, D.; Ruan, R.; Addy, M.; Mack, S.; Chen, P.; Zhou, Y. (2017): Life cycle assessment and nutrient analysis of various processing pathways in algal biofuel production. In: *Bioresource Technology* 230, S. 33–42
- Mussnug, J.H.; Klassen, V.; Schlüter, A.; Kruse, O. (2010): Microalgae as Substrates for Fermentative Biogas Production in a Combined Biorefinery Concept. In: *Journal of Biotechnology* 150 (1), S. 51–56
- Naraharisetti, P.; Das, P.; Sharratt, P. (2017): Critical factors in energy generation from microalgae. In: *Energy* 120, S. 138–152
- Naturkapital Deutschland – TEEB DE (2014): Naturkapital und Klimapolitik – Synergien und Konflikte. Kurzbericht für Entscheidungsträger. Technische Universität Berlin, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Berlin/Leipzig
- Naumann, K.; Oehmichen, K.; Remmele, E.; Thuncke, K.; Schröder, J.; Zeymer, M.; Zech, K.; Müller-Langer, F. (2016): Monitoring Biokraftstoffsektor. DBFZ, Leipzig, www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_11_3.pdf
- Nitsch, J.; Pregger, T.; Scholz, Y.; Naegler, T.; Sterner, M.; Gerhardt, N.; von Oehsen, A.; Pape, C.; Saint-Drenan, Y.-M.; Wenzel, B. (2010): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global: »Leitstudie 2010«. DLR, Fraunhofer IWES, IfnE, http://elib.dlr.de/69139/1/Leitstudie_2010.pdf
- Norsker, N.-H.; Barbosa, M.; Vermuë, M.; Wijffels, R. (2011): Microalgal production: A close look at the economics. In: *Biotechnology Advances* 29(1), S. 24–27
- O’Keeffe, S.; Majer, S.; Bezama, A.; Thrän, D. (2016): When considering no man is an island – assessing bioenergy systems in a regional and LCA context: A review. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21(6), S. 885–902
- O’Brien, M.; Wechsler, D.; Stefan, B.; Arnold, K. (2015): Sachstandsbericht über vorhandene Grundlagen und Beiträge für ein Monitoring der Bioökonomie: Systemische Betrachtung und Modellierung der Bioökonomie. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Wuppertal, epub.wupperinst.org/files/5851/5851_Biooekonomie.pdf
- OECD (Organisation for Economic Co-Operation and Development); FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2007): OECD-FAO agricultural outlook 2007-2016. Paris
- Petrack, I.; Dombrowski, L.; Kröger, M.; Beckert, T.; Kuchling, T.; Kureti, S. (2013): Algae biorefinery: Material and energy use of algae. DBFZ Report No. 16. Leipzig, www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_16.pdf
- Pittman, J., Dean, A., Osundeko, O. (2011): The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. *Bioresource Technology* 102, S. 17–25

