

SCHRIFTENREIHE ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT

Analyse

Februar 2019

Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik

Potenziale – Technologien – Zielkonflikte

Gernot Klepper | Daniela Thrän (Hrsg.)

Energiesysteme der Zukunft ist ein Projekt von:

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina | www.leopoldina.org

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften | www.acatech.de

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften | www.akademienunion.de

Impressum

Herausgeber

Prof. Gernot Klepper, Ph. D.
Institut für Weltwirtschaft an der Universität Kiel
Kiellinie 66, 24105 Kiel

Prof. Dr. Daniela Thrän
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ
Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH DBFZ
Torgauerstraße 116, 04347 Leipzig

Reihenherausgeber

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. (Federführung)
Geschäftsstelle München, Karolinenplatz 4, 80333 München | www.acatech.de

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V.
– Nationale Akademie der Wissenschaften –
Jägerberg 1, 06108 Halle (Saale) | www.leopoldina.org

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V.
Geschwister-Scholl-Straße 2, 55131 Mainz | www.akademienunion.de

Empfohlene Zitierweise

Klepper, G./Thrän, D.: *Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Potenziale – Technologien – Zielkonflikte* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2019.

Redaktion

Julika Witte, acatech

Wissenschaftliche Koordination

Dr. Berit Erlach, acatech
Christiane Hennig, Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH DBFZ
Dr. Franziska Schünemann, Institut für Weltwirtschaft an der Universität Kiel

Produktionskoordination

Marie-Christin Höhne, acatech

Gestaltung und Satz

Atelier Hauer und Dörfler GmbH, Berlin

Druck

koenigsdruck.de, Berlin

ISBN: 978-3-9820053-0-0

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie, detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Gedruckt auf säurefreiem Papier | Printed in EC

Das Akademienprojekt

Das Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“ erarbeitet Stellungnahmen und Analysen zur Gestaltung der Energiewende. Stellungnahmen enthalten Handlungsoptionen für die Transformation des Energiesystems und werden nach externer Begutachtung vom Kuratorium des Akademienprojekts verabschiedet. Analysen sind Ergebnisberichte von Arbeitsgruppen. Die inhaltliche Verantwortung für Analysen liegt bei den Autoren. Sofern eine Analyse Bewertungen enthält, geben diese die persönliche Meinung der Autoren wieder.



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften



Vorwort

Bioenergie trägt derzeit in Deutschland mehr zur Energieversorgung bei als alle anderen erneuerbaren Energien zusammen. Gerade im Verkehrsbereich und in der Wärmeerzeugung, wo der Anteil Erneuerbarer noch gering ist, leistet Bioenergie bereits heute einen wertvollen Beitrag zum Klimaschutz. Als speicherbarer Energieträger kann Bioenergie Wind und Sonne gut ergänzen: als Kraftstoff, zur Erzeugung von Prozesswärme in der Industrie und zur Überbrückung langer Dunkelflauten.

Soll die Erderwärmung auf 1,5 Grad begrenzt werden, muss voraussichtlich CO₂ aus der Atmosphäre entfernt werden, um unvermeidbare Emissionen aus Landwirtschaft und Industrie auszugleichen. Das zeigt der 2018 veröffentlichte Sonderbericht des Weltklimarats IPCC. Auch die Europäische Kommission rechnet damit, dass für das ausgerufene Ziel eines treibhausgasneutralen Europas bis 2050 „negative Emissionen“ erforderlich sind. Verschiedene Möglichkeiten, der Atmosphäre CO₂ zu entziehen, sollten daher untersucht werden – unter anderem Bioenergie mit Kohlendioxid-Abscheidung und Speicherung (BECCS).

Im zukünftigen Energiesystem wird es also viele denkbare Einsatzgebiete für Bioenergie geben. Aber wo sind die begrenzten Biomassepotenziale am sinnvollsten einsetzbar? Und wieviel Bioenergie kann nachhaltig genutzt werden, wenn man den Nahrungsmittelbedarf der wachsenden Weltbevölkerung und die steigende Nachfrage nach klimafreundlichen Produkten und Materialien aus Biomasse bedenkt?

Mit techno-ökonomischer Optimierung allein können diese Fragen nicht beantwortet werden. Denn neben einem möglichst großen Beitrag zu einer kostengünstigen, sicheren Energieversorgung werden weitere Erwartungen an die zukünftige Biomassenutzung gestellt. Sie soll ökologisch verträglich sein, zur regionalen Wertschöpfung beitragen und das Landschaftsbild nicht stören.

Die interdisziplinär zusammengesetzte Arbeitsgruppe hat den zukünftigen Einsatz der Bioenergie aus verschiedenen Blickwinkeln diskutiert. Anhand von 29 Kriterien haben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mögliche Entwicklungspfade bewertet und stellen fest: Bioenergie kann auf vielfältige Weise sinnvoll zu Energieversorgung und Klimaschutz beitragen – einen Königsweg gibt es aber nicht. Alle Technologien haben Vor- und Nachteile. Für welchen Weg man sich entscheidet, muss daher gesellschaftlich diskutiert werden. Diese Diskussion möchten wir mit der vorliegenden Publikation anstoßen.

Den Mitgliedern der Arbeitsgruppe danken wir herzlich für ihr Engagement.



Prof. Gernot Klepper, Ph.D.
Leiter der Arbeitsgruppe „Bioenergie“



Prof. Dr.-Ing. Daniela Thrän
Leiterin der Arbeitsgruppe „Bioenergie“

Inhalt

Abkürzungen und Einheiten	6
Zusammenfassung	7
1 Einleitung	15
2 Biomasseproduktion	20
2.1 Heutige Biomassenutzungskonkurrenzen.....	21
2.2 Unsicherheiten der Potenzialschätzungen und Trade-offs	24
2.2.1 Potenzial aus Ackerland, Wiesen- und Weideland	25
2.2.2 Potenzial aus Wald.....	31
2.2.3 Potenzial aus Rest- und Abfallstoffen	32
2.2.4 Potenziale in Deutschland	34
2.3 Fazit und Handlungsbedarf	35
3 Energetische Nutzung von Biomasse	37
3.1 Technologien zur Bioenergiebereitstellung im Überblick.....	37
3.2 Künftige Nutzungspfade im Energiesystem.....	43
3.3 Regelwerk in Deutschland und Europa	44
3.4 Treibhausgasemissionen aus Bioenergiebereitstellung, -umwandlung und -nutzung	46
3.5 Herausforderungen und energiepolitischer Handlungsbedarf	51
4 Nutzung von Biomasse zur CO₂-Entnahme	52
4.1 Was bedeutet das für Deutschland und Europa?	55
4.2 CO ₂ -Entnahmetechnologien	57
4.3 CCS-Technologie	63
4.4 Technologieoptionen für BECCS.....	65
4.5 Akzeptanz von BECCS.....	68
4.6 BECCS im Kontext der deutschen und europäischen Energie- und Klimapolitik...	73
4.7 Herausforderungen und Handlungsbedarf	74

5	Bewertungsrahmen für Bioenergietechnologieoptionen.....	76
5.1	Kriterien für einen umfassenden Bewertungsrahmen	78
5.2	Anwendung des Bewertungsrahmens.....	80
5.2.1	Ausgewählte Bioenergietechnologien	80
5.2.2	Referenzsysteme	83
5.2.3	Anwendung der Kriterien auf die gewählten Bioenergietechnologiekonzepte	83
5.2.4	Grenzen der Betrachtung und Aussagefähigkeit der Untersuchung	84
5.3	Ergebnisse und Diskussion	85
5.4	Schlussfolgerungen	88
6	Fazit	91
7	Anhang: Ergänzende Angaben zur Kohlenstoffspeicherung in Mooren.....	96
	Literatur.....	97
	Das Akademienprojekt	109

Abkürzungen und Einheiten

BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage
BHKW	Blockheizkraftwerk
CCS	Carbon Capture and Storage, CO ₂ -Abtrennung und -Speicherung
CDR	Carbon Dioxide Removal
CCU	Carbon Capture and Utilization, CO ₂ -Abscheidung und -Verwendung
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EU ETS	European Union Emissions Trading System, Europäisches Emissionshandelssystem
ILUC	Indirect Land Use Change
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
Mio.	Millionen
PV	Photovoltaik
TRL	Technology Readiness Level, Entwicklungsstand der Technologie

a	Jahr
EJ	Exajoule (1 EJ entspricht 277,8 TWh)
EJ/a	Exajoule pro Jahr
ha	Hektar (1 ha entspricht 0,01 km ²)
GJ	Gigajoule (1 GJ entspricht 277,8 kWh)
Gt	Gigatonne (1 Gt entspricht 1 Mrd. t)
kg	Kilogramm
km ²	Quadratkilometer
kW _{el}	Kilowatt elektrischer Energie
kW _{th}	Kilowatt thermischer Energie
Mt	Megatonnen (1 Mt entspricht 1 Mio. t)
MW _{el}	Megawatt elektrischer Energie
MW _{th}	Megawatt thermischer Energie
MWh	Megawattstunde
t	Tonne
t/a	Tonnen pro Jahr
TWh	Terawattstunde

Zusammenfassung

Im Jahr 2017 deckte Bioenergie mit 222 Terawattstunden rund 9 Prozent des deutschen Endenergiebedarfs und trug damit mehr zur Energieversorgung bei als alle anderen erneuerbaren Energien zusammen. Der größte Teil der eingesetzten Bioenergie (63 Prozent) diente dabei der Wärmeversorgung, während Strom aus Biomasse 23 Prozent und Biokraftstoffe 14 Prozent beitrugen.

Im Zuge der Energiewende wird sich die Erzeugung und Verwendung von Bioenergie bis 2050 voraussichtlich stark wandeln. Als speicherbarer Energieträger, der flexibel zur Strom-, Wärme- und Kraftstofferzeugung eingesetzt werden kann, kann Bioenergie Windkraft und Photovoltaik gut ergänzen und auch in Zukunft zu einer umweltfreundlichen, sicheren und bezahlbaren Energieversorgung beitragen.

Für eine nachhaltige Bioenergiestrategie stellt sich erstens die Frage nach den **Biomassepotenzialen**, das heißt, wie viel und welche Arten von Biomasse energetisch genutzt werden sollen. Zweitens muss festgelegt werden, wie die energetisch nutzbare Biomasse im **Energiesystem** am sinnvollsten eingesetzt werden kann.

Bioenergie im Kontext der globalen Landnutzung

Wie viel Biomasse zukünftig energetisch genutzt werden kann und soll, wird kontrovers diskutiert. Denn der verstärkte Einsatz von Bioenergie birgt Risiken: Einerseits bestehen Nutzungskonkurrenzen zu der Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln sowie der Herstellung von Produkten und Materialien aus Biomasse. Zudem können Ökosysteme und die Qualität von Böden und Gewässern beeinträchtigt sowie die Artenvielfalt gefährdet werden. Beim Anbau von Energiepflanzen können darüber hinaus Treibhausgasemissionen entstehen, die den Beitrag der Bioenergie zum Klimaschutz erheblich schmälern würden. Art und Ausmaß dieser Risiken hängen von den eingesetzten Rohstoffen ab. Die geringsten Risiken birgt der Einsatz von Rest- und Abfallstoffen.

Da Agrarrohstoffe und Holz international gehandelt werden, kann eine wissenschaftlich basierte Abschätzung nachhaltig nutzbarer Bioenergiemengen nur auf globaler Ebene erfolgen. Die **Bioenergienutzung in Deutschland ist daher untrennbar mit der globalen Landnutzung verbunden**. Durch die wachsende Weltbevölkerung wird der Bedarf an Biomasse für die Nahrungs- und Futtermittelproduktion voraussichtlich weiter zunehmen. Potenziale an ungenutzten Landflächen, die bewirtschaftet werden könnten, gibt es kaum, denn 75 Prozent der globalen Landfläche werden bereits durch den Menschen bewirtschaftet. Die noch ungenutzten Landflächen bestehen zum einen aus unproduktiven Böden wie Wüsten, zum anderen aus den letzten unberührten Urwäldern. Eine Produktion von Biomasse zur Energieerzeugung kann und sollte daher nur auf bereits genutzten Landflächen erfolgen.

Soll Biomasse verstärkt energetisch genutzt werden, gibt es dafür zwei Möglichkeiten: Entweder es gelingt, die **landwirtschaftlichen Erträge** sehr stark zu steigern. Wie realistisch diese Option ist, ist jedoch unter Agrarfachleuten umstritten. Zudem ist zu berücksichtigen, dass eine intensivere Bewirtschaftung mit höherem Einsatz an Düngemitteln und Pestiziden auch höhere Treibhausgasemissionen und andere schädliche Umweltauswirkungen nach sich ziehen kann. Die andere Möglichkeit besteht darin, den Biomassebedarf in anderen Nutzungsbereichen zu reduzieren. Das größte Potenzial dafür bietet eine **Umstellung der Ernährungsweise auf überwiegend pflanzliche Produkte**. Derzeit wird mehr als die Hälfte der für menschliche Zwecke geernteten Biomasse an Nutztiere verfüttert. Studien zeigen, dass rechnerisch bei einer rein pflanzlich basierten Ernährung weltweit von der gleichen Fläche etwa doppelt so viele Menschen ernährt werden könnten wie heute.

Schwer erfassbare Effekte in den Landnutzungssystemen beeinflussen die Treibhausgasbilanz

Ein erhebliches Problem bei der Bewertung des Klimaschutzbeitrags von Bioenergie sind sogenannte **indirekte Landnutzungsänderungen** (ILUC). Diese treten auf, wenn der Anbau von Bioenergiepflanzen durch damit verbundene steigende Preise für Biomasse zur Ausweitung von Agrarflächen in anderen Gegenden führt. Bisher können diese Effekte nicht wissenschaftlich fundiert beziffert werden. Verschiedene Ansätze zu ihrer Abschätzung werden kontrovers diskutiert.

Auch die Frage, inwieweit eine Ausweitung der energetischen Nutzung von Holz zum Klimaschutz beiträgt, ist unter Fachleuten umstritten. Denn bei der Verbrennung von Biomasse wird in der Regel in etwa so viel CO₂ freigesetzt wie bei der Verbrennung von Kohle. In der Folge nimmt die nachwachsende Vegetation dann wieder CO₂ auf. Aufgrund der langsamen Wachstumszyklen von Bäumen kann es allerdings Jahrzehnte dauern, bis das gesamte bei der Verbrennung ausgestoßene CO₂ wieder absorbiert ist. Auch Auswirkungen der Waldbewirtschaftung auf die Kohlenstoffbilanz des Bodens sind zu beachten. Erst wenn durch Einsparung fossiler Rohstoffe mehr CO₂ vermieden als durch Verbrennung des Holzes und die Waldbewirtschaftung freigesetzt wurde, trägt Bioenergie wirklich zum Klimaschutz bei. Die **Treibhausgasbilanz der energetischen Holznutzung** hängt daher vom Betrachtungszeitraum ab.

Um die Treibhausgaseinsparung der Bioenergienutzung zu bestimmen, wird zudem ein Szenario benötigt, das die weitere wahrscheinliche Entwicklung ohne Bioenergie beschreibt. Zum einen muss gegenübergestellt werden, wie sich der Kohlenstoffbestand in Vegetation und Boden entwickelt hätte, wenn keine Bioenergie genutzt würde. Zentrale Fragen sind: Würde die Biomasse bald verrotten und das CO₂ ohne Energiegewinnung freigesetzt werden? Würden die Bäume über viele Jahrzehnte weiterwachsen und CO₂ binden? Zum anderen müssen Annahmen getroffen werden, wie die benötigten Energiedienstleistungen bereitgestellt würden, wenn keine Bioenergie zur Verfügung steht. Würden in dem Fall zum Beispiel Kohle- oder Erdgaskraftwerke betrieben? Je nach verwendeter Berechnungsmethodik und Annahmen für das Referenzszenario werden die **Treibhausgaseinsparungen durch Bioenergie sehr unterschiedlich eingeschätzt**.

Rest- und Abfallstoffe

Ein gut quantifizierbares Potenzial mit geringen sozialen und ökologischen Risiken bilden **Rest- und Abfallstoffe**. Weltweit könnten diese jährlich zwischen 40 und 140 Exajoule an Primärenergie bereitstellen und zukünftig bis zu einem Fünftel des weltweiten Primärenergiebedarfs decken. Zum Vergleich: Heute werden etwa 60 Exajoule an Biomasse energetisch genutzt.

Im Gegensatz zu Holz und Agrarprodukten werden Rest- und Abfallstoffe nicht international gehandelt, da ein Transport über weite Strecken aufgrund ihrer geringen Energiedichte nicht wirtschaftlich ist. Gelänge es in Deutschland, bisher nicht erschlossene Potenziale an Rest- und Abfallstoffen zu erschließen, stünden etwa 200 bis 340 Terawattstunden zur Verfügung. Diese könnten je nach Entwicklung des Energieverbrauchs etwa 9 bis 17 Prozent des Primärenergiebedarfs decken. Durch eine **Kaskadennutzung** kann **Holz** zunächst stofflich, am Ende der Lebensdauer der Produkte dann energetisch verwertet werden. Auf diese Weise kann Biomasse insgesamt effizienter genutzt und eine Konkurrenz zwischen stofflicher und energetischer Nutzung abgefedert werden.

Anforderungen an die zukünftige Nutzung der Bioenergie

Die begrenzten Biomassepotenziale sollten zukünftig so verwendet werden, dass sie einen möglichst wertvollen Beitrag zur Energiewende leisten. Dafür muss das **Zusammenspiel der Bioenergie mit anderen erneuerbaren Energien** optimiert werden. Bioenergie sollte vorrangig diejenigen Funktionen im Energiesystem übernehmen, die andere erneuerbare Energiequellen nicht oder nur zu sehr hohen Kosten erfüllen können. Auf diese Weise soll sie dazu beitragen, eine **sichere Versorgung** mit Strom, Wärme und Mobilität möglichst **kostengünstig** zu realisieren.

Als wichtigste zukünftige Einsatzbereiche gilt derzeit die Bereitstellung von **industrieller Wärme** und von **Kraftstoffen** für Verkehrsbereiche, die schwierig zu elektrifizieren sind. Die **kombinierte Strom- und Wärmeerzeugung (KWK)** aus Bioenergie wird voraussichtlich künftig flexibel erfolgen, um die fluktuierende Einspeisung aus Windkraft- und Solaranlagen auszugleichen. Brenn- und Kraftstoffe aus Biomasse können helfen, auch **lange wind- und sonnenarme Zeiten zu überbrücken**. Zur Bereitstellung von **Heizwärme** wird Bioenergie wahrscheinlich vorrangig in schwer dämmbaren Gebäuden verwendet werden, in denen Wärmepumpen schlecht einsetzbar sind. Zudem kann Biomasse bei der Herstellung von Produkten und Materialien fossile Quellen als Kohlenstofflieferant ersetzen. Dies fällt allerdings in den Bereich der stofflichen Nutzung, die hier nicht im Detail betrachtet wird.

Langfristig gesehen könnte Bioenergie noch eine zusätzliche Rolle im Energiesystem spielen, die in der bisherigen Diskussion um die Energiewende noch nicht ausreichend berücksichtigt wird. Globale Klimaschuttszenarien zeigen, dass eine Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 oder 2 Grad Celsius bis 2100 nur dann erreicht werden kann, wenn **in den kommenden Jahrzehnten der Atmosphäre CO₂ entzogen** wird. Denn selbst wenn die Energieversorgung komplett auf erneuerbare Energien umgestellt wird, bleiben Treibhausgase aus der Landwirtschaft und einigen Industriezweigen, die sich kaum vermeiden lassen. Aus der Atmosphäre entferntes CO₂

könnte diese Treibhausgase kompensieren. Die Klimaschutzszenarien, die in den Sachstandsberichten des Weltklimarates (IPCC) analysiert werden, nutzen dafür größtenteils **Bioenergie mit Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (BECCS)**. Die Biomasse würde mit BECCS also verwendet, um neben Wärme, Strom oder Kraftstoff sogenannte **negative Emissionen** zu erzeugen.

Auch aus dem Landnutzungssystem werden vielfältige Erwartungen an Bioenergie gestellt: Durch eine **naturverträgliche Gewinnung** sollen die Artenvielfalt gefördert, Boden und Gewässer geschützt sowie Kohlenstoff in Boden und Vegetation angereichert werden. Zudem soll Bioenergie zu **Beschäftigung und Wertschöpfung im ländlichen Raum** beitragen.

Bioenergie mit CCS im Vergleich mit anderen CO₂-Entnahmetechnologien

Neben BECCS gibt es weitere Verfahren, um der Atmosphäre CO₂ zu entziehen und unvermeidbare Emissionen unter anderem aus der Landwirtschaft zu kompensieren:

- Durch **großflächige Aufforstung** wird CO₂ im Holz gebunden. Das Potenzial lässt sich erhöhen, wenn das Holz geerntet und zu langlebigen Produkten (zum Beispiel Baumaterialien) verbaut wird.
- Biomasse kann zu sogenannter **Biokohle**, einer Art Holzkohle, verarbeitet und in landwirtschaftliche Böden eingearbeitet werden. Der Kohlenstoff bleibt in der Biokohle langfristig gebunden, zusätzlich können die Bodeneigenschaften verbessert werden.
- Ökosysteme wie **Moore** und Mangrovenwälder, die besonders viel Kohlenstoff speichern, können **renaturiert** werden. Das kann auch zum Erhalt der Artenvielfalt beitragen.
- Bestimmte Formen der Bewirtschaftung (zum Beispiel ohne Pflügen) können dazu führen, dass sich **Kohlenstoff im Boden anreichert**.
- Die **direkte Entnahme von CO₂ aus der Luft** (Direct Air Capture) mit chemischen Bindemitteln benötigt weniger Landfläche als Verfahren, in denen CO₂ durch Vegetation oder Böden gebunden wird. Nachteile sind der hohe Energieverbrauch und die hohen Kosten. Wie bei BECCS wird das CO₂ unterirdisch gespeichert (CCS).
- Einige Gesteine wie Basalt binden im natürlichen **Verwitterungsprozess** CO₂. Werden sie fein vermahlen und verteilt, kann dieser Prozess **beschleunigt** werden. Dieses Verfahren befindet sich allerdings noch in einer frühen Entwicklungsphase und bedarf weiterer Forschung.

Die meisten dieser CO₂-Entnahmetechnologien bergen derzeit **große Unsicherheiten** im Hinblick auf Potenziale, Flächenbedarf, Kosten, Umweltauswirkungen und die Dauerhaftigkeit der Kohlenstoffspeicherung. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Um die unvermeidbaren Emissionen auszugleichen und treibhausgasneutral zu werden, müsste in Deutschland voraussichtlich ein **Mix aus mehreren dieser Technologien** eingesetzt werden.

Um konsensfähige Strategien zum Erreichen der erforderlichen Treibhausneutralität zu entwickeln, sollten die **Bedeutung der CO₂-Entnahme** und die Vor- und Nachteile der verschiedenen CO₂-Entnahmetechnologien dringend in der Gesellschaft und auf politischer Ebene thematisiert werden. Insbesondere der Einsatz der umstrittenen **CCS-Technologie** sollte vor diesem Hintergrund **neu diskutiert** werden.

Welche Rolle BECCS in der zukünftigen Klimaschutzstrategie spielen kann und soll, muss sich zunächst in der gesellschaftlichen Debatte herauskristalisieren. Wenn BECCS ab 2050 in nennenswertem Maßstab CO₂ aus der Atmosphäre aufnehmen soll, müsste allerdings die kommerzielle Entwicklung **zeitnah beginnen**, und zwischen 2020 und 2030 müssten erste BECCS-Anlagen kommerziell in Betrieb gehen. Zudem müsste eine Infrastruktur für CO₂-Transport und -Einlagerung aufgebaut werden. Darüber hinaus bedarf es **rechtlicher und ökonomischer Rahmenbedingungen**, die CO₂-Entnahmetechnologien fördern können und die Lasten und Nutzen der Technologie fair verteilen. Denn unter den derzeitigen Rahmenbedingungen gibt es keine Anreize, die Technologie zu entwickeln.

Ein umfassendes Bewertungsinstrument für Bioenergietechnologien

Abhängig vom weiteren Verlauf der Energiewende können sich die Anforderungen an die Bioenergienutzung jederzeit ändern. Um ständiges Nachsteuern bei der Bioenergiepolitik zu vermindern und dadurch die Planungssicherheit für Entwickler, Anbieter und Betreiber von Bioenergietechnologien zu erhöhen, ist eine umfassende Bewertung verschiedener Technologieoptionen erforderlich.

Die interdisziplinäre Arbeitsgruppe des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“ hat zu diesem Zweck einen **Kriterienkatalog** mit insgesamt 29 Kriterien erarbeitet. Dazu zählen technische Kriterien wie der technologische Reifegrad und die Effizienz, systemische Kriterien, die die Einbettung ins Energiesystem charakterisieren, und ökonomische Kriterien wie die Energiegestehungskosten und das Potenzial regionaler Wertschöpfung und Beschäftigung. Neben den Treibhausgasemissionen werden weitere ökologische Kriterien wie weitere Emissionen, Flächenverbrauch und die Auswirkungen auf die Artenvielfalt berücksichtigt. Soziale Kriterien beinhalten unter anderem Aspekte der Verteilungsgerechtigkeit, der empfundenen Autonomie, der Risikowahrnehmung sowie mögliche gesundheitliche Beeinträchtigungen (zum Beispiel durch Feinstaub). Zudem wird die Möglichkeit zur CO₂-Abscheidung der jeweiligen Entwicklungspfade berücksichtigt und untersucht.

Die Kriterien wurden auf je zwei **exemplarische Entwicklungspfade** für Holz und Lignozellulose und für Biogas von heute bis 2050 angewendet. Diese sind in Tabelle 1 aufgeführt.

	2018	2050 Weiterentwicklung heute genutzter Technologie	2050 Perspektivische Anwendung mit Kraftstofferzeugung
Feuchte Biomasse	Biogasanlage mit BHKW zur lokalen Strom- und Wärmeerzeugung	Flexibel betriebene Biogasanlage mit BHKW zur lokalen Strom- und Wärmeerzeugung	Biogasanlage mit Aufbereitung des Biogases zu Biomethan und Einspeisung ins Erdgasnetz
Holz	Holzheizkessel zur Erzeugung von Niedertemperaturwärme	Holzvergaseranlage zur lokalen Strom- und Wärmeerzeugung	Holzbasierte Bioraffinerie zur Erzeugung von Kraftstoffen

Tabelle 1: Untersuchte Technologien

Die ausgewählten Entwicklungspfade wurden anhand eines Ampelsystems mit fünf Stufen von Dunkelgrün (sehr positiv) bis Rot (sehr problematisch) im Hinblick auf die identifizierten Kriterien bewertet. Dadurch soll aufgezeigt werden, an welchen Stellen Hindernisse bei der Umsetzung eines Technologiepfades zu erwarten sind, deren Überwindung zusätzliche Anstrengungen erfordert.

Ob der Einsatz einer Technologie sinnvoll ist, hängt unter anderem davon ab, ob sie Vorteile gegenüber alternativen Technologien bietet. Daher erfolgte bei vielen Kriterien die Bewertung im Vergleich zu einer Referenztechnologie, die die gleichen Energiedienstleistungen zur Verfügung stellt wie die jeweilige Bioenergietechnologie. Während für das Jahr 2018 fossile Referenztechnologien angesetzt wurden, sind es für 2050 alternative Erneuerbare-Energie-Technologien (beispielsweise synthetisches Methan hergestellt mit Strom aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen als Referenz für Biomethan).

Die Bewertung anhand der definierten Kriterien zeigt die Vor- und Nachteile der verschiedenen Entwicklungspfade und offenbart, wo mögliche Hindernisse bei der Umsetzung zu erwarten sind. In der Gesamtschau wird deutlich, dass **alle untersuchten Technologien auf sinnvolle Weise zur künftigen Energieversorgung beitragen können**. Die Kraftstoffherstellung in der Bioraffinerie und die Herstellung von Biomethan, das flexibel in allen Sektoren als Ersatz für Erdgas verwendet werden kann, sind mit der Perspektive bis 2050 vermutlich systemdienlicher als die kleineren Strom- und Wärmeerzeugungsanlagen. Denn während Strom und Niedertemperaturwärme effizient mit Windkraft- und Photovoltaikanlagen sowie Wärmepumpen hergestellt werden können, ist die Erzeugung von Kraftstoffen mit Wind- und Solarstrom komplizierter und geht mit hohen Energieverlusten einher.

Technisch sind die betrachteten Technologien weitgehend ausgereift und bereits am Markt verfügbar. Lediglich bei der **Bioraffinerie besteht Forschungs- und Entwicklungsbedarf**.

Für die **Umweltfolgen** ist die Bereitstellung der Biomasse ausschlaggebend. Tendenziell sind alle betrachteten Bioenergietechnologien für 2050 aus ökologischer Sicht ungünstiger als die Bereitstellung vergleichbarer Energiedienstleistungen basierend auf Windkraft- und Solarstrom – insbesondere bei den Kriterien Flächenbedarf, Auswirkungen auf die Biodiversität und Treibhausgasbilanz. **Partikelemissionen** sind aufgrund ihrer gesundheitsschädlichen Wirkung bei allen Technologien ein wichtiges Kriterium, das auch für die zukünftige Akzeptanz entscheidend sein kann.

Auch die **regionalökonomischen und sozialen Effekte** sind stark von der Rohstoffbereitstellung geprägt. Insgesamt sind bei der Holzraffinerie als „Großtechnologie“ die größten Widerstände zu erwarten.

Die **Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen** im künftigen Gesamtsystem hängt in hohem Maße davon ab, wie sich die Kosten konkurrierender Technologien wie Power-to-Gas entwickeln. Dies ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Dezentrale Anlagenkonzepte wie Kraftwärmekopplungs- und Biogasanlagen bieten in vergleichsweise vielen Regionen Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenziale. Bei zentralen Anlagenkonzepten wie der Bioraffinerie konzentrieren sich diese Effekte auf eine geringere Zahl an Akteuren und Anlagenstandorten.

Für eine **CO₂-Abscheidung** und damit die Erzeugung negativer Emissionen kommen von den untersuchten Technologien nur die Bioraffinerie und die Biomethananlage infrage. Für die Biomethananlage wäre zu prüfen, inwieweit die Anbindung an die Transportinfrastruktur für CO₂ logistisch praktikabel und wirtschaftlich vertretbar wäre, da die jährlich anfallenden CO₂-Mengen relativ gering sind.

Eine wichtige Frage ist, wie aufwendig es ist, von einem einmal eingeschlagenen Entwicklungspfad auf einen anderen zu wechseln. Dies kann erforderlich werden, wenn sich beispielsweise die Kosten verschiedener Technologien oder die Anforderungen des Energiesystems anders entwickeln als erwartet, wenn neue Erkenntnisse zum Bedarf negativer Emissionen aus der Klimaforschung vorliegen oder wenn gesellschaftlich und politisch über den Einsatz von CCS und BECCS entschieden wird.

Dabei ergeben sich grundsätzliche Unterschiede zwischen feuchter Biomasse zur Biogaserzeugung und Holz. Die Herstellung und Nutzung von **Biomethan** kann schrittweise aufbauend auf der bestehenden Biogasnutzung entwickelt werden. Die Struktur der Rohstoffbereitstellung und die beteiligten Akteure bei der Rohstoffbereitstellung und beim Anlagenbetrieb unterscheiden sich kaum. Bei der Nutzung von Holz sind die beiden möglichen Transformationspfade (Kraft-Wärme-Kopplung versus Bioraffinerie) hingegen grundlegend verschieden. Für die **Bioraffinerie** müssten Biomasseströme aus regionalen Bereitstellungs- und Nutzungskonzepten herausgelöst werden. Die sozialen Folgen wären stärker ausgeprägt: Regionale Akteure insbesondere in der Land- und Forstwirtschaft würden gegebenenfalls weniger profitieren, und die bisherigen Nutzer zum Beispiel von Brennholz würden ihre Heizenergiequelle verlieren.

Die Bewertung der exemplarischen Entwicklungspfade für Holz und Biogas zeigt, dass noch **große Ungewissheiten** bei den Transformationspfaden für die künftige Bioenergienutzung bestehen. Durch eine **regelmäßige, transparente und umfassende Bewertung** verschiedener Entwicklungspfade könnten diese reduziert werden. Das in der Arbeitsgruppe entwickelte Bewertungsinstrument bietet Ansätze dafür.

Herausforderungen für eine nationale Bioenergiestrategie

Agrarbiomasse energetisch zu nutzen, birgt insbesondere durch die möglichen indirekten Landnutzungseffekte ökologische und soziale **Risiken**, die teilweise schwer zu quantifizieren sind. Verzichtet man andererseits auf die Verwendung von Bioenergie, könnte die Energiewende teurer und komplizierter in der Umsetzung

werden – dadurch droht die Gefahr, die Klimaschutzziele durch den anhaltenden Einsatz fossiler Energieträger zu verfehlen. Diese Risiken müssen sorgfältig gegeneinander abgewogen werden.

Für eine nachhaltige Bioenergienutzung muss die Rolle der Bioenergie im Energie- und Landnutzungssystem berücksichtigt werden. Das erfordert eine **enge Abstimmung der Klima-, Energie-, Agrar- und Umweltpolitik**. Für die Kontrolle und Regulierung der Biomassenutzung wäre langfristig gesehen ein Instrumentarium wünschenswert, das Klimaschutz, den Schutz von Ökosystemen und soziale Aspekte der Ernährungssicherheit als ein integriertes System betrachtet. **Nachhaltigkeitsanforderungen** sollten dabei nicht nur an Bioenergie gestellt werden, sondern gleichermaßen **an alle im Inland erzeugten sowie importierten land- und forstwirtschaftlichen Produkte**.

Wie **Biomasse im Energiesystem zukünftig am sinnvollsten eingesetzt werden kann, lässt sich aus heutiger Sicht nicht abschließend beurteilen**. Ob Lignozellulose zukünftig in Bioraffinerien oder in dezentralen KWK-Anlagen genutzt wird, hängt beispielsweise davon ab, ob technische Schwierigkeiten bei der Bioraffinierietechnologie überwunden und deren Kosten signifikant gesenkt werden können, aber auch, wie beide Technologien von der Bevölkerung akzeptiert werden. Auch eine Entscheidung für oder gegen den zukünftigen Einsatz von CCS und CO₂-Entnahmetechnologien kann große Auswirkungen darauf haben, wie Biomasse im Energiesystem perspektivisch eingesetzt werden wird. Denn CCS ist eher für große, zentralere Anlagen geeignet. Daher ist ein **gesellschaftlicher Dialog und Beteiligungsprozess** zu diesen Technologien dringend erforderlich.

1 Einleitung

Biomasse trägt zur Energiebereitstellung in Deutschland derzeit mehr bei als alle anderen erneuerbaren Energien zusammen. Während im Wärme- und Verkehrssektor über 90 Prozent der eingesetzten erneuerbaren Energie aus Biomasse stammt, sind es selbst im Stromsektor mehr als ein Viertel. Insgesamt werden rund 60 Prozent des Endenergiebeitrags erneuerbarer Energien aus Biomasse (einschließlich Klärgas, Müll und Deponiegas) gewonnen. Mit 222 Terawattstunden (0,80 Exajoule) deckte Bioenergie im Jahr 2017 rund 9 Prozent des deutschen Endenergieverbrauchs.¹ Dadurch wurden nach Berechnungen des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie 64,3 Millionen Tonnen CO₂ eingespart,² was 36 Prozent der gesamten Treibhausgaseinsparungen durch erneuerbare Energien entspricht.³

Bioenergie ist also bereits heute ein wichtiger Energieträger. Für das zukünftige Energiesystem birgt ihr Einsatz weitere Potenziale: Im Gegensatz zu Wind- und Solarenergie kann Bioenergie auch über lange Zeiträume gut gespeichert werden und ist im Energiesystem vielfältig einsetzbar, etwa zur planbaren Stromerzeugung, als Biokraftstoff im Verkehrssektor und zur Wärmeerzeugung. Daher ergänzt sie die fluktuierenden Energiequellen sehr gut. Studien deuten darauf hin, dass die Energiewende ohne Bioenergie wesentlich schwieriger und teurer werden würde, da sie eine wichtige Alternative zu fossilen Brennstoffen darstellt.⁴

Dem potenziellen Beitrag zum Klimaschutz stehen allerdings teilweise erhebliche Risiken der Bioenergienutzung gegenüber. Bioenergie wird aus vielfältigen Ressourcen gewonnen und je nach Art des Rohstoffs teilweise kontrovers diskutiert. So befürchten Kritiker, dass ein verstärkter Einsatz von Bioenergie ungewollte Nebeneffekte wie die Übernutzung von Wäldern nach sich zieht und dadurch langfristig nicht beziehungsweise weniger als oft angenommen zum Klimaschutz beiträgt. Anbaubiomasse, die zur Energiegewinnung genutzt wird, kann in Konkurrenz zur Ernährung von Menschen und Nutztieren (Tank-Teller-Diskussion) sowie als Rohstoff (zum Beispiel Holz) stehen und in diesen Bereichen zu Nutzungskonkurrenzen führen. Auswirkungen auf Ökosysteme, Artenvielfalt, Atmosphäre, Böden und Gewässer sind ebenso Teil der Debatte.

Die Nutzung von Biomasse in Kaskaden wird daher von politischer und gesellschaftlicher Seite gefordert. Sie ist besonders für lignozellulosehaltige Biomassen interessant – und in Ansätzen bereits implementiert. So hat Holz in Europa bereits heute im Mittel 2,6 Nutzungszyklen.⁵ Eine verstärkte Kaskadennutzung dürfte sich nicht nur auf die Quantität, sondern auch auf die Qualität der Biomasse zur energetischen Nutzung

1 BMWI 2018-1; BMWI 2018-2.

2 BMWI 2018-1.

3 UBA 2018-1.

4 Zum Beispiel acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017; BMWI 2017-2; Lunz 2016, S. 119.

5 Mantau et al. 2010.

auswirken (Rest- und Abfallstoffe statt Rohstoffe aus der Land- und Forstwirtschaft). Der Kaskadengedanke umfasst verschiedene Dimensionen.⁶ Die Weiterentwicklung der Kaskadennutzung ist ein wichtiger Pfeiler für eine nachhaltige Biomassenutzung, wird allerdings in diesem Papier nicht im Detail betrachtet.

Da Bioenergie nur in begrenztem Maße zur Verfügung steht, sollte sie so eingesetzt werden, dass der Nutzen für das Gesamtsystem möglichst groß ist.⁷ Sie sollte diejenigen Funktionen im Energiesystem übernehmen, die durch andere erneuerbare Energien nicht oder nur zu sehr hohen Kosten erfüllt werden können. Biomasse kommt also im Kontext erneuerbarer Energiequellen eine spezifische Rolle zu. Das Problem: Die Erwartungen, wie Bioenergie besonders gewinnbringend und nützlich im Energiesystem eingesetzt werden kann, ändern sich schnell. Haben Fachleute beispielsweise lange Zeit angenommen, dass der Verkehrssektor vor allem durch Biokraftstoffe umweltfreundlicher werden kann, so hat sich dieses Bild mit dem Konzept der Sektorkopplung – also der zunehmenden Verknüpfung von Strom, Wärme und Verkehr – gewandelt. In den Energieszenarien bis 2050 wird Bioenergie als wichtiges Element zur Erreichung ambitionierter Klimaschutzziele gesehen, jedoch mit Zuweisung unterschiedlicher Anteile und Rollen von Biomasse, ob zur Nutzung als Kraftstoff, zur Strom- und Wärmeerzeugung oder zum Einsatz in der Bioökonomie (Abbildung 1).