- Pulz, O. (2001): Photobioreactors: Production systems for phototrophic microorganisms. In: *Applied Microbiology and Biotechnology* 57(3), S. 287–293
- Quinn, J.; Catton, K.; Wagner, N.; Bradley, T. (2012): Current Large-Scale US Biofuel Potential from Microalgae Cultivated in Photobioreactors. In: *BioEnergy Research* 5, S. 49–60
- Quinn, J.; Gordon Smith, T.; Downes, C. M.; Quinn, C. (2014): Microalgae to Biofuels Lifecycle Assessment – Multiple Pathway Evaluation. In: *Algal Research* 4, S. 116–122
- Quinn, J.C.; Davis, R. (2015): The potentials and challenges of algae based biofuels: A review of the techno-economic, life cycle, and resource assessment modeling. In: *Bioresource Technology* 184, S. 444–452
- Razon, L.; Tan, R. (2011): Net energy analysis of the production of biodiesel and biogas from the microalgae: *Haematococcus pluvialis* and *Nannochloropsis*. In: *Applied Energy* 88(10), S. 3507–3514
- Repenning, J.; Emele, L.; Blanck, R.; Dehoust, G.; Förster, H.; Greiner, B.; Harthan, R.; Henneberg, K.; Hermann, H.; Jörß, W.; Ludwig, S.; Loreck, C. (2015): Klimaschutzscenario 2050: Zusammenfassung des 2. Endberichts – Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin, Öko-Institut e.V.; Fraunhofer ISI, www.oeko.de/oekodoc/2441/2015-598-de.pdf
- Resurreccion, E.; Colosi, L.; White, M.; Clarens, A. (2012): Comparison of algae cultivation methods for bioenergy production using a combined life cycle assessment and life cycle costing approach. In: *Bioresource Technology* 126, S. 298–306
- Reuß, H.-J. (2011): Gas als alternativer Kraftstoff und bestmögliche Nutzung der Primärenergie. In: *Hansa* 12, S. 28–30
- Richardson, J.W.; Johnson, M.D.; Zhang, X.; Zemke, P.; Chen, W.; Hu, Q. (2014): A financial assessment of two alternative cultivation systems and their contributions to algae biofuel economic viability. In: *Algal Research* 4, S. 96–104
- Rocca, S.; Agostini, A.; Giuntoli, J.; Marelli, L. (2015): Biofuels from algae: Technology options, energy balance and GHG emissions. Insights from a literature review. Joint Research Centre Science Report – Euro 27582. European Commission Joint Research Centre. Luxembourg
- Rodolfi, L.; Chini Zittelli, G.; Bassi, N.; Padovani, G.; Biondi, N.; Bonini, G.; Tredici, M. R. (2009): Microalgae for oil: Strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor. In: *Biotechnology and Bioengineering* 102(1), S. 100–112
- Roesijadi, G.; Jones, S.; Snowden-Swan, L.; Zhu, Y. (2010): Macroalgae as a biomass feedstock: A preliminary analysis. Richland, WA, PNNL (Pacific Northwest National Laboratory) www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-19944.pdf
- Rogers, J.; Rosenberg, J.; Guzman, B.; Oh, V.; Mimbela, L.; Ghassemi, A.; Betenbaugh, M.; Oyler, G.; Donohue, M. (2014): A critical analysis of paddlewheel-driven raceway ponds for algal biofuel production at commercial scales. In: *Algal Research* 4, S. 76–88
- Roostaei, J.; Zhang, Y. (2017): Spatially Explicit Life Cycle Assessment: Opportunities and challenges of wastewater-based algal biofuels in the United States. In: *Algal Research* 24, S. 395–402
- Rosello Sastre, R.; Posten, C. (2010): Die vielfältige Anwendung von Mikroalgen als nachwachsende Rohstoffe. The Variety of Microalgae Applications as a Renewable Resource. In: *Chemie Ingenieur Technik* 82(11), S. 1925–1939
- Roux, J.-M.; Lamotte, H.; Achard, J.-L. (2017): An Overview of Microalgae Lipid Extraction in a Biorefinery Framework. In: *Energy Procedia* 112, S. 680–688
- Rumpke, C.; Peters, D.; Kalinowska, D.; Müller-Langer, F.; Seiffert, M.; Thrän, D.; Lambrecht, U.; Höpfner, U.; Bünger, U.; Schmidt, P.; Weindorf, W.; Rommerskirchen, S.; Anders, N. (2011): Entwicklung einer Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie für Deutschland: Voruntersuchung. Deutsche Energie-Agentur GmbH, Berlin, www.lbst.de/ressources/docs2012/dena-et-al_2011-08_MKS-Voruntersuchung.pdf

- Ryan, C. (2009): Cultivating clean energy: the promise of algae biofuels. Natural Resources Defence Council, New York
- Salecker, H. (2009): Energiegewinnung aus Mikroalgen: Konzepte und deren Bewertung. Diplomarbeit. TU Hamburg-Harburg
- Sander, K.; Murthy, G. (2010): Life cycle analysis of algae biodiesel. In: The International Journal of Life Cycle Assessment 15(7), S. 704–714
- Schlesinger, M.; Lindenberger, D.; Lutz, C.; Hofer, P.; Kemmler, A.; Kirchner, A.; Strassburg, S.; Fürsch, M.; Nagl, S.; Paulus, M.; Richter, J.; Trüby, J.; Khorushun, O. (2010): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Prognos AG; Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln; Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH. Basel u.a.O., www.ewi.uni-koeln.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Studien/Politik_und_Gesellschaft/2010/EWI_2010-08-30_Energieszenarien-Studie.pdf
- Schlesinger, M.; Lindenberger, D.; Lutz, C.; Hofer, P.; Kemmler, A.; Kirchner, A.; Koziel, S.; Ley, A.; Piégsa, A.; Seefeldt, F.; Straßburg, S.; Weinert, K.; Knaut, A. (2014): Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose. Prognos AG; Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln; Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH, Basel u.a.O., www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/entwicklung-der-energiemaerkte-energiereferenzprognose-endbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=7
- Schmack, D.; Schneider, G.; Nusko, R. (2008): Effizienzsteigerung der Biogasnutzung durch Solarenergie: Abschlussbericht: EBSIE Technikumsphase – FKZ 22017105. Gefördert durch BMELV (Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz). o.O., Schmack Biogas, rent a scientist GmbH www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22017105.pdf
- Schmidt, P.; Zittel, W.; Weindorf, W.; Raksha, T. (2016b): Renewables in Transport 2050 – Empowering a sustainable mobility future with zero emission fuels from renewable electricity – Europe and Germany. FVV-Report 1086/2016. LBST, Ottobrunn, www.fvv-net.de/de/download/kraftstoffstudie-ii/kraftstoffstudie-ii.html
- Schubert, M.; Kluth, T.; Nebauer, G.; Ratzenberger, R.; Kotzagiorgis, S.; Butz, B.; Schneider, W.; Leible, M. (2014): Verkehrsverflechtungsprognose 2030 – Los 3: Erstellung der Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen unter Berücksichtigung des Luftverkehrs – Schlussbericht. Intraplan Consult GmbH, BVU Beratergruppe Verkehr+Umwelt GmbH, München/Freiburg, www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/verkehrsverflechtungsprognose-2030-zusammenfassung-los-3.pdf?__blob=publicationFile
- Seigné Itoiz, E.; Fuentes-Grünewald, C.; Gasol, C.; Garcés, E.; Alacid, E.; Rossi, S.; Rieradevall, J. (2012): Energy balance and environmental impact analysis of marine microalgal biomass production for biodiesel generation in a photobioreactor pilot plant. In: Biomass and Bioenergy 39, S. 324–335
- Sheehan, J.; Dunahay, T.; Benemann, J.; Roessler, P. (1998): A look back at the U.S. Department of Energy's aquatic species program – Biodiesel from algae. National Renewable Energy Laboratory, Golden, www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/24190.pdf
- Shen, Y.; Pei, Z.; Yuan, W.; Mao, E. (2009): Effect of nitrogen and extraction method on algae lipid yield. In: International Journal of Agricultural and Biological Engineering 2 (1), S. 51–57
- Shurin, J.; Abbott, R.; Deal, M.; Kwan, G.; Litchman, E.; McBride, R.; Mandal, S.; Smith, V. (2013): Industrial-strength ecology: Trade-offs and opportunities in algal biofuel production. In: Ecology Letters 16(11): S. 1393–1404
- Shurtz, B.; Wood, B.; Quinn, J. (2017): Nutrient resource requirements for large-scale microalgae biofuel production: Multi-pathway evaluation. In: Sustainable Energy Technologies and Assessments 19, S. 51–58