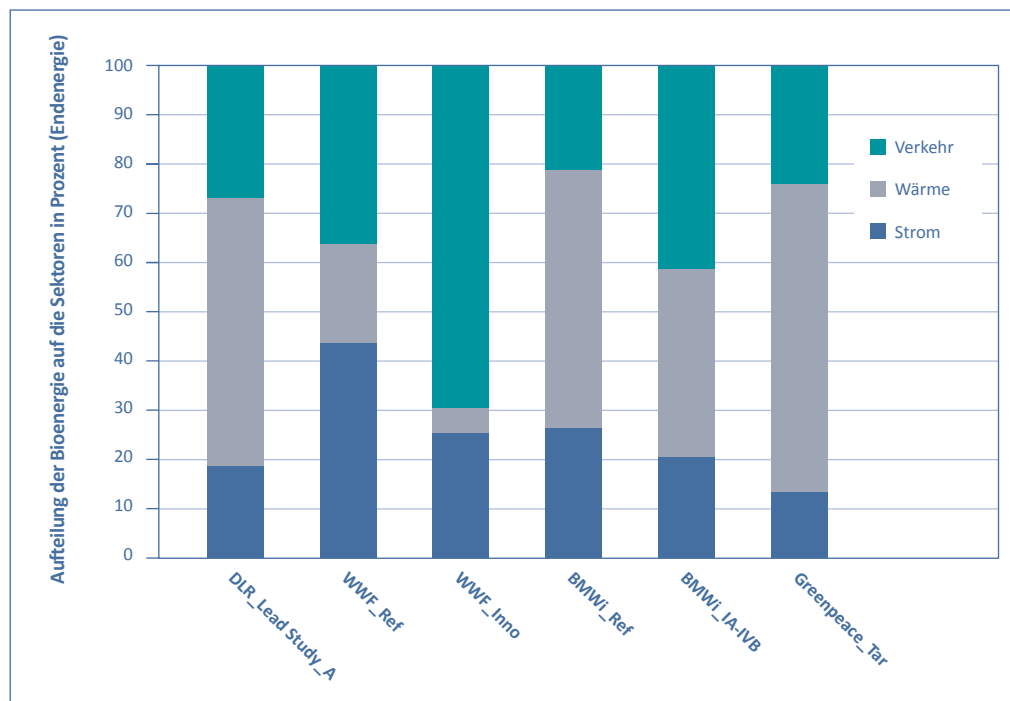


Abbildung 1: Aufteilung der Bioenergie auf die Sektoren in verschiedenen Energieszenarien für das Jahr 2050, Szarka et al. 2017.

Langfristig gesehen – also auch über das Jahr 2050 hinausgehend – könnte Bioenergie noch eine weitere, völlig andere Rolle im Energiesystem spielen, die bisher in den Energieszenarien nicht berücksichtigt ist. Globale Klimaschutzszenarien, die in den Berichten des Weltklimarats IPCC zusammengefasst sind, deuten darauf hin, dass die langfristigen

⁶ Olsson et al. 2018.

⁷ Haberl/Geissler 2000.

Klimaschutzziele nur erreicht werden können, wenn in den kommenden Jahrzehnten der Atmosphäre in beträchtlichem Ausmaß CO₂ entzogen wird.⁸ Denn selbst wenn die Energieversorgung komplett auf erneuerbare Energien umgestellt wird und es gelingt, den Energieverbrauch drastisch zu reduzieren, bleiben Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft und einigen Industriezweigen, die sich kaum vermeiden lassen. Zudem ist kaum zu erwarten, dass die Emissionsreduktion rasch genug voranschreiten kann, um eine temporäre Überschreitung der knappen Emissionsbudgets für das 2-Grad- oder sogar das 1,5-Grad-Ziel zu vermeiden. Um schwer vermeidbare Emissionen zu kompensieren und Überschreitungen der Emissionsbudgets rückgängig zu machen, müsste CO₂ aus der Atmosphäre entfernt beziehungsweise auf andere Weise der Klimaerwärmung entgegenwirken. In den genannten Klimaschutzszenarien kommt Bioenergie mit Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (BECCS) eine besonders große Bedeutung zu. Die Funktionsweise: Pflanzen nehmen durch Photosynthese CO₂ aus der Atmosphäre auf und bilden daraus energiereiche Kohlenstoffverbindungen. Werden diese zur Gewinnung von Strom, Wärme oder Kraftstoff verbrannt, entsteht CO₂, das abgetrennt und dauerhaft unterirdisch gelagert wird. Insgesamt könnte so im Prinzip der CO₂-Gehalt der Atmosphäre gesenkt und gleichzeitig Energie produziert werden, es entstünden also „negative Emissionen“ beziehungsweise ein „CO₂-negatives“ Energiesystem.

Während etablierte Wissenschaftsinstitutionen wie der Weltklimarat IPCC bereits seit einigen Jahren die Notwendigkeit negativer Emissionen und die Potenziale von BECCS diskutieren,⁹ ist das Thema in der gesellschaftlichen und politischen Diskussion bisher kaum angekommen. Die Debatte sollte jedoch dringend und mit breiter gesellschaftlicher Beteiligung geführt werden, denn die Zeit drängt. Soll BECCS in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts einen Beitrag zum Klimaschutz in der Größenordnung leisten wie in den IPCC-Szenarien vorgesehen, so müssten bereits in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren erste großtechnische Anlagen in Betrieb gehen. Will man auf BECCS verzichten, bedarf es alternativer Technologien für die oben genannten Sektoren sowie noch stärkerer beziehungsweise schnellerer Klimagaseinsparungen, damit die Klimaschutzziele dennoch erreicht werden können.

Klimaschutz- und Energieszenarien zeigen, wie das Energieversorgungssystem bis 2050 aus technischer Sicht klimaverträglich werden könnte, welche Rolle Bioenergie und „negative Emissionen“ dabei spielen können und welche Kosten in etwa entstehen. Der notwendige gesellschaftliche Transformationsprozess, vom Verhalten verschiedener Akteursgruppen bis hin zu konkreten Marktmodellen, ist in der Regel nicht Teil der Szenarien. Dadurch entstehen Unsicherheiten, die die Entwicklung neuer Technologien und Investitionen hemmen können. So hat beispielsweise die gesellschaftliche Entscheidung, ob Bioenergie mit oder ohne CCS (Carbon Capture and Storage) genutzt werden soll, weitreichende Auswirkungen auf die künftige Art der Bioenergienutzung. Derzeit wird Bioenergie überwiegend in kleinen Anlagen – etwa in landwirtschaftlichen Biogasanlagen zur Strom- und Wärmeerzeugung oder in Holzheizungen in Einzelgebäuden – eingesetzt. Die Anbindung an eine Infrastruktur für den CO₂-Transport lohnt sich hingegen nur für Anlagen, die große Mengen CO₂ produzieren.

⁸ IPCC 2014; IPCC 2018; UNEP 2017; easac 2018.

⁹ Zum Beispiel Azar et al. 2006.

Für die Entwicklung einer langfristigen Bioenergiestrategie bedarf es daher einer robusten Entscheidungsgrundlage, die über Klimaschutz- und Energieszenarien hinausgeht. Die verschiedenen Technologieoptionen zur Nutzung von Bioenergie sollten einer umfassenden, transparenten Bewertung unterzogen werden, die technische, ökologische, ökonomische und soziale Aspekte einschließt. Dabei muss insbesondere analysiert werden, welche Auswirkungen der Übergang zu anderen Nutzungspfaden in verschiedenen Bereichen hat. Wenn zum Beispiel Biomasse größtenteils importiert statt regional produziert wird oder Holz, das bisher von der lokalen Bevölkerung zum Heizen verwendet wurde, zukünftig zur Kraftstoffherstellung benötigt wird, müssen die Auswirkungen für die bisherigen Produzenten und Nutzer sowie die Umweltfolgen bei der Entscheidung für oder gegen neue Technologien berücksichtigt werden. Auch die Folgen, die die Nutzung von Bioenergie in Deutschland für andere Länder hat, müssen sorgfältig untersucht und in die Entscheidungen einbezogen werden.

Eine umfassende Bewertung verschiedener Pfade einer energetischen Nutzung von Biomasse könnte ein ständiges Nachsteuern bei der Bioenergiepolitik vermindern und dadurch die Planungssicherheit für Entwickler, Anbieter und Betreiber von Bioenergietechnologien erhöhen. Da Bioenergieanlagen ebenso wie die benötigte Infrastruktur etwa für CO₂-Transport und -Lagerung mit genügend Vorlauf geplant und errichtet werden müssen und die Anlagen teilweise über Jahrzehnte genutzt werden, sind dabei auch Pfadabhängigkeiten zu berücksichtigen. Nur so kann das Energiesystem bis 2050 klimafreundlich gestaltet werden.

Die vorliegende Analyse zeigt verschiedene Optionen für eine zukünftige Bioenergienutzung in Deutschland auf, die in Einklang mit den langfristigen Klimaschutzziele stehen und die Einbindung Deutschlands in die internationalen Handelsströme von Biomasse berücksichtigen. Dabei werden Entwicklungspfade mit und ohne CCS aufgezeigt. Neben BECCS werden auch weitere CO₂-Entnahmetechnologien diskutiert, die ergänzend oder alternativ eingesetzt werden können, um unvermeidbare Treibhausgasemissionen auszugleichen. Bei den Einsatzstoffen liegt der Fokus auf Holz und Biogas, da diese voraussichtlich in Zukunft in Deutschland den größten Beitrag leisten können. Die verschiedenen Entwicklungspfade werden mithilfe eines interdisziplinären Bewertungsrahmens diskutiert, um Vor- und Nachteile sowie mögliche Hemmnisse bei der Umsetzung aufzuzeigen. Insgesamt werden 29 Kriterien identifiziert, wobei technische, systemische, ökologische, ökonomische und soziale Aspekte berücksichtigt werden sowie die Möglichkeit der Kombination mit CCS. Die Kriterien werden auf typische heutige Anlagenkonzepte für Biogas und Holz sowie mögliche Anlagenkonzepte für 2050 angewendet. Es resultiert eine Bewertungsmatrix, die aufzeigt, wo bei den jeweiligen Entwicklungspfaden die Vor- und Nachteile liegen und mit welchen möglichen Hemmnissen bei der Umsetzung zu rechnen ist. Die Ergebnisse wurden verwendet, um Handlungsoptionen für eine nachhaltige Bioenergiestrategie abzuleiten, die in der parallel zu diesem Dokument erscheinenden Stellungnahme dargestellt sind.¹⁰

¹⁰ acatech/Leopoldina/Akademienunion 2019.

Weltweit ist die Bioenergienutzung weiterhin geprägt von traditioneller Energiebereitstellung, also der Verbrennung in offenen Feuerstellen zum Heizen und Kochen (Abbildung 2). Diese ist sehr ineffizient, wie der große Unterschied zwischen eingesetzter Primärenergie und gewonnener Endenergie in Abbildung 2 zeigt. Zudem ist sie mit grundlegend anderen Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft verbunden als die Nutzung moderner Bioenergietechnologien, wie sie in Deutschland etabliert ist. Die folgenden Untersuchungen beziehen sich ausschließlich auf die Bioenergienutzung in Deutschland, wobei die Auswirkungen im Ausland (bei importierter Biomasse) berücksichtigt werden.

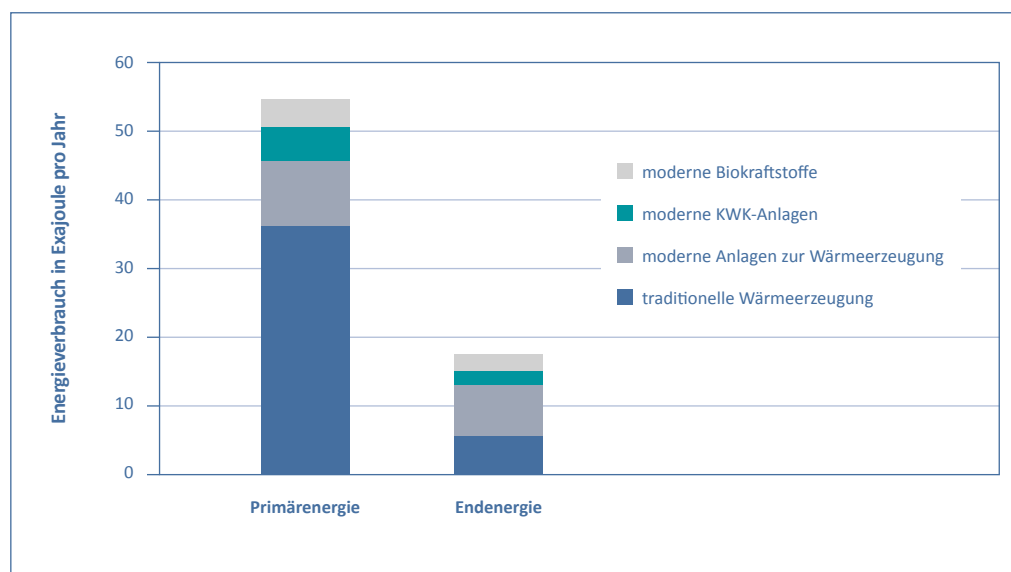


Abbildung 2: Weltweite Bioenergienutzung, Thrän 2015.

2 Biomasseproduktion

Wie viel Biomasse nachhaltig für energetische Zwecke genutzt werden kann, hängt in erster Linie davon ab, wie viel pflanzliche Biomasse¹¹ in Wäldern sowie auf Wiesen und Ackerland mittel- und langfristig mit akzeptablen ökologischen Auswirkungen produziert wird.¹² Darüber hinaus gehen die Schätzungen weit auseinander, wie viel der verfügbaren Biomasse weltweit in Energie umgewandelt werden kann. Die Gründe hierfür liegen neben Datenunsicherheiten vor allem in der unterschiedlichen Bewertung von Trade-offs¹³ mit anderen Verwendungsmöglichkeiten von Biomasse wie der Nahrungsmittelproduktion, der stofflichen Nutzung oder Ökosystemdienstleistungen. Da Biomasse weltweit gehandelt wird und somit im internationalen Kontext betrachtet werden muss, werden im Folgenden zunächst globale Biomassepotenziale untersucht.

Zu den global gehandelten Bioenergieträgern zählen Biokraftstoffe (Ethanol, Biodiesel und Pflanzenöle), Holzpellets, Holzkohle und Rundholz. Der Handel mit Biomasse – und damit indirekt auch mit Land – floriert und entwickelt sich dynamisch. Ändert sich die Nachfrage nach Biomasse in einem Staat, hat dies globale Auswirkungen.¹⁴ Zwei Beispiele: Trotz der starken Rapsproduktion in Deutschland importierte die Europäische Union 2015 insgesamt 53 Prozent der Pflanzenöle, die zur Biodieselproduktion eingesetzt wurden.¹⁵ Betrachtet man Biomasse unabhängig von ihrer Nutzung, importierte die EU im Jahr 2007 41 Prozent ihrer direkt oder indirekt konsumierten Biomasse.¹⁶ Rest- und Abfallstoffe hingegen werden aufgrund ihrer geringen Energiedichte wenig gehandelt und können daher national betrachtet werden.¹⁷

11 Biomasse bezeichnet unabhängig von der Art der Verwendung den „biologisch abbaubaren Teil von Erzeugnissen, Abfällen und Reststoffen der Landwirtschaft mit biologischem Ursprung (einschließlich tierischer und pflanzlicher Stoffe), der Forstwirtschaft und damit verbundener Wirtschaftszweige einschließlich der Fischerei und der Aquakultur. Auch der biologisch abbaubare Teil von Abfällen aus Industrie und Haushalten zählt nach dieser Definition zur Biomasse“ (Richtlinie 2009/28 EG). Bioenergie bezeichnet Biomasse, die als Energieträger genutzt wird.

12 Eine nachhaltige Produktion ist nicht hinreichend für die CO₂-Neutralität beziehungsweise THG-Neutralität von Bioenergie. Das gilt besonders in Bezug auf Bioenergie aus Forstbiomasse, denn „nachhaltige“ Forstnutzung bedeutet nur, dass nicht mehr genutzt wird, als nachwächst. Ein nachhaltig bewirtschafteter Wald wäre zwar langfristig betrachtet CO₂-neutral, jedoch ist der Wald heute in den meisten Regionen Europas nicht nur CO₂-neutral, sondern eine CO₂-Senke (Erb et al. 2008). Diese Senke ginge bei einer entsprechenden Steigerung der Ernte im Wald verloren. Die sogenannte Carbon-Debt-Debatte wird in Kapitel 3.3 näher beleuchtet.

13 Der Begriff „Trade-off“ bezeichnet einen Zielkonflikt, in dem zwei oder mehrere Ziele unvereinbar miteinander sind, sodass sich die Erreichung des einen Ziels negativ auf die Erreichung des anderen Ziels auswirkt und umgekehrt. Im Sinne der Bioenergie bedeutet dies, dass Biomasse, die für energetische Zwecke genutzt wird, nicht mehr für andere Nutzungsformen zur Verfügung steht.

14 Durch den Import von Agrarprodukten beansprucht Deutschland landwirtschaftliche Flächen im Ausland. Die Angaben zu diesem sogenannten virtuellen Landimport unterscheiden sich je nach Datengrundlage und Berechnungsmethodik teilweise erheblich. So importierte Deutschland nach einer Abschätzung von Lugschitz et al. im Jahr 2004 87 Millionen Hektar virtuelles Land gegenüber 10 Millionen Hektar Exporten (Lugschitz et al. 2012). Dabei betrug die landwirtschaftlich genutzte Fläche in Deutschland im Jahr 2015 nur 18,5 Millionen Hektar (Statistisches Bundesamt 2016). Eine Studie des WWF schätzt die virtuellen Landimportüberschüsse im Jahr 2010 netto (das heißt abzüglich der Exporte) auf 5,4 Millionen Hektar, wobei allerdings nur Agrarprodukte aus Nicht-EU-Ländern betrachtet wurden. Die Netto-Importe in die gesamte EU betragen laut dieser Studie 30 Millionen Hektar (WWF 2011).

15 Proskurina et al. 2018.

16 Kastner et al. 2015.

17 Holzreststoffe mit einer hohen Energiedichte wie Altholz werden jedoch durchaus gehandelt.

2.1 Heutige Biomassenutzungskonkurrenzen

Entscheidend für die Betrachtung der Potenzialschätzungen ist, dass es kein ungenutztes Land per se gibt, das zur Produktion von Biomasse allein für den Energiesektor zur Verfügung steht. Von den 130.000¹⁸ Quadratkilometern der globalen Landfläche werden 75 Prozent durch den Menschen genutzt.¹⁹ Die noch ungenutzten Landflächen bestehen zum einen aus unproduktiven Böden wie Wüsten, zum anderen aus den letzten unberührten Urwäldern. Eine Produktion von Biomasse zur Energieerzeugung kann und sollte nur auf den bereits genutzten Landflächen erfolgen.

Je stärker Biomasse im Energiesystem eingesetzt wird, desto mehr Nutzungskonkurrenzen und Trade-offs entstehen, da die verwendete Biomasse weder für andere Nutzungsformen (stoffliche Nutzung, Nahrungs- und Futtermittel) genutzt werden kann, noch für ökosystemare Prozesse (zum Beispiel als Nahrung für Wildtiere) zur Verfügung steht. Die von Pflanzen in der Photosynthese gebildete chemische Bindungsenergie stellt nicht nur die Grundlage für alle menschlichen Nutzungen (Nahrung, Fasern, Energie usw.) dar, sondern auch den Input aller Nahrungsnetze und Nahrungsketten in Ökosystemen und ist daher für Biodiversität und ökologische Integrität von zentraler Bedeutung.²⁰ Sie ist damit auch die Grundlage für Ökosystemleistungen, die Ökosysteme für die menschliche Gesellschaft bereitstellen.²¹ Jede zusätzliche Entnahme von Biomasse und jede Änderung der Bewirtschaftung hat daher Auswirkungen auf die Ökosysteme und auch deren Kapazität, Kohlenstoff zu speichern.²²

Die jährlich global durch Photosynthese produzierte Biomasse wird als Netto-Primärproduktion (NPP) bezeichnet.²³ Dieser Indikator misst die jährliche pflanzliche Produktion organischer Substanzen aus anorganischen Stoffen (vor allem CO₂ und H₂O sowie diversen Mineralstoffen) abzüglich der für die Zellatmung der Pflanzen benötigten Energie in Ökosystemen.²⁴ In menschlich unbeeinflussten terrestrischen²⁵ Ökosystemen wird die NPP sowohl durch das Klima – insbesondere durch die Intensität der Sonneneinstrahlung, Niederschlag und Temperatur – als auch durch die Bodenqualität im Sinne der Mineralstoff- und Wasserversorgung sowie die biotischen Interaktionen im Ökosystem bestimmt. Landnutzung beeinflusst, gezielt oder indirekt, diese Faktoren und damit auch die NPP. Die heutigen Agrarökosysteme weisen insgesamt eine geringere Biomasseproduktion im Vergleich zur natürlichen Vegetation auf, auch weil viele Kulturpflanzen bewusst auf die Produktion von bestimmten Bestandteilen wie Eiweiße und Öle selektiert und gezüchtet wurden und nicht unbedingt auf eine erhöhte

18 Ausgenommen Grönland, Antarktis und Binnengewässer.

19 Erb et al. 2016-1.

20 Vitousek et al. 1986; Haberl et al. 2014.

21 Millennium Ecosystem Assessment 2005.

22 Erb et al. 2018.

23 Die Netto-Primärproduktion wird üblicherweise als Biomasse-Trockensubstanz (kg/a), Kohlenstoffgehalt der produzierten Biomasse (kgC/a) oder in Form des Energiegehalts der Biomasse (durchschnittlich etwa 37kJ pro Gramm Kohlenstoff oder 18,5kJ pro Gramm Trockenbiomasse) angegeben.

24 Erb et al. 2016-2.

25 Biomasse aus maritimen Ökosystemen in Form von Algen wird oft als Trade-off-minimierende Alternative zu terrestrischer Biomasse gesehen, da sie nicht mit anderen Nutzungsformen um Land konkurriert. Aufgrund der hohen Kosten und des teilweise hohen Energieaufwands werden Algen jedoch aller Voraussicht nach zumindest kurz- bis mittelfristig eher als eine Ressource zur stofflichen Nutzung denn als signifikante nachhaltige Bioenergiequelle an Bedeutung gewinnen (siehe auch Abschnitt 3.1).

Biomasseproduktion, also eine Erhöhung der NPP.²⁶ Die NPP des heutigen globalen Ackerlandes liegt derzeit im globalen Durchschnitt 23 Prozent unter der potenziellen NPP der Ackerflächen, wobei je nach Region und Landnutzungsintensität eine erhebliche Bandbreite (Reduktion der NPP um mehr als 80 Prozent bei stark degradierten Böden und wenig produktiven Anbauverfahren bis hin zu Erhöhungen auf mehr als das Doppelte) besteht.²⁷ Die gleiche Untersuchung zeigte auch, dass – bei heutiger Technologie – eine Überschreitung der potenziellen NPP immer größere Inputs an Stickstoffdünger erfordert.

Fast 60 Prozent des Biomassezuwachses erfolgt oberirdisch, wobei unklar ist, welcher Anteil davon nachhaltig vom Menschen genutzt werden kann. Gegenwärtig beiträgt die menschliche Aneignung rund 30 Prozent des oberirdischen Biomassezuwachses. Man kann davon ausgehen, dass eine Verdoppelung zu massiven und irreversiblen Umweltproblemen führt.

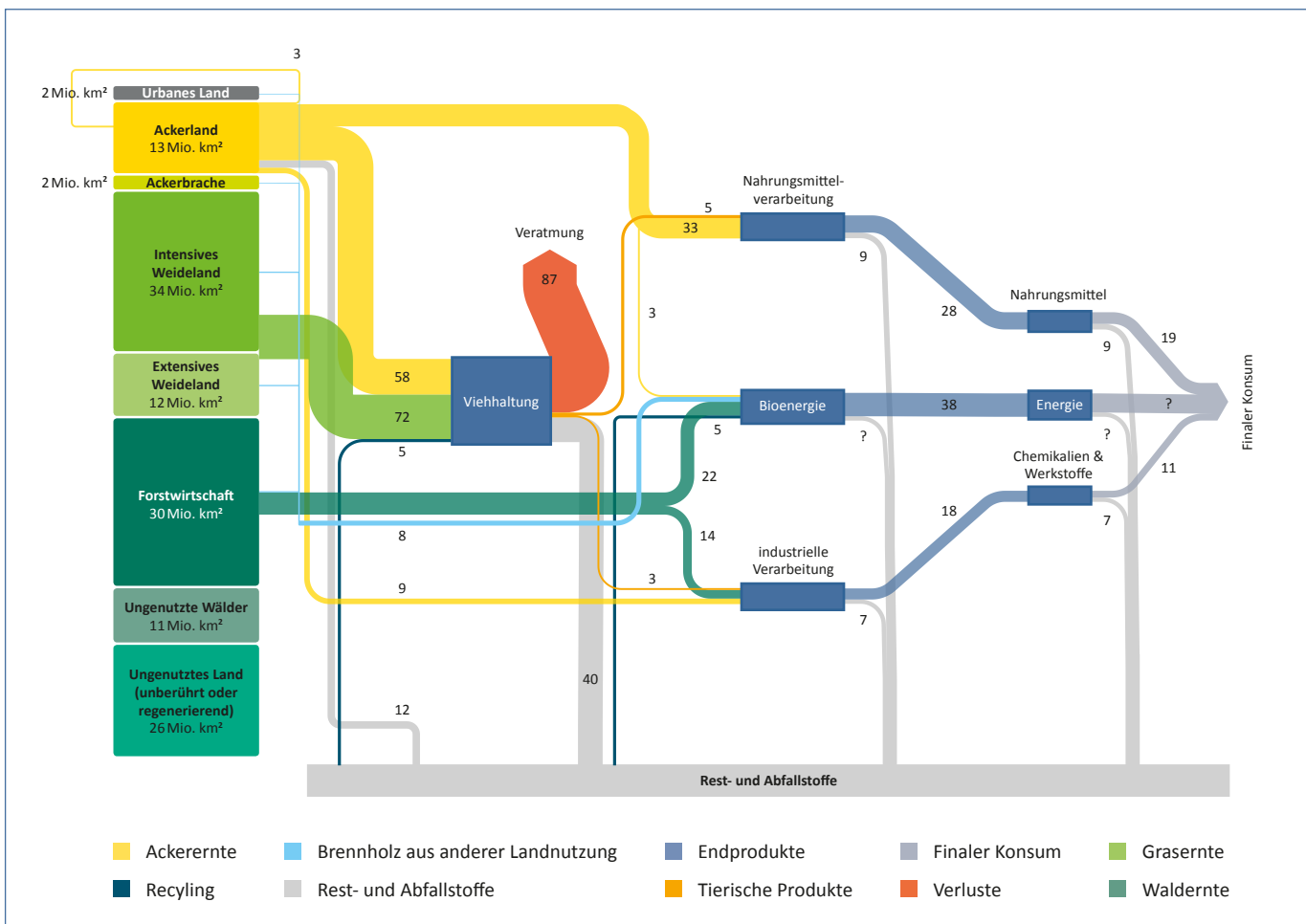


Abbildung 3: Globale Nutzung der geernteten Biomasse in Exajoule/Jahr. Flussdiagramm der globalen Biomasseflüsse in Exajoule/Jahr mit Zahlen für das Jahr 2000. Dies ist das letzte Jahr, für das konsistente Biomasse- und Landbilanzen schon vorhanden sind. Die linke Spalte illustriert die gegenwärtige globale Landnutzung. Daten aus Erb et al. 2007; Schneider et al. 2009; FAO 2010, Wirsenius 2003; Sims et al. 2006; Krausmann et al. 2008; FAOSTAT 2012; Kummu et al. 2012.

²⁶ Die gegenwärtige globale Biomasseproduktion liegt ca. 10 Prozent unter der „potenziellen NPP“ (NPP_{pot}, ca. 2.400 EJ/Jahr, wobei oberirdische und unterirdische NPP einbezogen sind), welche die Biomasseproduktion in Abwesenheit menschlich gemachter Landnutzungsänderungen wie Abholzung, landwirtschaftlicher Nutzung oder Infrastrukturbebauung bezeichnet (Rogner et al. 2012).

²⁷ Niederscheider et al. 2016.

Abbildung 3 stellt die Flüsse der geernteten und genutzten Biomasse (225 Exajoule pro Jahr) aus den verschiedenen Landnutzungskategorien dar. Diese beziehen sich auf das Jahr 2000 – das letzte Jahr, für das zusammenhängende, räumlich hochaufgelöste und konsistente Daten über globale Biomasseflüsse vorliegen.²⁸ Während eine Steigerung der vom Menschen geernteten Biomasse seit 2000 sehr wahrscheinlich ist, insbesondere was die energetische Nutzung der Biomasse angeht²⁹, haben sich die Größenordnungen der jährlichen Flüsse vermutlich nur wenig geändert: Die NPP hängt auf einem Großteil der Fläche vorwiegend von natürlichen Rahmenbedingungen wie Niederschlag und Temperatur ab. Diese schwanken zwar von Jahr zu Jahr teilweise beträchtlich, aber ihr Mittelwert ändert sich nur relativ langsam, im Wesentlichen durch den Klimawandel. Technologische Veränderungen wie Menge und Art der Düngemittel und Bewässerung betreffen einen relativ kleinen Teil der Erdoberfläche (nur etwa 12 Prozent der Erdoberfläche sind Ackerland). Sie unterliegen zwar Veränderungen, aber auch diese laufen nicht sprunghaft ab.

Die menschliche Biomasseernte besteht zur Hälfte aus Kulturpflanzen am Ackerland und deren genutzten Reststoffen, ein Drittel wird durch grasendes Vieh „geerntet“, während die Holzernte 16 Prozent ausmacht. Insgesamt werden fast 60 Prozent der genutzten Biomasse zur Fütterung der Nutztiere verwendet. Der überwiegende Teil dieser Biomasse wird von den Tieren selbst veratmet oder ausgeschieden, und es kommen nur 5 Exajoule pro Jahr von den insgesamt 135 Exajoule pro Jahr verfütterter Biomasse beim Menschen in der Form von Produkten an. Insgesamt werden circa 70 Prozent der geernteten Biomasse direkt und indirekt zur Nahrungsmittelproduktion für Menschen genutzt. Die finale menschliche Nutzung von 86 Exajoule pro Jahr unterteilt sich in Nahrungsmittel, Energie sowie Chemikalien und Werkstoffe. Mit 38 Exajoule im Jahr 2000 hat die Bioenergie den größten Anteil an der final genutzten Biomasse. Neuere Schätzungen gehen von 50 Exajoule pro Jahr in 2008³⁰, von 51 Exajoule pro Jahr in 2015³¹ oder von 59,2 Exajoule pro Jahr in 2014³² aus. Davon stammen 87 Prozent aus Feuerholz, Holzkohle und Holzabfällen, 10 Prozent aus landwirtschaftlicher Biomasse in Form von Energiepflanzen und landwirtschaftlichen Reststoffen; der Rest aus organischem Hausmüll.³³ Diese Zahlen sowie die in den folgenden Unterkapiteln diskutierten Bioenergiepotenzialschätzungen beziehen sich auf die aus Biomasse gewonnene Primärenergie.³⁴ Abbildung 3 zeigt auch die großen Abfall- und Reststoffströme (in Rot), die bei der Ernte und Weiterverarbeitung anfallen. Die bei der energetischen Nutzung anfallenden Reststoffe sind bis dato nicht quantifiziert. Viele Reststoffe der Pflanzen- und Holzernte verbleiben im Feld oder im Wald und erfüllen wichtige Ökosystemdienstleistungen wie die natürliche Düngung des Bodens. Eine Ernte dieser Reststoffe ist zwar technisch möglich, müsste aber durch den Einsatz von chemischem Dünger beziehungsweise Rückführung der Nährstoffe (Stickstoff, Phosphor, Kalium)

²⁸ Haberl et al. 2014.

²⁹ Zwischen 1990 und 2010 ist die Nutzung von Holz für energetische Zwecke von 1,81 GtC/Jahr auf 1,94 GtC/Jahr gestiegen. Während es in diesem Zeitraum in Industrieländern eine deutliche Steigerung der Nutzung der modernen holzartigen Bioenergie wie Pellets von 82 Prozent gab, ist die Nutzung von traditioneller Biomasse wie Feuerholz in Entwicklungsländern um 23 Prozent gesunken (Bais et al. 2015).

³⁰ Arvizu et al. 2011.

³¹ OECD/IEA 2017.

³² WBA 2017.

³³ Arvizu et al. 2011; WBA 2017.

³⁴ Die Höhe der daraus gewonnenen Endenergie ist abhängig von der jeweils verwendeten Technologie zur Bioenergiebereitstellung; verschiedene Technologien werden in Kapitel 3 diskutiert. Beispielsweise könnte man aus der gleichen Menge Primärenergie mehr Endenergie gewinnen, wenn man statt der traditionellen Bioenergienutzung in offenen Feuern mit einem Wirkungsgrad von weniger als 10 Prozent moderne, effiziente Technologien einsetzen würde.

kompensiert werden – somit würde sie ökologische und ökonomische Trade-offs nach sich ziehen.³⁵ Auch tierische Exkremente (40 Exajoule pro Jahr) werden zum Teil schon zur Düngung und Energiegewinnung genutzt.

Das Flussdiagramm zeigt: Bei weltweit gleichbleibender Biomasseproduktion kann Biomasse nur dann stärker im Energiesystem genutzt werden, wenn Nutzungseffizienzen erhöht und/oder bestehende Biomasseflüsse umgeleitet werden. Im Falle der Umleitung bedeutet dies, dass beispielsweise weniger Biomasse für die Produktion von Nahrungsmitteln zur Verfügung stehen würde. Die daraus entstehenden Trade-offs werden im folgenden Kapitel näher beleuchtet.

2.2 Unsicherheiten der Potenzialschätzungen und Trade-offs

Wie viel Biomasse für Bioenergie auf den bereits genutzten Flächen produziert werden kann, ist schwer zu beziffern. Zum einen ist heute nicht bekannt, wie sich etwa das Bevölkerungswachstum, das Ernährungsverhalten oder der technische Fortschritt künftig entwickeln werden. Zum anderen hängt das Biomassepotenzial auch von der Kosten-Nutzen-Bewertung der jeweiligen Landnutzungsalternativen ab. Gleichzeitig besteht immer noch eine große Datenunsicherheit in den Schätzungen der gegenwärtigen Landnutzung, allen voran im Weideland.³⁶ Die potenzielle oberirdische Biomasseproduktion³⁷ der globalen Landfläche von rund 1.300 Exajoule pro Jahr substanziell zu steigern, erscheint unwahrscheinlich.³⁸ Im Jahr 2000 lag die NPP der weltweit vorherrschenden Vegetation mit etwa 1.240 Exajoule pro Jahr unter diesem Wert, vor allem weil ein erheblicher Teil der landwirtschaftlichen Nutzfläche weniger produzierte, als potenziell möglich wäre, aber auch durch Verlust produktiver Flächen infolge von Überbauung und Bodendegradation.³⁹ Zum Vergleich: Der weltweite Primärenergieverbrauch betrug im Jahr 2015 circa 571 Exajoule. Eine Steigerung der NPP über die potenzielle Biomasseproduktion hinaus ist zwar auf regionaler Ebene möglich, etwa durch Bewässerung arider Gebiete (sehr trockener Gebiete, unter anderem Wüsten)⁴⁰ oder durch sehr intensive Landbewirtschaftung wie in Teilen Nordwesteuropas.⁴¹ Allerdings sind derartige Steigerungen mit entsprechenden Umweltauswirkungen der Intensivlandwirtschaft verbunden⁴² und daher aus ökologischen Gründen zweifelhaft.

Würde man versuchen, die menschliche Ernte von Biomasse für Energieversorgungszwecke der potenziellen NPP von 1.300 Exajoule pro Jahr anzunähern, bliebe keine Biomasse für andere menschliche und tierische Nutzungen oder Ökosysteme übrig. Zudem wäre dies mit einer Freisetzung großer Mengen Kohlenstoff verbunden, die derzeit in den Wäldern und Böden gespeichert sind. Die meisten Studien schätzen daher ein technisches Bioenergiepotenzial, welches in der Regel eine Abholzung der Wälder und diejenige Biomasse ausschließt, die für Nahrungsmittel, Futter und

³⁵ Bais et al. 2015.

³⁶ Fetzel et al. 2017-1, Erb et al. 2016-1.

³⁷ In Abwesenheit menschlicher Landnutzung wie Abholzung, landwirtschaftlicher Nutzung oder Infrastrukturbebauung.

³⁸ Rogner et al. 2012; Smith et al. 2014-1; Smith et al. 2012-1.

³⁹ Haberl et al. 2007.

⁴⁰ Haberl et al. 2007.

⁴¹ Plutzer et al. 2016.

⁴² IAASTD 2009.

Faserstoffe gebraucht wird. Je nachdem, welche Nachhaltigkeitskriterien zum Beispiel in Bezug auf Biodiversität oder Wasserverfügbarkeit zugrunde liegen, entstehen sehr unterschiedliche Schätzungen des nachhaltigen Bioenergiepotenzials aus Landwirtschaft, Wald und Reststoffen: Die Spannweite liegt zwischen 50 und 1.000 Exajoule pro Jahr.⁴³ Integrated-Assessment-Modelle (IAMs) rechnen mit einem ökonomischen und nicht zwingend nachhaltigen Bioenergiepotenzial von 20 bis 300 Exajoule pro Jahr, das in erster Linie Kriterien einer kosteneffizienten Produktion berücksichtigt.⁴⁴ Unter Berücksichtigung von Bedingungen wie „Food-first“ und „Zero Deforestation (Keine Abholzung)“ kommen Haberl et al. (2011)⁴⁵, basierend auf einem diagnostischen biophysikalischen Modell, das rein thermodynamischen Prinzipien folgt, auf ein Potenzial von 64 bis 161 Exajoule pro Jahr, abhängig von Klimawandeleffekten, den Entwicklungen landwirtschaftlicher Erträge sowie dem Umfang und der Zusammensetzung menschlicher Ernährung. Berücksichtigt man Biodiversitätsschutzziele und politische Instabilitäten mancher Weltregionen, reduziert sich dieses Potenzial um bis zu 45 Prozent.⁴⁶ Um zu verstehen, warum die in der Literatur dokumentierten nachhaltigen Bioenergiepotenzialschätzungen eine so große Spannweite haben, werden die zugrunde liegenden Unsicherheiten, Annahmen und Trade-offs im Folgenden anhand der für die Bioenergie wichtigsten Biomassetypen diskutiert.

2.2.1 Potenzial aus Ackerland, Wiesen und Weideland

Tabelle 2 und Abbildung 4 geben einen Überblick über bisherige Schätzungen von Bioenergiepotenzialen aus Energiepflanzen bis zum Jahr 2050 und beschreiben die jeweiligen Annahmen der Studien in Bezug auf Nachhaltigkeitskriterien, Landverfügbarkeit und Erträge der Energiepflanzen. Diese Gruppe umfasst klassische Energiepflanzen wie Mais, Zuckerrohr und Raps, aber auch Gräser wie Miscanthus und schnell wachsende Energiehölzer in Form von Kurzumtriebsplantagen auf Ackerland. Gräser und Energieholzplantagen werden unter ökologischen Gesichtspunkten bevorzugt, da sie weniger Dünger bedürfen und auch auf schlechteren Böden (etwa auf degradiertem Land) angebaut werden können.