- Sills, D.; Paramita, V.; Franke, M.; Johnson, M.; Akabas, T.; Greene, C.; Tester, J. (2013): Quantitative Uncertainty Analysis of Life Cycle Assessment for Algal Biofuel Production. In: *Environmental Science & Technology* 47, S. 687–694
- Sim, T.-S.; Goh, A.; Becker, E. (1988): Comparison of centrifugation, dissolved air flotation and drum filtration techniques for harvesting sewage-grown algae. In: *Biomass* 16(1), S. 51–62
- Singh, A.; Nigam, P.; Murphy, J. (2011): Mechanism and challenges in commercialisation of algal biofuels. In: *Bioresource Technology* 102, S. 26–34
- Singh, K.; Kaloni, D.; Gaur, S.; Kushwaha, S.; Mathur, G. (2017): Current research and perspectives on microalgae-derived biodiesel. In: *Biofuels* 1, S. 18
- Singh, P.; Kumari, S.; Guldhe, A.; Misra, R.; Rawat, I.; Bux, F. (2016): Trends and novel strategies for enhancing lipid accumulation and quality in microalgae. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55, S. 1–16
- Skarka, J. (2015): Potenziale zur Erzeugung von Biomasse aus Mikroalgen in Europa unter besonderer Berücksichtigung der Flächen- und CO₂-Verfügbarkeit. Dissertation. Karlsruhe, KIT (Karlsruher Institut für Technologie)
- Slade, R.; Bauen, A. (2013): Micro-algae cultivation for biofuels: Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects. In: *Biomass and Bioenergy* 53, S. 29–38
- Spolaore, P.; Joannis-Cassan, C.; Duran, E.; Isambert, A. (2006): Commercial applications of microalgae. In: *Journal of Bioscience and Bioengineering* 101(2), S. 87–96
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2017): Umsteuern erforderlich: Klimaschutz im Verkehrssektor. Sondergutachten. Berlin
- Statista (2016): Anzahl der Autobahntankstellen in Deutschland in den Jahren 2005 bis 2016; <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/157962/umfrage/anzahl-der-autobahntankstellen-in-deutschland-seit-2005/>
- Stephenson, A.; Kazamia, E.; Dennis, J.; Howe, C.; Scott, S.; Smith, A. (2010): Life-Cycle Assessment of Potential Algal Biodiesel Production in the United Kingdom: A Comparison of Raceways and Air-Lift Tubular Bioreactors. In: *Energy & Fuels* 24(7), S. 4062–4077
- Su, Y.; Song, K.; Zhang, P.; Su, Y.; Cheng, J.; Chen, X. (2017): Progress of microalgae biofuel's commercialization. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74, S. 402–411
- Subhadra, B. (2010): Sustainability of algal biofuel production using integrated renewable energy park (IREP) and algal biorefinery approach. In: *Energy Policy* 38(10), S. 5892–5901
- Sun, A.; Davis, R.; Starbuck, M.; Ben-Amotz, A.; Pate, R.; Pienkos, P. (2011): Comparative cost analysis of algal oil production for biofuels. In: *Energy* 36(8), S. 5169–5179
- TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2012): Technische Optionen zum Management des CO₂-Kreislaufs (Caviezel, C., Grünwald, R.). TAB-Hintgrundpapier Nr. 18, Berlin
- TAB (2015): Synthetische Biologie – die nächste Stufe der Bio- und Gentechnologie (Sauter, A.; Albrecht, S.; van Doren, D.; König, H.; Reiß, T.; Trojok, R.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 164, Berlin
- TAB (2016): Weiße Biotechnologie Stand und Perspektiven der industriellen Biotechnologie: Verfahren, Anwendungen, ökonomische Perspektiven (Aichinger, H.; Hüsing, B.; Wydra, S.). Innovationsanalyse Teil I, TAB-Arbeitsbericht Nr. 168, Berlin
- Tasić, M.; Rios Pinto, L.; Klein, B.; Veljković, V.; Filho, R. (2016): *Botryococcus braunii* for biodiesel production. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 64, S. 260–270