Die Unterschiede in den Schätzungen beruhen zunächst auf den Trade-offs, die die Studien für eine Ausweitung der Bioenergie zugrunde legen und sowohl sozioökonomische als auch ökologische Nachhaltigkeitskriterien darstellen. Einer der wichtigsten sozioökonomischen Trade-offs ist die potenzielle Einschränkung der Ernährungssicherheit durch erhöhte Bioenergienutzung, wenn Nahrungsmittelpflanzen durch Energiepflanzen verdrängt werden und dadurch die Nahrungsmittelpreise auf den globalen Agrarmärkten steigen. In welchem Ausmaß die Biokraftstoffpolitiken der Industrieländer zur globalen Nahrungsmittelpreiskrise in den Jahren 2007 und 2008 beigetragen haben, ist zwar nach wie vor umstritten.⁴⁷ Sicher ist jedoch, dass die Nachfrage nach Nahrungsmitteln den Druck auf die globalen Agrarmärkte erhöhen wird: Die Bevölkerung wächst vor allem in Entwicklungsländern, und in bevölkerungsreichen Ländern wie Indien und China steigt der Wohlstand und damit auch die Nachfrage nach mehr tierischen Proteinen. Schätzungen der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (Food and Agriculture Organization of the United

43 Smith et al. 2014-2.

44 Creutzig 2016.

45 Haberl et al. 2011.

46 Erb et al. 2012.

47 Rosegrant et al. 2008; Zilberman et al. 2013.

Nations, FAO) zufolge muss die globale Agrarproduktion bis 2050 gegenüber 2005 um 60 Prozent zunehmen, um die erwartete steigende Nachfrage befriedigen zu können.⁴⁸ Gerade in den Ländern, in denen eine umfassende Ernährungssicherheit nicht gegeben ist, ist kaum sicherzustellen, dass eine erhöhte Nachfrage nach Biomasse für energetische Zwecke und damit höhere Preise für Energiepflanzen nicht zu einer Verdrängung der Produktion von Nahrungsmitteln für die ansässige Bevölkerung führen. In vielen afrikanischen Ländern gibt es beispielsweise keine Landmärkte oder staatlich gesicherte Landbesitz- oder Landnutzungsrechte, was illegale Landnahme von inländischen und ausländischen Investoren vereinfacht.⁴⁹

In den in Tabelle 2 aufgelisteten Potenzialschätzungen ist die Ernährungssicherheit einer wachsenden Weltbevölkerung daher wichtiger als jegliche energetische Nutzung von Biomasse. Auch die stoffliche und industrielle Nutzung von Biomasse hat in manchen Studien wie Hoogwijk et al. (2005)⁵⁰ und Erb et al. (2009)⁵¹ Vorrang. Dies ist besonders relevant, da viele Länder ihre chemischen und stofflichen Industrien von fossilen Ressourcen auf Biomasse im Sinne einer Bioökonomie umstellen wollen und damit Nutzungskonkurrenzen verstärken werden. Wie viel Biomasse tatsächlich bis 2050 global zur Nahrungsmittel- und Futterproduktion benötigt werden wird, hängt von den jeweiligen Annahmen bezüglich des Bevölkerungswachstums⁵², des Wirtschaftswachstums und des daraus resultierenden Nachfrageverhaltens ab. Hoogwijk et al. (2005) berechnen Biomassepotenziale unter den vier Hauptszenarien aus dem *Special Report on Emissions Scenarios (SRES)* des IPCC, wo die Weltbevölkerung 2050 zwischen 8,7 und 11,3 Milliarde erreichen soll. Für die Entwicklung des Nahrungsmittelkonsums werden verschiedene Szenarien berechnet, die meistens zwischen hohem und niedrigem globalem Fleischkonsum unterscheiden: Erb et al. (2009) und Haberl et al. (2011)⁵³ vergleichen die Nahrungsmittelnachfrage unter einer globalen Anpassung an westliche Fleischkonsummuster bis hin zu einer starken Reduktion des Fleischkonsums, die gerade noch eine ausgewogene Ernährung zulässt. Demzufolge würde ein hoher globaler Fleischkonsum, also eine weltweite Anpassung an westliche Muster, bei sonst gleichen Bedingungen ein maximales Bioenergiepotenzial von 58 Exajoule pro Jahr zulassen, wohingegen eine starke Reduktion des Fleischkonsums genug Flächen freisetzen könnte, um bis zu 161 Exajoule pro Jahr an Bioenergie erzeugen zu können.⁵⁴

Neben den Flächen für Nahrungsmittelproduktion schließen alle aufgeführten Studien auch Flächen mit besonders hohem Biodiversitätsnutzen aus, um Ökosystemfunktionen und die biologische Vielfalt zu erhalten.⁵⁵ Die Umwandlung von Naturschutzflächen und Wäldern in agrarische Flächen wird damit grundsätzlich ausgeschlossen,⁵⁶

48 Diese Schätzungen beruhen auf der Fortschreibung gegenwärtiger Trends und können daher in der Realität stark abweichen (Alexandratos/Bruinsma 2012).

49 Die Chancen und Risiken von (ausländischen) Investitionen in Land sind vielschichtig. Einerseits können Investitionen dazu beitragen, die Erträge zu steigern und damit die Nahrungsmittelproduktion zu erhöhen (Schünemann et al. 2017). Andererseits zeigen Studien, dass durch den Landkauf in vielen Fällen die Lebensgrundlage traditionell lebender Menschen erheblich beeinträchtigt wurde (Matondi et al. 2011).

50 Hoogwijk et al. 2005.

51 Erb et al. 2009.

52 Die meisten Studien gehen von einer Weltbevölkerung zwischen 9,2 und 9,7 Milliarden in 2050 aus, was auf den mittleren Bevölkerungsprognosen der Vereinten Nationen (Erb et al. 2009; Haberl et al. 2011) oder den Prognosen des OECD Environmental Outlook (van Vuuren et al. 2009) fußt.

53 Haberl et al. 2011.

54 Erb et al. 2009.

55 WBGU 2008.

56 Die Bioenergiepotenziale von Waldbiomasse werden im nächsten Kapitel diskutiert.

genauso wie von Savannen und Tundren.⁵⁷ Schließt man zusätzlich extrem wasserarme Regionen und Flächen, die unter starker Bodendegradation leiden, aus, verringern sich die Bioenergiepotenziale jeweils um 17 beziehungsweise 21 Prozent.⁵⁸

Unsicherheiten in den Schätzungen bestehen nach Ausschluss dieser Flächen darin, wie viel Land tatsächlich verfügbar ist, wie stark sich Ackerland in andere Landnutzungsformen wie Weideland ausdehnen wird, welche Ertragssteigerungen (auch bei Vieh) bis 2050 eintreten werden und welche Erträge beim Anbau von Bioenergiepflanzen erreicht werden können. Verschiedene Studien kommen daher je nach Annahme zu unterschiedlichen Spannbreiten: Hoogwijk et al. (2005) berechnen beispielsweise ein Bioenergiepotenzial von 300 bis 650 Exajoule pro Jahr unter der Annahme, dass große brache und produktive landwirtschaftliche Flächen für energetische Zwecke genutzt werden können. Haberl et al. (2011) und Erb et al. (2009) auf der anderen Seite gehen davon aus, dass solche Flächen bereits als Weideland genutzt werden und berücksichtigen basierend auf Futtermittelbilanzen der Nutztierhaltung die dort geweideten beziehungsweise in Form von Heu geernteten Biomassemengen. Basierend auf Daten der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) berechnen sie Biomassepotenziale zwischen 28 und 161 Exajoule pro Jahr, die lediglich eine Ausweitung von Ackerland zwischen 9 und 19 Prozent bis zum Jahr 2050 annehmen. Van Vuuren et al. (2009) schätzen, dass eine durchschnittliche globale Ertragssteigerung von 12,5 Prozent die Biomassepotenziale um 50 Prozent erhöhen würde. Einen Ausreißer stellt die Studie von Smeets et al. (2007) mit einem maximalen Biomassepotenzial von bis zu 1.272 Exajoule pro Jahr dar.⁵⁹ Diese Schätzung beruht auf sehr optimistischen Annahmen bezüglich der zur Verfügung stehenden Landfläche sowie auf der Annahme von sehr hohen Erträgen der Bioenergieplantagen, die in dieser Rechnung eine Produktivität von knapp dem Vierfachen der gegenwärtigen durchschnittlichen oberirdischen Biomasseproduktion erreichen.⁶⁰

Generell ist die Frage der zukünftigen Erträge des Energiepflanzenanbaus umstritten. Mehrere Studien gehen davon aus, dass in der Praxis die potenzielle NPP auf großen Flächen nicht oder nur unwesentlich überschritten werden kann.⁶¹ Andere Autorinnen und Autoren kommen zu dem Schluss, dass durch Pflanzenzüchtung in der Zukunft erhebliche Potenziale zur Steigerung der Produktivität von Energiepflanzen bestehen könnten.⁶² Die oft geübte Praxis, in der Vergangenheit beobachtete Ertragssteigerungen beim Anbau von Nahrungspflanzen auf zukünftige Ertragssteigerungen von Lignozellulose-Pflanzen wie Energiehölzern oder mehrjährigen Gräsern umzulegen,⁶³ ist kritisch zu sehen: Erstens sind Lignozellulose-Pflanzen von Haus aus produktiver als Nahrungspflanzen, die hochwertige Stoffe wie Zucker, Stärke, Proteine oder Öle produzieren. Zweitens wird bei Lignozellulose-Energiepflanzen die gesamte oberirdische Pflanze geerntet. Im Gegensatz zu Nahrungspflanzen wie Getreide besteht bei ihnen daher nicht die Möglichkeit, den Ertrag durch Verbesserung des „Harvest Index“ (Anteil des kommerziellen Produkts an der Gesamtpflanze) zu steigern. Die Steigerung des „Harvest Index“ war für etwa die Hälfte der globalen Ertragssteigerungen von

57 Erb et al. 2009.

58 van Vuuren et al. 2009.

59 Smeets et al. 2007.

60 Coelho et al. 2012.

61 Smith et al. 2012-1; Smith et al. 2012-2; Haberl et al. 2013.

62 DeLucia et al. 2014.

63 Bonsch et al. 2014.

Nahrungspflanzen in den letzten 100 Jahren verantwortlich.⁶⁴ Auch die Hochrechnung der Erträge von Versuchsflächen auf große potenzielle Anbauflächen erscheint problematisch, wie empirische Untersuchungen gezeigt haben – bei Berücksichtigung dieser Faktoren ergibt sich ein erheblich geringeres globales Bioenergiepotenzial als oft angenommen.⁶⁵ In einer neueren Studie zeigen Mauser et al. (2015)⁶⁶, dass die Produktion von agrarischer Biomasse auf bereits genutzten Flächen bis auf das Dreifache ihres heutigen Wertes ansteigen könnte. Voraussetzung für diese Ertragssteigerungen sind allerdings weitreichende Verbesserungen der Anbaumethoden wie gesteigerte Anbauintensität, Bewässerung und Düngung, die insbesondere in Entwicklungsländern problematisch sind.⁶⁷ Auch wenn diese hohen Erträge unwahrscheinlich sind, so sind Produktivitätssteigerungen in der Landwirtschaft ein wichtiger Hebel – nicht nur für eine nachhaltige Bioenergienutzung, sondern auch für die Ernährung. Denn heutige Ertragswachstumsraten werden nicht ausreichen, um die wachsende Weltbevölkerung ohne Expansion von Ackerland ernähren zu können.⁶⁸

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor ist der allgemeine Effekt des Klimawandels, beispielsweise durch häufigere Wetterextreme oder den direkten Einfluss von CO₂-Fertilisation auf Erträge. Berücksichtigt man Letzteren, kehrt sich der ansonsten stark negative Ertragseffekt des Klimawandels (flächengewichtet –16 Prozent) um und führt zu einer globalen Steigerung der Erträge (flächengewichtet +15 Prozent).⁶⁹ Wenn man diese Effekte miteinbezieht, kommt man auf Bioenergiepotenzialschätzungen zwischen 88 und 152 Exajoule pro Jahr, je nach Berücksichtigung der Fertilisation.⁷⁰ Allerdings sind die Auswirkungen des CO₂-Effekts stark umstritten.⁷¹

Der Studienvergleich zeigt: Ohne Ertragssteigerungen ist eine nachhaltige Erhöhung der Bioenergienutzung aus Energiepflanzen nur möglich, wenn bereits genutzte Wiesen- und Weideflächen in Ackerland beziehungsweise Energiepflanzenplantagen umgewandelt werden. Dies setzt jedoch voraus, dass in den Industrieländern weniger tierische Produkte konsumiert werden und deren Konsum in den Schwellenländern weniger schnell wächst. Zwar gibt es Potenziale, die Intensität der Nutztierhaltung unter Einhaltung von saisonalen Beschränkungen zu steigern und damit mehr tierische Produkte zu produzieren oder Flächen freizustellen. Allerdings müssten hierzu gravierende sozialökologische Herausforderungen überwunden werden.⁷²

Derzeit werden jährlich etwa 135 Exajoule an Biomasse für die Viehhaltung genutzt – mehr als die Hälfte auf Weideflächen, der andere Teil auf Ackerland. Damit werden rund 47 Prozent der globalen Biomasse von Ackerland für die Tierfütterung eingesetzt, weit mehr als direkt zur pflanzlichen Nahrungsmittelproduktion verwendet werden.⁷³ Der Anteil der zur Tierfütterung eingesetzten Kalorien aus Getreide und Gras, der am Ende tatsächlich vom Menschen in Form von Fleisch konsumiert wird,

64 Krausmann et al. 2013.

65 Searle/Malins 2014; Searle/Malins 2015.

66 Mauser et al. 2015.

67 Siehe dazu auch Mueller et al. 2012.

68 Alexandratos/Bruinsma 2012.

69 Erb et al. 2009; Haberl et al. 2011.

70 Haberl et al. 2011.

71 Long et al. 2006; Schleussner et al. 2018.

72 Fetzel et al. 2017-2; Irisarri et al. 2017.

73 Smith et al. 2014-2.

ist dabei gering. Selbst in den USA - einem Land mit sehr hohen Fleischerträgen – beträgt er nur drei Prozent bei Rindfleisch und 13 Prozent bei Geflügel.⁷⁴ Bei einer rein veganen Ernährung könnten von der gleichen Fläche weltweit etwa doppelt so viele Menschen ernährt werden wie heute.⁷⁵ Dabei muss erwähnt werden, dass Nutztierflächen für Menschen nutzbar machen, die nicht direkt als Ackerland geeignet sind. Unter solchen Bedingungen kann die Viehzucht die Ressourcenbasis der Gesellschaft verbreitern – ein Aspekt, der besonders für die Ernährungssicherheit unter Subsistenzbedingungen (Sicherung des Lebensunterhalts durch weitgehende Selbstversorgung, zum Beispiel durch eigenen Anbau von Nahrungsmitteln) und damit für die Resilienz von Gesellschaften vornehmlich in Entwicklungsländern von zentraler Bedeutung ist. Auch wenn eine solch weitreichende globale Ernährungsumstellung ausgeschlossen erscheint, verdeutlichen diese Berechnungen, dass eine fleischärmere Ernährung die Spielräume für unterschiedliche Alternativen – von der Ausweitung des Biolandbaus⁷⁶ bis zur Bereitstellung von Bioenergie im Energiesystem – vergrößern würde. Allerdings sind die genauen Potenziale von Wiesen- und Weideflächen umstritten, da es sich oft um ertragsarme Flächen handelt, die für den Ackerbau nicht oder kaum geeignet sind. Zudem ist die Datenunsicherheit, insbesondere bezogen auf Produktivität, Flächenverfügbarkeit und Verteilung der Nutztiere, so groß, dass eine verlässliche Schätzung derzeit nicht möglich ist.

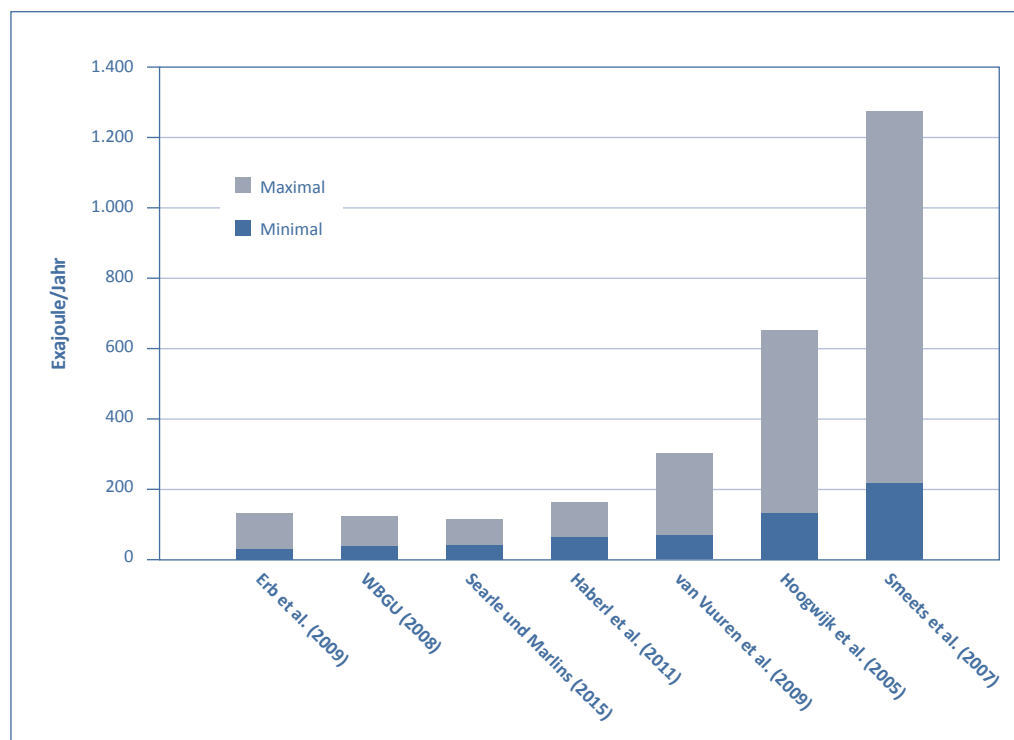


Abbildung 4: Spannweiten des technischen Bioenergiepotenzials für Energiepflanzen aus Ackerland in Exajoule pro Jahr

74 Shepon et al. 2016.

75 Erb et al. 2016-2.

76 Erb et al. 2016-2.

Quelle	Zeit- raum	Sozioökonomische und ökologische Nachhaltigkeits- kriterien ^{a)}	Erlaubte Landnutzungskategorien	Für Bioenergie- potenziale benö- tigte Landfläche (Millionen km ²)	Angenommener Energiepflanzen- Ertrag	Geschätztes Bio- massepotenzial für Energiepflanzen (EJ/Jahr)
Erb et al. 2009	2050	Ausschluss von Land zur Nah- rungsmittel- und Futterproduk- tion und zur Chemikalien- und Werkstoffproduktion, von Wäl- dern und unproduktivem Land	Ackerland, das nicht für Nahrungsmittel, Chemi- kalien oder Werkstoffe genutzt wird, Intensivierung von Wiesen- und Weideland	2,3–9,9 abhängig von der Nachfrage für Nahrungsmit- tel oder Faserstof- fe (44 Szenarien)	Entsprechend der potenziellen (Ackerland) oder tatsächlichen (Wei- deflächen) NPP	Energiepflanzen: 28–128 EJ/Jahr; Reststoffe: 21–26 EJ/Jahr
WBGU 2008	2050	Ausschluss von Biodiversitäts- hotspots, geschützten Flächen, Feuchtgebieten, Flächen mit hohem Kohlenstoffbestand, Abholzung; Nahrungsmittel- sicherheit, Bodendegradation, Wasser Verfügbarkeit	Geeignetes Land für Bioenergiepflanzen im Sinne der Nachhaltig- keitskriterien	2,4–5,0	7,5–12,6 t/ha/Jahr	34–120 EJ/Jahr
Searle/ Malins 2015	2050	Ausschluss von Land zur Nah- rungsmittel- und Futterproduk- tion, von Wäldern, Feuchtgebie- ten, Tundren und Wüsten	Geeignetes Land für Bioenergiepflanzen im Sinne der Nachhaltig- keitskriterien	–	7,5 t/ha/Jahr	40–110 EJ/Jahr
Haberl et al. 2011	2050	Ausschluss von Land zur Nahrungsmittel- und Futter- produktion, von Wäldern und unproduktivem Land	Produktive Weideflächen	3,8–9,9	20–135 t/ha/Jahr	64–161 EJ/Jahr ^{b)}
van Vuuren et al. 2009	2050	Biodiversität, Nahrungsmittel- sicherheit, Bodendegradation, Wasser Verfügbarkeit	Brache landwirtschaft- liche Flächen (75 Prozent), Wiesen- und Weideland (25 Prozent)	13	10–32 t/ha/Jahr (Trockenmasse), abhängig von Bodenqualität und Klima	120–300 EJ/Jahr (uneingeschränkt), 65– 115 EJ/Jahr (unter Einbeziehung der Nachhaltigkeitskrite- rien)
Hoog- wijk et al. 2005	2050– 2100	Biodiversität, Nahrungsmittel- sicherheit, Ausschluss von Land zur Chemikalien- und Werkstoff- produktion	Brache landwirtschaftliche Flächen (100 Prozent), Flächen, die nicht für Nah- rungsmittel, Chemikalien oder Werkstoffe genutzt werden (10–50 Prozent), extensives Weideland	Brache Flächen: 0,6–1,5; Restliches Land: 0,3–1,4	Abhängig von Bodenqualität und Klima	Brache Fläche: 130–400 EJ/Jahr; Übriges Land: 235–240 EJ/Jahr; Summe: 300–650 EJ/Jahr
Smeets et al. 2007	2050	Biodiversität, Nahrungs- mittelsicherheit, Ausschluss von Wäldern	Überschüssiges Ackerland (100 Prozent)	7,3–35,9	16–21 t/ha/Jahr (Ofentrockenmasse)	215–1.272 EJ/Jahr

Tabelle 2: Schätzungen des technischen Bioenergiepotenzials für Energiepflanzen aus Ackerland

a) Die sozioökonomischen Nachhaltigkeitskriterien bedeuten gleichzeitig, dass die in dieser Kategorie genannten Nutzungen Vorrang vor der energetischen Nutzung haben und damit von den energetischen Biomassepotenzialen abgezogen werden. **b)** Inklusive Reststoffen.

2.2.2 Potenzial aus Wald

Biomasse aus Holz nimmt mit circa 40 Exajoule pro Jahr den größten Anteil an der heutigen energetischen Nutzung von Biomasse ein.⁷⁷ Der überwiegende Teil wird vor allem in Entwicklungsländern als Feuerholz und Holzkohle in traditionellen Feuerstätten genutzt, was mit energetischen Konversionsverlusten von bis zu 90 Prozent verbunden und durch die starke Raumentwicklung in Wohnräumen außerdem sehr gesundheitsschädlich ist.⁷⁸

Mehr als ein Drittel der Erdoberfläche ist bewaldet, wobei etwa 85 Prozent der Wälder durch den Menschen genutzt werden und der Rest noch mit unberührten Urwäldern bedeckt ist.⁷⁹ Sowohl ungenutzte als auch genutzte Wälder erfüllen zentrale Ökosystemdienstleistungen – zum Beispiel speichern sie Kohlenstoff – und leisten damit einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz. Inwieweit man überhaupt Biomasse aus Wäldern energetisch nutzen sollte, ist daher umstritten.⁸⁰ Durch die Nutzung von Wäldern wird Kohlenstoff, der zuvor im Wald gebunden war, in Holzprodukte überführt. Wann er als CO₂ freigesetzt wird, hängt von der Lebensdauer der Produkte ab. Zudem wird der im Wald pro Flächeneinheit durchschnittlich vorhandene Kohlenstoffbestand verringert, da sich der Wald verjüngt und in jüngeren Bäumen weniger Kohlenstoff gebunden ist als in älteren Bäumen. Andererseits verlangsamt und verringert sich mit zunehmendem Alter der Wälder die Kohlenstoffspeicherung. Ein kluges und nachhaltiges Waldbewirtschaftungssystem kann daher eine wichtige Rolle spielen. Neuen Forschungsergebnissen zufolge ist dieser Effekt in Summe etwa so groß wie die globale Abholzung, aber derzeit kaum beachtet.⁸¹ Restorationsmaßnahmen haben daher ein nicht unbeachtliches Potenzial zur Kohlenstoffbindung. So könnte die Restoration von genutzten Wäldern auf 90 Prozent ihrer potenziellen Biomasseproduktion die globalen Emissionen von fossilen Brennstoffen für sieben bis zwölf Jahre absorbieren.⁸² Die Reduktion des Kohlenstoffbestandes ist eine Funktion der Nutzungsintensität. Daher gibt es einen Trade-off zwischen Klimaschutz durch gesteigerte Bioenergienutzung aus Waldbiomasse (und dadurch Vermeidung fossiler Brennstoffe) und Klimaschutz durch Aufforstung beziehungsweise Verringerung der Nutzungsintensität. Diese Frage ist Teil der Debatte um die Kohlenstoffschuld (siehe Kapitel 3.3).

Wie viel Waldbiomasse nachhaltig nutzbar ist, kann nur schwer beziffert werden. Während die Holznutzung in Entwicklungsländern nur geschätzt werden kann, weisen auch die Holzbilanzen der Industrieländer große Lücken auf, da beispielsweise Privatwälder nur zum Teil und Reststoffe wie Rinde überhaupt nicht erfasst werden. Momentan werden global ungefähr 4 Prozent der Biomasseproduktion der Wälder vom Menschen geerntet, wobei sich dieser Wert erheblich zwischen einzelnen Regionen unterscheidet und beispielsweise in Lateinamerika durchschnittlich bei rund 1 Prozent, in Südasien hingegen bei 24 Prozent liegt. Lokal können die Werte noch wesentlich niedriger oder höher sein.⁸³ Ein Großteil der Waldbiomasse wird jedoch von Tieren konsumiert oder dient der Erhaltung der Böden, der Artenvielfalt und der

⁷⁷ Bais et al. 2015.

⁷⁸ REN21 2016.

⁷⁹ Potapov et al. 2017.

⁸⁰ Bentsen 2017; Schlesinger 2018.

⁸¹ Erb et al. 2018.

⁸² Erb et al. 2018.

⁸³ Bais et al. 2015.

Waldökosysteme allgemein und sollte daher nicht geerntet werden.⁸⁴ Hinzu kommt, dass zu hohe Erntewerte nicht nachhaltig sind: Wird zu viel geerntet, sind die Böden weniger fruchtbar, und der im Wald gespeicherte Kohlenstoffbestand sinkt.⁸⁵ Will man die industrielle stoffliche Holznutzung nicht einschränken und die Rolle von Wäldern für die globalen Ökosysteme beibehalten, so ist fraglich, ob eine Steigerung der derzeitigen Biomassenutzung aus Waldbeständen überhaupt nachhaltig möglich ist. Andererseits ist in den letzten 20 Jahren die Produktivität der Wälder weltweit jährlich um 7 Prozent gestiegen, während die Ernterate stabil geblieben ist.⁸⁶ Hintergrund dieser Produktivitätssteigerung könnten veränderte Wachstumsbedingungen durch Klimaveränderungen sein, aber auch Landnutzungsveränderungen, die eine Erholung degradierter Waldökosysteme erlauben.⁸⁷

2.2.3 Potenzial aus Rest- und Abfallstoffen

Rest- und Abfallstoffe der industriellen Holznutzung in Form einer Kaskadennutzung mehrfach zu nutzen, ist hingegen empfehlenswert. Aufgrund potenzieller Schadstoffanreicherungen in den Kaskadenstufen ist jedoch das jeweilige Design der Holzprodukte entscheidend. Hierbei muss man zwischen primären (Abfälle des Holzeinschlags), sekundären (Abfälle der Holzverarbeitung) und tertiären (Holzabfälle nach Endnutzung) Abfallstoffen unterscheiden.⁸⁸ Der Vorteil der Mehrfachnutzung ist, dass Biomasse zunächst stofflich und in einem zweiten Schritt energetisch genutzt wird, was sowohl Nutzungskonkurrenzen verringert als auch die Wertschöpfung steigert.⁸⁹ Allerdings muss man beachten, dass viele Nutzungswege von Holzreststoffen bereits optimiert sind und die Reststoffe eines Sektors häufig Rohstoffe eines anderen darstellen. Eine Erhöhung der Nutzung und Nachfrage von Reststoffen kann in vielen Fällen zu Ressourcenkonkurrenzen zwischen Produkten führen, die aus diesen Reststoffen hergestellt werden können (etwa Papier oder Spanplatten), und der energetischen Nutzung. Dies kann letztlich in einem erhöhten Primäreinschlag münden.

Die Potenzialschätzungen unterliegen zum Teil den oben genannten Unsicherheiten, da sie die traditionelle Nutzung von Reststoffen zum Kochen und Heizen in Entwicklungsländern abziehen und von der Nachfrage nach industriell genutztem Holz abhängen. Diese wiederum schwankt je nach Bevölkerungswachstum, Wirtschaftswachstum und künftigen Konsumgewohnheiten sowie entsprechenden politischen Programmen, etwa zur Förderung des Bauens mit Holz, die auch ökologisch vorteilhafte Effekte (Ersatz energie- und THG-intensiver Materialien wie Stahlbeton) haben können.⁹⁰ Zudem müssen als ökologisches Nachhaltigkeitskriterium genug primäre Reststoffe zur Erhaltung der Bodenqualität und zur Speicherung des Kohlenstoffs im Boden bleiben. Wie groß der Anteil sein muss, ist umstritten, da dies von klimatischen und Bodenbedingungen abhängt. Verschiedene Studien schätzen daher ökologisch-nachhaltige Holzreststoffpotenziale zwischen 12 und 35 Exajoule pro Jahr (siehe Abbildung 5). Smeets et al. (2007) nehmen an, dass 75 Prozent der primären Reststoffe im Wald verbleiben, und schätzen, dass das zusätzliche ökologisch-nachhaltige Bioenergiepotenzial aus allen Holzreststoffen ab 2050 bis zu 30 Exajoule pro Jahr betragen

84 Schulze et al. 2012.

85 Schulze et al. 2012.

86 Bais et al. 2015.

87 Erb et al. 2013; Gingrich et al. 2007; Rautiainen et al. 2010.

88 Rogner et al. 2012.

89 Carus et al. 2014.

90 Smith et al. 2014-2.

kann.⁹¹ Haberl et al. (2010) berücksichtigen basierend auf Anttila et al. (2009) nur die Baumkronen und unverkäufliche Stammreste als primäre Reststoffe und berechnen ein technisch-nachhaltiges Potenzial zwischen 19 und 35 Exajoule pro Jahr für die Summe aus allen Holzreststoffen.⁹² In den Schätzungen von Daioglou et al. (2016) werden 1.000 Tonnen primäre Reststoffe pro Quadratkilometer Wald ausgeschlossen, womit ihr ökologisches Potenzial je nach Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum bis 2050 zwischen 12 und 19 Exajoule pro Jahr liegt.⁹³

Neben den Reststoffen der Holzindustrie könnten organische Reststoffe in Form von Agrarreststoffen, Hausmüll und Tierexkrementen nachhaltig im Energiesystem genutzt werden, wie die großen Reststoffströme in Abbildung 3 verdeutlichen. Auch bei den Agrarreststoffen gibt es primäre (Ernteabfälle) und sekundäre Reststoffe (Abfälle aus der Verarbeitung). Beide werden generell durch Annahmen über feste Verhältnisse zwischen Endprodukt und Reststoffen geschätzt.⁹⁴ Weitere Unterschiede in den Schätzungen zukünftiger Potenziale fußen auf unterschiedlichen Annahmen bezüglich der Agrarproduktion im Jahr 2050 und der Frage, wie viele primäre Reststoffe zur Erhaltung der Bodenqualität und zur Speicherung des Kohlenstoffs in Boden und Feld bleiben sollten. Die Spannbreite der vorhandenen Schätzungen ist relativ gering und reicht von 46 bis 67 Exajoule pro Jahr für Agrarreststoffe (siehe Abbildung 5).⁹⁵ Dieses Potenzial ist jedoch nur teilweise für Bioenergie nutzbar, da gerade in Entwicklungsländern agrarische Reststoffe bereits zur Tierfütterung und als Ersatz für Feuerholz genutzt werden, sodass man zwischen 19 Exajoule pro Jahr⁹⁶ und 40 Exajoule pro Jahr⁹⁷ abziehen muss. Schätzungen für ein technisches Biomassepotenzial von Hausmüll basierend auf den Energiewerten von biogenem und nicht-biogenem Müll reichen von 11 bis 17 Exajoule pro Jahr.⁹⁸ In vielen westlichen Ländern wird Müll bereits zur Energieversorgung verfeuert und deckt in Deutschland beispielsweise 1 Prozent des Primärenergieverbrauchs.⁹⁹ Unterschiedlichen Annahmen bezüglich der Viehhaltung im Jahr 2050 und der Heizwerte von Tierexkrementen zufolge wird deren Bioenergiepotenzial auf 9 bis 39 Exajoule pro Jahr geschätzt.¹⁰⁰ Da Tierexkremente bereits in großem Umfang genutzt werden und eine wichtige Rolle als organischer Dünger und Ersatz für fossilen Dünger spielen, ist die obere Schätzung von 39 Exajoule pro Jahr jedoch nur ein theoretisches Potenzial.¹⁰¹ Insgesamt ergibt sich dadurch ein Bioenergiepotenzial aus organischen Reststoffen von 40 bis 140 Exajoule pro Jahr. Damit könnten organische und Holzreststoffe zusammen bis zu 25 Prozent des heutigen globalen Primärenergiebedarfs (571 Exajoule im Jahr 2015) decken.

91 Smeets et al. 2007.

92 Haberl et al. 2010; Anttila et al. 2009.

93 Daioglou et al. 2016.

94 Koopmans/Koppejan 1997; Smeets et al. 2007.

95 Hakala et al. 2009.

96 Smeets et al. 2007.

97 Daioglou et al. 2016.

98 Rogner et al. 2012.

99 BMWi 2017-1.

100 Hoogwijk et al. 2005; Rogner et al. 2012.

101 Nutzt man Tierexkremente zunächst energetisch, beispielsweise in Biogasanlagen, kann man die dabei übrig bleibenden Gärreste im Sinne der Kaskadennutzung als Dünger wiederverwenden. Fraglich ist, ob dies mit Hinblick auf Transportkosten ökonomisch sinnvoll ist. Zudem gibt es Einschränkungen, wie viel Gärrest ausgebracht werden darf.

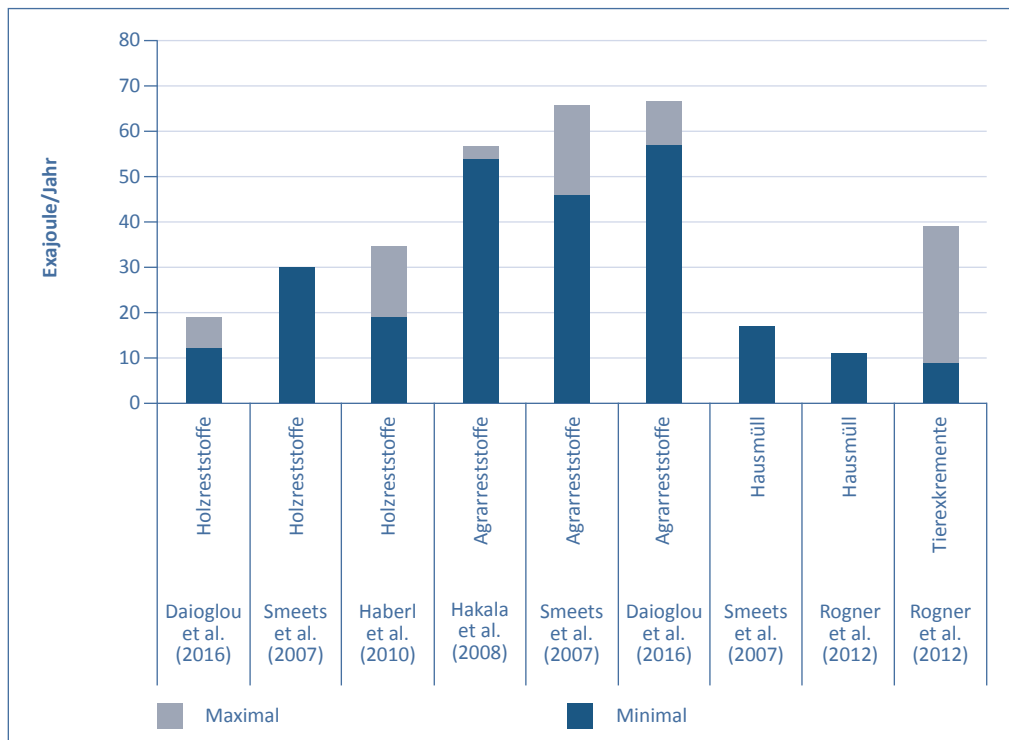


Abbildung 5: Potenzialschätzungen für Rest- und Abfallstoffe (in Exajoule/Jahr)

2.2.4 Potenziale in Deutschland

Wie bereits erwähnt, reicht eine rein nationale Sichtweise auf Bioenergiepotenziale nicht aus, da Biomasse international gehandelt wird. Deutschland ist Netto-Exporteur von Holzpellets, Holzreststoffen und Biodiesel, aber Netto-Importeur von Bioethanol¹⁰². Zudem ist die NPP-Aneignung, die durch den Biomassekonsum global verursacht wird, größer als die NPP-Aneignung durch die inländische Landnutzung in Deutschland, das heißt, Deutschland ist insgesamt ein großer Netto-Importeur von Biomasse.¹⁰³ Dennoch ist eine separate Ermittlung der wenig energiedichten, nährstoffreichen, vergärbaren Reststoffpotenziale in Deutschland sinnvoll, da diese nicht transportfähig sind und zum Nährstoffkreislauf beitragen. Gegenwärtig werden in Deutschland 0,54 Exajoule pro Jahr Biomasse in Form von Rest- und Abfallstoffen energetisch genutzt. Dem steht ein ungenutztes technisches Potenzial von 0,39 bis 0,68 Exajoule an Rest- und Abfallstoffen gegenüber.¹⁰⁴ Berücksichtigt man den aktuellen deutschen Primärenergiebedarf von 13,5 Exajoule pro Jahr, könnten Rest- und Abfallstoffe 7 bis 9 Prozent des Primärenergiebedarfs decken. Gelingt jedoch die Senkung des Primärenergieverbrauchs bis 2050 auf 7,2 Exajoule pro Jahr – wie von der deutschen Bundesregierung angestrebt –, könnten Rest- und Abfallstoffe bis zu 17 Prozent des Primärenergiebedarfs bereitstellen. Bei den noch ungenutzten Abfall- und Reststoffpotenzialen handelt es sich insbesondere um Biomasse aus Waldrestholz, Getreidestroh und tierischen Exkrementen. Getreidestroh wird bisher am wenigsten in Deutschland genutzt und kann künftig einen Teil des Energiebedarfs decken.¹⁰⁵ Zum Vergleich: In Deutschland werden derzeit etwa 1,1 Exajoule (305 Terawattstunden) Bioenergie pro Jahr genutzt, was einem Anteil von 8 Prozent am Primärenergieverbrauch entspricht.¹⁰⁶

¹⁰² Thrän et al. 2015.

¹⁰³ Kastner et al. 2015.

¹⁰⁴ Brosowski et al. 2016.

¹⁰⁵ Weiser et al. 2014.

¹⁰⁶ BMWi 2017-1.

2.3 Fazit und Handlungsbedarf

Aktuell werden 70 Prozent der weltweit verfügbaren Biomasse für die Nahrungsmittelproduktion verwendet. Zur Energieversorgung wird Biomasse nur in einem vergleichsweise begrenzten Umfang genutzt – jährlich werden etwa 50 bis 60 Exajoule Bioenergie produziert. Ohne ökologische Einschränkungen oder umfassende Effizienz- und Ertragssteigerungen ist eine Ausweitung der weltweiten Produktion von Biomasse unwahrscheinlich. Um Biomasse nachhaltig und in größerem Umfang im Energiesystem einzusetzen als heute, muss sie künftig also anders genutzt werden als bisher. Da derzeit mehr als die Hälfte der für menschliche Zwecke geernteten Biomasse an Nutztiere verfüttert wird, bestehen in diesem Bereich theoretisch die quantitativ größten Handlungsoptionen: Eine Reduktion des Anteils tierischer Produkte an der Ernährung könnte sehr erhebliche Flächen und Biomassemengen freisetzen. Studien zeigen, dass bei einer rein pflanzlichen Ernährung rechnerisch weltweit auf der heute landwirtschaftlich genutzten Fläche etwa doppelt so viele Menschen ernährt werden könnten wie heute.¹⁰⁷ Durch eine Reduktion des Konsums tierischer Produkte könnte der Bedarf an Biomasse für die Nahrungsmittelproduktion daher langfristig sinken, während neue Anwendungsmöglichkeiten im Energiesystem entstünden. Allerdings ist fraglich, ob die Menschen bereit sein werden, für das Ziel einer Steigerung der Bioenergieproduktion auf tierische Produkte in der Ernährung zu verzichten. Hier erscheint es plausibler, dass Gesundheitsargumente eine Rolle spielen könnten. So zeigen Studien, dass bereits eine Umsetzung von Ernährungsempfehlungen wie etwa jener der Harvard Medical School deutliche Entlastungen im Landnutzungssystem bringen könnte.¹⁰⁸

Die Schätzungen, wie viel Bioenergie 2050 weltweit genutzt werden kann, liegen weit auseinander. Einerseits sind sie abhängig vom Wachstum der Bevölkerung und des weltweiten Wohlstands – dadurch steigt der Konsum tierischer Erzeugnisse –, andererseits müssen Zielkonflikte zwischen dem Einsatz von Bioenergie im Energiesystem und anderen Nutzungsformen ausbalanciert werden. Hinzu kommt, dass die verfügbaren hochwertigen Ackerflächen begrenzt sind und auch von der Futter- und Nahrungsmittelindustrie genutzt werden. Die Potenziale aus organischen Reststoffen hingegen sind gut ermittelbar. Sie könnten in Zukunft stärker für die Herstellung von Bioenergie genutzt werden. Allein in Deutschland könnten Rest- und Abfallstoffe 7 bis 9 Prozent des heutigen Primärenergiebedarfs decken.

Aus Holz gewonnene Biomasse stellt heute den größten Anteil der energetischen Nutzung dar. Da Wälder Kohlenstoff speichern und wichtige Funktionen im Ökosystem einnehmen, ist eine Steigerung der Holznutzung als Primärrohstoff für die Energieversorgung aber nur eingeschränkt sinnvoll. Rest- und Abfallstoffe aus Holz können jedoch im Sinne der Kaskadennutzung verwendet werden. Durch diese Mehrfachnutzung – erst stofflich, dann energetisch – wird die Biomassenutzungseffizienz gesteigert und die Ökobilanz verbessert.