- Thrän, D.; Arendt, O.; Ponitka, J.; Braun, J.; Millinger, M.; Wolf, V.; Banse, M.; Schaldach, R.; Schüngel, J.; Gärtner, S.; Rettenmaier, N.; Hünecke, K.; Hennenberg, K. (2015): Meilensteine 2030: Elemente und Meilensteine für die Entwicklung einer tragfähigen und nachhaltigen Bioenergiestrategie. DBFZ, Leipzig
- Tian, C., Liu, Z., Zhang, Y. (2017): Hydrothermal Liquefaction (HTL): A Promising Pathway for Biorefinery of Algae. In: Gupta, S., Malik, A., Bux, F. (Hg.): Algal Biofuels: Recent Advances and Future Prospects, S. 361–391
- TMRA – Transparency Market Research Analysis (2016): Algae Market – Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, and Forecast 2016 – 2024. <https://www.transparencymarketresearch.com/algae-market.html>
- Tredici, M. (2007): Mass production of microalgae: Photobioreactors. In: Richmond, A. (Hg.): Handbook of Microalgal Culture. Oxford, S. 178–214
- Tredici, M. (2010): Photobiology of microalgae mass cultures: understanding the tools for the next green revolution. In Biofuels 1, S. 143–162
- Tredici, M.; Bassi, N.; Prussi, M.; Biondi, N.; Rodolfi, L.; Chini Zittelli, G.; Sampietro, G. (2015): Energy balance of algal biomass production in a 1-ha »Green Wall Panel« plant: How to produce algal biomass in a closed reactor achieving a high Net Energy Ratio. In: Applied Energy 154, S. 1103–1111
- Trivedi, J.; Aila, M.; Bangwal, D.; Kaul, S.; Garg, M. (2015): Algae based biorefinery – How to make sense? In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 47, S. 295–307
- TRUCKER ONLINE (2013): Supertest Iveco Stralis 330 CNG. München, <http://www.trucker.de/supertestiveco-stralis-330-cng-1221201.html>
- UBA (Umweltbundesamt) (2014): Treibhausgasausstoß in Deutschland 2013: Vorläufige Ergebnisse aufgrund erster Berechnungen und Schätzungen des Umweltbundesamtes. www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/478/publikationen/hgp_thg-ausstoss_prognose_2013.pdf
- UBA (2015): Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträger-übergreifende Bewertung (Autoren: Schmied, M.; Wüthrich, P.; Zah, R.; Althaus, H.-J.; Friedl, C.) UBA-Texte 30/2015. Dessau-Roßlau
- UBA (2017): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2017. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2015. Climate Change 13/2017. Dessau Roßlau
- UBA (2018): Nationaler Inventarbericht zum deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2016. http://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art07_inventory/ghg_inventory/envwldownw/2018_01_15_EU-NIR_2018.pdf/manage_document
- Uduman, N.; Qi, Y.; Danquah, M.; Forde, G.; Hoadley, A. (2010): Dewatering of microalgal cultures: A major bottleneck to algae-based fuels. In: Journal of Renewable and Sustainable Energy 2(1), 012701, S. 1–15
- Ummalyma, S.; Gnansounou, E.; Sukumaran, R.; Sindhu, R.; Pandey, A.; Sahoo, D. (2017): Bioflocculation: An alternative strategy for harvesting of microalgae – An overview. In: Bioresource Technology 242, S. 227–235
- UN (United Nations) (2015): Paris Agreement. Paris, http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf
- Unkefer, C.; Sayre, R.; Magnuson, J.; Anderson, D.; Baxter, I.; Blaby, I.; Brown, J.; Carleton, M.; Cattolico, R.; Dale, T.; Devarenne, T.; Downes, C.; Dutcher, S. (2017): Review of the algal biology program within the National Alliance for Advanced Biofuels and Bioproducts. In: Algal Research 22, S. 187–215
- US Hybrid Corporation (2015): H2-Truck. Torrance, <http://www.ushybrid.com/documents/PDF/2/H2Truck.pdf>