107 Erb et al. 2016.

108 Stehfest 2014; Stehfest et al. 2009.

Die Übersicht der Studien zu den weltweit nachhaltig erzeugbaren Bioenergiepotenzialen macht die große Bandbreite an Abschätzungen deutlich. Dies liegt zu einem Teil an Unsicherheiten über zukünftige Entwicklungen bezüglich des Angebots, aber auch der Nachfrage nach Biomasse in ihren unterschiedlichen Verwendungen. Bedeutender für die Unterschiede in den Schätzungen scheinen aber die jeweils akzeptierten Trade-offs zu sein, die eingegangen werden müssen, um Biomasse in die energetische Nutzung zu bringen. Auch unterschiedliche Einschätzungen zukünftig möglicher Ertragssteigerungen spielen eine große Rolle. Eher unstrittig scheint ein ökologisch nachhaltiges Bioenergiepotenzial aus holzartigen und anderen organischen Reststoffen weltweit von zwischen 40 und 140 Exajoule pro Jahr zu sein.

Die beschriebenen Unsicherheiten, Trade-offs und Nutzungskonkurrenzen erfordern einheitliche Bewertungskriterien, um festzulegen, wie viel Biomasse in welchen Bereichen durch den Menschen genutzt werden sollte. Heute wird der Einsatz von Biomasse als Nahrungs- oder Futtermittel jedoch weitgehend durch den Markt bestimmt. Viele externe Effekte werden dabei nicht in das Marktkalkül einbezogen, obwohl sie besonders wichtig sind, um Zielkonflikte der Bioenergienutzung angemessen bewerten zu können. Die wichtigsten externen Effekte sind die Treibhausgasemissionen, die bei der Produktion und Nutzung von Biomasse entstehen, sowie die negativen Einflüsse auf Ökosysteme und Biodiversität, die mit einer verstärkten Biomassenutzung einhergehen. Insbesondere die Nutzung von Biomasse für energetische Zwecke – Bioenergie – muss sich an den Klimaschutzziele zur Einsparung von Treibhausgasemissionen gegenüber fossilen Energieträgern, aber auch gegenüber Landnutzungsformen, die eine Senke für CO₂ darstellen, messen lassen.

Die Kontrolle und Regulierung der energetischen Nutzung von Biomasse wird somit zu einem Querschnittsthema, das eine enge Abstimmung der Klima-, Energie-, Agrar- und Umweltpolitik erfordert. Für eine „optimale“ Bioenergienutzung muss die Rolle der Bioenergie im Energie- und im Landnutzungssystem berücksichtigt werden. Langfristig wünschenswert wäre daher ein Instrumentarium, das Klimaschutz, den Schutz von Ökosystemen und soziale Aspekte der Ernährungssicherheit als ein integriertes System betrachtet. Nur bei der Berücksichtigung der ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Aspekte kann Bioenergie umwelt- und sozialverträglich eingesetzt werden.

3 Energetische Nutzung von Biomasse

3.1 Technologien zur Bioenergiebereitstellung im Überblick

Bioenergie wird aus unterschiedlichen biogenen Ressourcen und mit unterschiedlichen Technologien bereitgestellt. Aktuell werden 8,8 Prozent¹⁰⁹ des deutschen Endenergieverbrauchs im Wärme-, Strom- und Kraftstoffbereich aus Biomasse bereitgestellt.¹¹⁰ Dabei zeigt sich eine vorwiegende Nutzung landwirtschaftlicher Anbaubiomasse und forstwirtschaftlicher Produkte zur Erzeugung von Bioenergie (Abbildung 6). Ein verstärkter Einsatz biogener Rest- und Abfallstoffe ist wesentlich für die zukünftige energetische Biomassenutzung und die damit verbundene Debatte hinsichtlich der genutzten Flächen für die Energiebereitstellung. Allerdings sind hier die Größenordnungen ihrer wirtschaftlich verfügbaren Potenziale zu berücksichtigen (Kapitel 2).

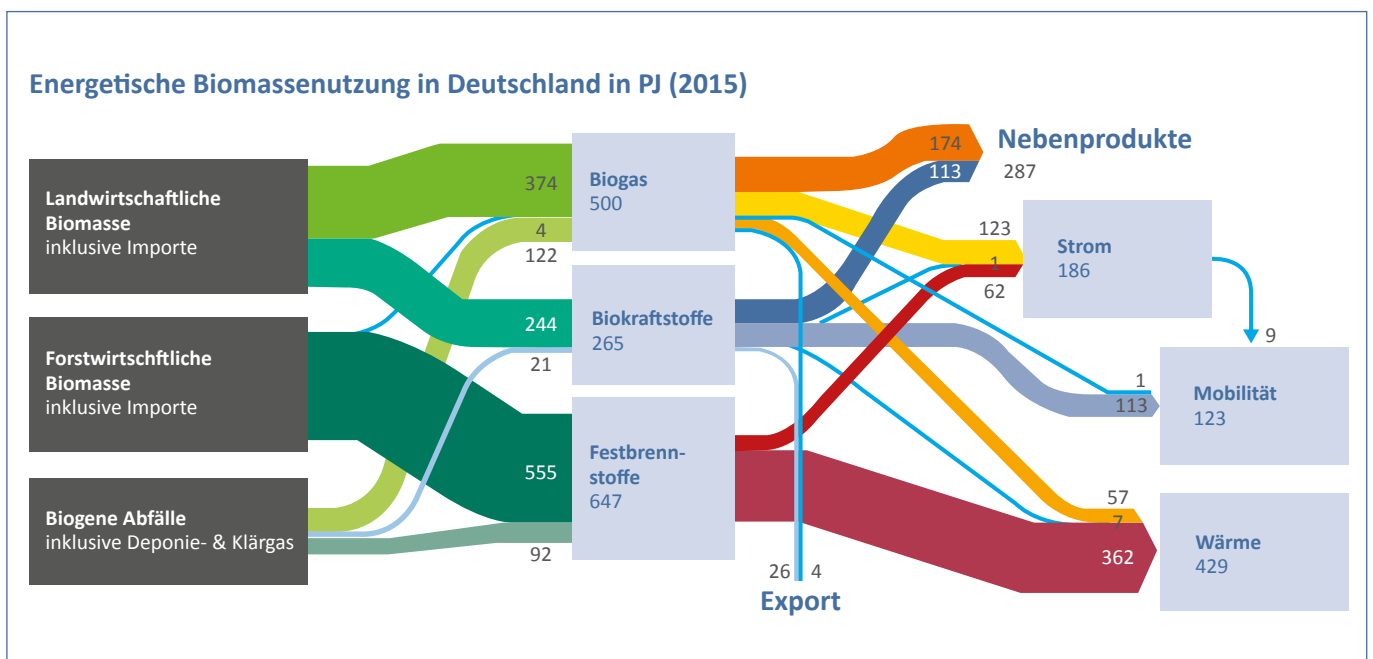


Abbildung 6: Energetische Biomassenutzung in Deutschland 2015, Grafik in Anlehnung an Thrän et al. 2018.

Um Bioenergie bereitzustellen, steht eine Vielzahl von Konversionspfaden zur Verfügung. Sie unterscheiden sich durch die Art der eingesetzten Biomasse, das erzeugte Produkt (verschiedene Kraftstoffe, Wärme, Strom) und die eingesetzten Umwandlungstechnologien. Bei der eingesetzten Biomasse kann unterschieden werden zwischen öl- und fetthaltigen Pflanzen (zum Beispiel Raps, Soja, Palmöl, Jatropha), zuckerhaltigen Pflanzen (Zuckerrohr, Zuckerrübe), stärkehaltigen Pflanzen (Mais, Weizen, Roggen), halmgutartiger Biomasse (Stroh, Gras), holzartiger Biomasse, aquatischer

¹⁰⁹ Inklusive biogener Anteil des Abfalls sowie Deponie- und Klärgas.

¹¹⁰ BMWi 2017-1.

Biomasse (zum Beispiel Mikroalgen) sowie verschiedenen Reststoffen wie Dung/Gülle und Bioabfall. Abhängig von der Art der eingesetzten Biomasse und dem gewünschten Produkt kommen unterschiedliche Umwandlungstechnologien zur Anwendung. Dabei kann unterschieden werden zwischen thermochemischen Konversionstechnologien, die sich bei hohen Temperaturen abspielen (zum Beispiel Vergasung und Pyrolyse), biochemischen Verfahren, bei denen die Umsetzung durch Mikroorganismen erfolgt wie alkoholische Fermentation (Ethanolherzeugung) und anaerobe Fermentation (Biogasherzeugung), und physikalisch-chemischer Konversion (zum Beispiel Umesterung zur Biodieselerzeugung oder Pressung und Extraktion zur Herstellung von Pflanzenölen).

Die schematische Darstellung in Abbildung 7 gibt einen Überblick zu den verschiedenen Biomassekonversionspfaden und dem damit verbundenen Einsatz verschiedener Biomassefraktionen. Die abgebildeten Technologien und Konzepte sind teilweise im Markt etabliert, teilweise noch in der Entwicklung.

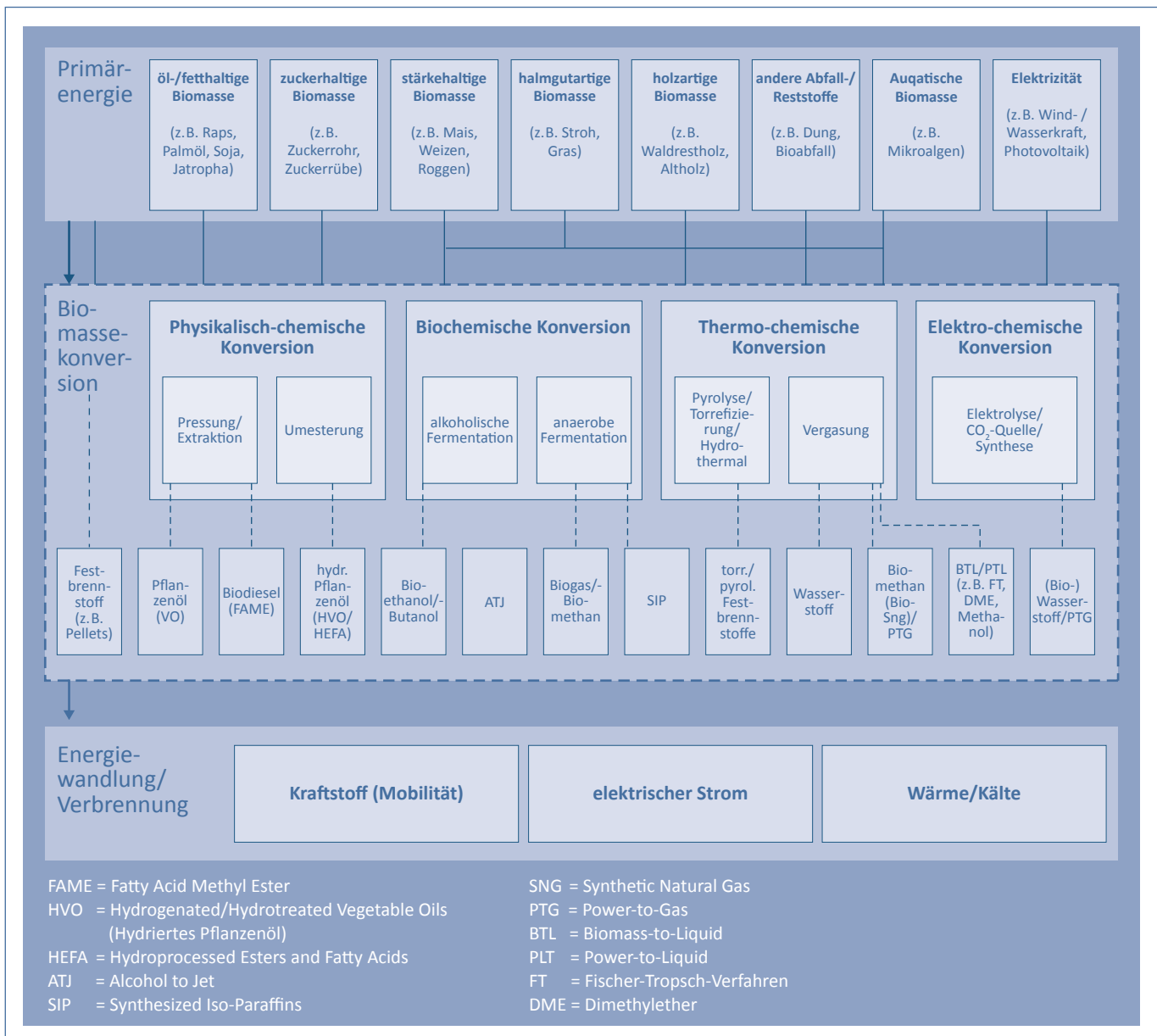


Abbildung 7: Übersicht Bioenergie-Technologiepfade, in Anlehnung an Mueller-Langer et al. 2017.

Abbildung 8 gibt einen Überblick über die Anlagengrößen der einzelnen Bioenergietechnologien sowie den jeweiligen Entwicklungsstand der Technologie (TRL – Technology Readiness Level)¹¹¹. Die heutige Nutzung ist gekennzeichnet durch eine große Anzahl kleiner Anlagen mit vielfach lokaler Rohstoffversorgung. Aus der Abbildung geht hervor, dass für die Herstellung von Kraftstoffen tendenziell größere Anlagen erforderlich sind als zur Bereitstellung von Wärme und Strom. Vor allem im Bereich der Kraftstoffherstellung gibt es eine Vielzahl an Technologien, die sich noch in der Entwicklung befinden (TRL 5–7).

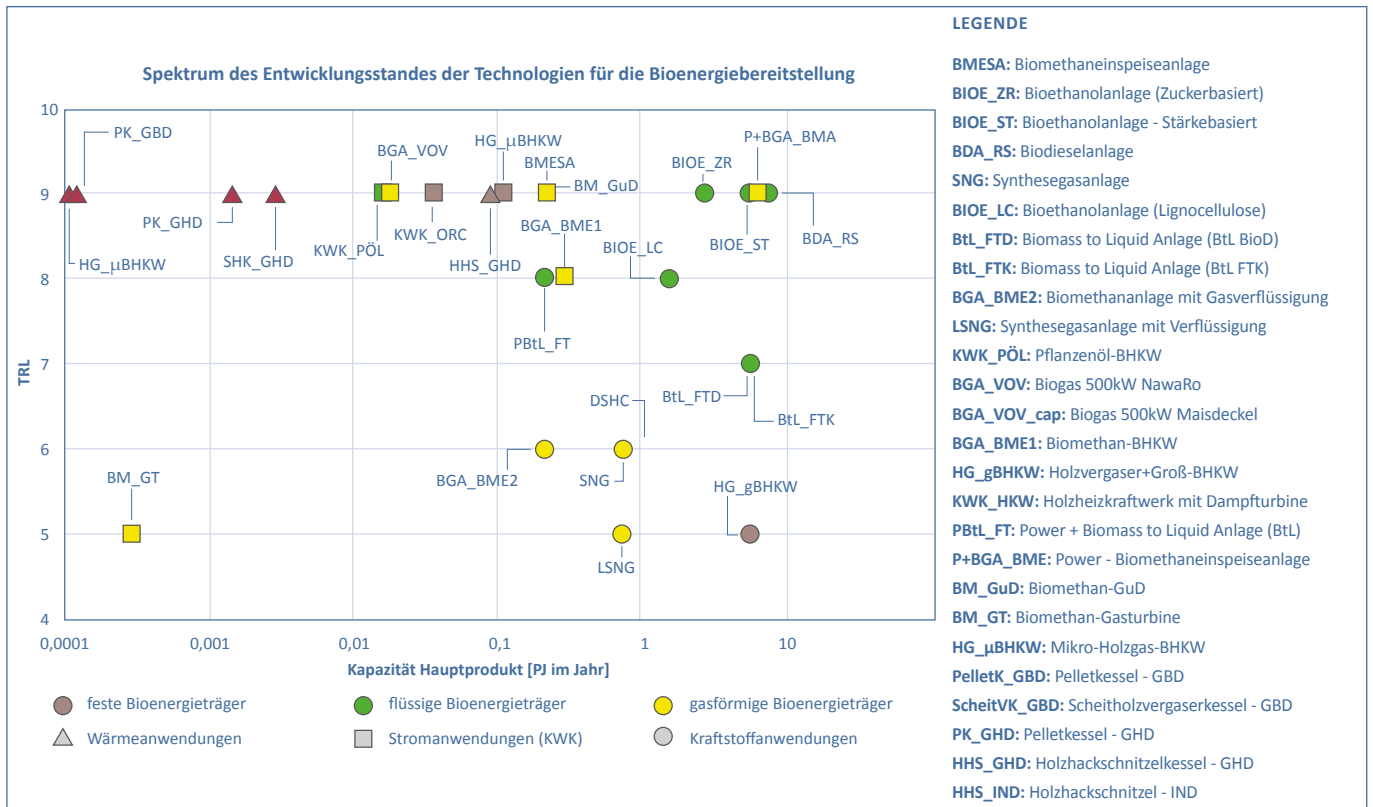


Abbildung 8: Spektrum des Entwicklungsstandes der Technologien für die Bioenergiebereitstellung, DBFZ 2018.

Aktuell werden gasförmige Bioenergieträger vor allem aus Energiepflanzen und vergärbaren Abfällen (über Biogas) und flüssige Bioenergieträger aus öl- und zucker- oder stärkehaltigen Energiepflanzen sowie aus Abfallfetten hergestellt. Als biogene Festbrennstoffe werden vornehmlich Wald- und Industrierestholz sowie Alt- und Landschaftspflegeholz in modernen Holzöfen und Kesseln (wie unter anderem Scheitholzvergaserkessel, Holzpelletkessel und -öfen und Holzhackschnitzelheizungen) sowie in Einzelraumfeuerungen (unter anderem Kaminöfen) verfeuert. Sie dienen der Bereitstellung von Wärme im häuslichen Bereich sowie in größeren Biomasse-Heizwerken und Kraftwerken auch der Strom- und Wärmeerzeugung. Insgesamt sind in Deutschland über elf Millionen Bioenergieanlagen in Betrieb (siehe Tabelle 3), mit entsprechender Einbindung in Strom-, Wärme- und Gasnetze.

111 Verschiedene Technology Readiness Level (TRL): Technologie im Demonstrationsmaßstab verifiziert (Flagship), Markteinführung möglich (TRL 8–9). Technologie befindet sich in der Prozessentwicklung. Proof of concept erbracht, Betrieb von Pilotanlagen (TRL 6–7). Forschung und Entwicklung zur Validierung. Betrieb von Versuchsanlagen (TRL 3–5). Idee und Prinzipien einer Technologie liegen vor (TRL 1–2).

Schwerpunkt der Forschung und Entwicklung ist die Gewinnung von gasförmigen und flüssigen Biokraftstoffen auf Basis von Holz und anderen lignozellulosehaltigen Rohstoffen, die – wie in Kapitel 2 beschrieben – das größte flächenunabhängige Biomassepotenzial darstellen. Lignozellulose bildet die Zellwände verholzter Pflanzen. Holz und Stroh bestehen größtenteils aus Lignozellulose. Heute übliche Verfahren zur Herstellung flüssiger Kraftstoffe sowie Biogasanlagen können Lignozellulose nicht oder nur mit sehr hohem zusätzlichem Aufwand verarbeiten. An Verfahren zur Gewinnung von flüssigen Biokraftstoffen aus Lignozellulose wird intensiv geforscht.¹¹²

Biomasse ist ein komplexer Rohstoff, aus dem sich verschiedene Materialien, Werkstoffe und Energieträger sowie viele Bausteine für Chemikalien gewinnen lassen. Sogenannte Bioraffinerien verbinden verschiedene Wertschöpfungsketten und sind in der Lage, ganz verschiedene Produkte parallel herzustellen (Koppelprodukte). Dadurch kann die eingesetzte Biomasse vollständig genutzt werden, um aus all ihren Bestandteilen hochwertige Produkte und Zwischenprodukte zu erzeugen. Bioenergieträger sowie Nahrungs- und Futtermittel können in Bioraffinerien als Koppelprodukte neben Chemikalien, Materialien und Werkstoffen erzeugt werden. Je nach Anlagenkonzept und Region können diese Raffinerien unterschiedlich groß sein, wobei sie zwischen zehntausend und mehreren hunderttausend Tonnen pro Jahr Biomasse verarbeiten können.

Um unterschiedliche Arten von Einsatzstoffen (zum Beispiel zucker- und stärkehaltige Rohstoffe, Ölsaaten, Lignozellulose oder Algen) möglichst effizient und nachhaltig zu verwerten, existieren verschiedene Bioraffineriekonzepte.¹¹³ In allen Bioraffinerien wird die Biomasse zunächst aufbereitet und anschließend in Einzelkomponenten aufgeteilt. Bei dieser sogenannten *Primärraffination* werden Zwischenprodukte wie Zucker, Pflanzenöle oder Synthesegas erzeugt, die in den nachfolgenden Konversions- und Veredelungsschritten (*Sekundärraffination*) weiterverarbeitet werden.

Sowohl etablierte als auch fortschrittliche Biokraftstoffe werden in der Regel gekoppelt mit anderen Produkten erzeugt. Für die Verarbeitung von Lignozellulose beispielsweise werden in sogenannten *Lignozellulose-Bioraffinerie* holz- und halmgutarartige Biomassen (etwa Stroh) über verschiedene Aufschlussverfahren in die Zwischenprodukte Zellulose, Hemizellulose und Lignin umgewandelt, die vorzugsweise über biotechnologische Verfahren (zum Beispiel Fermentation) weiterverarbeitet werden.

Hingegen wird die aufbereitete Lignozellulose in der sogenannten *Synthesegas-Bioraffinerie* thermo-chemisch in kohlen- und wasserstoffreiche Gase umgewandelt. Diese werden im nächsten Schritt entweder als Wasserstoff oder als sogenanntes Syngas in verschiedenen Produktsynthesen zu Kraftstoffen und/oder Grundstoffen umgewandelt.¹¹⁴

Lignozellulose-Bioraffinerien sind technisch weiter ausgereift als Synthesegas-Bioraffinerien. Ungeachtet dessen besteht insbesondere im Bereich der fortschrittlichen Biokraftstoffe und Bioraffinerien zum Teil umfangreicher Entwicklungs- und Demonstrationsbedarf. Fortschrittliche Anlagen wie Synthesegas-Bioraffinerien zeichnen sich

112 Eine Datenbank mit weltweiten Projekten zur Herstellung fortschrittlicher gasförmiger und flüssiger Biokraftstoffe wird im Rahmen der Taskforce 39 der Internationalen Energieagentur (IEA) von bioenergy 2020+ online veröffentlicht: <http://demoplants.bioenergy2020.eu/>.

113 Verschiedene Bioraffinerie-Konzepte sind in der Roadmap Bioraffinerien der Bundesregierung (Bundesregierung 2012) beschrieben.

114 Bundesregierung 2012; DBFZ 2016.

dadurch aus, dass sie eine erweiterte Rohstoffbasis wie Rest- und Abfallstoffe, Holz- und Halmgut sowie Algenbiomasse verarbeiten können und/oder auch Hybridkonzepte mit Bezug auf Sektorkopplung und eine höhere Diversifizierung der Produkte realisieren können.

Entwicklungs- und Demonstrationsbedarf besteht insbesondere hinsichtlich der Integration der verschiedenen Prozesse und der Senkung der Kosten.¹¹⁵ Wichtige Aspekte sind dabei:

- die Integration der verschiedenen Prozesse; das Zusammenspiel der Teilprozesse in der Gesamtanlage, insbesondere beim Einsatz von Rest- und Abfallstoffen;
- die Einbindung innovativer Anlagenkomponenten in Bezug auf Up-/Downstreaming-Prozesse;
- die Erhöhung der Anlagengröße und -verfügbarkeit (zum Beispiel Skalierung von Gesamtanlagen, Bereitstellung der benötigten Rohstoffmengen in definierter Qualität, hohe Volllaststundenzahlen bei gleichzeitiger Flexibilität in Bezug auf Rohstoffe und Produkte, Integration in entsprechende Infrastrukturen);
- an lokale Standorte angepasste Anlagendesigns und damit verbundene sinkende Investitionsaufwendungen;
- adäquate Rohstoff- und Produktkosten verbunden mit entsprechend verfügbaren und stabilen Märkten bei gleichzeitig hohen Treibhausgasminderungspotenzialen.

Die schrittweise Weiterentwicklung von Bioraffinerien bietet ein großes Potenzial, die begrenzte Biomasse zielgerichtet für diejenigen Bereiche einzusetzen, wo durch erneuerbaren Strom nur sehr kostspielige Lösungen vorhanden sind. Dafür sind entsprechende technische Weiterentwicklungen und Innovationen unerlässlich. Diese müssen im Kontext einer klimaneutralen Kreislaufwirtschaft den Anforderungen an sogenannte „Null-Emissions-Technologien“ gerecht werden. Damit verbundene Synergien und integrative Ansätze, die sich aus dem Zusammenspiel der einzelnen erneuerbaren Edukte und Produkte ergeben, werden bislang nur unzureichend betrachtet.

Eine Kombination aus Bioraffinerien und Power-to-X-Technologien kann zudem den Einstieg in die Sektorkopplung vorantreiben. So kann beispielsweise Wasserstoff aus Elektrolyseanlagen in eine Bioraffinerie eingekoppelt werden, um das Verhältnis von Wasserstoff und Kohlenstoff für die Herstellung von Kraftstoffen oder chemischen Grundstoffen zu optimieren. Der Stromsektor würde auf diese Weise nicht nur – wie unter dem Begriff Sektorkopplung derzeit viel diskutiert – mit dem Verkehrssektor, sondern auch mit der chemischen Industrie und insbesondere der stofflichen Nutzung von Biomasse verknüpft. Solche Hybridkonzepte zwischen Bioraffinerie und Power-to-X können eine höhere Diversifizierung der Produkte sicherstellen. Sie können beispielsweise fortschrittliche Biokraftstoffe unter anderem für den Flugverkehr erzeugen. Für effiziente und wettbewerbsfähige Hybridprozesse ist noch Forschung und Entwicklung erforderlich.

¹¹⁵ Mueller-Langer et al. 2017; Bundesregierung 2012.

Die Produktion von Biokraftstoffen aus Algen ist nach wie vor ein Thema in Forschung und Entwicklung und wird weiterhin auch durch die Wirtschaft vorangetrieben. Allerdings verschiebt sich der Schwerpunkt derzeit mehr zu Produkten aus Algen mit einer stofflichen statt einer energetischen Nutzung. Grund hierfür sind die aktuell noch zu niedrigen Produktionskapazitäten und damit relativ hohen Produktionskosten der Algenbiomasse, die für einen wirtschaftlichen Einsatz die Herstellung von höherpreisigen Produkten notwendig machen.¹¹⁶ Zudem ist der Energiebedarf für die Kultivierung und Verarbeitung in derzeit betriebenen Algenproduktionsanlagen so hoch, dass die Energiebilanz für einen energetischen Einsatz ungünstig erscheint.¹¹⁷

	Art der Anlage	Anlagenanzahl	Installierte Leistung/ Produktionskapazität
Biogene Festbrennstoffe			
KWK^{a)}	EEG-fähige Biomasse(Heiz-)Kraftwerke	300	1.369 MW _{el}
	EEG-fähige Kleinvergaseranlagen (≤ 180 kW)	400	45 MW _{el}
Wärme^{b)}	Biomasse-Heizwerke	1.000	2.000 bis 5.000 MW _{th} (Hochrechnung)
	Kleinf Feuerungsanlagen: Zentralfeuerstätten (Holzhackschnitzel, Scheitholz, Pellets) (2014)	1.153.300	36.372 MW _{th}
	Kleinf Feuerungsanlagen: Einzelraumfeuerungen Kaminöfen (2014)	5.370.000	38.982 MW _{th}
	Kleinf Feuerungsanlagen: andere Einzelraumfeuerungen (2014)	4.600.000	34.635 MW _{th}
Gasförmige Bioenergieträger			
KWK^{c)} (anteilig Kraftstoffe bei Biomethan)	Landwirtschaftliche Biogasproduktionsanlagen	7.640	4.379 MW _{el}
	Güllekleinanlagen (≤75kW)	560	40 MW _{el}
	Vergärungsanlagen für Bioabfälle, Speisereste und sonstige organische Abfälle	335	keine Angabe
	Biogasaufbereitungsanlagen zu Biomethan	196	553 MW _{el}
Flüssige Bioenergieträger			
KWK^{d)}	Pflanzenöl-BHKW (Palmöl, Rapsöl)	690	79 MW _{el}
Kraftstoffe^{e)}	Biodieselanlagen (Rapsöl ^{f)} , Palmöl, Altspesiefette/-öle)	30	4 Mio. t/a
	Bioethanolanlagen (Zucker, Stärke)	5	0,7 Mio. t/a

Tabelle 3: Installierte Bioenergieanlagen in Deutschland im Jahr 2016 (bei Wärme teilweise Daten aus 2014)

a) DBFZ 2015; eigene Auswertung der Stamm- und Bewegungsdaten der BNetzA (durchgeführt 2018 am DBFZ).

b) Lenz et al. 2018; Rönsch 2018. c) DBFZ 2017. d) DBFZ 2015. e) DBFZ 2016. f) Rapsöl als Reinkraftstoff ist in Deutschland aktuell nicht mehr von Relevanz.

¹¹⁶ Berechnung des DBFZ für die Wirtschaftlichkeit von Algenbiomasseproduktionsanlagen ergeben für Open Ponds Produktionskosten von rund 0,46 Euro pro Kilogramm Trockenmasse (Zahlen DBFZ 2011, unveröffentlicht). Berechnungen von Sun et al. 2011 gehen von 0,79 bis 0,96 46 US-Dollar pro Kilogramm Trockenmasse aus, Norsker et al. 2011 liegen bei ihren Berechnungen bei 1,28 bis 4,95 Euro pro Kilogramm Trockenmasse für die Produktion in offenen Teichanlagen (Open Ponds). Benemann 2013 geht gar von etwa 10 US-Dollar pro Kilogramm Trockenmasse für Algen der Gattung *Spirulina* und bis zu US-Dollar pro Kilogramm Trockenmasse für Algen der Gattung *Chlorella* aus. Bei Normalisierung dieser Kosten auf ein Bezugsjahr (hier 2015) liegt die auf Basis der genannten Untersuchungen ermittelte Bandbreite bei circa 480 bis 20.100 Euro pro Tonne Trockenmasse. Zum Vergleich: Das Erzeugerpreisniveau international gehandelter Rohstoffe wie beispielsweise Ölsaaten (Raps) liegt bei rund 329 Euro pro Tonne Trockenmasse, für Weizen bei etwa 169 Euro pro Tonne Trockenmasse (Thrän et al. 2015).

¹¹⁷ Es gibt derzeit verschiedene Prozessbestandteile in der Algenproduktion, die eine energetischen Optimierung erfordern (Rocca et al. 2015). Dazu gehören die Pumpenleistung, Ernte und Entwässerung sowie die Wahl des Nährmediums unter energetischen Gesichtspunkten (Slade/Bauen 2013).

3.2 Künftige Nutzungspfade im Energiesystem

Ob die aktuellen Nutzungspfade von Bioenergie beibehalten werden beziehungsweise welcher Nutzungspfad und welche Nutzungstechnologie künftig den Vorzug erhält, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Hier sind insbesondere (1) die Entwicklung von anderen Erneuerbaren und Speichertechnologien in den verschiedenen Anwendungsbereichen, (2) grundlegende Veränderungen in der Energienachfrage (zum Beispiel Verkehrswende) und in der Akzeptanz, (3) die Weiterentwicklung der Bioenergie-technologien und (4) Fortschritte in der internationalen Klimapolitik (zum Beispiel CO₂-Reduktion im Flugverkehr) und Priorität der unterschiedlichen Energiepolitikziele¹¹⁸ zu nennen. Bioenergiestrategien, die auf diesen Politiken aufbauen, sind daher zwangsläufig mit Unsicherheiten behaftet. Eine Weiterentwicklung der energetischen Biomassenutzung hin zu mehr Systemintegration ist inzwischen Konsens¹¹⁹, was sowohl Investitionen als auch Anpassungen der Akteursstrukturen erfordert.¹²⁰ Werden mittel- bis langfristig nachwachsende Rohstoffe aus dem Agrarsektor verstärkt stofflich genutzt, muss der Anlagenpark zur Verarbeitung von Biomasse daran angepasst werden. Werden Energiepflanzen bislang hauptsächlich in Biogasanlagen genutzt, erfordert die – im Idealfall als Kaskade praktizierte – stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe eher thermochemische Prozesse. Insbesondere der Entsorgungssektor muss daher in verstärktem Maße als Bestandteil des Energiesystems gedacht werden.

Als langfristig notwendige Einsatzbereiche für Bioenergie in Deutschland werden aktuell diskutiert:

- **Industrielle Hochtemperaturprozesse:** In gewissen industriellen Prozessen werden sehr hohe Temperaturen benötigt. Diese können mit elektrisch erzeugten Lichtbögen oder Plasmen erneuerbar bereitgestellt werden. Es gibt jedoch auch Anwendungen, wie zum Beispiel das Brennen von Emaille, bei denen der Einsatz dieser Verfahren nicht möglich ist. Hier bleibt nur ein Ersatz der bisher fossil bereitgestellten Brennstoffe durch vergleichbare Brennstoffe auf Biomassebasis (im Falle der Emaille durch Biomethan). Daneben gibt es aber auch Hochtemperaturprozesse wie die Stahlherstellung, bei der Kohle nicht nur für die Temperaturbereitstellung, sondern vor allem als Reduktionsmittel benötigt wird, um die gewünschte Stahlqualität zu erhalten. Für eine vollständige Defossilisierung der Energiewirtschaft wäre auch an dieser Stelle ein Umstieg auf entsprechende biomassebasierte Produkte notwendig.
- **Verkehr:** Das im Klimaschutzplan der Bundesregierung verankerte Leitbild für treibhausgasneutrale Mobilität umfasst zahlreiche Maßnahmen zur Umsetzung des damit einhergehenden Innovationsprozesses. Wesentlicher Treiber der Energiewende im Verkehr ist die Umstellung der Energieversorgung auf Biokraftstoffe, auf Strom aus erneuerbaren Energien sowie weitere treibhausgasneutrale Kraftstoffe. Die Luft- und Schifffahrt sowie in weiten Teilen der Straßenschwerlastgüterverkehr werden auch mittel- bis langfristig auf Kraftstoffe angewiesen sein. Während im Flugverkehr flüssige Kraftstoffe unabdingbar sind, kommt im Schiffs- und Straßengüterverkehr darüber hinaus gasförmigen Kraftstoffen (insbesondere auf Basis von

118 Unter anderem Kosteneffizienz, Klimagasvermeidungseffizienz, Versorgungssicherheit, Vermeidung von umstrittenen Projekten beispielsweise im Netzausbau etc.

119 Gawel/Purkus 2013; Zipp 2016; Holzhammer 2014; Lauer et al. 2017; Hahn et al. 2014.

120 Lauer/Thrän 2017; Hirth et al. 2015; Brouwer et al. 2016; Ueckerdt et al. 2013.

erneuerbarem Methan in Form von komprimiertem Gas (Compressed Natural Gas, CNG) oder verflüssigtem Gas (Liquefied Natural Gas, LNG) eine besondere Rolle zu.¹²¹ Beispielhafte Szenarien für die Entwicklung der Energienachfrage im Verkehr in Deutschland bis zum Jahr 2050 wurden unter anderem im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (kurz MKS) entwickelt.¹²² Dabei gilt es sowohl angebots- als auch bedarfsseitig, zahlreiche Randbedingungen zu beachten. Dazu zählen etwa der Zeitbedarf für den Aufbau der erforderlichen Produktionskapazitäten entsprechender Anlagen sowie Tank- und Ladeinfrastruktur und den nur schrittweisen Austausch der Verkehrsträger innerhalb des Bestandes.

3.3 Regelwerk in Deutschland und Europa

Das im Jahr 2010 verabschiedete Energiekonzept der deutschen Bundesregierung definiert die langfristige Strategie für die Entwicklung und Umsetzung der zukünftigen Energieversorgung bis 2050.¹²³ Im Rahmen des Konzepts wurden für die Kernbereiche Klimaschutz, Energieeffizienz sowie erneuerbare Energien Ziele sowie Maßnahmen zu deren Erreichung definiert (siehe Box). Für den weiteren Ausbau der Bioenergie bedeutet dies insbesondere die Umsetzung einer nachhaltigen und effizienten Nutzung in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. Rohstoffseitig liegt der Fokus auf dem verstärkten Einsatz von Biomassefraktionen wie Abfall- und Reststoffen, Landschaftspflegematerial und Holz aus Kurzumtriebsplantagen.

Energiekonzept der Bundesregierung: Ziele für 2050

- 60 Prozent des Endenergieverbrauchs aus regenerativen Quellen
- 80 Prozent erneuerbare Energien im Stromsektor
- 40 Prozent Reduktion des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor (gegenüber 2005)
- 50 Prozent Reduktion des Primärenergieverbrauchs (gegenüber 2008)
- 80 bis 95 Prozent Reduktion der THG-Emissionen gegenüber 1990

Bisher wird die energetische Biomassenutzung in Deutschland durch energiewirtschaftliche Anreizsysteme und Regulierungen in den verschiedenen Sektoren unterschiedlich geregelt. Dazu zählen insbesondere

- im **Strombereich** das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), die Biomasseverordnung und das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG),
- im **Wärmebereich** das Marktanzreizprogramm „Wärme aus erneuerbaren Energien“ (kurz MAP) und das Gesetz zur Förderung erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz – EEWärmeG) sowie
- im Bereich der **Kraftstoffherzeugung** das Biokraftstoffquoten-Gesetz.

¹²¹ Wurster et al. 2014; Zech et al. 2015.

¹²² Kreyenberg et al. 2015.

¹²³ Bundesregierung 2010.

Ein holistischer Ansatz, wie man die energetische Biomassenutzung insgesamt über alle Sektoren regelt, fehlt bislang. Zudem finden auch parallele Förderungen innerhalb der Sektoren statt (zum Beispiel durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz und das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz im Strombereich), die eine zielgerichtete Nutzung der Biomasse erschweren können.

Erste Bemühungen einer Regulierung des nachhaltigen Einsatzes biogener Energieträger wurden 2009 mit der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED) auf EU-Ebene unternommen. Hier wurden erstmals Nachhaltigkeitsanforderungen für die Nutzung flüssiger Bioenergieträger im Strom- und Kraftstoffbereich gesetzt. Damit reagierte man ganz konkret auf die Auswirkungen des Anbaus von Palmölpflanzen im nichteuropäischen Ausland für eine energetische Nutzung in der EU. Die Umsetzung der RED in nationales Recht erfolgte über die Einführung der Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung sowie der Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung im Jahr 2009.

Bereits 2010 wurden in einem Bericht der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament Voraussetzungen und Empfehlungen für eine Ausweitung der Nachhaltigkeitsanforderungen dargelegt.¹²⁴ Diese Ausweitung auf feste und gasförmige Bioenergieträger und damit auf alle energetischen Anwendungen ist ebenso Bestandteil des Energiekonzepts 2010. Mit der im Dezember 2018 verabschiedeten Neufassung der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED II) der EU werden verbindliche Nachhaltigkeitsanforderungen auch an feste und gasförmige Bioenergieträger gestellt.¹²⁵ Des Weiteren enthält die Richtlinie zaghafte Anreize für eine Nutzung von abfall- und reststoffbasierten Kraftstoffen. So soll der Anteil der fortschrittlichen Biokraftstoffe (basierend auf Rest- und Abfallstoffen) im Verkehrssektor bis 2030 mindestens 3,5 Prozent betragen.¹²⁶ Gleichzeitig wird der Einsatz von konventionellen Kraftstoffen aus Nahrungs- und Futtermittelpflanzen auf maximal 7 Prozent des Endenergieverbrauchs im Bereich Straßen und Schienenverkehr begrenzt.¹²⁷ Darüber hinaus wird eine stufenweise Senkung des Beitrags von Biokraftstoffen mit einem hohen ILUC-Risiko angestrebt. Das vom Europäischen Parlament angestrebte Verbot von Palmöl für die Erzeugung von Kraftstoffen¹²⁸ setzte sich nicht durch. Mit diesen Vorgaben wird insbesondere der Einsatz von Biodiesel und Bioethanol und damit von konventionellen Kraftstoffen (Biokraftstoffen der ersten Generation) begrenzt. Zukünftig könnten sich die Anforderungen an die Bioenergienutzung daher deutlich wandeln. Es wird erwartet, dass die neue Richtlinie Anfang 2019 in Kraft tritt.