- Vardon, D.; Sharma, B.; Blazina, G.; Rajagopalan, K.; Strathmann, T. (2012): Thermochemical conversion of raw and defatted algal biomass via hydrothermal liquefaction and slow pyrolysis. In: *Bioresource Technology* 109, S. 178–187
- Vereinte Nationen (2015): Transformation unserer Welt: die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung. www.un.org/Depts/german/gv-70/band1/ar70001.pdf
- Wang, T.; Yabar, H.; Higano, Y. (2013): Perspective assessment of algae-based biofuel production using recycled nutrient sources: The case of Japan. In: *Bioresource Technology* 128, S. 688–696
- Weissman, J.; Goebel, R. (1987): Design and analysis of microalgal open pond systems for the purpose of producing fuels: A subcontract report. Microbial Products, Inc., Fairfield, www.nrel.gov/docs/legosti/old/2840.pdf
- Wetzel, D. (2010): EADS lässt Flugzeug mit Algentreibstoff fliegen. www.welt.de/wirtschaft/article7896708/EADS-laesst-Flugzeug-mit-Algentreibstoff-fliegen.html
- Wiens, J.; Fargione, J.; Hill, J. (2011): Biofuels and biodiversity. In: *Ecological Applications* 21, S. 1085–1095
- Wigmosta, M.; Coleman, A.; Skaggs, R.; Huesemann, M.; Lane, L. (2011): National microalgae biofuel production potential and resource demand. In: *Water Resources Research* 47, W00H04, doi:10.1029/2010WR009966
- Williams, P.; Laurens, L. (2010): Microalgae as biodiesel & biomass feedstocks: Review & analysis of the biochemistry, energetics & economics. In: *Energy & Environmental Science* 3, S. 554–590
- Worldwatch Institute (2006): Biofuels for Transport: Global Potential and Implications for Sustainable Agriculture and Energy in the 21st Century. Washington, D.C
- Xin, C.; Addy, M.; Zhao, J.; Cheng, Y.; Cheng, S.; Mu, D.; Liu, Y.; Ding, R.; Chen, P.; Ruan, R. (2016): Comprehensive techno-economic analysis of wastewater-based algal biofuel production: A case study. In: *Bioresource Technology* 211, S. 584–593
- Yanfen, L.; Zehao, H.; Xiaolian, M. (2012): Energy analysis and environmental impacts of microalgal biodiesel in China. In: *Energy Policy* 45, S. 142–151
- Yang, J.; Xu, M.; Zhang, X.; Hu, Q.; Sommerfeld, M.; Chen, Y. (2011): Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: Water footprint and nutrients balance. In: *Bioresource Technology* 102, S. 159–165
- Yen, H.-W.; Brune, D. (2007): Anaerobic co-digestion of algal sludge and waste paper to produce methane. In: *Bioresource Technology* 98(1), S. 130–134
- Yen, H.-W.; Hu, I.; Chen, C.-Y.; Ho, S.-H.; Lee, D.-J.; Chang, J.-S. (2013): Microalgae-based biorefinery – From biofuels to natural products. In: *Bioresource Technology* 135, S. 166–174
- Yu, G.; Zhang, Y.; Schideman, L.; Funk, T.; Wang, Z. (2011): Hydrothermal liquefaction of low lipid content microalgae into bio-crude oil. In: *Transactions of the ASABE* 54(1), S. 239–246
- Zhu, Y.; Albrecht, K.; Elliott, D.; Hallen, R.; Jones, S. (2013): Development of Hydrothermal Liquefaction and Upgrading Technologies for Lipid-Extracted Algae Conversion to Liquid Fuels. In: *Algal Research* 2 (4), S. 455–64
- Zittelli, G.; Rodolfi, L.; Bassi, N.; Biondi, N.; Tredici, M. (2013): Photobioreactors for microalgal biofuel production. In: Borowitzka, M.; Moheimani, N. (Hg.): *Algae for Biofuels and Energy*. Dordrecht, S. 115–131

9 Anhang

9.1 Abbildungen

Abb. 2.1	Bereitstellungsoptionen für Biokraftstoffe	23
Abb. 2.2	Anteil erneuerbarer Energien am Gesamtenergieverbrauch des Verkehrssektors in Deutschland	26
Abb. 2.3	Anteil von Biokraftstoffen am Gesamtkraftstoffverbrauch in Deutschland 2016	27
Abb. 2.4	Produktion und Nutzung von Biokraftstoffen in Deutschland	28
Abb. 3.1	Prozessschritte der Erzeugung algenbasierter Kraftstoffe	30
Abb. 4.1	Konversionspfade für algenbasierte Biokraftstoffe	44
Abb. 5.1	THG-Emissionen verschiedener Biokraftstoffe	57
Abb. 6.1	Szenarien zur Beförderungsleistung des Straßengüterverkehrs für Deutschland	67
Abb. 6.2	Kraftstoffverbrauch schwerer Lkw: Deutschland versus US-Regulatorik	68
Abb. 6.3	Verteilung der Kraftstoffverbräuche verschiedener Güterverkehrs- typen	69
Abb. 6.4	Technologien und Potenziale zur Reduktion von Kraftstoffverbräuchen bei Sattelzugmaschinen im Fernverkehr	70
Abb. 6.5	Modellierte Verbrauchsreduktionspotenziale verschiedener Technologiepakete zur Effizienzsteigerung im Lkw-Fernverkehr	71
Abb. 6.6	Annahmen zu den Zeitpfaden der Einführung alternativer Kraftstoffe	79
Abb. 6.7	THG-Emissionen aus der Bereitstellung und Nutzung verschiedener Kraftstoffe 2020	84
Abb. 6.8	THG-Emissionen aus der Bereitstellung und Nutzung verschiedener Kraftstoffe 2050	85
Abb. 6.9	Kraftstoffserträge pro ha und Jahr 2020	86
Abb. 6.10	Kraftstoffserträge pro ha und Jahr 2050	87
Abb. 6.11	Reduzierung der THG-Emissionen bis 2050 bei der Einführung algenbasierter Diesels und unterschiedlicher Verkehrsnachfrage	88
Abb. 6.12	Reduzierung der THG-Emissionen bis 2050 bei der Einführung von Algenmethan und unterschiedlicher Verkehrsnachfrage	88
Abb. 6.13	Reduzierung der THG-Emissionen bis 2050 bei der Einführung strombasierter Kraftstoffe und unterschiedlicher Verkehrsnachfrage	89

9.2 Tabellen

Tab. 3.1	Typische Varianzen biochemischer Zusammensetzungen verschiedener Algenarten	32
Tab. 3.2	Vergleich wichtiger Parameter verschiedener Verfahren der Algenernte und Entwässerung	36
Tab. 3.3	Charakteristika von Mikroalgenkultivierungssystemen	37
Tab. 3.4	Produktivität verschiedener Algenproduktionssysteme	38
Tab. 3.5	Kosten der Algenlipidproduktion in offenen und geschlossenen Produktionssystemen	42
Tab. 4.1	Geschätzte Produktionskosten von Algenkraftstoffen	48
Tab. 5.1	Nettoenergiebilanz der Erzeugung von Algenlipiden für die Kraftstoffherstellung	53
Tab. 5.2	THG-Bilanz von Algenkraftstoffen	56
Tab. 5.3	Sensitivität der THG-Bilanz von Algenkraftstoffen	56
Tab. 5.4	Wasserbedarf verschiedener Algenproduktionssysteme	58
Tab. 5.5	Wasserverbrauch pflanzenbasierter Biomasse für die Biokraftstoffherzeugung	59
Tab. 6.1	Lkw-Bestand in Deutschland zum 1.1.2017	62
Tab. 6.2	Bestand an schweren Lkw und Sattelzugmaschinen in Deutschland zum 1.1.2017	62
Tab. 6.3	Gesamte und durchschnittliche Jahresfahrleistungen deutscher Kfz 2016 und Veränderungen zum Vorjahr	63
Tab. 6.4	Abschätzung des Endenergieverbrauchs des Straßengüterfernverkehrs durch deutsche Kraftfahrzeuge 2016	64
Tab. 6.5	Beförderungsleistung im Straßengüterverkehr und Anteil des Fernverkehrs 2016	65
Tab. 6.6	Beförderungsleistung im Straßengüterverkehr und Anteil des Fernverkehrs 2012 bis 2016	66
Tab. 6.7	Steckbrief dieselbetriebener Fern-Lkw (Sattelzug)	73
Tab. 6.8	Annahmen zukünftiger Kraftstoffverbräuche und THG-Emissionen eines Dieselmotor-Lkws	73
Tab. 6.9	Steckbrief gasbetriebener Fern-Lkw mit Ottomotor	74
Tab. 6.10	Annahmen zukünftiger Kraftstoffverbräuche und THG-Emissionen eines gasbetriebenen Ottomotor-Lkws	74
Tab. 6.11	Steckbrief Brennstoffzellen-Lkw	75
Tab. 6.12	Annahmen zukünftiger Kraftstoffverbräuche und THG-Emissionen eines Brennstoffzellen-Lkw	76
Tab. 6.13	Steckbrief elektrisch-betriebener Oberleitungs-(Diesel-Hybrid-)Lkw	76
Tab. 6.14	Annahmen zukünftiger Energieverbräuche und THG-Emissionen eines Oberleitungs-Lkw	77
Tab. 6.15	Prognosen der Transportleistung im Straßengüterverkehr für die Modellierung	78