Die Nachhaltigkeitskriterien werden aktuell nur für den Teil der Biomasse, der in die energetische Nutzung geht (insbesondere bei der Herstellung von Kraftstoffen), diskutiert und implementiert. Für die stoffliche Nutzung sind entsprechende Nachhaltigkeitskriterien bisher nicht definiert.

124 Europäische Kommission 2010.

125 EU 2018-1.

126 Art. 25.

127 Art. 26 (1).

128 EU 2018-2.

3.4 Treibhausgasemissionen aus Bioenergiebereitstellung, -umwandlung und -nutzung

Um den Klimaschutzbeitrag von Bioenergie einzuschätzen, ist es wichtig, die Treibhausgasbilanz über den gesamten Lebenszyklus möglichst vollständig zu erfassen. THG-Emissionen aus der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung (zum Beispiel Lachgasemissionen aus Düngemittel, Emissionen aus der Nutzung von Energieträgern für Bewirtschaftung, Ernte etc.), etwaige Emissionen aus Veränderungen des Bodenkohlenstoffbestandes sowie Emissionen aus der Erzeugung und Nutzung der Energie aus Biomasse können auf Basis messbarer Werte relativ gut quantifiziert werden. Emissionen aus etwaigen indirekten Landnutzungsänderungen (ILUC) können jedoch nur modellbasiert bestimmt werden. Für diese werden etwa seit dem Jahr 2010 unter Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern verschiedene Ansätze zur Bestimmung der Treibhausgasbilanz kontrovers diskutiert.¹²⁹

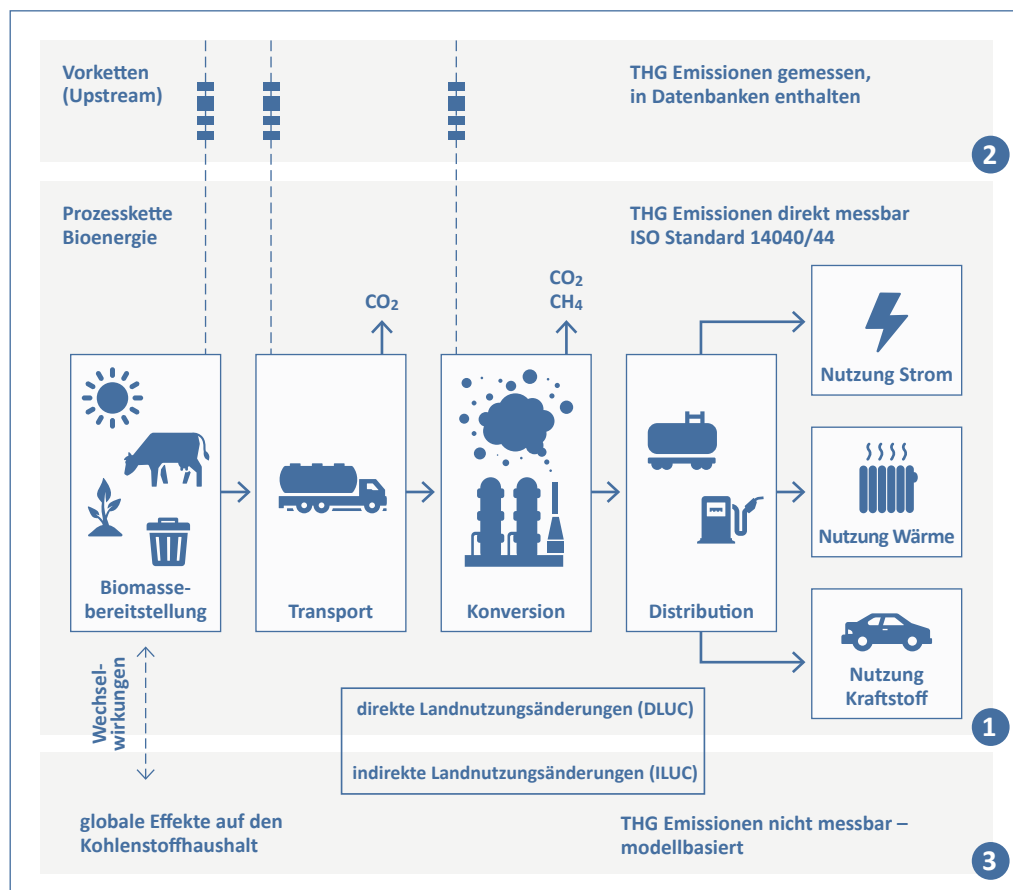


Abbildung 9: Direkte und indirekte THG-Emissionen von Bioenergie

Abbildung 9 veranschaulicht die durch Bioenergie direkt sowie indirekt verursachten THG-Emissionen und ihre Messbarkeit. Der Grad der Unsicherheit in der Bestimmung der Höhe der THG-Emissionen wird über die Rangfolge der Zahlen 1 bis 3 dargestellt – je höher die Zahl, desto mehr Unsicherheiten bestehen.

129 Finkbeiner 2014; Wicke et al. 2014.

Prozessemissionen

Bei der Nutzung landwirtschaftlicher Ressourcen zur Energiebereitstellung hat insbesondere die Produktion und Verwendung von Stickstoffdüngemitteln während der Biomasseproduktion einen großen Einfluss auf die Treibhausgasbilanz. Die Nutzung von Stickstoffdüngern führt teilweise zu Lachgasemissionen (N_2O). Das Treibhausgas Lachgas hat ein CO_2 -Äquivalent von 265, das heißt, die Treibhauswirkung von einem Kilogramm Lachgas entspricht derjenigen von 265 Kilogramm CO_2 . Wird für die Produktion von Bioenergie Anbaubiomasse eingesetzt, tragen die aus dem Boden resultierenden Lachgasemissionen auch zu den insgesamt bedeutsamen Emissionen des landwirtschaftlichen Sektors in Deutschland bei. Insgesamt stammen etwa sieben Prozent der THG-Emissionen in Deutschland aus der Landwirtschaft.¹³⁰ Hierzu muss angemerkt werden, dass dies eine Konsequenz der konventionellen Landwirtschaft insgesamt ist und nicht auf die Bioenergienutzung zurückzuführen ist. Lachgasemissionen variieren sehr stark je nach Pflanzenart, Standortbedingungen und Düngeregime.¹³¹ Für die Berechnung von THG-Bilanzen ist daher die Bestimmung regionalspezifischer Werte von Bedeutung. Haupttreiber der Emissionen des landwirtschaftlichen Sektors stellt die Viehhaltung dar.

Viele gängige Ökobilanzierungsmodelle bilden die Lachgasentstehung jedoch nur sehr vereinfacht ab, indem sie Pauschalwerte für den Anteil des Stickstoffdüngers, der zu Lachgas wird, annehmen. Dadurch steigen die Lachgasemissionen in diesen Modellen immer linear mit steigenden Düngermengen. Neueste Untersuchungen deuten darauf hin, dass die Lachgasemissionen für Raps mit den vom IPCC empfohlenen Pauschalwerten¹³² überschätzt werden.¹³³ Eine genauere Erfassung der Lachgasemissionen wäre wünschenswert. Um spezifische Werte für verschiedene Anbaukulturen und Boden-Klima-Räume zu ermitteln, wären zunächst Messprogramme erforderlich.

Bei der Konversion der Biomasse zu Energie sind vor allem die Bereitstellung der Prozessenergie sowie die Nutzung weiterer Hilfs- und Betriebsstoffe von Bedeutung. Zusätzlich können bei bestimmten Prozessen weitere direkte Emissionen (zum Beispiel Methanverluste bei der Biogasproduktion, Verbrennungsemissionen etc.) auftreten.

Landnutzungsänderungen

Die Menge an Kohlenstoff, die in Vegetation und Boden gespeichert ist, ist von der Art der Vegetation sowie von der Art der Landnutzung abhängig. In der Regel ist die Kohlenstoffspeicherung in von Menschen genutztem Land niedriger als bei natürlicher, vom Menschen unbeeinflusster Vegetation.¹³⁴ Die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf die globale Klimabilanz sind immens: So wurden im Jahr 2010 etwa acht Prozent der globalen THG-Emissionen durch Entwaldung verursacht.¹³⁵ Globale Treiber für Landnutzungsänderungen sind vielfältig. Sie haben einen großen Effekt auf die Treibhausgasbilanz von Bioenergie und dürfen in einer nachhaltigen Bioenergiestrategie keinesfalls vernachlässigt werden.

130 65,2 Millionen Tonnen CO_2 -Äquivalente im Jahr 2016 (UBA 2018-2).

131 Creutzig et al. 2015, S. 925.

132 IPCC Tier 1 Methode (IPCC 2006).

133 Ruser et al. 2017.

134 Erb et al. 2018.

135 Tubiello et al. 2015.

Eine Landnutzungsänderung kann aber auch zu einer zusätzlichen Speicherung von Kohlenstoff im Boden führen, etwa wenn Moore restauriert oder zum Beispiel degradierte Flächen wieder genutzt werden.

Man unterscheidet zwischen direkten und indirekten Landnutzungsänderungen (vgl. Abbildung 10). Wird ein Wald gerodet und werden auf der gleichen Fläche Bioenergiepflanzen angebaut, handelt es sich um eine **direkte Landnutzungsänderung**. Die Treibhausgasemissionen durch solche direkten Landnutzungsänderungen sind messbar und werden bei der Zertifizierung von Biokraftstoffen bereits berücksichtigt (Renewable Energy Directive 2009/28/EC). Als **indirekte Landnutzungsänderungen** bezeichnet man marktbasierende Rückkopplungseffekte, die dazu führen, dass der Anbau von Bioenergie auf einer Fläche eine Landnutzungsänderung auf einer anderen Fläche verursacht. Wird beispielsweise eine bestehende Agrarfläche für den Bioenergiepflanzenanbau genutzt, auf der zuvor Pflanzen für die Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln kultiviert wurden, kann dies dazu führen, dass an anderer Stelle Flächen für deren Produktion erschlossen werden. Möglicherweise wird dafür Wald gerodet – und dadurch CO₂ emittiert. Hauptursache für diese Effekte ist die unterschiedliche Implementierung von Nachhaltigkeitskriterien in der aktuellen Gesetzgebung. Während Biomasse für Biokraftstoffe konkrete Nachhaltigkeitskriterien (auch zum Kriterium der Landnutzungsänderungen) erfüllen muss, sind andere Bereiche der Biomassenutzung nicht reguliert, zum Beispiel die Nahrungs- und Futtermittelproduktion. Dies führt zu entsprechenden Verschiebungseffekten bei einer Nachfrageerhöhung.

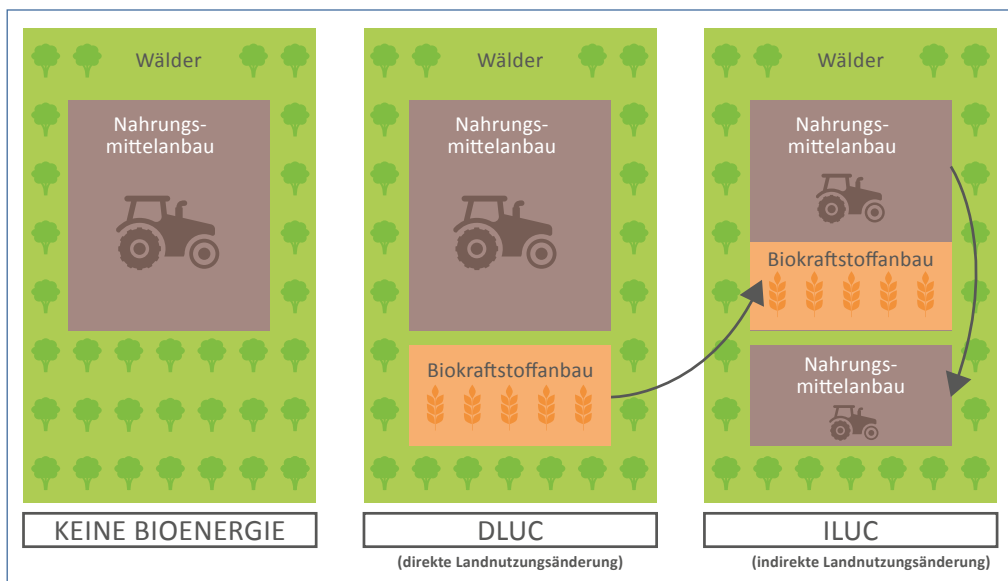


Abbildung 10, Schematische Darstellung von direkten und indirekten Landnutzungsänderungen, nach UFOP 2012.

Indirekte Landnutzungsänderungen können vermieden oder reduziert werden, wenn mit dem Bioenergieanbau eine Steigerung der Erträge einhergeht, weil etwa die Erlöse der Bioenergieproduktion effizientere landwirtschaftliche Praktiken ermöglichen. Im Idealfall können die Energiepflanzen auf der gegebenen Fläche zusätzlich angebaut werden, ohne die bisherige Produktion an Nahrungs- und Futtermitteln zu verdrängen.¹³⁶

¹³⁶ Die Auswirkungen der intensiveren Landwirtschaft, insbesondere Düngemittel, auf Treibhausgasbilanz und Umwelt müssen allerdings ebenfalls berücksichtigt werden.

Eine andere Option zur Vermeidung indirekter Landnutzungsänderungen ist der Anbau der Bioenergiepflanzen auf degradiertem Land.¹³⁷

Treibhausgasemissionen durch indirekte Landnutzungsänderungen sind nicht messbar und schwierig zu ermitteln. Denn die Landnutzungsänderungen können irgendwo auf der Welt auftreten, und auch ohne Bioenergie befindet sich die Landnutzung durch zahlreiche gesellschaftliche, politische und ökonomische Faktoren ständig im Wandel. Inwieweit Änderungen dem Bioenergieeinsatz zuzuschreiben sind, kann daher in der Regel nicht bestimmt werden.¹³⁸ Die Treibhausgasemissionen durch indirekte Landnutzungsänderungen können somit nur modellbasiert abgeschätzt werden, wobei ihre Höhe abhängig ist von den zugrunde liegenden Annahmen sowie Berechnungsmethoden. Im Vergleich zur Bestimmung der sonstigen THG-Emissionen entlang der Bioenergieprozesskette sind diese Werte mit großen Unsicherheiten behaftet.

Kohlenstoffschuld – die Carbon-Debt-Debatte

Wird durch die Gewinnung von Bioenergie in Boden und Pflanzen gespeicherter Kohlenstoff abgebaut, führt dies zunächst zu zusätzlichen CO₂-Emissionen. Man bezeichnet dies als „Kohlenstoffschuld“ (Carbon Debt). Anschließend können jedoch Emissionen vermieden werden, wenn Bioenergie anstelle von fossilen Energieträgern eingesetzt wird. Erst wenn diese Einsparungen die anfänglichen Emissionen vollständig kompensiert haben, werden durch die Bioenergieverwendung netto CO₂-Emissionen vermieden. Die Dauer, bis die Kohlenstoffschuld beglichen ist und die Bioenergie einen wirklichen Beitrag zum Klimaschutz leistet, bezeichnet man als „CO₂-Amortisationszeit (Carbon Payback Time)“.¹³⁹

Die Quantifizierung der Kohlenstoffschuld und der CO₂-Amortisationszeit ist wissenschaftlich sehr umstritten. So ist nach Einschätzung einiger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die CO₂-Amortisationszeit für die Nutzung von Bioenergie aus Waldbiomasse fast vernachlässigbar, während andere in den nächsten 10.000 Jahren keinen Beitrag zum Klimaschutz erwarten. Die großen Unterschiede sind überwiegend in der Berechnungsmethodik sowie in den grundsätzlichen Annahmen zur Waldbewirtschaftung und deren Effekt auf den Kohlenstoffbestand begründet.¹⁴⁰

Die CO₂-Amortisationszeit ist insbesondere auch im Hinblick auf mittelfristige Klimaschutzziele von Bedeutung. So kann es – unterstellt man eine hohe CO₂-Amortisationszeit – vorkommen, dass Bioenergie zwar über einen sehr langen Zeithorizont betrachtet zu einer Emissionsminderung führt, im Zeitraum bis 2050 aber zusätzliche Emissionen verursacht.

Auch die Nutzungsgeschichte eines Waldes spielt eine Rolle. So ist die CO₂-Aufnahmefähigkeit eines Waldes von seinem Alter abhängig. Natürliche, nicht bewirtschaftete Wälder erreichen nach einigen Jahrzehnten oder Jahrhunderten einen Gleichgewichtszustand, in dem zwar große Mengen an Kohlenstoff im Wald gespeichert sind, sie aber netto kein weiteres CO₂ aufnehmen. Zuwachs wird in diesem Fall ausgeglichen durch die

137 Beispielsweise konnte auf degradiertem, verlassenem Agrarland in Minnesota und Australien durch den Anbau von Bioenergiepflanzen zusätzlich Bodenkohlenstoff angereichert und die Bodenqualität wieder verbessert werden (Haberl 2013).

138 El Takriti et al. 2016; Finkbeiner 2014.

139 Das Konzept ist vergleichbar mit der energetischen Amortisationszeit, die die Zeit bemisst, bis beispielsweise eine Windkraftanlage so viel Strom erzeugt hat, wie zu ihrer Herstellung benötigt wurde.

140 Bentsen 2017.

Verrottung von absterbenden Pflanzenteilen. In vielen OECD-Ländern sind jedoch die Wälder durch intensive Forstwirtschaft und frühere Übernutzung weit von diesem Gleichgewichtszustand entfernt, sodass sie große Mengen an zusätzlichem CO₂ aufnehmen können.¹⁴¹

Überblick zu Treibhausgasen bei der Bioenergieproduktion, -umwandlung und -nutzung

Tabelle 4 gibt einen Überblick über die möglichen Quellen und Senken von Treibhausgasen bei der Bioenergieproduktion, -umwandlung und -nutzung. Neben den Treibhausgasemissionen sollten auch biogeophysische Einflüsse der Vegetation auf das Klima berücksichtigt werden, etwa eine Änderung der Albedo¹⁴² oder der Evapotranspiration (Verdunstung aus Pflanzen, Böden und Gewässern).¹⁴³

Prozessschritt		Erklärung/Kommentare
Prozessemissionen		
Biomasseproduktion	Düngemittel, Pflanzenschutzmittel	Lachgasemissionen sind die größte Quelle direkter Treibhausgasemissionen agrarischer Biomasse. ^{a)} Außerdem ist die Herstellung von Mineraldünger energieintensiv und verursacht mit den heutigen Herstellungsverfahren relativ gesehen hohe Treibhausgasemissionen.
	Energieträger in der Landbewirtschaftung	THG-Emissionen hängen vom eingesetzten Energiemix ab. Relevant sind vor allem Kraftstoffe für Landmaschinen und Fahrzeuge.
	Emissionsminderung Landwirtschaft	Bestimmte Bioenergiesysteme (zum Beispiel die Biogaserzeugung) können durch die Nutzung von landwirtschaftlichen Abfällen zur Emissionsminderung in der Landwirtschaft beitragen.
Biomassebereitstellung	Transport von Rohstoffen und Produkten	Art des Transportmittels und Höhe des Energieverbrauchs
Konversion – Aufbereitung in Endenergieträger	Prozessenergie	Energieaufwand und -art für die Aufbereitung (zum Beispiel Umwandlung in Kraftstoff)
	Methanemissionen	Methanemissionen aus nicht (vollständig) gasdicht abgedeckten Gärrestlagern
	Gärrest als Nebenprodukt	Einsatz des Gärrestes als nährstoffreiches Düngemittel und Rückführung auf die landwirtschaftlichen Flächen, wodurch industrieller Dünger ersetzt und die mit der Herstellung verbundenen THG-Emissionen vermieden werden können
Energetische Nutzung	Effizienz des Umwandlungsprozesses	Bei unvollständigen oder ineffizienten Verbrennungsprozessen können neben CO ₂ zusätzliche Emissionen entstehen.
Direkte Landnutzungsänderung		Änderung in der Menge an Kohlenstoff, die in Vegetation und Boden gespeichert ist. Eine direkte Landnutzungsänderung ist dabei zum Beispiel der Anbau von Biomasse auf einer ehemaligen Waldfläche (CO ₂ -Quelle) oder der Anbau auf degradierten Flächen (CO ₂ -Senke).
Erweitertes System		
Indirekte Landnutzungsänderung		Wird eine bestehende Agrarfläche für den Bioenergiepflanzenanbau genutzt, die zuvor verwendet wurde, um Pflanzen für die Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln zu kultivieren, kann dies dazu führen, dass an anderer Stelle für deren Produktion Flächen erschlossen werden. Solche marktbasieren Rückkopplungseffekte sind jedoch nicht direkt messbar, sondern können nur modellbasiert abgeschätzt werden.
Verdrängung fossiler Energieträger		Abhängig vom Referenzsystem

Tabelle 4: Quellen und Senken von Treibhausgasen bei der Bioenergieproduktion, -umwandlung und -nutzung

a) Creutzig et al. 2015.

¹⁴¹ Creutzig et al. 2015, S. 928.

¹⁴² Die Albedo ist das Verhältnis von rückgestrahltem zu einfallendem Licht. Sie ist von der Oberflächenbeschaffenheit und -farbe abhängig.

¹⁴³ Creutzig et al. 2015, S. 925.

Fazit

Zusammenfassend bietet Bioenergie ein hohes Potenzial zur Einsparung von THG-Emissionen, wenn

- Abfälle und Reststoffe eingesetzt werden, die sonst schnell kompostieren oder ohne Energiegewinnung verbrannt würden;
- degradiertes Agrarland für den Anbau von Bioenergiepflanzen eingesetzt wird, insbesondere, wenn dadurch Kohlenstoff im Boden angereichert wird (zum Beispiel durch mehrjährige Gräser oder Gehölze);
- die Erträge durch die Bioenergieproduktion so gesteigert werden können, dass die energetisch genutzte Biomasse zusätzlich zur bisherigen Nutzung auf der gleichen Fläche erzeugt wird. Im Einzelfall ist allerdings zu prüfen, ob die Ertragssteigerung wirklich durch die Bioenergieproduktion erreicht wird oder ohnehin durch allgemeinen Fortschritt in der landwirtschaftlichen Praxis stattgefunden hätte;
- Land und Vegetation so bewirtschaftet werden, dass sie mehr CO₂ aufnehmen, als sie ohne die Bioenergienutzung aufnehmen würden (unter Berücksichtigung indirekter Landnutzungseffekte);¹⁴⁴
- ein optimales Verhältnis zwischen dem Einsatz von Stickstoffdünger und Biomasseertrag besteht und Lachgasemissionen durch Stickstoffverluste möglichst gering gehalten werden.

3.5 Herausforderungen und energiepolitischer Handlungsbedarf

Da Bioenergie mit dem Ziel genutzt wird, fossile Energieträger zu ersetzen und damit THG-Emissionen zu vermeiden, ist die Höhe der THG-Emissionen durch die Bioenergienutzung und damit verbunden das Ausmaß der Einsparung ein zentrales Bewertungskriterium. Wie die obigen Ausführungen zeigen, sind THG-Emissionen aus den einzelnen Prozessschritten mess- und bestimmbar. Die Höhe der THG-Emissionen und -Einsparungen hängt stark vom Einzelfall und von der konkreten energetischen Biomasseanwendung ab. Betrachtet man zusätzlich globale Effekte (wie ILUC und Effekte auf den Kohlenstoffhaushalt), kann der mögliche Einfluss nur modellbasiert abgeschätzt werden. Momentan gibt es keinen wissenschaftlichen Konsens über die Kohlenstoffschuld der Bioenergie. Eine Herausforderung ist zudem, Methoden zur Ermittlung der THG-Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen zu etablieren, die gleichzeitig hinreichend genau sind, ohne enorme Transaktionskosten zu verursachen.

Die großen Unsicherheiten im Hinblick auf die Treibhausgasbilanz von Bioenergie aus Waldbiomasse und aus landwirtschaftlicher Biomasse legen vielleicht nahe, lediglich Rest- und Abfallstoffe energetisch zu nutzen und auf den Anbau von Biomasse für die energetische Nutzung komplett zu verzichten. Dies birgt allerdings das Risiko, dass die Energiewende technisch erschwert und verteuert wird und die Klimaschutzziele durch den anhaltenden Einsatz von fossilen Energieträgern verfehlt werden. Es bedarf daher einer ganzheitlichen und ressortübergreifenden Strategie, welche Landnutzungsaspekte (stoffliche Nutzung, Ökolandbau etc.) mit energiewirtschaftlichen und energietechnischen Entwicklungen in einer planbaren Zeitschiene in Einklang bringt. Diese Aspekte der energetischen Biomassenutzung sollten für die Gestaltung einer klugen Bioenergie- und Klimaschutzpolitik weiter erörtert und diskutiert werden.

144 Haberl et al. 2012.

4 Nutzung von Biomasse zur CO₂-Entnahme

Aus dem Klimaschutzabkommen von Paris entsteht die Verpflichtung, die Netto-Treibhausgasemissionen im Laufe der zweiten Hälfte des Jahrhunderts auf null zu reduzieren. Zudem ist die Menge an Treibhausgasen, die weltweit noch ausgestoßen werden können, um die Erderwärmung unter 1,5 °C oder 2 °C zu halten (das sogenannte Budget), sehr begrenzt. Die Budgets hängen davon ab, wie das komplexe Klimasystem auf die Treibhausgase reagiert. Dabei gibt es Unsicherheiten. Die Menge an CO₂, die noch ausgestoßen werden kann, kann daher nicht als eine exakte Zahl angegeben werden, sondern nur als Bandbreite. Neuere Schätzungen gehen teilweise davon aus, dass die zur Verfügung stehenden CO₂-Budgets eher am oberen Ende der im fünften Sachstandsbericht des Weltklimarats (IPCC) angenommenen Bandbreite liegen.¹⁴⁵

Klimaschutzszenarien globaler integrierter Assessmentmodelle¹⁴⁶ (IAM) zeigen, dass es ohne Technologien, die der Atmosphäre wieder CO₂ entziehen, extrem schwierig wird, das Zwei-Grad-Ziel einzuhalten; für das 1,5-Grad-Ziel gilt das in noch viel stärkerem Ausmaß. Der Grund dafür ist zum einen, dass unvermeidbare Emissionen kompensiert werden müssen – dies sind insbesondere Lachgas (N₂O) und Methan aus der Landwirtschaft sowie teilweise prozessbedingte Emissionen aus der Industrie.

Zum anderen wird das für die Menschheit noch verbleibende Gesamtbudget an CO₂ in der ersten Hälfte des Jahrhunderts überschritten, wenn es nicht gelingt, die THG-Emissionen im Energie- und Verkehrssektor schnell genug zu reduzieren. Diese überschüssigen Emissionen müssen dann zusätzlich wieder aus der Atmosphäre entfernt werden. Abbildung 11 zeigt am Beispiel eines Szenarios für das Zwei-Grad-Ziel, wie durch das Zusammenspiel von CO₂-Vermeidung und CO₂-Entnahme das gesamte weltweite CO₂-Budget eingehalten werden kann.

In der Wissenschaft wird die Entnahme von CO₂ als „negative Emissionen“ bezeichnet. „Negativ“ ist hierbei im Sinne einer negativen Zahl, also „unter null“, zu verstehen – durch negative Emissionen wird der CO₂-Gehalt der Atmosphäre kleiner. Die Brutto-Emissionen sind die Emissionen, die ausgestoßen werden. Teilweise werden sie durch die negativen Emissionen kompensiert. Zu einer weiteren Anreicherung von Treibhausgasen in der Atmosphäre führen dann nur die restlichen, nicht kompensierten Netto-Emissionen.

Nach heutigem Kenntnisstand scheinen CO₂-Entnahmetechnologien zum Erreichen der Klimaschutzziele unverzichtbar. So gelingt es in keinem einzigen bisher gerechneten Szenario, ohne CO₂-Entnahmetechnologien die Erderwärmung bis 2100

¹⁴⁵ Schleussner et al. 2018.

¹⁴⁶ IAM sind Computersimulationen, die die Zusammenhänge zwischen dem Energiesystem, der ökonomischen Entwicklung, dem Ausstoß von Treibhausgasen, deren Konzentration in der Atmosphäre sowie den resultierenden Temperaturänderungen abbilden. Sie enthalten als Teilmodelle mindestens ein Klimamodell und ein ökonomisches Modell (zum Beispiel ein allgemeines Gleichgewichtsmodell). Viele IAM sind Optimierungsmodelle, die unter vorgegebenen Randbedingungen den kostenoptimalen Entwicklungspfad suchen, um ein gegebenes Klimaschutzziel zu erreichen. Sie betrachten Zeiträume von mehreren Dekaden, oft bis 2100.

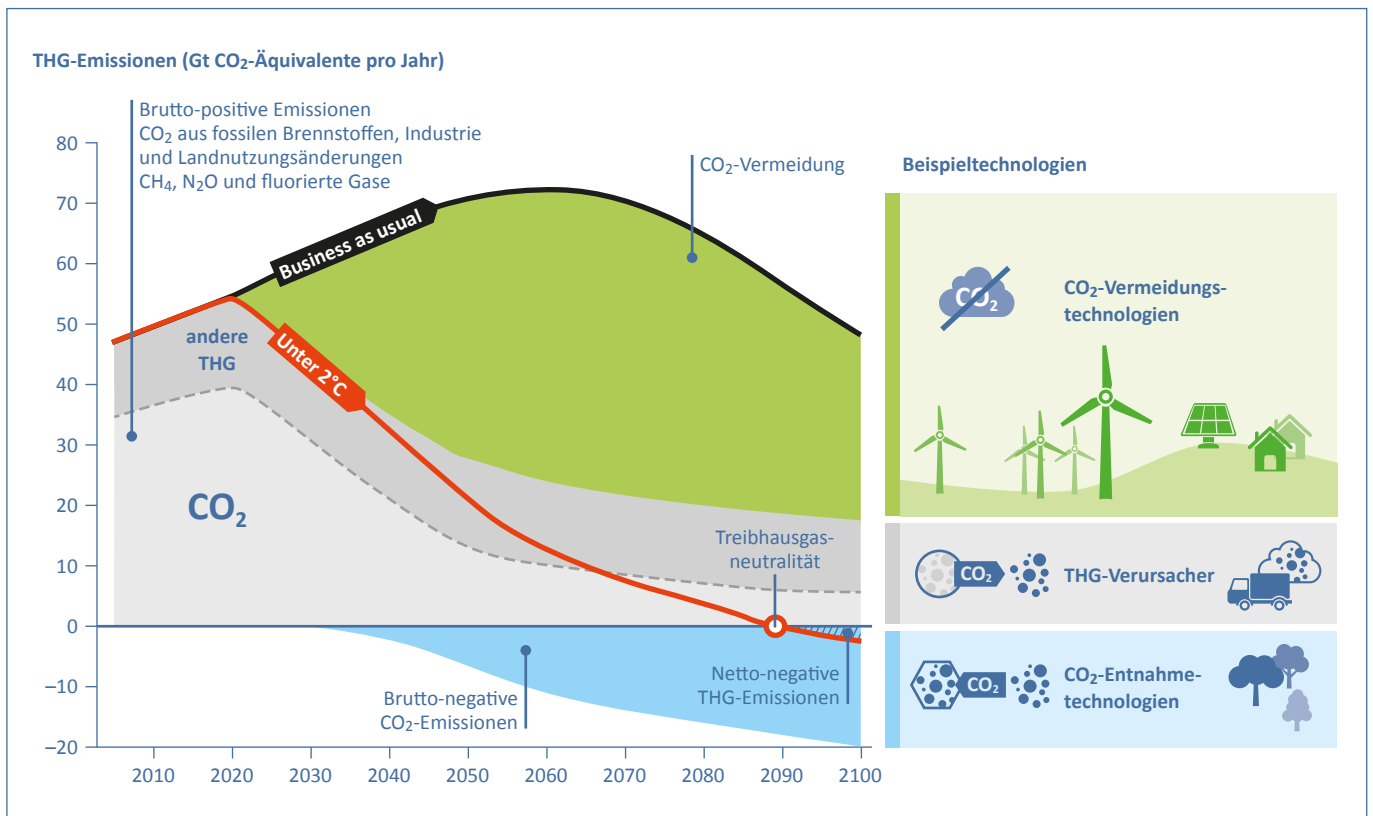


Abbildung 11: CO₂-Vermeidung und negative Emissionen zum Erreichen der Klimaschutzziele. Das dargestellte Szenario führt mit mindestens 66 Prozent Wahrscheinlichkeit dazu, dass die Erderwärmung auf unter 2 °C gegenüber vorindustriellen Temperaturen begrenzt wird. Die weltweiten CO₂-Emissionen werden gegenüber heute um etwa 90 Prozent reduziert. Da die restlichen Treibhausgase schwierig zu vermeiden sind, werden sie durch die Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre ausgeglichen. Am Ende des Jahrhunderts sind die Emissionen netto-negativ, das heißt, der Atmosphäre wird mehr CO₂ entzogen, als Treibhausgase ausgestoßen werden. CO₂-Entnahmetechnologien kommen bereits ab etwa 2030 zum Einsatz. Basierend auf UNEP 2017.

auf unter 1,5 °C zu halten.¹⁴⁷ Selbst um das 2-Grad-Ziel zu erreichen, werden in 101 von 116 Klimaschuttszenarien in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts netto-negative Emissionen benötigt.¹⁴⁸ Um das 2-Grad-Ziel ohne netto-negative Emissionen zu erreichen, müssten die Emissionen bis 2030 im Vergleich zu den Klimaschutzzielen, die die Staaten im Rahmen des Pariser Klimaschutzabkommens national formuliert haben (Nationally Determined Contributions, NDCs), halbiert werden und darüber hinaus bis 2050 jedes Jahr um mindestens 8 Prozent sinken.¹⁴⁹ Es ist bisher nicht erkennbar, dass eine solch drastische Emissionsreduktion angestrebt wird oder konkrete Pläne zur Umsetzung erarbeitet werden. Massive Verhaltensänderungen wie ein stark reduzierter Konsum von Fleisch und Milchprodukten oder ein geringerer Individualverkehr mit Auto oder Flugzeug würden solche Emissionsreduktionen wesentlich erleichtern, erscheinen derzeit aber ebenfalls nicht umsetzbar. Die Kosten der CO₂-Vermeidung werden bis zu dreimal so hoch eingeschätzt, wenn keine CO₂-Entnahmetechnologien zur Verfügung stehen.¹⁵⁰ Es wäre daher äußerst riskant, sich darauf zu verlassen, dass die Klimaschutzziele auch ohne CO₂-Entnahmetechnologien erreichbar sind. Für die CO₂-Entnahme werden verschiedene Verfahren diskutiert (siehe Kapitel 4.2). In Modellrechnungen kommt meist BECCS als einzige CDR-Technologie zum Einsatz, in einigen Modellen zusätzlich Aufforstung und Direct Air Capture.

¹⁴⁷ UNEP 2017, S. 60.

¹⁴⁸ Fuss et al. 2014.

¹⁴⁹ Strefler et al. 2018.

¹⁵⁰ Kriegler et al. 2014.

In den meisten Szenarien ist der Einsatz von Bioenergie erheblich. So werden darin bis zu 400 Exajoule Bioenergie pro Jahr produziert, davon 300 Exajoule in Kombination mit CCS.¹⁵¹ Der hohe Bedarf an Bioenergie ist allerdings nicht an die Verfügbarkeit der BECCS-Technologie gebunden. So ist in Szenarien ohne BECCS der CO₂-Preis höher, was zu einer höheren Zahlungsbereitschaft für CO₂-arme Energieträger führt. Klimaschutzszenarien, die auf BECCS verzichten, zeigen daher einen ähnlich hohen Bioenergieeinsatz.¹⁵² Der Bioenergieeinsatz beträgt damit das Zwei- bis Vierfache der niedrigsten in Kapitel 2 diskutierten Schätzungen des nachhaltig nutzbaren Bioenergiepotenzials. Dies könnte zu erheblichen Zielkonflikten mit dem Erhalt von Ökosystemen und der Artenvielfalt sowie der Sicherung der Nahrungsmittelsicherheit führen, sofern es nicht gelingt, die landwirtschaftlichen Erträge signifikant zu steigern oder durch eine überwiegend pflanzliche Ernährungsweise den Flächenbedarf für die Futtermittelproduktion zu reduzieren.

CCS als Kombination von CO₂-Abscheidung, -Transport und -Speicherung befindet sich noch in der Entwicklung, obwohl die einzelnen Prozessschritte in industriellem Maßstab einsatzbereit sind.¹⁵³ Entwicklung und Markteinführung der CCS-Technologie gingen in den letzten Jahren sehr viel langsamer voran als in Szenarien vor fünf bis zehn Jahren erwartet.¹⁵⁴ Grund dafür waren fehlende Anreize wie etwa ein ausreichend hoher CO₂-Preis. Demgegenüber ist der Bedarf an diesen Technologien in den Klimaschutzszenarien gewaltig: Von 2020 bis 2100 sollen weltweit insgesamt bis zu 2.000 Gigatonnen CO₂ eingelagert werden, die teilweise aus CO₂-Entnahmetechnologien und teilweise aus fossilen Brennstoffen stammen.¹⁵⁵ Die Szenarien gehen typischerweise von einer Kapazität der CO₂-Entnahme in der Größenordnung von einigen Gigatonnen CO₂ pro Jahr aus. Zum Vergleich: Im Jahr 2017 betrug die weltweiten energiebedingten CO₂-Emissionen rund 33 Gigatonnen.¹⁵⁶ Soll eine realistische Chance bestehen, dass diese Technologien in den kommenden Jahrzehnten einen derart großen Beitrag zum Klimaschutz leisten, müssen sie bereits zeitnah großtechnisch implementiert werden. Erste Anlagen müssten zwischen 2020 und 2030 zum Einsatz kommen.

Trotz dieser Zahlen ist hervorzuheben, dass CO₂-Entnahme- und -Einlagerungstechnologien die beschleunigte Reduktion von Treibhausgasemissionen nicht ersetzen können, sondern diese nur ergänzen. Der Hauptfokus muss auf der Vermeidung von THG-Emissionen liegen, indem der Energieverbrauch gesenkt und fossile Energieträger weitestgehend vermieden werden. Dahingehende Anstrengungen sollten deutlich erhöht werden, um die zukünftige Notwendigkeit der CO₂-Entnahme möglichst gering zu halten. Denn mit der CO₂-Entnahme bürdet man späteren Generationen die weitestgehend ohne fossile Energieträger auskommen und mit den bereits verursachten Folgen des Klimawandels leben müssen eine weitere Verantwortung auf. Dennoch deuten viele Studien darauf hin, dass es ohne CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre kaum noch möglich sein wird, die Klimaschutzziele einzuhalten. Durch die heutige Entwicklung von CO₂-Abscheidetechnologien gibt man den späteren Generationen zumindest Werkzeuge dafür an die Hand.

151 AR5 scenario database (IIASA 2015).

152 Bauer et al. 2018.

153 Verschiedene Abscheideverfahren sind technisch erprobt und marktreif, müssten jedoch in die jeweiligen Anlagen zur Bioenergieumwandlung integriert werden. Mit dem Transport von CO₂ bestehen umfangreiche Erfahrungen, vor allem in den USA. Die dauerhafte Speicherung wurde erprobt, zudem bestehen umfangreiche Erfahrungen mit Projekten zur Verpressung von CO₂ zur Ausbeutesteigerung von Erdöllagerstätten (acatech 2018).

154 So sieht eine Roadmap der Internationalen Energieagentur von 2009 für das Jahr 2020 bereits 100 CCS-Anlagen vor (IEA 2009). Anfang 2017 waren aber erst 17 Anlagen mit einer Kapazität von 0,035 Gigatonnen pro Jahr im Einsatz (easac 2018).

155 AR5 scenario database (IIASA 2015).

156 IEA 2018.

4.1 Was bedeutet das für Deutschland und Europa?

Selbst optimistische Szenarien prognostizieren für das Jahr 2050 und darüber hinaus für Deutschland unvermeidbare Emissionen in Höhe von mindestens 60 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten pro Jahr.¹⁵⁷ Diese setzen sich zusammen aus circa 14 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten aus der Industrie (vor allem Zement- und Kalkindustrie), 35 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten aus der Landwirtschaft, 8 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten aus Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (LULUCF) sowie 3 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten aus Abfall und Abwasser. Dabei liegen bereits sehr optimistische Annahmen zugrunde: eine komplette Umstellung des Energie- und Verkehrssektors auf erneuerbare Energien, die Halbierung des Energieverbrauchs in Haushalten, Verkehr, Industrie sowie in Gewerbe, Handel und Dienstleistungen gegenüber 2010, die Reduktion des Fleischkonsums um 25 bis 55 Prozent, der massive Ausbau der Elektrostahlerzeugung sowie eine komplette Umstellung der chemischen Industrie auf regenerative Kohlenstoffquellen bis 2050. Die tatsächlichen unvermeidbaren Emissionen dürften daher eher höher ausfallen.

Um die Netto-Emissionen insgesamt auf null zu reduzieren,¹⁵⁸ müssen Emissionen mindestens in Höhe dieser unvermeidbaren Emissionen der Atmosphäre entzogen werden. Gibt es Restemissionen aus weiteren Sektoren, müssten CO₂-Entnahmetechnologien entsprechend in noch größerem Umfang eingesetzt werden. Wenn es in den kommenden Jahrzehnten nicht gelingt, die Klimaschutzziele einzuhalten, und das Emissionsbudget überschritten wird, muss dies durch zusätzliche CO₂-Entnahme kompensiert werden. Die 60 Millionen Tonnen stellen also eher eine Untergrenze dar. Während die industriebedingten Emissionen mit konventioneller CCS-Technologie reduziert werden können, erfordern die Emissionen der anderen Sektoren, die nicht lokal konzentriert auftreten, CO₂-Entnahmetechnologien über den Anbau von Biomasse oder Direct Air Capture, die CO₂ direkt aus der Luft aufnehmen können.

Die meisten Energieszenarien für Deutschland untersuchen, wie das deutsche Klimaschutzziel einer Reduktion der THG-Emissionen bis 2050 um 80 bis 95 Prozent erreicht werden kann. Die Notwendigkeit, die Emissionen in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts auf null zu reduzieren oder sogar netto CO₂ aus der Atmosphäre zu entfernen, wird wegen der Beschränkung des Zeithorizontes auf 2050 nicht berücksichtigt. Die Fokussierung auf 2050 kann daher dazu verleiten, Entwicklungspfade einzuschlagen, die für das Erfüllen der langfristigeren Klimaschutzziele nicht geeignet sind.

¹⁵⁷ Zum Beispiel die Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ (UBA 2015).

¹⁵⁸ In der Governance-Verordnung der EU wurde festgeschrieben, dass die EU sich bemüht, eine treibhausgasneutrale Wirtschaft „so bald wie möglich“ zu realisieren. Die Kommission soll dazu bis April 2019 Szenarien vorlegen, die analysieren, wie Treibhausgasneutralität bis 2050 und im folgenden Zeitraum netto-negative Emissionen erreicht werden können (Verordnung (EU) 2018/1999).

Zumindest das weniger ambitionierte Ziel von 80 Prozent lässt sich auch erreichen, wenn konsequent auf den Einsatz fossiler Energieträger verzichtet wird und stattdessen erneuerbare Energien verwendet werden. CCS wird allerdings teilweise auch in solchen Szenarien eingesetzt, um prozessbedingte Emissionen aus der Industrie abzufangen.¹⁵⁹

Legt man das obere Ende des deutschen Klimaschutzziels – eine Reduktion der THG-Emissionen um 95 Prozent bis 2050 – zugrunde, wird es bedeutend schwieriger, auf CO₂-Entnahmetechnologien zu verzichten. In einigen Szenarien kommt BECCS daher bereits in bestimmten Bereichen zum Einsatz, um schwer vermeidbare Emissionen aus anderen Sektoren zu kompensieren.¹⁶⁰ Andere Szenarien gehen davon aus, dass eine 95-prozentige Reduktion der THG-Emissionen auch ohne CCS technisch möglich ist, wenn es gelingt, den Energieverbrauch in allen Bereichen sehr stark zu reduzieren und die Emissionen aus der Landwirtschaft unter anderem durch eine fleischärmere Ernährung zu senken.¹⁶¹

Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Europäische Union, die für 2050 das gleiche Klimaschutzziel verfolgt wie Deutschland (80 bis 95 Prozent Treibhausgaseinsparung). In Klimaschutzszenarien wird angenommen, dass die EU einen erheblichen Anteil zur global zu erbringenden CO₂-Entnahme beisteuern wird: etwa 7,5 Gigatonnen bis 2050 und etwas mehr als 50 Gigatonnen bis 2100.¹⁶²

Nur wenige Modellrechnungen für das europäische Energiesystem berücksichtigen CO₂-Entnahmetechnologien. Diese erreichen 2050 bereits Jahres-Volumina von 0,8 bis 1 Gigatonnen CO₂-Entnahme durch BECCS.¹⁶³ Auf mitgliedstaatlicher Ebene finden sich erste Modellierungen und fachöffentliche Diskussionen über CO₂-Entnahmetechnologien bislang vor allem in Großbritannien und in Schweden. In Großbritannien wurde auch das bislang größte Forschungsprogramm Europas zu CO₂-Entnahmetechnologien aufgelegt.¹⁶⁴

Obwohl die Modellrechnungen darauf hindeuten, dass ohne CO₂-Entnahme die Klimaschutzziele nicht zu erreichen sind, werden diese Technologien klimapolitisch bisher sowohl in Deutschland als auch auf EU-Ebene nur wenig diskutiert.

159 Beispielsweise werden in den für das BMWi gerechneten Langfristszenarien 42 Prozent der Emissionsminderungen in der Industrie durch CCS erreicht (BMWi 2017-2, Berichtsmodul 0).

160 So sind im Szenario KS95 die Emissionen der Industrie durch den Einsatz von BECCS insgesamt negativ (BMU 2015, S. 392). In den Langfristszenarien für das BMWi wird BECCS als ökonomisch attraktive Option für eine vollständige Dekarbonisierung diskutiert (BMWi 2017-2, Berichtsmodul 10a).

161 „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ (UBA 2015). Ziel der Studie ist, die technischen Möglichkeiten aufzuzeigen, bis 2050 in Deutschland Treibhausgasneutralität zu erreichen. Die entsprechenden Entwicklungen müssten durch entsprechende politische Maßnahmen angereizt werden. Damit eine fleischärmere Ernährung auch zu einer entsprechenden Reduktion der Fleischproduktion führt, müsste beispielsweise vermieden werden, dass der abnehmende inländische Konsum durch steigende Exporte kompensiert wird.

162 Peters/Geden 2017.

163 Solano Rodriguez et al. 2016; Bollen/Aalbers 2017. Aus Kosteneffizienzgründen kommt BECCS in diesen Szenarien bereits bei einem 80-Prozent-Ziel zum Einsatz: Emissionen im Verkehrs- und Gebäudereich werden durch negative Emissionen im Stromsektor kompensiert.

164 NERC 2017.

4.2 CO₂-Entnahmetechnologien

Es werden verschiedene CO₂-Entnahmetechnologien diskutiert, die sich anhand der Art der CO₂-Aufnahme und der Form der Kohlenstoffspeicherung unterscheiden. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten, der Atmosphäre CO₂ zu entziehen, und bewertet deren Potenziale. Die verwendete Bewertungsskala ist in Tabelle 6 beschrieben.

Zur Einordnung kann zwischen landbasierten und technischen Verfahren unterschieden werden. Landbasierte Verfahren nutzen biogene Prozesse, um die Kohlenstoffspeicherung in Pflanzen und Boden zu erhöhen. Dabei nehmen Pflanzen zunächst CO₂ aus der Luft auf und speichern den Kohlenstoff mithilfe von Sonnenlicht in der energiereichen Biomasse. Zu den landbasierten Verfahren gehören unter anderem Aufforstung und Formen der Landbewirtschaftung, durch die sich Kohlenstoff im Boden anreichert (Soil Carbon Sequestration). Ein rein technisches Verfahren ist die Entnahme von CO₂ aus der Luft (Direct Air Capture) mit Verpressung des abgeschiedenen CO₂. BECCS und die thermische Erzeugung von Biokohle können als Hybridtechnologien angesehen werden, da die CO₂-Aufnahme aus der Luft durch Pflanzen (also landbasiert) erfolgt, die Biomasse aber mit technischen Verfahren weiterverarbeitet wird.

Bei den technischen Verfahren ist für einen großtechnischen Einsatz, mit dem ein relevanter Klimaschutzbeitrag geleistet werden kann, noch viel Forschung und Entwicklung erforderlich. Zudem sind die Kosten pro abgetrennte Tonne CO₂ meist relativ hoch. CCS-Technologien sind vergleichsweise weit entwickelt. Sie können typischerweise bis zu 95 Prozent des entstehenden CO₂ aus Bioenergieanlagen abtrennen und als flüssiges Kohlendioxid unterirdisch lagern. Verschiedene Abscheidetechnologien für BECCS-Anlagen sind in Kapitel 4.4 detaillierter beschrieben.

Im Vergleich zu konventionellem CCS, bei dem CO₂ an großen Punktquellen aus einem Verbrennungsabgas oder Synthesegas an Industrieanlagen, Kraftwerken oder einer Bioenergieanlage abgeschieden wird, ist der Aufwand für die CO₂-Entnahme aus der Luft ungleich höher. Der Grund: Das CO₂ liegt in der Luft in viel niedriger Konzentration vor und muss umso stärker aufkonzentriert werden. Ein Vorteil von Verfahren mit landbasierter CO₂-Aufnahme wie BECCS und Aufforstung gegenüber Direct Air Capture ist, dass die Konzentrierung des CO₂ aus der Luft durch den natürlichen Photosyntheseprozess in den Pflanzen geschieht.

Die meisten landbasierten Verfahren sind bereits weiterentwickelt, da sie auf bestehenden Landnutzungstechniken aus der Land- und Forstwirtschaft aufbauen. Sie sind nach heutiger Schätzung meist kostengünstiger als die technischen Verfahren. Ein Nachteil der landbasierten Verfahren ist allerdings, dass die Dauer der Kohlenstoffspeicherung in Vegetation und Boden meist ungewisser ist als bei der Verpressung von CO₂ im Untergrund.¹⁶⁵ Werden aufgeforstete Wälder in Zukunft wieder abgeholzt oder fallen einem Feuer oder Schädlingen zum Opfer, wird der gespeicherte Kohlenstoff wieder freigesetzt. Durch den Klimawandel erhöhen sich die Risiken durch Feuer und Schädlinge, Krankheiten und Wassermangel. Auch die CO₂-Emissionen von Böden steigen mit zunehmender Erderwärmung.¹⁶⁶

¹⁶⁵ UNEP 2017, Kapitel 7; easac 2018, S. 12.

¹⁶⁶ easac 2018.

Technologie	CO ₂ Aufnahme	CO ₂ -Speicherung	Globales CDR-Potenzial (globaler Bedarf: etwa 5–15 Gt CO ₂ /Jahr ^{a)})	Landbedarf	
Aufforstung/Wiederaufforstung Bäume nehmen CO ₂ aus der Atmosphäre auf und speichern den Kohlenstoff im Holz.	Durch Pflanzen	Durch Photosynthese im Holz	80–800 Gt CO ₂ ^{b)} bis 2100, 1–12 Gt CO ₂ /Jahr. Wenn gleichzeitig BECCS oder Biokohle eingesetzt werden, ist das Potenzial wegen der Flächenkonkurrenz geringer. Durch Ernte von Holz und Verbauen in langlebigen Produkten kann das Potenzial erhöht werden.	0,08 ha/t CO ₂ /Jahr ^{c)}	
Kohlenstoffbindung im Boden (Soil Carbon Sequestration) Durch bestimmte Formen der Landwirtschaft ^{g)} wird Kohlenstoff im Boden angereichert.	Anreicherung im Boden	Als Kohlenstoff im Boden	Potenzial unsicher. 2,3–5,3 Gt CO ₂ /Jahr ^{h)}	Hoch, das Land kann aber gleichzeitig landwirtschaftlich genutzt werden.	
Restoration von Mooren und marinen Habitaten Ökosysteme wie Moore oder Mangrovenwälder speichern sehr viel Kohlenstoff.	Pflanzen und Anreicherung im Boden	In den Pflanzen und im Boden	Großes THG-Vermeidungspotenzial ^{j)} , darüber hinausgehendes Potenzial für CO ₂ -Entnahme unsicher und eher gering. Könnte durch zusätzliche Methan- und Stickoxidemissionen kurzfristig zusätzliche Erderwärmung verursachen.	Bei Restoration von Mooren erhebliche Nutzungseinschränkungen für Landwirte, das kann zu Landnutzungsänderungen führen.	
Biochar/Biokohle Verkohlte Biomasse wird in den Boden eingearbeitet. Durch die Verkohlung wird die Verrottung verhindert, der Kohlenstoff wird daher nicht (oder erst nach sehr langer Zeit) wieder als CO ₂ freigesetzt.	Durch Pflanzen	Als Holzkohle im Boden	0,3–2 Gt CO ₂ /Jahr (abhängig von der verfügbaren Biomasse). Wenn gleichzeitig Aufforstung oder BECCS eingesetzt werden, ist das Potenzial wegen der Flächenkonkurrenz geringer. ^{h)}	Ähnlich wie BECCS. Falls der Fokus auf Energiegewinnung läge, wäre das Potenzial geringer.	
Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und Speicherung (BECCS, Bio-CCS) Biogene Brennstoffe werden zur Energiegewinnung verbrannt, das dabei entstehende CO ₂ wird abgetrennt und unterirdisch eingelagert.	Durch Pflanzen	Unterirdische Einlagerung von CO ₂	0,5–5 Gt CO ₂ /Jahr. Je höher die Nutzung, desto schwerwiegender die Nebenwirkungen. Wenn gleichzeitig Aufforstung oder Biokohle eingesetzt werden, ist das Potenzial wegen der Flächenkonkurrenz geringer. ⁿ⁾	0,03–0,06 ha/t CO ₂ /Jahr ^{c)} bei Verwendung von Anbaubiomasse ^{c)} ; kein Landbedarf bei Verwendung von Abfall- und Reststoffen.	

Tabelle 5a: CDR-Technologien: Übersicht über verschiedene CO₂-Entnahmetechnologien (landbasiert)

a) Fuss et al. 2018, Strefler et al. 2018. **b)** Fuss et al. 2018, Kreidenweis et al. 2016. **c)** Smith et al. 2015. **d)** Die Albedo ist das Verhältnis von rückgestrahltem zu einfallendem Licht. Sie ist von der Oberflächenbeschaffenheit und -farbe abhängig. Wälder reflektieren weniger Licht als beispielsweise Felder und Wiesen und absorbieren dadurch mehr Energie. Dadurch wird der klimaschützende Effekt der Aufforstung vermindert (siehe zum Beispiel Kreidenweis et al. 2016). **e)** Strefler et al. 2018. **f)** Umweltbundesamt 2018. **g)** Zum Beispiel bodenbedeckende Kulturen, Belassen von Ernterückständen auf dem Feld, Ausbringung von Kompost, pfluglose Bewirtschaftung (easac 2018, S. 18). **h)** Smith et al. 2016, Global Change Biology. **i)** Smith 2016 (SCS and biochar). **j)** Siehe Anhang 7.1. **k)** Tetzlaff et al. 2015.

	Energiebilanz	Kosten	Umweltauswirkungen	Speicherdauer/Sicherheit	Technologischer Reifegrad	Ausgleich der 60 Mio. t CO ₂ -Äquivalente unvermeidbare Emissionen in Deutschland
	Neutral	5–50 \$/t CO ₂	Eventuell hoher Wasserbedarf, Änderung der Albedo ^{d)} und der Wolkenbildung durch Verdunstung ^{e)}	Es muss langfristig garantiert werden, dass der Kohlenstoff gebunden bleibt (Risiken durch Abholzung, Feuer, Schädlinge).	Sofort machbar	4,8 Mio. ha = 48.000 km ² Land benötigt (entspricht 26 Prozent der landwirtschaftlichen Fläche von Deutschland ^{f)})
	Neutral ^{h)}	0–100 \$/t CO ₂	Verbesserung der Wasser- und Nährstoffspeicherfähigkeit des Bodens ⁱ⁾	Es muss langfristig garantiert werden, dass der Kohlenstoff gebunden bleibt (Risiken durch Nutzungsänderung und Bodenrespiration).	Sofort machbar	Potenzial für Deutschland unsicher
	Neutral	10–100 \$/t CO ₂	Positiv für Wasserschutz ^{k)} und für Biodiversität	Es muss langfristig garantiert werden, dass der Kohlenstoff gebunden bleibt (Risiko durch Änderung des Wasserspiegels).	Sofort machbar, aber Forschungsbedarf, wie THG-Emissionen am stärksten reduziert werden können	Bei Berechnung der 60 Mt CO ₂ -Äquivalenten wurde bereits angenommen, dass 85 Prozent der Moore (mehr als 1 Mio. ha) wiedervernässt sind. Durch Torfaufbau ist 1–2 Mt CO ₂ -Entnahme möglich (Daten unsicher)
	Energie wird gewonnen, allerdings weniger als bei BECCS ^{l)}	90–120 \$/t CO ₂	Düngeneffekt, Verbesserung der Wasser- und Nährstoffspeicherfähigkeit des Bodens. Negative Effekte auf Boden möglich, wenn Biokohle schlecht an Boden angepasst ^{m)} . Änderungen der Albedo.	Langzeitstabilität hängt von Produktionsbedingungen ab.	Sofort machbar, allerdings keine Erfahrung mit großskaliger Verarbeitung	Bedarf an Biomasse in der gleichen Größenordnung wie bei BECCS (abhängig von den Prozessbedingungen)
	Energie wird gewonnen (Menge abhängig vom eingesetzten Verfahren).	100–200 \$/t CO ₂	Eventuell hoher Wasser- und Düngemittelbedarf, ähnliche Folgen wie andere Formen industrieller Landwirtschaft. Geringe Effekte, wenn Rest- und Abfallstoffe eingesetzt werden.	CCS – CO ₂ bleibt langfristig gespeichert.	Demoanlage in Betrieb (Ethanolherzeugung aus Mais, Decatur, Illinois)	14 Mt CO ₂ aus Industrie werden direkt an der Quelle aufgefangen und mit CCS gespeichert; für die verbleibenden 46 Mt CO ₂ werden die Hälfte bis mehr als die gesamte momentan energetisch genutzte Biomasse benötigt ^{o)} (oder 1,4–2,8 Mha Land für Anbaubiomasse).

l) Biokohle ist eine energiereiche Verbindung. Je mehr Kohlenstoff in der Biokohle fixiert wird, desto geringer ist daher die potenzielle Energiegewinnung. Bei BECCS hingegen kann (außer wenn kohlenstoffhaltige Kraftstoffe erzeugt werden) theoretisch der gesamte in der Biomasse enthaltene Kohlenstoff als CO₂ abgeschieden und dabei die in der Biomasse enthaltene Energie weitgehend genutzt werden. BECCS ist allerdings technisch aufwendiger als die Biokohleherzeugung, daher sind die Umwandlungsverluste und die Kosten höher. Je nach Verfahren und Art der erzeugten Endenergie (Strom, Wärme, Wasserstoff, Kraftstoffe) können sich Kosten und Umwandlungsverluste bei BECCS-Anlagen erheblich unterscheiden. m) easac 2018, S. 18. n) Aufforstung und BECCS konkurrieren um die gleichen Flächen. Über einen langen Zeitraum betrachtet, kann mit BECCS pro Hektar mehr CO₂ aus der Atmosphäre entfernt werden als mit Aufforstung durch ungenutzten Wald. Denn ein Wald erreicht nach einigen Jahrzehnten ein Gleichgewicht, in dem der Holzzuwachs durch absterbendes Material kompensiert wird, das sich zu CO₂ zersetzt. Netto wird dann kein CO₂ mehr aufgenommen. Bei BECCS oder Entnahme von Holz zum Bauen hingegen kann die Fläche dauerhaft CO₂ aufnehmen, da beständig Holz nachwachsen kann, und das CO₂ aus dem entnommenen Holz dauerhaft der Atmosphäre entzogen bleibt (eingelagert mit CCS oder gebunden im Bauholz). o) Abgeschätzt mit einem Heizwert der Biomasse von 18 MJ/kg und der Annahme, dass 40 bis 80 Prozent des in der Biomasse gebundenen Kohlenstoffs an der Anlage als CO₂ abgeschieden werden.

Technologie	CO ₂ Aufnahme	CO ₂ -Speicherung	Globales CDR-Potenzial (globaler Bedarf: etwa 5–15 Gt CO ₂ /Jahr ^{a)})	Landbedarf	
Direct Air Capture CO ₂ wird mithilfe von chemischen Bindemitteln aus der Umgebungsluft entfernt und unterirdisch eingelagert.	Technisch aus der Luft	Unterirdische Einlagerung von CO ₂	CO ₂ -Abscheidkapazität im Prinzip unbegrenzt. Limitierung durch CCS-Kapazität und Energiebedarf.	< 0,001 ha/t C ^{b)} Kein Ackerland erforderlich. Allerdings zusätzlicher Flächenbedarf für Wind/PV-Anlagen, um Energiebedarf zu decken.	
Beschleunigte Verwitterung (Enhanced Weathering) Natürliche Mineralien reagieren mit CO ₂ und binden auf diese Weise den Kohlenstoff.	Im geologischen Verwitterungsprozess	Gebunden im Gestein	2–4 Gt CO ₂ /Jahr im Jahr 2050. Theoretisch unbegrenzt, durch langsame Reaktion und die Notwendigkeit, zermahlene Mineralien in der Landschaft zu verteilen, aber eingeschränkt. Abhängig von Körnung und Verwitterungsrate.	Hoch, das Land kann aber gleichzeitig landwirtschaftlich genutzt werden.	

Tabelle 5b: CDR-Technologien: Übersicht über verschiedene CO₂-Entnahmetechnologien (technisch)

a) Fuss et al. 2018; Strefler et al. 2018. b) Smith et al. 2015. c) Smith et al. 2015; Ishimoto et al. 2017. d) Fuss et al. 2018; Keith et al. 2018; Climeworks 2017; Carbonbrief 2017. e) easac 2018, S. 9. f) BMWi 2018. g) Strefler et al. 2018. h) Statista 2018.

Globales CDR-Potenzial	Könnte den gesamten Bedarf an CO ₂ -Entnahme decken	Kann mit hoher Wahrscheinlichkeit einen substantziellen Anteil, aber nicht den gesamten Bedarf an CO ₂ -Entnahme decken	Kann möglicherweise einen substantziellen Anteil des Bedarfs an CO ₂ -Entnahme decken, das Potenzial ist aber unsicher	Eher gering oder so ungewiss, dass eine verlässliche Schätzung nicht möglich ist	Vernachlässigbar
Landbedarf	Kein Ackerland erforderlich	Ackerland ist erforderlich, kann aber gleichzeitig mit geringen Nutzungseinschränkungen landwirtschaftlich genutzt werden.	Bei Verwendung von Anbaubiomasse hoher Landbedarf, es können aber auch Rest- und Abfallstoffe eingesetzt werden	Ackerland ist erforderlich. Es kann zwar gleichzeitig landwirtschaftlich genutzt werden, die Nutzungseinschränkungen sind aber wesentlich.	Große Menge Ackerland erforderlich, das nicht gleichzeitig landwirtschaftlich genutzt werden kann
Energiebilanz	Energie wird gewonnen	Neutral beziehungsweise es wird nur wenig nutzbare Energie gewonnen	Geringer Energiebedarf	Mittlerer Energiebedarf	Hoher Energiebedarf
Kosten^{a)}	< 30 \$/t CO ₂	30–50 \$/t CO ₂	50–100 \$/t CO ₂	100–150 \$/t CO ₂	> 150 \$/t CO ₂
Umweltauswirkungen	Positiv	Geringe Effekte, keine bleibenden Schäden	Sowohl positive wie auch potenziell negative Effekte, die voraussichtlich durch Forschung oder rechtliche Rahmenbedingungen minimiert werden können	Es besteht ein hohes Risiko, dass negative Effekte überwiegen.	Es treten schwerwiegende negative Effekte auf, die sich nicht vermeiden lassen.
Speicherdauer/Sicherheit	Langfristig chemisch gebunden	Langfristig als Gas gespeichert, geringe Restrisiken	Langfristige Speicherung potenziell möglich, es besteht aber Forschungsbedarf	Biologisch gebunden, muss langfristig garantiert werden	Instabil
Technologischer Reifegrad	Sofort machbar	Sofort machbar, aber Optimierung nötig	Demoanlage in Betrieb, bei Landnutzung vieljährige Erfahrung im Feld	Im Pilotmaßstab getestet, bei Landnutzung kleinere Feldversuche	Nur theoretische Ergebnisse

Tabelle 6: Bedeutung der Farben für die Bewertung der CO₂-Entnahmetechnologien

a) Mittelwert.

	Energiebilanz	Kosten	Umweltauswirkungen	Speicherdauer/ Sicherheit	Technologischer Reifegrad	Ausgleich der 60 Mio. t CO ₂ -Äquivalente unvermeidbare Emissionen in Deutschland
	Energieintensiv, 8–13 GJ/t CO ₂ ^{c)}	Anfangs ~ 600 \$/t CO ₂ , später 100–300 \$/t CO ₂ ^{d)}	Gegebenenfalls Effekte niedriger CO ₂ -Konzentra- tion in der Nähe der Anlagen auf Vegetation ^{e)}	CCS – CO ₂ bleibt langfristig ge- speichert.	Demoanlage in Betrieb (Clime- works, Schweiz)	14 Mt CO ₂ aus Industrie direkt mit CCS; Energiebedarf für die ver- bleibenden 46 Mt CO ₂ 0,37–0,6 EJ (100–170 TWh). Endenergiever- brauch in Deutschland in 2016 ~ 9 EJ ^{f)}
	Energiebedarf für Abbau, Mahlen und Ausbringung der Mine- ralien abhängig von Körnung, zentraler Wert 0,7 GJ/t CO ₂ ^{g)} (0,2–2)	50–200 \$/t CO ₂	Eventuell Düngeeffekt durch hohen Phosphor, Magnesium, Calcium, Kalium Gehalt. Eventuell Er- zeugung von Feinstaubpar- tikeln bei kleiner Körnung	Bleibt lang- fristig im Gestein gebunden	Wird noch erforscht	Basalt bindet 0,3 kg CO ₂ pro kg Gestein ^{g)} → 60 Mt CO ₂ erfordern 200 Mt fein zerkleinerten Basalt pro Jahr. Das ist etwas mehr als die gesamte Braun- und Steinkohle- förderung ^{h)} .

Wie aus Tabelle 5 hervorgeht, werden für die landbasierten Verfahren Flächen in sehr großem Ausmaß benötigt. Aufforstung, BECCS und Biokohle konkurrieren dabei um die gleichen Flächen für den Anbau der benötigten Biomasse. Hier sind die in Kapitel 2 beschriebenen Trade-offs mit Nahrungsmittelproduktion und Schutz der Biodiversität zu berücksichtigen. Die Kohlenstoffbindung im Boden und die Wiedervernässung von Mooren wären im Prinzip sofort einsatzbereit und haben insgesamt positive Auswirkungen auf die Umwelt, werden allein jedoch weder in Deutschland noch weltweit ausreichen, um der Atmosphäre die erforderlichen Mengen an CO₂ zu entziehen. Dennoch spielt die Wiedervernässung von Mooren eine wichtige Rolle für den Klimaschutz, denn die landwirtschaftliche Nutzung von Moorstandorten verursacht in Deutschland über vier Fünftel der Bodenemissionen.¹⁶⁷ Hier können in hohem Maße Emissionen vermieden werden, das darüber hinausgehende Potenzial für negative Emissionen ist jedoch gering.

Da es in Deutschland kaum ungenutzte Flächen gibt, besteht nur ein geringes Potenzial für die Aufforstung. Durch den Anbau produktiverer Baumarten (insbesondere die Erhöhung des Nadelbaumanteils) könnte die Kohlenstoffspeicherung im Wald jedoch in gewissem Umfang erhöht werden.¹⁶⁸ Dabei wäre jedoch zwischen Zielen des Klimaschutzes und des Naturschutzes abzuwägen. BECCS oder Biokohle könnten ohne zusätzlichen Flächenbedarf einen Beitrag zur CO₂-Entnahme leisten, wenn die bisher genutzte Biomasse anders eingesetzt wird und zusätzliche Potenziale an Rest- und Abfallstoffen erschlossen werden. Insgesamt ist es jedoch unwahrscheinlich, dass durch die landbasierten Technologien allein der Bedarf an CO₂-Entnahme gedeckt werden kann. Direct Air Capture und die beschleunigte Verwitterung (Enhanced Weathering) sind nicht auf landwirtschaftliche Flächen angewiesen, gehen aber mit hohem logistischem Aufwand, Kosten und Energiebedarf einher.

Da BECCS neben den negativen Emissionen Energie liefert, wird ein zusätzlicher Nutzen generiert. Im Gegensatz etwa zur Aufforstung könnte BECCS den Ausbaubedarf an Windkraft- und Photovoltaikanlagen sowie Speichern reduzieren beziehungsweise Emissionen in Sektoren senken, in denen wenige andere Alternativen zur Verfügung

¹⁶⁷ UBA 2015. Siehe auch Anhang 7.1.

¹⁶⁸ WBAE/WBW 2016, S. 282.

stehen, beispielsweise im Flugverkehr. Um die Emissionen aus der Landnutzung komplett mit BECCS zu kompensieren, würde etwa die Hälfte bis mehr als die gesamte aktuelle Bioenergiebereitstellung in Deutschland um CCS erweitert werden müssen. Bei Direct Air Capture hingegen ist der Energiebedarf hoch. Um die unvermeidbaren Emissionen aus dem Landnutzungssektor in Deutschland aufzunehmen, könnte Energie in der Größenordnung von rund 100 Terawattstunden (0,36 Exajoule) benötigt werden¹⁶⁹ – das entspricht etwa einem Sechstel des heutigen Stromverbrauchs. Dieser zusätzliche Energiebedarf müsste über weitere Windkraft- und Solaranlagen gedeckt werden. Allerdings könnten die Anlagen überschüssigen Wind- und PV-Strom nutzen und somit zur Flexibilisierung des Strombedarfs beitragen. Gegebenenfalls würden Direct-Air-Capture-Anlagen eher im Ausland errichtet (in der Nähe geologischer Formationen, die für die Errichtung großer CO₂-Speicher geeignet sind, und an guten Wind- und Solarstandorten), wenn dies mit internationalem Recht vereinbar ist.

Auch bei der Herstellung von Biokohle fällt Energie an, wenn auch in geringerem Maße als bei BECCS. Die durch Pyrolyse (Verschmelzung unter Sauerstoffausschluss) erzeugte Biokohle wird in den Boden eingearbeitet und kann über die Speicherung von Kohlenstoff hinaus die Eigenschaften des Bodens verbessern.¹⁷⁰ Als Nebenprodukte entstehen brennbare Pyrolysegase und eventuell flüssiger Schwelteer, die energetisch genutzt werden können. Je nach Reaktionsbedingungen ist die Ausbeute an Biokohle oder -koks sehr unterschiedlich. Maximal können bis zu 70 Prozent des Kohlenstoffs der Biomasse in der Biokohle gespeichert werden. Hohe Pyrolysetemperaturen begünstigen dabei die Bildung langzeitstabiler Biokohlen. Die Vielzahl der Ausgangsstoffe, Herstellungsverfahren und Konditionierungsoptionen erfordert systematische Untersuchungen, um das Prozessverständnis zur Wirkung von Biokohlen in Böden zu verbessern. Dabei fehlt es insbesondere an langfristigen Freilanduntersuchungen. Ein potenzielles Risiko ist, dass sich bei der Biokohleherstellung organische Schadstoffe bilden und mit der Biokohle in die Böden gelangen.¹⁷¹

Neben den hier aufgeführten Technologien lässt sich biogener Kohlenstoff auch in langlebigen Materialien speichern, entweder über die direkte Nutzung von Holz als Konstruktionsmaterial, in Form von Bio-Beton oder über den Weg der Synthesegasherstellung durch Vergasung von Biomasse und Weiterverarbeitung des Gases zu Produkten. Der Kohlenstoff bleibt hier für die Lebensdauer der Produkte gebunden. Die Netto-Senkenleistung durch Kohlenstoffspeicherung in langlebigen Holzprodukten in Deutschland beträgt derzeit etwa 3,5 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr¹⁷² und ließe sich durch eine verstärkte stoffliche Nutzung von Holz um 4,7 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr erhöhen.¹⁷³

Welche CO₂-Entnahmetechnologien sich am besten in das Gesamtkonzept zum Klimaschutz einfügen, hängt unter anderem von den verfügbaren Flächen und von der Frage ab, wie viel CO₂ zu welchen Kosten pro Hektar gespeichert werden kann. Außerdem spielt der relative Wert von klimafreundlicher Energie im Vergleich zur CO₂-Entnahme eine wichtige Rolle. Ob sich die Mehrkosten für BECCS gegenüber

169 Bei einem spezifischen Energiebedarf von 8 Gigajoule pro Tonne CO₂ (2.222 kWh/t). Der zukünftige Energiebedarf von Direct Air Capture ist aber noch mit hoher Unsicherheit behaftet.

170 Das Konzept basiert auf Terra Preta, einem fruchtbaren Boden, der ursprünglich im Amazonasgebiet aus einer Mischung von Holzkohle, menschlichen Fäkalien, Dung, Kompost und Tonscherben in präkolumbianischer Zeit hergestellt wurde. Es wird erforscht, wie das Prinzip an verschiedene Bodentypen angepasst werden kann.

171 UBA 2016.

172 WBAE/WBW 2016, S. 293.

173 WBAE/WBW 2016, S. 295.

Aufforstung oder Biokohle lohnen, hängt daher nicht zuletzt davon ab, wie stark die Energieversorgung auf den Beitrag der Bioenergie angewiesen ist. Aller Voraussicht nach wird ein Mix verschiedener CO₂-Entnahmetechnologien zum Einsatz kommen müssen, um den gesamten Bedarf an negativen Emissionen zu decken.

4.3 CCS-Technologie

Die CCS-Technologie setzt sich zusammen aus den Schritten CO₂-Abscheidung, -Transport und Speicherung. Die eingesetzten Verfahren zur CO₂-Abscheidung können sich je nach Art der CO₂-Quelle (zum Beispiel ein Kraftwerk oder eine Industrieanlage) unterscheiden. Für BECCS werden sie in Kapitel 4.4 beschrieben.

Unabhängig davon, mit welcher Technologie CO₂ entweder direkt an den Emissionsquellen oder aus der Atmosphäre abgeschieden wird, muss es dauerhaft aus der Atmosphäre ferngehalten werden. Aus heutiger Sicht ist dies in den erforderlichen Mengen nur mit einer geologischen Speicherung sicherzustellen. Das CO₂ wird dabei in Tiefen von idealerweise mehr als 1.000 Metern eingelagert. Als mögliche Speicher kommen zum einen leergeförderte Erdöl- und Erdgaslagerstätten, zum anderen tiefliegende, salzwasserführende Aquifere infrage. Weitere Optionen wie die Speicherung in Basalten oder Kohleflözen sind mengenmäßig und/oder räumlich begrenzt oder werden noch erprobt. Abschätzungen für Deutschland ergeben Speicherkapazitäten von etwa 2,75 Gigatonnen CO₂ in erschöpften Erdgasfeldern und zwischen 6 und 12 Gigatonnen CO₂ in salinen Aquiferen.¹⁷⁴ Für die prognostizierten unvermeidbaren Emissionen und die notwendigen negativen Emissionen in Höhe einiger zehn bis hundert Millionen Tonnen reichen diese Speicherkapazitäten für mehrere Dekaden bis Jahrhunderte. Weitere belastbare Kapazitätsabschätzungen liegen für Nordamerika, Europa, Australien, den asiatisch-pazifischen Raum sowie Brasilien und das südöstliche Afrika vor. Sie zeigen, dass weder auf globaler noch auf regionaler Ebene die vorhandenen Speicherkapazitäten der limitierende Faktor dafür sind, CO₂ geologisch zu speichern.¹⁷⁵ Innerhalb Europas liegen die größten Potenziale in der Nordsee und der Norwegischen See, mit etwa 38 Gigatonnen in Erdgas- und Erdöllagerstätten und 165 Gigatonnen in salinen Aquiferen.¹⁷⁶

Aktuell sind weltweit 17 großskalige CCS-Projekte in Betrieb, von denen vier Projekte mit einer dauerhaften geologischen CO₂-Speicherung gekoppelt sind.¹⁷⁷ Mit dem Projekt *Illinois Industrial Carbon Capture and Storage* in Decatur, Illinois, existiert zudem bereits eine großskalige BECCS-Infrastruktur mit einer jährlichen Speichermasse von einer Million Tonnen CO₂. Das CO₂ wird in dieser Anlage bei der fermentativen Ethanolherzeugung aus Maisstärke abgeschieden. Die anderen 13 in Betrieb befindlichen Projekte setzen die CO₂-Speicherung als tertiäre Erdölfördermaßnahme¹⁷⁸ ein. Zur CO₂-Abtrennung und -Lagerung bei der Erdgasgewinnung sind heute Anlagen mit einer Kapazität von bis zu mehreren hunderttausend Tonnen pro Jahr erreicht worden. Verschiedene andere Verfahren sind im großen Maßstab nicht erprobt beziehungsweise

174 Knopf et al. 2010.

175 Consoli/Wildgust 2017; Global CCS Institute 2016.

176 acatech 2018.

177 Global CCS Institute 2017.

178 Dabei wird durch das Verpressen des CO₂ in das Bohrloch das Öl an die Oberfläche gedrückt.

noch in der Entwicklung.¹⁷⁹ Insgesamt existieren mehr als vierzig Jahre Erfahrungen mit CCS, und die CCS-Technologie mit Pipeline-Transport und geologischer Speicherung ist bereits heute einsatzfähig.¹⁸⁰ Ein zukünftiger Einsatz von CCS in Verbindung mit der Biomassenutzung sowie für unterschiedliche, voraussichtlich überwiegend kleinere Emittenten setzt jedoch voraus, dass eine lokale oder länderübergreifende CCS-Infrastruktur aufgebaut wird, die die unterschiedlichen CO₂-Quellen und -Senken verknüpft. Gerade für Europa mit großen, prospektiven Speicherkapazitäten in der Nordsee erfordert dies zudem rechtliche Rahmenbedingungen, die einen grenzüberschreitenden CO₂-Transport ermöglichen.¹⁸¹

Eines der größten Hindernisse für den Einsatz der CCS-Technologie könnte absehbar die geringe gesellschaftliche Akzeptanz sein (siehe Kapitel 4.5).

Carbon Capture and Utilization

Im Gegensatz zu CCS ist Carbon Capture and Utilization (CCU) keine CO₂-Entnahmetechnologie. CCU bezeichnet die Abscheidung von Kohlenstoffdioxid aus Feuerungsanlagen, industriellen Prozessen und gegebenenfalls der Atmosphäre zum Zweck einer energetischen und stofflichen Verwertung. Das CO₂ wird dabei nicht notwendigerweise dauerhaft gespeichert und gelangt am Ende der Lebenszeit der mit CCU hergestellten Produkte wieder in die Atmosphäre. Eine Ausnahme wäre die Herstellung sehr langlebiger Produkte wie Baustoffe, in denen der Kohlenstoff für viele Jahrzehnte gebunden bleibt.

Wird CO₂ aus fossilem Kohlenstoff verwendet, können lediglich CO₂-Emissionen eingespart werden, indem der Kohlenstoff „zweimal verwendet“ wird – beispielsweise, wenn CO₂ aus einer Industrieanlage zur Herstellung von synthetischem Kraftstoff verwendet wird und dieser erdölbasierte Kraftstoffe ersetzt. In einer treibhausgasneutralen Welt kann CCU mit fossilem Kohlenstoff daher nicht eingesetzt werden (es sei denn, er wird an anderer Stelle durch CO₂-Entnahmetechnologien kompensiert). Wird CO₂ aus Bioenergieanlagen verwendet, ist die Gesamtbilanz bestenfalls CO₂-neutral, wenn man von den durch die Bereitstellung der Biomasse verursachten Emissionen absieht.

Für zukünftige Kohlenstoffkreisläufe kann Biomasse eine wichtige Rolle spielen, denn langfristig muss in allen zukünftig notwendigen kohlenstoffbasierten Produktionsprozessen Kohlenstoff aus fossilen Quellen ersetzt werden. Neben CO₂ aus der Luft kommt dafür der in Biomasse gebundene Kohlenstoff infrage. Der Vorteil: Der Energieaufwand ist geringer und die Technologie ist für viele Einsatzgebiete bereits verfügbar oder weit entwickelt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die mögliche Rolle von Bioenergie-technologien zur CO₂-Entnahme diskutiert, CCU-Technologien werden daher nicht weiter betrachtet.