Tab. 6.16	Annahmen zur THG-Bilanz, Energieverbrauch und Flächenenertrag der Produktion von algenbasiertem Diesel	80
Tab. 6.17	Annahmen zukünftiger Energieverbräuche und THG-Emissionen von Algendiesel	80
Tab. 6.18	Annahmen zur THG-Bilanz, Energieverbrauch und Flächenenertrag der Produktion von algenbasiertem Biomethan	81
Tab. 6.19	Annahmen zukünftiger Energieverbräuche und THG-Emissionen von Algenmethan	81
Tab. 6.20	Annahmen zukünftiger Energieverbräuche und THG-Emissionen von strombasierten Kraftstoffalternativen	82
Tab. 6.21	Technische Eignung alternativer Antriebe und Kraftstoffe im Straßenverkehr	91

9.3 Abkürzungen

a	Jahr
BEV	Battery Electric Vehicle (Batteriefahrzeug)
bhp-hr	break horsepower-hour (Leistung)
BtL	Biomass to Liquid (biomassebasierte Flüssigkraftstoffe)
Btu	British thermal unit (Energieeinheit, üblich in den USA)
C	Grad Celcius
CGH ₂	Compressed Gaseous Hydrogen (Druckwasserstoff)
CH ₄	Methan
CH-Prozess	Prozess zur Produktion von HEFA-Kraftstoff, Eigennahme der Firma ARA
CNG	Compressed Natural Gas (komprimiertes Erdgas)
CO ₂ /CO ₂ -Äq.	Kohlendioxid/Kohlendioxidäquivalent
d	Tag
dLUC	Direct land use change
DME/OME	Dimethylether/Oxymethylenether
EU	Europäische Union
FA	Fatty acids (Fettsäuren)
FAME	Fatty-Acid Methyl-Esther (Biodiesel)
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellenfahrzeug)
FT	Fischer-Tropsch
g/kg	Gramm/Kilogramm
GJ	Gigajoule (1 GJ = 1.000 MJ)
H ₂	Wasserstoff
ha	Hektar
HEFA	Hydrotreated Esterified Fatty Acid (dieselähnlicher Biokraftstoff)
HTL	hydrothermale Verflüssigung
HVO	Hydrotreated Vegetable Oils

iLUC	indirect land use change
k. A.	keine Angabe
Kfz	Kraftfahrzeug
km/km ²	Kilometer/Quadratkilometer
kV	Kilovolt (1 kV = 1.000 V)
kW(h)	Kilowatt(stunde); 1 kW(h) = 1.000 W(h)
l	Liter
Lkw	Lastkraftwagen
LNG	Liquefied Natural Gas (Flüssigerdgas)
Low N	Szenario von Lardon et al 2009 mit reduzierter Stickstoffzuführung (N)
m/m ² /m ³	Meter/Quadratmeter/Kubikmeter
MeOH	Methanol
min	Minute
MJ	Megajoule (3,6 MJ = 1 kWh)
MPa	Megapascal
MW	Megawatt (1 MW = 1.000 kW)
N	Stickstoff
NaOH	Natronlauge
NH ₃	Ammoniak
Nm	Newtonmeter (Drehmoment)
Nm ³	Normkubikmeter unter Normbedingungen (0,1013 MPa, 273,15 Kelvin)
NO _x	Stickstoffoxide
P	Phosphor
PBR	Photobioreaktor (zur Produktion von Algenbiomasse)
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Hybridfahrzeug mit externer Lademöglichkeit)
PJ	Petajoule (1 PJ entspricht ca. 107 l Dieseläquivalent)
Pkw	Personenkraftwagen
PS	Pferdestärke
PtG	Power to Gas
PtL	Power to Liquid
PtX	Power to X (X ist Platzhalter für G oder L, also elektrische Energie zu gasförmigen (G) oder flüssigen (L) Energieträgern)
SNG	Synthetic Natural Gas
t/tkm	Tonne/Tonnenkilometer (gefahrte Strecke multipliziert mit der Masse transportierter Güter)
THG	Treibhausgas
TM	Trockenmasse
TtW	Tank to Wheel (Bilanzgrenze vom Tank bis zum Rad)
V	Volt

WtT	Well to Tank (von der Quelle bis zum Tank)
WtW	Well to Wheel (von der Quelle bis zum Rad)
zGG	zulässiges Gesamtgewicht