179 Dabei werden Abscheideverfahren mit Adsorption (Zeolithe), Feststoffreaktionen (Carbonat-Looping), Membranen oder tiefen Temperaturen (Kryoverfahren) erforscht und entwickelt.

180 Eine detaillierte Beschreibung der CCS-Technologie einschließlich der Speicherkapazitäten, Risiken, rechtlichen Rahmenbedingungen und Akzeptanzfaktoren bietet acatech 2018.

181 Das London-Protokoll zum *Londoner Übereinkommen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen* wurde 2009 geändert (Amendment to Article 6), um den grenzüberschreitenden CO₂-Transport zu ermöglichen. Die Änderung ist aber noch nicht von einer ausreichenden Anzahl an Staaten ratifiziert und daher noch nicht rechtskräftig (Stand August 2018).

4.4 Technologieoptionen für BECCS

Das BECCS-Konzept setzt sich aus zwei Schritten zusammen: 1) der Bereitstellung der Biomasse und 2) deren energetischer Nutzung zur Herstellung von Strom, Wärme oder Kraftstoff, wobei das dabei entstehende CO₂ abgeschieden und analog zu konventionellen CCS-Technologien unterirdisch eingelagert wird.

Fragestellungen bezüglich der Bereitstellung der Biomasse sind unabhängig davon, ob diese mit oder ohne CCS eingesetzt wird. Dies sind die Frage nach den Potenzialen und die in Kapitel 2 beschriebenen Trade-offs wie Treibhausgasemissionen, Umweltauswirkungen und Flächenkonkurrenzen mit der Nahrungsmittelproduktion.

Für CO₂-Abscheidung, -Transport und -Einlagerung stehen im Prinzip die gleichen technologischen Verfahren zur Verfügung wie für CCS in Industrieanlagen oder Kraftwerken. Je nach Bioenergieanlage muss die CO₂-Abscheidung in den individuellen Prozess eingebunden werden. Es ist zu erwarten, dass für die CO₂-Abscheidung in kleineren Biomasse-Konversionsanlagen aufgrund von Skaleneffekten pro Tonne CO₂ höhere Kosten entstehen als in größeren Anlagen.

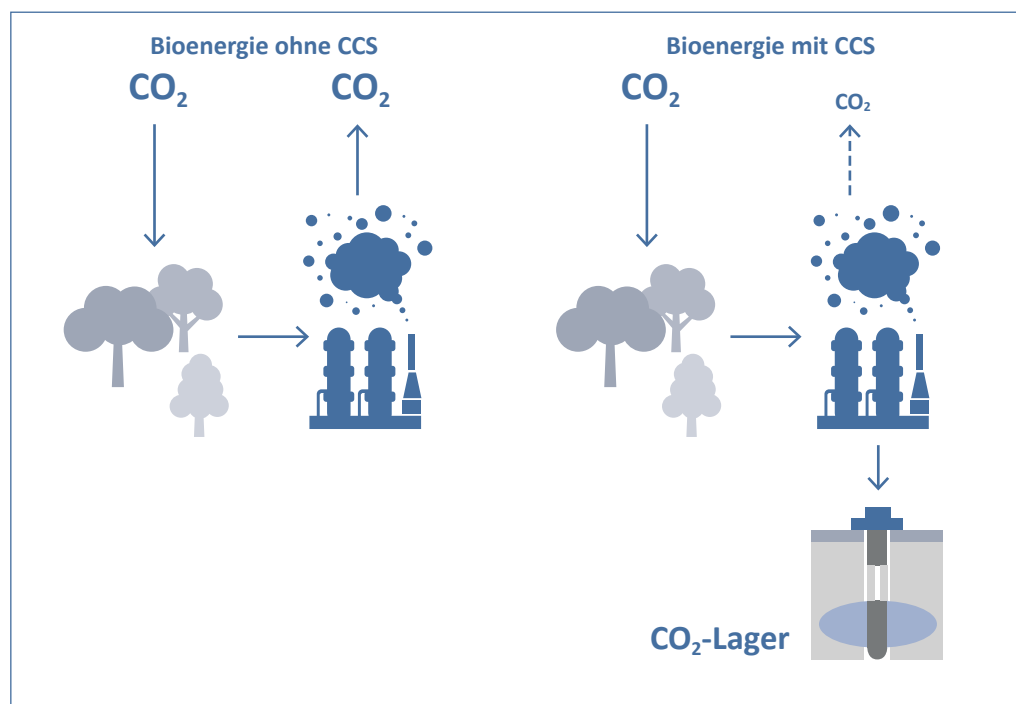


Abbildung 12: Funktionsweise und Kohlenstoffströme von Bioenergie mit und ohne CCS. Emissionen aus der Landnutzung sind nicht abgebildet.

Eine BECCS-Anlage erstellt zwei Produkte: Energie und negative Emissionen. Verschiedene BECCS-Technologien liefern die beiden Produkte in unterschiedlichem Verhältnis. Welche Technologie am vorteilhaftesten ist, hängt davon ab, wie wertvoll die beiden Produkte für das Energiesystem sind. Entscheidend ist also das Zusammenspiel mit anderen Technologien. Beispielsweise sind bei BECCS zur Stromerzeugung die CO₂-Emissionen und die mögliche Abscheiderate hoch, Strom kann aber relativ einfach durch Wind und Photovoltaik erzeugt werden. Bei BECCS zur Kraftstoffherzeugung wird weniger CO₂ erzeugt und abgeschieden, da im Kraftstoff Kohlenstoff enthalten ist. Es kann also nur der „Kohlenstoffüberschuss“ aus der Biomasse, der für

den Kraftstoff nicht benötigt wird, abgeschieden werden – entsprechend niedriger sind die negativen Emissionen. Allerdings ist das energetische Produkt Kraftstoff für das Energiesystem wertvoller als Strom, denn aus Wind- und PV-Strom kann Kraftstoff nur über aufwendige und teure Power-to-X-Verfahren erzeugt werden. Wie wertvoll die CO₂-Abscheidung aus Systemsicht im Verhältnis zum energetischen Produkt ist, hängt davon ab, wie wichtig negative Emissionen für das Erreichen der Klimaschutzziele sind und in welchem Umfang und zu welchen Kosten andere CO₂-Abscheidetechnologien wie Direct Air Capture zur Verfügung stehen.

Im Hinblick auf BECCS könnte auch die Wasserstoffherzeugung aus Biomasse eine relevante Option werden. Zwar kann Wasserstoff zukünftig vermutlich flächeneffizienter und möglicherweise auch kostengünstiger mit Windkraft und Photovoltaik erzeugt werden. Andererseits lässt sich zumindest theoretisch der gesamte in der Biomasse enthaltene Kohlenstoff als CO₂ abtrennen und einlagern – die negativen Emissionen sind ähnlich hoch wie bei der Stromerzeugung. Zudem könnte Wasserstoff ähnlich wie Kraftstoffe als speicherbarer Energieträger wichtige Funktionen im zukünftigen Energiesystem übernehmen. Dafür wäre allerdings der Aufbau einer entsprechenden Wasserstoffinfrastruktur erforderlich. Die Anforderung, der Atmosphäre CO₂ zu entziehen, kann daher völlig andere Wege der Bioenergienutzung anregen. So zeigen Modellrechnungen beispielsweise, dass ohne CCS fast die gesamte Bioenergie zur Kraftstoffproduktion genutzt wird, während mit CCS ein Anteil von etwa 40 Prozent der Strom- und Wasserstoffherzeugung dient.¹⁸²

Während Wasserstoff im Energiesystem bisher kaum eine Rolle spielt, wird er in der chemischen Industrie bereits vielfältig eingesetzt. Die größte Anwendung von Wasserstoff heute ist die Herstellung von Ammoniak, in Anlagengrößen von über 1.000 Tonnen pro Tag mit einer Produktkapazität von 100 Millionen Tonnen Stickstoff pro Jahr vorwiegend zur Herstellung von Düngemitteln.¹⁸³

Die BECCS-Prozesse lassen sich anhand der CO₂-Abscheidung in vier Technologien einteilen:

1. CO₂-Abtrennung nach der Verbrennung von Biomasse im Kraftwerk oder einer Industrieanlage (Post-Processing), gefolgt von Kompression, Transport und Speicherung. In Verbrennungsgasen liegt CO₂ typischerweise in Gehalten von 10 bis 20 Prozent vor. Dessen Abtrennung mit Reinheitsgraden von bis zu 99 Prozent gelingt mit chemischen Wäschen, die heute Stand der Technik sind.
2. Biomasseverbrennung mit Sauerstoff (Oxyfuel Combustion) im Kraftwerk oder einer Industrieanlage, wobei CO₂ und Wasser entstehen, die sich leicht voneinander trennen lassen. Dem steht allerdings der vermehrte Aufwand (Sauerstoffherstellung, Moderation der hohen Verbrennungstemperaturen mit Kaltgas etc.) in der Verbrennungstechnologie gegenüber. Die Technologie wird in Pilotprojekten getestet.

¹⁸² Klein et al. 2014.

¹⁸³ In integrierten Prozessen der Harnstoffproduktion werden auch große Mengen an CO₂ gebunden, im Verlauf weniger Jahre aber von den landwirtschaftlichen Flächen wieder als CO₂ freigesetzt.

3. CO₂-Abtrennung aus einem Synthesegas, das durch Vergasung (Teiloxidation) von Biomasse erzeugt wird. Der Vorteil dieses sogenannten Pre-Processing gegenüber der CO₂-Abtrennung nach der Verbrennung ist die höhere Konzentration des CO₂ im Synthesegas, was die Abscheidung erleichtert. Hier kommen physikalische Gaswäschen mit organischen Lösungsmitteln wie Methanol, Ethern oder Aminen zum Einsatz. Insbesondere bei hohen Drücken werden hohe Abscheidegrade von bis zu 95 Prozent erreicht. Die Technologie ist Stand der Technik und kommerziell eingeführt. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens ist, dass damit verschiedene Produkte erzeugt werden können: Das Synthesegas kann in einem IGCC-Kraftwerk¹⁸⁴ als Brennstoff eingesetzt oder zur Herstellung von Flüssigkraftstoffen oder chemischen Grundprodukten genutzt werden. Im letzten Fall kann nur der Teil des Kohlenstoffs aus der Biomasse als CO₂ abgetrennt werden, der nicht in den Syntheseprodukten chemisch gespeichert wird. Bei Einsatz im IGCC-Kraftwerk hingegen könnte auch das bei der Verbrennung entstehende CO₂ abgetrennt werden. Auch BECCS-Verfahren zur Wasserstoff-erzeugung nutzen die CO₂-Abtrennung aus einem Gas, etwa bei der Dampfreformierung¹⁸⁵ von (Bio)Methan zu Wasserstoff.
4. CO₂-Entnahme bei Fermentationsprozessen, etwa bei der Herstellung von Ethanol. Bei der Fermentation wird etwa die Hälfte des Kohlenstoffs aus den zu vergärenden Zuckern in CO₂ umgewandelt. Dieses kann mit geringem zusätzlichem Aufwand aus dem Prozess abgeführt und eingelagert werden. Bereits heute wird es in vielen Fällen aufgrund seiner Reinheit als technisches Kohlendioxid gewonnen.

Die ersten drei Optionen entsprechen den „klassischen“ CCS-Technologien, wie sie für die energetische Nutzung von fossilen Rohstoffen verwendet werden. Bei der vierten Option unterscheidet sich zwar der Prozess der CO₂-Entstehung und -Abscheidung; der Transport und die Einlagerung entsprechen aber der „klassischen“ CCS-Technologie.

In globalen Klimaschutzszenarien werden meist BECCS-Technologien als einzige CO₂-Entnahmeoption berücksichtigt, obwohl eine Vielzahl von weiteren Verfahren erforscht wird. Der Grund: BECCS war die erste CDR-Technologie, für die genügend fundierte Daten zu Potenzialen und Kosten vorlagen. Zudem konzentrierten sich viele Modelle zunächst auf das Energiesystem. In den IAMs erweist sich BECCS daher als Schlüsseltechnologie, sowohl in 2-Grad- als auch in 1,5-Grad-Szenarien.¹⁸⁶ In den letzten Jahren werden IAMs jedoch verstärkt mit Landnutzungsmodellen gekoppelt, sodass beispielsweise auch Aufforstung abgebildet werden kann. Außerdem hat die Entwicklung anderer Verfahren wie Direct Air Capture große Fortschritte gemacht, sodass auch diese Technologien zunehmend in den Modellen abgebildet werden können.

Prinzipiell könnten die in den Szenarien durch BECCS realisierten negativen Emissionen auch durch andere CDR-Technologien erzeugt werden. Da sich die meisten CDR-Technologien noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden, sind Potenziale, Umweltauswirkungen und Kosten teilweise noch sehr unsicher. Die zukünftige Entwicklung und weitere Erforschung der Verfahren muss zeigen, welche Technologien

¹⁸⁴ Gas- und Dampfkraftwerk mit integrierter Kohlevergasung.

¹⁸⁵ Bei der Dampfreformierung (Steam Reforming) wird Methan mit Wasserdampf in Wasserstoff und Kohlenmonoxid umgewandelt. In einem weiteren Schritt, der Wassergas-Shift-Reaktion, reagiert das Kohlenmonoxid mit Wasserdampf zu zusätzlichem Wasserstoff und CO₂, die dann getrennt werden.

¹⁸⁶ Fridahl 2017.

sich als am vorteilhaftesten erweisen. Dies kann sich je nach lokalen Gegebenheiten und politischen Präferenzen unterscheiden, sodass in der Praxis ein Mix aus verschiedenen CDR-Technologien wahrscheinlich ist.

4.5 Akzeptanz von BECCS

Eine wichtige Rolle für die Energiewende wird BECCS nur spielen können, wenn die Technologie von großen Teilen der Bevölkerung und gesellschaftlichen Akteuren befürwortet oder zumindest toleriert wird. Die wenigen existierenden Untersuchungen deuten darauf hin, dass fehlende Akzeptanz ein mögliches Hemmnis für den Einsatz von BECCS darstellen könnte.¹⁸⁷ Ausgangspunkt für Akzeptanzbetrachtungen von BECCS stellen insbesondere Ergebnisse von Akzeptanzstudien und Erfahrungen in der Praxis zur Bioenergienutzung einerseits sowie zur CCS-Technologie andererseits dar. Dementsprechend ist es sinnvoll, für BECCS zwischen dem Fokus der Erzeugung (Bioenergie) und der Nutzung (Abscheidung und insbesondere Speicherung von CO₂) zu unterscheiden. Zudem sind zur Präzisierung der Akzeptanzbetrachtung drei verschiedene Ebenen zu unterscheiden (Abbildung 13):¹⁸⁸

- **Lokale Akzeptanz** (Community Acceptance) umfasst die Wahrnehmung und Reaktion vor Ort auf die jeweilige Technologie und deren mögliche Auswirkungen. Sie steht in engem Zusammenhang mit Verfahrensgerechtigkeit und Verteilungsgerechtigkeit¹⁸⁹ bei Planungs- und Entscheidungsprozessen auf lokaler Ebene.
- **Marktakzeptanz** (Market Acceptance) stellt die Ebene der Investoren und Konsumenten sowie die intra-organisationale Perspektive dar. Eine Frage könnte etwa sein, inwieweit sich Firmen in ihrer Unternehmensstrategie auf erneuerbare Energien einstellen. Deutlichster Indikator ist jeweils die Verbreitung einer Technologie.
- **Sozialpolitische Akzeptanz** (Socio-Political Acceptance) bezieht sich auf das gesellschaftliche Klima bezüglich einer Technologie und ist beeinflusst von der breiten Öffentlichkeit, Politikern sowie von weiteren Schlüsselakteuren (zum Beispiel Medien).

187 Buck 2016.

188 Wüstenhagen et al. 2007.

189 Das Kriterium Verteilungsgerechtigkeit ist ein Maß für die subjektive Balance von materiellen und immateriellen Kosten und Nutzen. Es spielt also nicht nur finanzieller Nutzen eine Rolle, sondern durchaus auch andere, wie Lebensgefühl, Stolz oder Identifikation. Aufseiten der wahrgenommenen Kosten stehen Aspekte wie Landschaftsveränderung und Abnahme von Lebensqualität. Die Bewertungen sind hier auch subjektiv zu verstehen und meist auf die lokale beziehungsweise regionale Ebene bezogen.

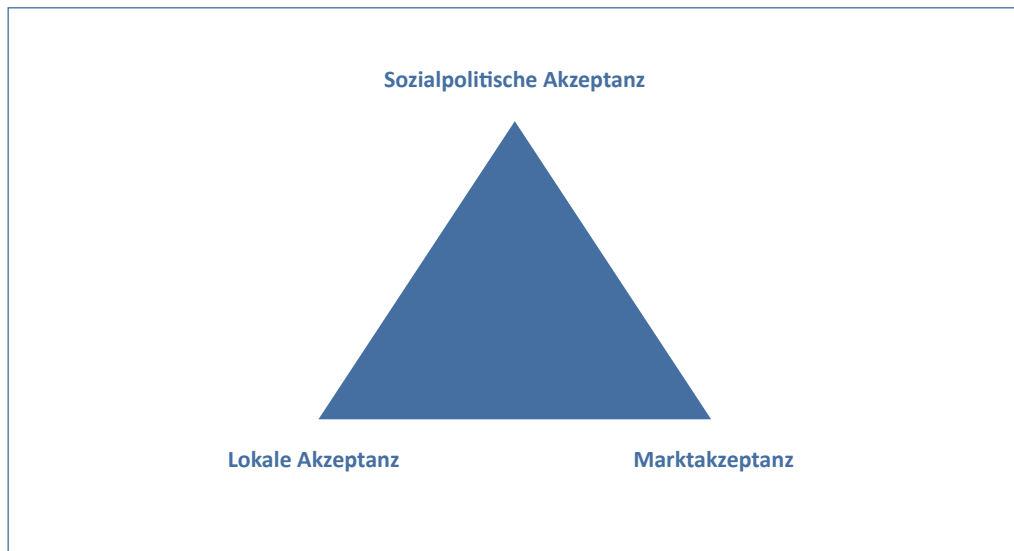


Abbildung 13: Betrachtungsebenen der Akzeptanz (eigene Darstellung nach Wüstenhagen et al. 2007, S. 2.684)

Diese Differenzierung der verschiedenen Betrachtungsebenen hinsichtlich der Akzeptanzverteilung in einer Gesellschaft ist wichtig, um Daten oder Aussagen den entsprechenden Geltungsbereichen zuzuordnen und korrespondierende Instrumente entwickeln zu können. Übergeordnet werden vier wesentliche Faktoren als für die Akzeptanz von Energieinfrastrukturen maßgeblich erachtet, welche dementsprechend auch für BECCS von Bedeutung sind: die Einsicht in die Notwendigkeit, ein wahrgenommener persönlicher Nutzen, erlebte Selbstwirksamkeit sowie emotionale Identifikation.¹⁹⁰ Auch qualitative Merkmale von Akteursbeziehungen wie Vertrauen sowie der Einfluss des Gerechtigkeitserlebens innerhalb der Planungsverfahren haben einen großen Einfluss auf die Akzeptanz.¹⁹¹

Die Gründe für eine eingeschränkte Akzeptanz der Bioenergienutzung sind vielfältig und unterscheiden sich zwischen verschiedenen Akteursgruppen, beispielsweise der allgemeinen Öffentlichkeit, Anwohnenden, Landwirten oder Naturschutzverbänden. Neben der Sorge im öffentlichen Diskurs, dass durch die Flächenkonkurrenz die Nahrungsmittelpreise steigen („Tank-Teller-Diskussion“)¹⁹², befürchten Umweltorganisationen, dass für die Kultivierung von Bioenergiepflanzen Wälder abgeholzt werden¹⁹³ und der Anbau von Monokulturen erfolgen kann, der mit naturbezogenen Nachteilen wie dem Einsatz von Gentechnik, Pestiziden und Düngemitteln oder der Einschränkung der Artenvielfalt verbunden sein kann.

Insbesondere Biogas wird weniger stark befürwortet als andere erneuerbare Energien. Eine repräsentative Umfrage aus dem Jahr 2017 zeigt, dass nur 38 Prozent der Bevölkerung einer Biogasanlage in der Nähe des eigenen Wohnorts zustimmen. Die Zustimmung für Windenergieanlagen (57 Prozent) und Photovoltaikanlagen (72 Prozent) ist deutlich höher; Erneuerbare-Energie-Anlagen allgemein kamen auf 65 Prozent Zustimmung.¹⁹⁴ Differenziert nach dem Kriterium „Befragte mit entsprechenden Anlagen in der eigenen Nachbarschaft“ verschiebt sich die Zustimmung leicht nach oben:

¹⁹⁰ Renn 2014.

¹⁹¹ Zoellner et al. 2011.

¹⁹² Radics 2015, S. 8778.

¹⁹³ Fridahl 2017, S. 97.

¹⁹⁴ AEE 2017.

So kommen Biogasanlagen auf 51 Prozent, Windenergieanlagen auf 69 Prozent und Solarparks auf 94 Prozent Zustimmung. Diese Ergebnisse verdeutlichen die Relevanz der Untersuchung von konkreten Erfahrungswerten mit Akzeptanzobjekten, da die Betrachtung sonst auf Ebene einer hypothetischen Bewertung verbleibt und entsprechend fehleranfälliger ist.

Anwohnerinnen und Anwohner befürchten beim Betrieb von Biogasanlagen insbesondere ein erhöhtes Verkehrsaufkommen durch Biomassetransporte, welche zu Belästigungen durch Lärm und Schmutz führen können. Auch Sorge vor Geruchsbelästigungen sowie mögliche Störfälle auf Ebene des Anlagebetriebs können zu einer Ablehnung von Bioenergieanlagen führen.¹⁹⁵ Außerdem werden bedingt durch die Flächenkonkurrenzen steigende Pachtpreise und eine Verknappung von Flächen für die Ausbringung von Gärresten befürchtet.¹⁹⁶

Für weitere Bioenergietechnologien müssen die Akzeptanz und deren Einflussfaktoren ebenfalls spezifisch betrachtet werden. Entscheidungen für oder gegen die Anschaffung einer Holzpellettheizung sind vor allem von der subjektiven Bewertung der Leistung, Funktionssicherheit und (Bedienungs) Anforderungen sowie den Kosten des konkreten Heizsystems abhängig. Daneben spielen allgemeine Einstellungen und Intentionen eine Rolle, etwa die subjektive Bedeutung, die den Faktoren Umweltfreundlichkeit und Betriebskosten einer Heizung beigemessen wird. Zudem haben gewohnheitsmäßige Entscheidungsabläufe einen signifikanten Einfluss. Um diese Routinen bei der Heizungswahl zu adressieren, ist die verstärkte Bewusstmachung und Kommunikation von potenziellen und bisher weniger bekannten Alternativen ein möglicher Ansatz.¹⁹⁷

Bei der Nutzung von modernen Holzöfen zeigte sich, dass die Zufriedenheit mit den Öfen von ökonomischen Aspekten, Heizleistung, Zeit und Aufwand zur Bedienung des Ofens, ökologischen Aspekten des Heizens mit Holz und subjektiven Normen beeinflusst wird. Wenige Nutzerinnen und Nutzer berichten von Problemen mit der Verfügbarkeit oder Beschaffung von Brennholz.¹⁹⁸

Akzeptanzprobleme (Widerstände wegen fehlenden Nachbarschaftsschutzes) ergeben sich teilweise infolge steigender Anzahl von Einzelraumfeuerungen für Festbrennstoffe. Diese führt zu einer zunehmenden Belastung mit Luftschadstoffen aufgrund des steigenden Holzeinsatzes (Kleinfeuerungsanlagen sind signifikante Quellen für polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, Dioxine, Feinstaub).¹⁹⁹

Untersuchungen zur Akzeptanz von CCS zeigen, dass CCS in Deutschland eher als Risikotechnologie wahrgenommen und daher äußerst kritisch gesehen wird.²⁰⁰ Lokal organisierte Widerstände haben bereits dazu geführt, dass geplante Vorhaben gestoppt wurden.²⁰¹ Gleichwohl zeigen die vorliegenden Studien, dass insgesamt wenig konkretes Wissen über die Technologie und deren Bedeutung für die Energiewende in der Bevölkerung existiert. Ebenso bestehen kaum praktische Erfahrungen, da es

195 Radics 2015, S. 8780.

196 Griesen 2010.

197 Söpha/Klößner 2011.

198 Nyruud et al. 2008.

199 Ewens 2013.

200 Pietzner/Schumann 2012.

201 Dütschke et al. 2015.

abgesehen von wenigen Forschungsanlagen bisher keine Anlagen gibt. Dementsprechend groß ist die Unsicherheit zur subjektiven Technologiebewertung. Folglich beziehen sich die Bewertungen insbesondere des Risikos stärker auf Erwartungen und Befürchtungen als auf tatsächliche Erfahrungen und Betroffenheit.

Von den Prozessschritten CO₂-Abscheidung, -Transport und -Speicherung ist es insbesondere die Speicherung, die die Ablehnung hervorruft.²⁰² Hierbei spielen der Eingriff in die Erde und dessen mögliche Auswirkungen verbunden mit den als fehlend wahrgenommenen Kontrollmöglichkeiten eine wesentliche Rolle.

In einer japanischen Studie wurden Risiken und Leckagen, die Wirksamkeit von CCS, gesellschaftliche Verantwortung zur CO₂-Reduktion und der Verbrauch fossiler Brennstoffe als wesentliche Akzeptanzfaktoren identifiziert. Der Faktor „Verstehen der Wirksamkeit von CCS“ hatte den größten Einfluss auf die allgemeine Akzeptanz von CCS.²⁰³

In einer amerikanischen Studie befürworteten über 80 Prozent der Befragten die allgemeine Verwendung der CCS-Technologie. Jedoch änderten 20 Prozent dieser anfänglichen Unterstützer ihre Meinung, wenn eine CCS-Einrichtung in der Nähe ihrer Gemeinde vorgeschlagen wurde.²⁰⁴ Die Weltanschauungen der Befragten, ihre Ansichten über die lokalen wirtschaftlichen Vorteile, die CCS erzeugen wird, und Bedenken bezüglich der Sicherheit hatten den größten Einfluss auf die Akzeptanz von Einrichtungen in der Nähe.²⁰⁵

Hinsichtlich der Bereitstellung von Informationen zeigen verschiedene Studien, dass sich Vertrauen und Integrität der Quelle von Informationen ebenfalls auf die Akzeptanz von CCS auswirken.²⁰⁶ Es scheint eine Interaktion zwischen Vertrauen und wahrgenommenen Risiken und Vorteilen zu geben: Vertrauen erhöht den erwarteten Nutzen und verringert Bedenken hinsichtlich der Risiken von CCS.²⁰⁷

Die Ergebnisse zur Akzeptanz von CCS lassen zunächst vermuten, dass BECCS wegen der Notwendigkeit der CO₂-Speicherung abgelehnt wird. Dennoch gibt es Hinweise darauf, dass die Akzeptanz für BECCS höher ist als für CCS mit fossilen Brennstoffen.²⁰⁸ Andererseits sehen Umweltorganisationen das Risiko, dass CCS als Argument genutzt wird, um fossile Brennstoffe weiterhin zu nutzen.²⁰⁹ BECCS wird dabei als riskante Geoen지니어ing-Technologie angesehen, die von der wirklichen Lösung des Klimaproblems – der Emissionsreduktion – ablenkt.²¹⁰ Als ein Nachteil für die Akzeptanz von BECCS könnte sich auch erweisen, dass CCS eher für große Anlagen geeignet ist und Bioenergie daher aus kleineren Strukturen in solche umgeleitet werden müsste. Kleine Anlagen werden von der Mehrheit der Bevölkerung aber gegenüber großen Anlagen bevorzugt, da sie weniger industriell wirken und bei diesen zudem oftmals die regionale Identifikation größer ist.²¹¹

202 Dütschke et al. 2016.

203 Itaoka et al. 2009.

204 Akzeptanz für die Technologie allgemein vorhanden, aber nicht im eigenen Wohnumfeld.

205 Krause et al. 2014.

206 Terwel et al. 2009.

207 Yang et al. 2016.

208 Fridahl 2017, S. 98; Dütschke 2016.

209 Fridahl 2017, S. 91.

210 Ernsting/Munnion 2015.

211 Ohlhorst 2009; Wüste 2012.

In der breiten Bevölkerung ist BECCS noch relativ unbekannt. Eine notwendige Grundvoraussetzung für eine gesellschaftliche Diskussion und elaborierte Meinungsbildung ist also zunächst eine verstärkte themenbezogene Wissensvermittlung. Dass mehr Informationen alleine nicht automatisch zu mehr Zustimmung führen, zeigen sowohl Erfahrungen aus dem Bereich der erneuerbaren Energien als auch Studien bezogen auf BECCS: In einer Umfrage haben Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus sechs europäischen Ländern die BECCS-Technologie kritischer bewertet, nachdem sie einen Informationsfilm gesehen und in Gruppen darüber diskutiert hatten. Sie äußerten Bedenken, ob die CO₂-Speicherung sicher sei, und vertrauten nicht auf Informationen, die durch Regierung oder Industrie bereitgestellt wurden.²¹² Die Autoren der Studie vermuten allerdings, dass die kritischere Haltung von negativen Assoziationen zu CCS allgemein herrührt und sich nicht spezifisch auf BECCS bezieht. Auch eine Studie in Deutschland zeigte, dass die Akzeptanz von CCS und großskaliger Aufforstung sank, nachdem die Teilnehmenden mehr Informationen erhalten hatten.²¹³ Gleichwohl bilden neutrale und wissenschaftlich fundierte Informationen die unbedingt notwendige Grundlage für einen gesellschaftlichen Diskurs und eine informierte Meinungsbildung. Im Zusammenhang mit der Frage nach der Rezeption und Wirkungsweisen von Informations-/Wissensvermittlung ist die Bedeutung des Faktors Vertrauen hervorzuheben. Das Ausmaß an Vertrauen und Glaubwürdigkeit, welches dem Informationsgeber entgegengebracht beziehungsweise zugeschrieben wird, übt eine Art Filterfunktion aus. Ob und wie die vermittelten Wissensinhalte aufgenommen und verarbeitet werden, entscheidet sich somit nicht zuletzt daran, von wem die Informationen kommen und welche Ziele und Absichten diesem Akteur zugeschrieben werden.²¹⁴ So werden etwa Projektentwickler und am Projekt beteiligte (und von diesem ökonomisch profitierende) Firmen als wenig vertrauenswürdige Quelle für Informationen zu CCS betrachtet.²¹⁵

Die Ergebnisse einer Studie aus der Schweiz zu Präferenzen der Öffentlichkeit hinsichtlich Eigenschaften der drei Elemente von CCS (Abscheidung, Transport und Speicherung) wiederum zeigten die Bedeutung der lokalen Nähe. Die Befragten äußerten allgemeine Akzeptanz für die Technologie, lehnen jedoch sowohl Leitungen als auch CO₂-Lager im eigenen Wohnumfeld ab. Dieser Effekt verschwindet jedoch, wenn das CO₂ aus einer Biogasanlage stammt (BECCS).²¹⁶

Die vorliegenden Ergebnisse verdeutlichen, dass zunächst Wissensvermittlungs- und Kommunikationsanstrengungen notwendig sind, um die Basis für eine Meinungsbildung zu schaffen. Hilfreich wären reale Erfahrungswerte, damit die Diskussion nicht auf hypothetischer Ebene verbleibt. Es bedarf eines gesellschaftlichen Dialogs, in welchem BECCS nicht separat, sondern im Zusammenspiel mit anderen Energiesystemkomponenten und den jeweiligen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen diskutiert wird. Nur so kann die Bevölkerung die Technologie fundiert bewerten.

212 Upham/Roberts 2011.

213 Braun et al. 2017.

214 Schmidt et al. 2016.

215 Oltra et al. 2012.

216 Wallquist et al. 2012.

Für die lokale Akzeptanz ist neben den technologiespezifischen Charakteristika die Größe der Anlagen, der Flächenanspruch und zusätzliche Infrastruktur (zum Beispiel für den CO₂-Transport) von Bedeutung. Diese beeinflussen maßgeblich das Ausmaß der Betroffenheit, was wiederum das übergeordnete gesellschaftliche Klima (soziopolitische Akzeptanz) beeinflusst. Neben gesellschaftlicher und lokaler Akzeptanz muss auch die Marktakzeptanz berücksichtigt werden: Die Entscheidungen von Marktakteuren hängen vor allem von den rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ab. Daher sollte geprüft werden, welche Formen der finanziellen Teilhabe existieren oder entwickelt werden können, um Akzeptanz und Akteursvielfalt im Markt zu erhöhen.

4.6 BECCS im Kontext der deutschen und europäischen Energie- und Klimapolitik

Eine Integration von BECCS in die EU-Klimapolitik würde eine Vielzahl regulatorischer Fragen aufwerfen. Im Wesentlichen betrifft dies drei Bereiche:

- Behandlung von Bioenergie
- Behandlung von CCS
- Anrechnung der negativen Emissionen

Hinsichtlich der Behandlung von Bioenergie gilt zu klären, welchen Nachhaltigkeitskriterien sie mindestens genügen müsste, um eingesetzt werden zu dürfen, und in welchem Ausmaß dabei auf Importe zurückgegriffen werden darf oder soll. Dies ist jedoch unabhängig davon, ob die Bioenergie mit oder ohne CCS genutzt wird. Die entsprechenden Herausforderungen und Handlungsbedarfe, die mit der Bereitstellung der Biomasse zusammenhängen, werden in Kapitel 2.3 diskutiert.

Bei CCS gilt es – auch unabhängig von der Kombination mit Bioenergie –, effektive Fördermechanismen für Pilotanlagen und den späteren Ausbau der Transport- und Speicherkapazitäten zu entwickeln, etwa im Rahmen des EU-Energieinfrastrukturprogramms (Projects of Common Interest, PCI).²¹⁷

Um negative Emissionen anrechnen zu können, müsste ein möglichst exaktes Accounting-System für generierte negative Emissionen entwickelt werden, welches die Spezifika der jeweils eingesetzten Biomasse und Umwandlungsverfahren angemessen berücksichtigt. Zudem stellt sich die Frage, ob und wie negative Emissionen bestehenden klimapolitischen Rechtsakten zugeordnet werden können – etwa der EU ETS-Richtlinie und der Effort-Sharing-Verordnung²¹⁸ für Nicht-EU-ETS-Sektoren. Darüber hinaus gilt es zu klären, ob sich die EU ein spezifisches Negativemissionsziel setzen soll. Separate Ziele für CO₂-Vermeidung und negative Emissionen, die in der Summe zu Treibhausgasneutralität führen (zum Beispiel 95 Prozent/5 Prozent), könnten Bedenken entgegenwirken, dass die Entwicklung von CO₂-Entnahmetechnologien zu einem Nachlassen der Bemühungen bei der CO₂-Vermeidung führen wird.²¹⁹

²¹⁷ Hier wären viele Überlegungen zu CCS für die Industrie (siehe acatech 2018) auf BECCS übertragbar.

²¹⁸ Die Effort-Sharing-Verordnung legt THG-Minderungsziele fest für die Sektoren, die nicht in das EU ETS integriert sind.

²¹⁹ Geden et al. 2018.

4.7 Herausforderungen und Handlungsbedarf

Obwohl Klimaschutzszenarien zeigen, dass der Atmosphäre langfristig wieder CO₂ entzogen werden muss, ist das Thema CO₂-Entnahmetechnologien in der politischen und gesellschaftlichen Diskussion noch nicht angekommen. Konsensfähige Strategien zum Erreichen der erforderlichen Treibhausneutralität können aber nur entwickelt werden, wenn die Bedeutung der CO₂-Entnahme und die Vor- und Nachteile der verschiedenen CO₂-Entnahmetechnologien in Gesellschaft und Politik diskutiert werden. Als Grundlage für die Diskussion bedarf es sachlich fundierter Informationen zu den Chancen und Risiken der verschiedenen CO₂-Entnahmetechnologien. Um die Technologien in zukünftigen Energieszenarien abzubilden und so plausible Mengengerüste aufzustellen, wie unvermeidbare Emissionen durch CO₂-Entnahme ausgeglichen werden können, sind bessere Daten zu Potenzialen, Flächenbedarf sowie Energie- und Kohlenstoffbilanz, Kosten und Umweltauswirkungen erforderlich. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Es ist unsicher, in welchem Ausmaß BECCS zur CO₂-Entnahme beitragen wird. Dies hängt zum einen von der Entwicklung konkurrierender CO₂-Entnahmetechnologien ab. Zum anderen wird sich erst in der gesellschaftlichen Debatte herauskristalisieren, welche CO₂-Entnahmetechnologien bevorzugt eingesetzt werden sollen. Wenn BECCS ab 2050 in großem Maßstab einsatzbereit sein soll, muss allerdings die kommerzielle Entwicklung zeitnah beginnen. Zwischen den Jahren 2020 und 2030 müssten erste BECCS-Anlagen kommerziell in Betrieb gehen. Zu den derzeitigen Rahmenbedingungen gibt es jedoch keine Anreize, die Technologie zu entwickeln.

Vor diesem Hintergrund ist es ein Ziel, robuste Technologiepfade der Bioenergienutzung zu finden, die sowohl mit als auch ohne BECCS einen sinnvollen Beitrag zum Energiesystem leisten und es ermöglichen, später die BECCS-Technologie zu nutzen.

Die Menge der insgesamt eingesetzten Bioenergie bleibt in globalen Klimaschutzszenarien ungefähr gleich, unabhängig davon, ob Bioenergie mit oder ohne CCS verwendet wird. Denn wenn die Möglichkeit der CO₂-Entnahme nicht zur Verfügung steht, steigt der Druck, möglichst bald große Mengen an fossilen Energieträgern durch Bioenergie zu ersetzen. Es entsteht durch BECCS also kein zusätzlicher Bedarf an Bioenergie. Die in Kapitel 2 beschriebenen Herausforderungen im Hinblick auf die nachhaltige Bereitstellung von Biomasse für die energetische Nutzung sind unabhängig davon, ob Biomasse mit oder ohne CCS eingesetzt wird. Auch bei den alternativen CO₂-Entnahmetechnologien Biokohle (sofern diese nicht aus Abfall- und Reststoffen gewonnen wird) und Aufforstung werden große Landflächen für den Anbau von Biomasse benötigt. Sie gehen daher mit ähnlichen Trade-offs in Bezug auf Nahrungsmittelsicherheit und Biodiversität einher wie Bioenergie.

Soll BECCS zum Einsatz kommen, muss rechtzeitig eine Infrastruktur für CO₂-Transport und Einlagerung aufgebaut werden. Diese Infrastruktur wird unabhängig von BECCS auch für die Einlagerung von prozessbedingten CO₂-Emissionen aus der Industrie benötigt. Auch Direct Air Capture – eine der wenigen CO₂-Entnahmetechnologien, die nicht um Anbauflächen für Biomasse konkurrieren – erfordert diese Infrastruktur.

Zudem müssen rechtliche und ökonomische Rahmenbedingungen entwickelt werden, die CO₂-Entnahmetechnologien anreizen können und die Lasten und Nutzen der Technologie fair verteilen.

Auf politischer Ebene erweitert die Möglichkeit der CO₂-Entnahme den Lösungsraum. So können zumindest theoretisch einzelne Sektoren durch CO₂-Entnahme die Emissionen anderer Sektoren ausgleichen. Dies birgt die Gefahr, dass einzelne Sektoren versuchen, in hohem Maße „unvermeidbare Emissionen“ für sich zu beanspruchen, und anderen Sektoren die Verantwortung zuschieben, diese auszugleichen. Ähnliche Verteilungskonflikte können sich beispielsweise auch bei der Aufteilung der Klimaschutzaufgaben auf verschiedene EU-Länder ergeben. Ein Fokus auf Treibhausgasneutralität, bei dem das Ziel ist, die eigenen unvermeidbaren Emissionen durch negative Emissionen auszugleichen, könnte zur Lösung solcher Konflikte beitragen.²²⁰

220 Geden et al. 2018.

5 Bewertungsrahmen für Bioenergieoptionen

In den vorigen Kapiteln wurden die Anforderungen des Energiesystems und des Klimaschutzes an eine künftige Bioenergiestrategie umrissen. Daraus leiten sich wesentliche Aspekte ab, die für die künftige Nutzung der Biomasse zur Energiegewinnung berücksichtigt werden sollten. Die Notwendigkeit, verschiedene Dimensionen der Nachhaltigkeit zu berücksichtigen, wird auch auf internationaler Ebene zunehmend betont, unter anderem im Rahmen der Initiative Global Bioenergy Partnership (GBEP) oder durch die Sustainable Development Goals (SDGs) der Vereinten Nationen.²²¹ Im Folgenden werden diese Aspekte näher beschrieben und ihre Einbindung in eine zukünftige Bioenergiestrategie dargelegt.

Angesichts der begrenzten Potenziale und ökologischen Risiken, insbesondere verbunden mit der Anbaubiomasse, ist eine Erschließung von zusätzlicher Biomasse für die energetische Nutzung voraussichtlich keine nachhaltige Lösung. Um die Anforderungen des zukünftigen Energiesystems und des Klimaschutzes zu erfüllen, sollte daher vorrangig eine Umnutzung der bereits energetisch genutzten Biomassemenge erfolgen.

Der Umbau der aktuellen Nutzungssysteme sollte dabei unter Berücksichtigung der zukünftigen Ansprüche an die Art der Rohstoffe sowie Rohstoffqualitäten und der sich wandelnden Nachfrage nach Energiedienstleistungen bis 2050 erfolgen. Das heißt, Bioenergie sollte so eingesetzt werden, dass der Nutzen für das Gesamtsystem möglichst groß ist. Als gut speicherbarer und sehr vielseitig einsetzbarer Energieträger sollte Bioenergie daher diejenigen Funktionen im Energiesystem übernehmen, die durch andere erneuerbare Energien nicht oder nur zu vergleichsweise höheren Gesamtkosten erfüllt werden können. Die zu füllenden „Lücken“ im Energiesystem sind vielfältig: Solange es keine konkurrenzfähigen Langzeitspeicher gibt, spielt Bioenergie eine wichtige Rolle, um mittel- bis langfristige Schwankungen aus der Einspeisung von Windkraft- und Photovoltaikanlagen auszugleichen und damit eine sichere Stromerzeugung zu ermöglichen. Mit der zunehmenden Verknüpfung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr (Sektorkopplung) kann Bioenergie zur Stabilisierung der gesamten Energieversorgung beitragen, da sie in allen Sektoren flexibel einsetzbar ist. In der längerfristigen Perspektive bis 2050 gewinnen der Einsatz von Bioenergie in Hochtemperaturprozessen in der Industrie sowie kohlenstoffbasierte Energieträger für Schiffe, Flugzeuge und Schwerlastverkehr an Bedeutung. Die Erwartungen an die Bioenergie verändern sich dabei ständig abhängig von der Entwicklung des restlichen Energiesystems, beispielsweise der Verbreitung der Elektromobilität sowie der Entwicklung von Speichern und Verfahren, um Brenn- und Kraftstoffe aus Wind- und Photovoltaikstrom zu erzeugen (Power-to-Gas, Power-to-Liquid).

²²¹ Bei den Sustainable Development Goals könnte die Bioenergienutzung beispielsweise Auswirkungen haben im Hinblick auf die Ziele „Ernährung sichern“, „Nachhaltige und moderne Energie für alle“, „Nachhaltiges Wirtschaftswachstum und menschenwürdige Arbeit für alle“ sowie „Landökosysteme schützen“.

Um die Energieversorgung auf nahezu 100 Prozent erneuerbare Energien umzustellen und nahezu treibhausgasneutral zu gestalten und die Voraussetzungen einer CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre zu schaffen, muss das Energiesystem grundlegend umstrukturiert werden. Für die Bioenergie bedeutet das, dass aktuelle Nutzungen und Technologien in angepasste oder neue Nutzungskonzepte überführt werden müssen. Die Bioenergie sollte dabei einerseits weitere erneuerbare Energien gut ergänzen, andererseits die Option für negative Emissionen bieten, um der Atmosphäre CO₂ zu entziehen. Klimaschutz- und Energieszenarien zeigen, wie das technisch gelingen könnte und welche Kosten in etwa zu erwarten sind. Der dafür erforderliche gesellschaftliche Transformationsprozess – vom Verhalten verschiedener Akteursgruppen bis hin zu konkreten Marktmodellen – ist jedoch bisher nicht ausreichend verstanden.

Die im Folgenden dargestellten Überlegungen für eine langfristige Bioenergiestrategie sollen diesen Transformationsprozess unterstützen. Um eine umfassende Bewertungsgrundlage für eine Biomassestrategie zu schaffen, sollten alle Bioenergie-Technologieoptionen umfassend und transparent untersucht werden. Dafür wurde in der Arbeitsgruppe ein Bewertungsinstrument entwickelt. Alle relevanten Faktoren und Fragestellungen im Bereich der Ökonomie, Ökologie und Technik, aber auch die Einbindung der Bioenergie in das Gesamtsystem sowie ihre sozialen und gesellschaftlichen Implikationen finden dabei Berücksichtigung. Als wichtiges Kriterium fließt auch ihr Potenzial zur CO₂-Abscheidung in die Bewertung ein: Es wird dargelegt, ob und inwieweit sich eine Technologie für eine Kombination mit einer CO₂-Abscheidung eignet.

Dieser Ansatz bietet verschiedene Vorteile: Eine umfassende Bewertung verschiedener Technologieoptionen könnte ständiges Nachsteuern bei der Bioenergiepolitik vermindern und dadurch die Planungssicherheit für Entwickler, Anbieter und Betreiber von Bioenergie-Technologien erhöhen.

Im Rahmen dieser Untersuchung war es nicht möglich, alle Bioenergie-Technologien zu bewerten. Daher wurden beispielhaft Technologien für Holz und Biogas bewertet, die heute in signifikantem Umfang eingesetzt werden oder von denen erwartet wird, dass sie im zukünftigen Energiesystem eine große Rolle spielen werden.

Die Arbeitsweise der Arbeitsgruppe stellte sich zusammenfassend wie folgt dar und wird im Folgenden im Detail beschrieben:

1. Definition von **Kriterien** zur Bewertung der Bioenergie-Technologien. Für jedes Kriterium wurden ein bis zwei Indikatoren identifiziert, die anzeigen, inwieweit ein Kriterium erfüllt ist.
2. Erstellen einer **Bewertungsskala** mit fünf Stufen (Ampelschema von Dunkelgrün bis Rot) für jeden Indikator.
3. Definition von **Bioenergie-Technologien**, die relevante **Nutzungspfade für 2018 und 2050** darstellen. Bei der Auswahl wurde berücksichtigt, welche Technologien derzeit in Deutschland vorrangig eingesetzt werden und welche in Zukunft eine wichtige Rolle spielen könnten. Für die Technologien 2018 wurde dabei der Status quo zugrunde gelegt (nicht die beste heute mögliche Technologie). Für die Technologien 2050 wurden Best-Practice-Beispielanlagen definiert.

4. Definition von **Referenzsystemen**, das heißt Technologien, die alternativ zur Bioenergie eingesetzt werden könnten, um die gleichen Energiedienstleistungen bereitzustellen.
5. **Anwendung der Bewertungsskala** für die definierten Indikatoren auf die gewählten Bioenergie-Technologiekonzepte.
6. Erstellung einer **Ergebnistabelle** mit den Bewertungen der ausgewählten Technologien anhand aller Kriterien und Indikatoren.
7. Identifikation von möglichen Hemmnissen bei der Umsetzung und Ableitung von Handlungsoptionen (diese sind in der parallel veröffentlichten Stellungnahme²²² dargestellt).

Eine ausführliche Beschreibung der Methodik, der Kriterien, Bewertungsskalen und Bewertungsergebnisse werden online veröffentlicht.²²³

5.1 Kriterien für einen umfassenden Bewertungsrahmen

Um Bioenergie-Technologien und Nutzungspfade in ihrer Gesamtheit bewerten zu können, wurde ein Kriterienkatalog mit einer Gliederung nach ökologischen, ökonomischen, sozialen, technischen und systemischen Kriterien sowie hinsichtlich des Potenzials zur CO₂-Abscheidung einer Technologie entwickelt und mit entsprechenden Indikatoren untersetzt. Abbildung 14 fasst alle 29 Kriterien zusammen.²²⁴

Für die Bewertung wurde ein „Ampelschema“ mit den fünf Abstufungen Dunkelgrün, Hellgrün, Gelb, Orange und Rot genutzt. Dabei stellen die Farben Dunkel- und Hellgrün eine Verbesserung, die Farbe Gelb keine Veränderung und die Farben Orange und Rot eine Verschlechterung gegenüber der gewählten Referenz dar. Eine Gewichtung der Kriterien wurde durch die ESYS-Arbeitsgruppe bewusst nicht vorgenommen, sondern muss durch die Politik erfolgen.

²²² acatech/Leopoldina/Akademienunion 2019.

²²³ Thrän 2019.

²²⁴ Eine detaillierte Erläuterung der Kriterien und Indikatoren befindet sich in Thrän 2019.

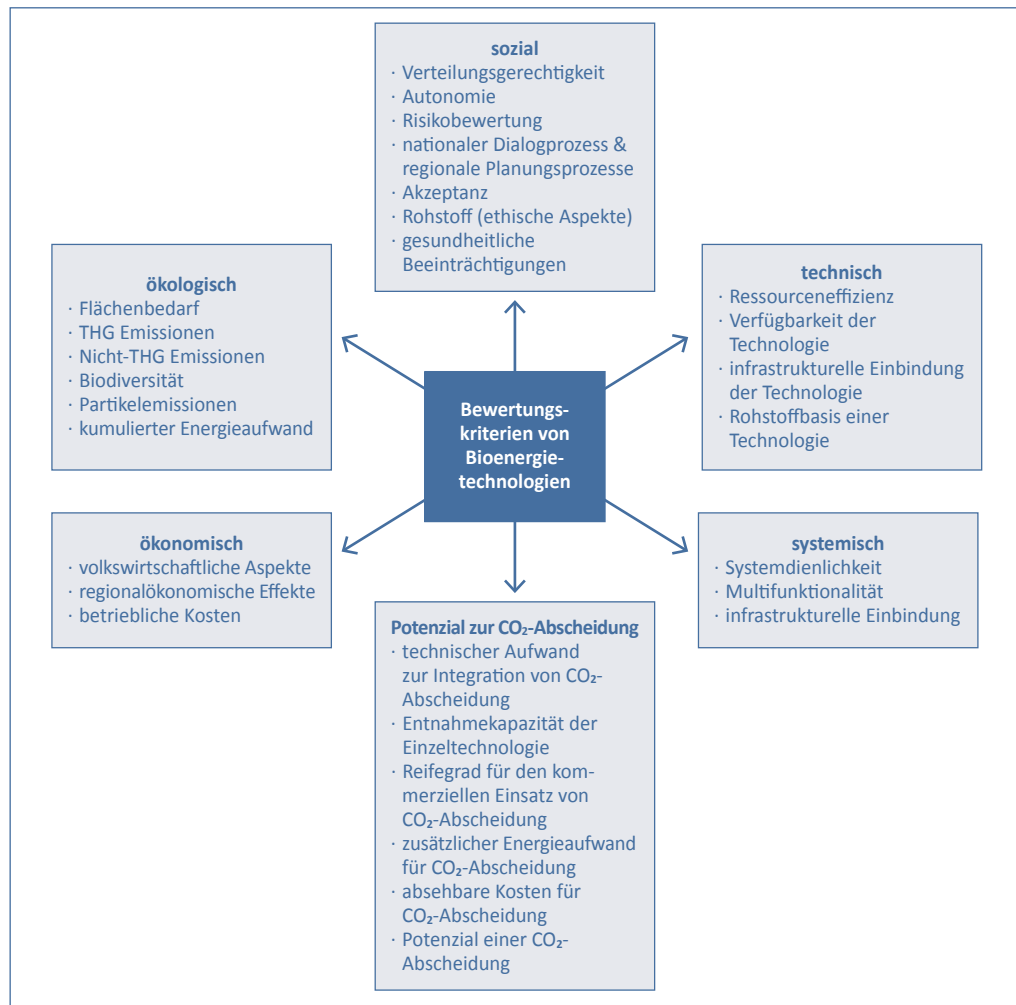


Abbildung 14: Definierte Kriterien zur Bewertung von Bioenergie-technologien

Es kann durchaus hinterfragt werden, ob etwa eine bestimmte regionale Verteilung der Wertschöpfung, Beteiligungsmöglichkeiten für möglichst viele Akteursgruppen oder ein empfundenes Mehr an Autonomie überhaupt bei der Bewertung von Energietechnologien in Betracht gezogen werden sollten. Wenn diese Aspekte jedoch von weiten Teilen der Bevölkerung als wichtig angesehen werden und diesbezügliche Erwartungen nicht erfüllt werden, besteht das Risiko, dass eine Transformation der Bioenergienutzung verschleppt oder verhindert wird.

Die Kriterien können daher dabei helfen, mögliche Hemmnisse frühzeitig zu erkennen und Strategien zu entwickeln, diese zu überwinden – etwa, indem Nachteile für bestimmte Akteursgruppen durch zusätzliche Maßnahmen abgefedert werden. In diesem Sinne ist eine „rote“ Bewertung im Ampelsystem nicht so zu verstehen, dass der betroffene Technologiepfad nicht verfolgt werden sollte. Vielmehr soll diese Einstufung darauf aufmerksam machen, dass in einem bestimmten Bereich Hindernisse auftreten können, deren Überwindung zusätzliche Anstrengungen erfordert. Die verschiedenen Kriterien geben damit Auskunft über die Stärken und Schwächen verschiedener Nutzungspfade und den etwaigen Aufwand, der für eine erfolgreiche Etablierung der Nutzungspfade notwendig ist.

5.2 Anwendung des Bewertungsrahmens

Um verschiedene Optionen für die Transformation der Bioenergienutzung einzuordnen, wurden die ermittelten Kriterien auf konkrete Bioenergiekonzepte angewandt. Im Rahmen der Arbeitsgruppe „Bioenergie“ konnte dies nur für ausgewählte Technologien erfolgen. Bei der Auswahl wurden Technologieoptionen berücksichtigt, die sowohl heute als auch in Zukunft über eine relativ breite Rohstoffbasis verfügen (Holz beziehungsweise vergärbare, feuchte Biomassen²²⁵) und die bereits heute in erheblichem Umfang zur Bioenergiebereitstellung und Klimagasreduktion beitragen.

Etablierte Bereitstellungstechnologien für Biokraftstoffe (Biodiesel und Bioethanol) werden hier nicht behandelt. Mit der Neufassung der europäischen Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED II)²²⁶ soll der Anteil der fortschrittlichen Biokraftstoffe im Verkehrssektor erhöht, der Anteil von konventionellen Kraftstoffen aus Anbau-biomasse hingegen reduziert werden (siehe hierzu auch Abschnitt 3.3). Mit diesen Vorgaben wird insbesondere der Einsatz von Biodiesel und Bioethanol und damit von konventionellen Kraftstoffen (Biokraftstoffen der ersten Generation) begrenzt.

5.2.1 Ausgewählte Bioenergieoptionen

Da es im Rahmen dieser Arbeitsgruppe nicht möglich ist, das komplette Spektrum an Bioenergieoptionen zu untersuchen, werden typische Anlagenkonzepte, die momentan genutzt werden, sowie ihre perspektivische Entwicklung bis 2050 unter Berücksichtigung der Wirkung der politischen Rahmenbedingungen (vgl. Kapitel 3.3), der Biomassepotenziale (vgl. Kapitel 2) und der Anforderungen an die Bioenergie für das Energiesystem bis 2050 (vgl. Kapitel 3.2) abgebildet.

Derzeit wird Bioenergie vor allem in kleinen Anlagen – etwa in landwirtschaftlichen Biogasanlagen zur Strom- und Wärmeerzeugung oder in Holzheizungen in Einzelgebäuden – genutzt (siehe Tabelle 3). Diese Nutzungsarten können heute fossile Energieträger ersetzen und dadurch teilweise sehr kostengünstig CO₂-Emissionen einsparen. Mittel- bis langfristig sind aber voraussichtlich andere Nutzungspfade sinnvoller. Denn Strom lässt sich kostengünstiger und flächeneffizienter mit Windkraft und Photovoltaik erzeugen, Heizwärme kann mit Wärmepumpen effizient aus Strom gewonnen werden. In aktuellen Energieszenarien für Deutschland spielt Bioenergie zur Strom- und Heizwärmeerzeugung daher langfristig eine untergeordnete Rolle.

Bioenergie könnte in Zukunft im Energiesystem eher zur Erzeugung von Hochtemperaturwärme in der Industrie oder für Kraftstoffe im Flug- und Schwerlastverkehr genutzt werden.²²⁷ Beispielsweise könnte bei Biogas eine Aufbereitung zu Biomethan an Bedeutung gewinnen. Biomethan kann über das Erdgasnetz transportiert werden und ist wie Erdgas sehr flexibel einsetzbar – etwa zur Stromerzeugung bei mehrwöchigen Dunkelflauten, zur Erzeugung von Hochtemperaturwärme und als Kraftstoff für Erdgasfahrzeuge. Holz könnte zukünftig in Bioraffinerien zu verschiedenen stofflichen und energetischen Produkten wie biobasierten Chemikalien, Werkstoffen und Biokraftstoffen verarbeitet werden. Diese Beispiele zeigen, dass komplexere Verfahren zur Umwandlung der Biomasse mit teilweise entsprechend größeren Anlagen in Zukunft

225 Beispiele für vergärbare, feuchte Biomassen sind Gülle, Bioabfall und Mais- oder Grassilage.

226 EU 2018-1.

227 acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017; BMWi 2017-2; Szarka et al. 2017.

wichtiger werden. Wie in Kapitel 4 dargestellt, ist die Nutzung von CCS in Kombination mit Bioenergie ein wesentlicher Aspekt zur Erreichung des 2-Grad-Ziels. Beim Einsatz von BECCS lohnt sich die Anbindung an eine Infrastruktur für den CO₂-Transport nur für Anlagen, die große Mengen CO₂ produzieren. Perspektivisch wird die Rohstoffbasis verstärkt Rest- und Abfallstoffe von den landwirtschaftlichen Flächen, aus den Wäldern sowie aus der Industrie und den Haushalten beinhalten. Damit wird der Hauptteil der Ressourcen nicht durch einen direkten Anbau auf landwirtschaftlichen Flächen gewonnen. Auf landwirtschaftlichen Flächen sollen perspektivisch naturschutznahe Biomassefraktionen zur energetischen Nutzung angebaut werden.

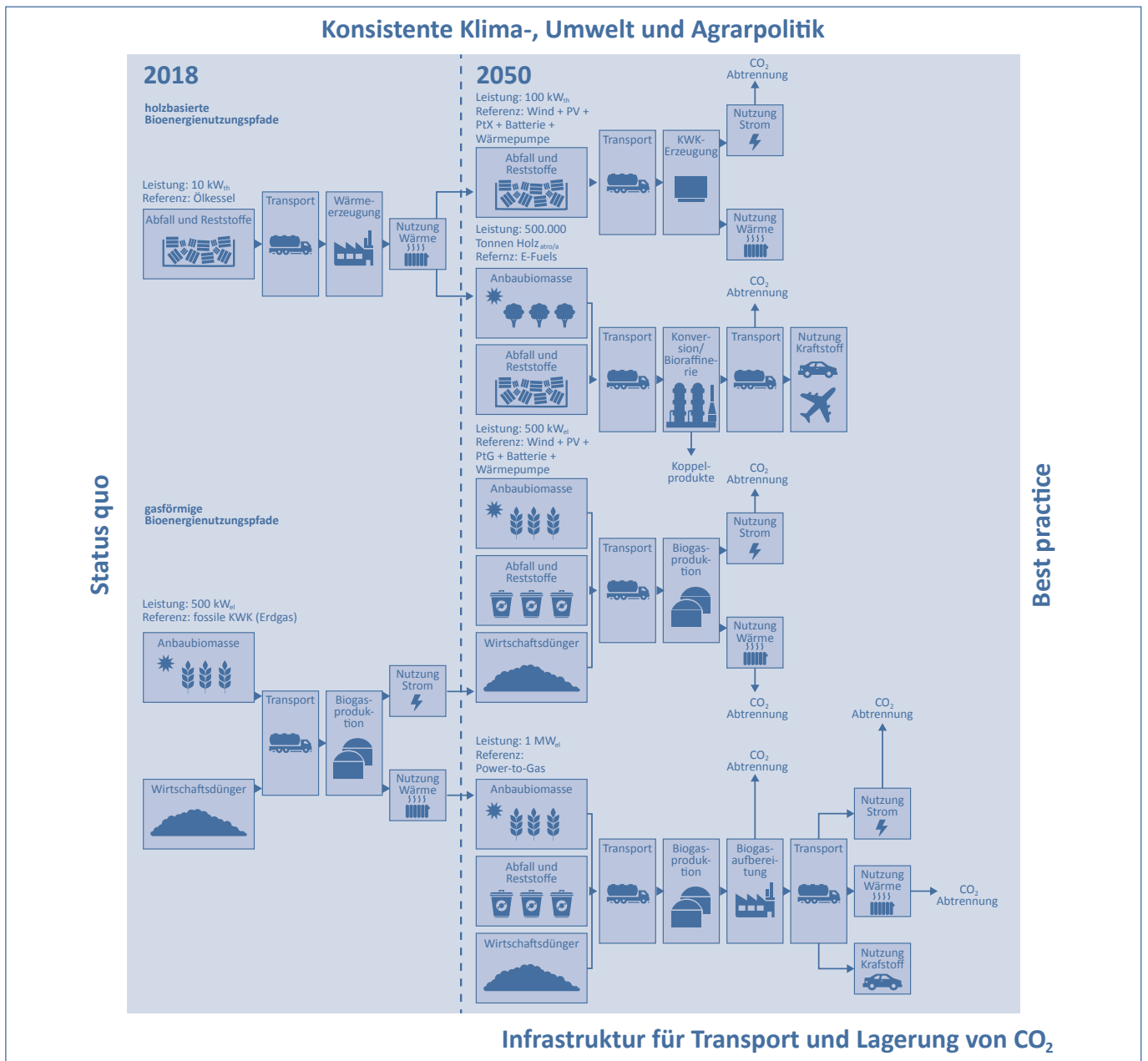


Abbildung 15: Betrachtete Transformationen und ihre Systemgrenzen

Für das Jahr 2018 werden die heute vorrangig eingesetzten Technologien zugrunde gelegt: die Biogaserzeugung mit lokalem Blockheizkraftwerk und der Einsatz von Holz zur Erzeugung von Niedertemperaturwärme in Heizkesseln. Für 2050 wird jeweils zum einen eine Weiterentwicklung dieser kleineren dezentraleren Anlagen²²⁸ betrachtet und zum anderen eine Technologie, die Kraftstoffe für den Verkehrssektor bereitstellen kann und sich für eine Kombination mit CCS eignet (Biomethanherzeugung und Bioraffinerie). Abbildung 15 und Tabelle 7 geben einen Überblick über die betrachteten Technologien in den Jahren 2018 und 2050.

Kurzbezeichnung	2018		2050			
	Biogas-KWK-2018	Holz-Wärme-2018	Biogas-KWK-2050	Biomethan-2050	Holz-Wärme-2050	Holzraffinerie-2050
Bioenergie-Technologie	Biogasanlage mit BHKW	Holzverbrennung zur Wärmeerzeugung	Biogasanlage mit BHKW	Biogasanlage mit Aufbereitung des Gases zu Biomethan	Holzvergasung mit KWK-	Holzbasierte Synthesegas-Bioraffinerie
Produkte	Wärme und Strom	Wärme	Wärme und Strom	Biomethan (als Erdgassubstitut)	Wärme und Strom	Kraftstoff
Installierte Leistung	500 kW _{el}	10 kW _{th}	500 kW _{el}	1 MW _{el}	100 kW _{th}	500.000 Tonnen Holz (Trockenmasse) pro Jahr
Eingesetzte Biomasse pro Anlage (Richtwert)	10.000 MWh/a	25 MWh/a	4.300 MWh/a ^a	20.000 MWh/a	360 MWh/a	2.500.000 MWh/a
Ressourcen	50% Maissilage, 30% Gülle, 20% Grassilage/Getreide-Ganzpflanzensilage	Holzhackschnitzel aus Waldrestholz, Scheitholz	50% Abfall/Reststoffe, 30% naturschutznahe Anbaubiomasse, 20% Gülle	50% Abfall/Reststoffe, 30% naturschutznahe Anbaubiomasse, 20% Gülle	Wald- und Sägereinstoffe, andere Reststoffe in Form von Pellets ^b	50% Kurzumtrieb, 50% Waldrestholz in Form von Hackschnitzeln
Funktion im Energiesystem	Regionale Bereitstellung von Strom und Wärme (Wärme unvollständig genutzt), Flexibilität wird nicht nachgefragt	Punktueller Bereitstellung von Heizwärme	Umfassende Wärmenutzung mit Anschluss an ein Wärmenetz, nachfrageorientierte Strombereitstellung	Einspeisung von Biomethan ins Erdgasnetz, Nutzung flexibel in allen Sektoren	Umfassende Wärmenutzung mit Anschluss an ein Wärmenetz, eingeschränkt nachfrageorientierte Strombereitstellung	Kraftstoffherzeugung
Sonstige Produkte	Nährstoffrückführung		Nährstoffrückführung, geringfügige Mengen an CO ₂ als Nebenprodukt	Geringfügige Mengen an CO ₂ als Nebenprodukt, Nährstoffrückführung		Chemische Zwischenprodukte und Produkte (zum Beispiel Methanol), biobasierter Wasserstoff, CO ₂
Betreiber	Genossenschaft, Kommune, Landwirt	Privater Nutzer (Haushalte)	Genossenschaft, Kommune, Landwirt	Genossenschaft, Kommune, Landwirt	Genossenschaft, Kommune	Industrieunternehmen
Referenz-Technologie	Gaskraftwerk	Ölkessel	Windkraft + PV – Speicher + Wärmepumpen	Power-to-Gas	Windkraft + PV – Speicher + Wärmepumpen	Synthetische Kraftstoffe aus Power-to-X mit Windkraft- und PV-Strom (E-Fuel)

Tabelle 7: Untersuchte Bioenergietechnologien (Fallbeispiele) für 2018 und 2050

a) Die Auslastung der Biogas-KWK-Anlage 2050 ist geringer als 2018, da die Stromerzeugung nachfrageorientiert erfolgt. Eine Anlage der gleichen installierten elektrischen Leistung benötigt daher 2050 weniger Biomasse als 2018. **b)** Pellets als sogenannte „High-end Fuels“ haben Brennstoffeigenschaften, die ein schnelleres Anfahren und Stoppen ermöglichen; dadurch wird die Flexibilität der Anlage erhöht.

²²⁸ Die Biomethananlage verarbeitet nur zwei- bis fünfmal so viel Biomasse wie die Biogasanlagen mit BHKW. Die Bioraffinerie hingegen benötigt pro Jahr etwa so viel Holz wie 7.000 Holzvergaser oder 100.000 Holzheizkessel. Bioenergieanlagen werden hier als „dezentral“ bezeichnet, wenn hauptsächlich Rohstoffe aus der Region eingesetzt werden und die Anlage von regionalen Betreibern oder Betreibergemeinschaften betrieben wird. Dies ist etwa bis zu einer Leistung von 1 Megawatt (elektrisch) realisierbar. Die Biomethananlage ist daher eher als eine Anlage mit dezentraler Erzeugung, aber zentralisierter Nutzung des Produkts einzustufen.

5.2.2 Referenzsysteme

Für eine Bewertung und Einordnung der Bioenergie-Technologien in das Ampelschema wurden Referenzsysteme herangezogen. Sinnvolle Referenzsysteme für Bioenergie-Technologien sind nicht statisch, sondern entwickeln sich entlang der Zeitachse. Kurzfristig können es fossile Referenzsysteme sein, die durch die Bioenergie-Technologien verdrängt werden. Langfristig werden es aber alternative Technologien sein, die ebenfalls auf erneuerbaren Energien beruhen (zum Beispiel Power-to-Gas) und perspektivisch dieselben Funktionen im Energiesystem übernehmen können wie die betrachtete Bioenergie-Technologie.

So wurde als Referenztechnologie für die Biogas-KWK-Anlage 2018 eine erdgasbetriebene KWK-Anlage als Referenz angesetzt. Als Referenz für die KWK-Anlagen 2050 hingegen wurde ein Technologiemix angenommen, der CO₂-frei und bedarfsorientiert Strom und Wärme erzeugen kann. Die bedarfsgerechte Stromerzeugung erfolgt dabei durch Windkraft- und PV-Anlagen in Kombination mit Kurzzeitspeichern (Batterien) sowie Langzeitspeichern (Power-to-X).²²⁹ Wärme wird durch Wärmepumpen bereitgestellt, die mit Windkraft- und PV-Strom gespeist werden.

Für die Biomethananlage 2050 wurde die Erzeugung von synthetischem Methan mit Power-to-Gas aus Windkraft- und Photovoltaikstrom als Referenz zugrunde gelegt, für die Bereitstellung von Flüssigkraftstoffen in der Bioraffinerie ist die Referenz die Produktion von synthetischen Flüssigkraftstoffen über Power-to-Liquids-Verfahren aus Windkraft- und Photovoltaikstrom.

Die Referenztechnologien für alle betrachteten Bioenergie-Technologien sind Tabelle 7 zu entnehmen.

Im Rahmen des Vorgehens ist zu beachten, dass die jeweilige Technologie für die Bewertung mit dem definierten Referenzsystem verglichen wurde und kein direkter Vergleich zwischen heutigen und perspektivischen Anlagenkonzepten oder zwischen den verschiedenen Anlagenkonzepten für 2018 beziehungsweise 2050 erfolgte.

5.2.3 Anwendung der Kriterien auf die gewählten Bioenergie-Technologiekonzepte

Die Anwendung der Kriterien auf das jeweilige Technologiekonzept erfolgte vornehmlich anhand von Experteneinschätzungen. Dabei wurden die Perspektiven verschiedener disziplinärer Zugänge von Expertinnen und Experten zusammengeführt, um so triangulierte Einschätzungen zu erhalten. Der Bewertungsprozess erfolgte im Konsensverfahren. Die Bewertung wurde durch Literaturangaben und soweit möglich durch eigene Berechnungen (insbesondere im Rahmen der Anwendung des Kriteriums „Potential zur CO₂-Entnahme“) unterstützt.

Ein Vergleich zu einer Referenz stellte sich nicht für alle Kriterien als zielführend und praktikabel dar. Ein Referenzvergleich wurde daher vornehmlich für die ökologischen und ökonomischen Kriterien (mit Ausnahme des Kriteriums „regionalökonomische Effekte“) herangezogen. Die technischen, systemischen und sozialen Kriterien (mit Ausnahme des Kriteriums „gesundheitliche Beeinträchtigungen“) sind als absolute Kriterien zu verstehen.

²²⁹ Verschiedene Möglichkeiten, Flexibilität in der Stromversorgung in einem durch erneuerbare Energien dominierten Energiesystem bereitzustellen, werden in Elsner et al. 2015 diskutiert.

Als Bewertungsmaßstab für die Technologie- und systemischen Kriterien wurden daher sogenannte Benchmarks definiert, an denen sich eine Technologie „messen“ muss. Für das Jahr 2018 fand eine Berücksichtigung des aktuellen „Status quo“ der Technologieentwicklung sowie -anwendung statt, und für 2050 wurden „Best Practice“-Ansätze gewählt, die bei der Nutzung der jeweiligen Bioenergie-Technologie als Maßstab gelten.

Für 2018 bedeutet „Status quo“ konkret:

- eine eingeschränkte Nutzung der erzeugten Wärme bei KWK-Anwendungen, das heißt, ausgeprägte Wärmekonzepte sind nicht etabliert,
- eine Nährstoffrückführung ist gegeben,
- Flexibilität der Bioenergiebereitstellung wird nicht vom Energiesystem nachgefragt, und
- es sind noch keine Vorrichtungen für eine CO₂-Abscheidung implementiert.

Für das Jahr 2050 wurde als „Best Practice“ definiert, dass:

- eine umfassende Wärmenutzung bei KWK-Konzepten und entsprechende Wärmenetze existieren,
- eine Nährstoffrückführung gegeben ist,
- eine CO₂-Abscheidung und -Nutzung möglich ist,
- mehr Abfälle und Reststoffe sowie spezielle naturschutznahe Anbaubiomassen eingesetzt werden,
- eine nachfrageorientierte Strombereitstellung besteht,
- weitestgehend THG-Neutralität herrscht,
- deutlich reduzierte NO_x-Emissionen vorliegen,
- keine Partikelemissionen auftreten.

5.2.4 Grenzen der Betrachtung und Aussagefähigkeit der Untersuchung

Auswirkungen der betrachteten energetischen Biomassenutzung auf andere internationale oder regionale Märkte (etwa Boden- und Immobilienmärkte) sowie eine globale Entwicklung konnten im Rahmen der Bewertung nicht abgebildet werden. Die Einschätzungen für das Potenzial einer Technologie zur CO₂-Entnahme beziehen sich auf die Abscheidung aus dem Prozess selbst. Die Verdichtung und die Infrastruktur für Transport und Lagerung sind hier nicht einbezogen, da sie sich für die verschiedenen Technologien nicht unterscheiden.

Bei der Betrachtung der ökonomischen Kriterien wurden die Energieerzeugungsanlagen selbst als Systemgrenze festgelegt. Fragen der infrastrukturellen Einbindung der Erzeugungsanlagen beziehungsweise Energieprodukte (zum Beispiel Erdgasnetze) sowie der Systemdienlichkeit werden bei den systemischen Kriterien der Bewertungsmatrix berücksichtigt. Kosten negativer Externalitäten (zum Beispiel Umweltfolgen) wurden bei den ökonomischen Kriterien nicht betrachtet, da es sich hier um die monetäre Bewertung von Schäden aus anderen Dimensionen handelt, für die mit den ökologischen und sozialen Kriterien eine differenzierte Bewertung vorgenommen wurde.

Insgesamt ist zu beachten, dass die Bioenergietransformationspfade immer Teil eines größeren Systems sind, dessen Entwicklung wiederum mit weiteren Transformationen und Unsicherheiten behaftet ist. Die Systemgrenzen der Untersuchung sind in Abbildung 15 dargestellt.

5.3 Ergebnisse und Diskussion

Aus der Anwendung des Bewertungsrahmens auf die konkreten Bioenergie-Technologiekonzepte wurde eine Bewertungsmatrix entwickelt (Tabelle 8).²³⁰ Die Ergebnisse zeigen, welche Trade-offs über die Bereiche der Ökonomie, Ökologie und Technik entstehen, aber auch hinsichtlich der Frage, welche Auswirkungen die Bioenergienutzung auf das Gesamtsystem sowie auf soziale und gesellschaftliche Bereiche hat, wenn man sich über die Zeitachse für die eine oder andere Option entscheidet. Damit wird eine generische und ganzheitliche Bewertung von Technologieoptionen ermöglicht.

Technologie	Indikatoren	2018		2050			
		Biogas KWK 2018	Holz-Wärme 2018	Biogas KWK 2050	Bio-methan 2050	Holz KWK 2050	Holz Raffinerie 2050
Kriterien	Indikatoren						
Technische Kriterien							
Ressourceneffizienz	Gesamtwirkungsgrad	Yellow	Green	Light Green	Light Green	Green	Light Green
	Kopplung/Koppelfähigkeit	Yellow	Red	Light Green	Green	Green	Light Green
Verfügbarkeit der Technologie (TRL)	Marktreife	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow
Infrastrukturelle Einbindung (Hilfsstoffe und Energie)	Infrastrukturkompatibilität/-ansprüche, Netzausbaubedarf	Green	Green	Green	Green	Green	Light Green
Rohstoffbasis einer Technologie		Light Green	Light Green	Light Green	Light Green	Light Green	Light Green
Systemische Kriterien							
Systemdienlichkeit	Technologie kann die im Jahr 2050 zu erwartenden Lücke(n) im System schließen	Grey	Grey	Yellow	Light Green	Orange	Green
Infrastrukturelle Einbindung	Rohstoffe	Green	Green	Green	Light Green	Green	Light Green
	Energieprodukte	Yellow	Green	Yellow	Green	Yellow	Green
Multifunktionalität		Orange	Red	Orange	Green	Orange	Light Green
Ökologische Kriterien							
Flächenbedarf		Orange	Yellow	Orange	Orange	Green	Orange
THG-Emissionen		Light Green	Light Green	Yellow	Orange	Yellow	Orange
Nicht-THG Emissionen		Orange	Orange	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
Partikelemissionen		Light Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
Biodiversität		Orange	Yellow	Yellow	Orange	Yellow	Orange
kumulierter Energieaufwand (kurz KEA)		Green	Light Green	Light Green	Light Green	Light Green	Light Green

²³⁰ Erläuterungen zur Bewertungsskala für die einzelnen Indikatoren und Begründungen für die einzelnen Bewertungen befinden sich in Thrän 2019.

Technologie		2018		2050			
		Biogas KWK 2018	Holz-Wärme 2018	Biogas KWK 2050	Bio-methan 2050	Holz KWK 2050	Holz Raffinerie 2050
Ökonomische Kriterien							
Betriebliche Kosten	Energiegestehungskosten						
	Brenn-/Rohstoffkosten						
Volkswirtschaftliche Aspekte	Inländischer Anteil Beschäftigung						
	Inländischer Anteil Wertschöpfung						
Regional-ökonomische Effekte	Potenzial für Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte auf regionaler Ebene						
Soziale Kriterien							
Verteilungsgerechtigkeit	Profit einer Vielzahl von Akteurinnen						
Autonomie	Regionale Eigenversorgung Individuelle Selbstversorgung						
Risikobewertung							
Nationaler Dialogprozess & Regionale Planungsprozesse							
Rohstoff (ethische Aspekte)							
Akzeptanz							
Gesundheitliche Beeinträchtigungen							
Potenzial zur CO₂-Abscheidung							
Technischer Aufwand zur Integration von CO ₂ -Abscheidung	CO ₂ -Anteil im Gas						
Entnahmekapazität der Einzeltechnologie	kt CO ₂ pro Jahr						
Reifegrad für den kommerziellen Einsatz von CO ₂ -Abscheidung	Manufacturing Readiness Level (kurz MRL)						
Zusätzlicher Energieaufwand für CO ₂ -Abscheidung	Prozent der Produktenergie						
Kosten für CO ₂ -Abscheidung	Prozent der Investitionssumme						
Potenzial einer vollständigen CO ₂ -Abscheidung	CO ₂ -Abscheiderate						

Tabelle 8: Bewertungsmatrix

Für die einzelnen Bewertungskategorien ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

Technische Kriterien: Die betrachteten Technologien sind weitgehend technisch ausgereift und am Markt verfügbar. Lediglich die Bioraffinerie auf Basis von Holz ist noch nicht im Markt implementiert. Die erfolgreiche Entwicklung von holzbasier-ten Bioraffinerien entscheidet damit zentral über die Ausgestaltung der langfristigen Bioenergiestrategie. Herausforderungen sind dabei unter anderem, die verschiedenen

Prozessschritte der Bioraffinerie zu integrieren, eine hohe Anlagenverfügbarkeit zu erreichen und die Kosten zu senken. Damit sich die Technologie am Markt behaupten kann, müssen Syntheseverfahren entwickelt werden, deren Produktspektrum als Ganzes marktfähig ist. Dabei stellen Biokraftstoffe, die in den Fahrzeugflotten einsetzbar sind, eines der Produkte dar. Sollen zukünftig Rest- und Abfallstoffe eingesetzt werden, müssen zudem kostengünstige thermochemische oder biochemische Aufschlussverfahren für Lignozellulose gemischter Qualität entwickelt werden. Die Bereitstellung hinreichend reiner Zwischenprodukte, um eine kostengünstige Synthese zu ermöglichen, erfordert zudem eine Weiterentwicklung der Gasreinigung.

Systemische Kriterien: Alle betrachteten Technologien können auf sinnvolle Weise zur künftigen Energieversorgung beitragen. Die Kraftstoffherstellung in der Bioraffinerie und die Herstellung von Biomethan, das flexibel in allen Sektoren als Ersatz für Erdgas verwendet werden kann, stellen mit der Perspektive bis 2050 eine höhere Systemdienlichkeit für das Energiesystem dar als die kleineren Anlagen zur Strom- und Wärmeerzeugung. Insbesondere für letztere Entwicklungspfade ist der Ausbau von Wärmenetzen eine wichtige Voraussetzung für eine gute systemische Einbindung. Sollen diese Pfade weiterverfolgt werden, bedarf es einer übergeordneten Wärmestrategie, die den Ausbau von Wärmenetzen fokussiert. Für Biomethan und Biokraftstoffe sind die Infrastrukturen hingegen bereits vorhanden.

Ökologische Kriterien: Die Umweltfolgen hängen vor allem von der Rohstoffbereitstellung ab und unterscheiden sich zwischen den verschiedenen Ausbaupfaden nur marginal. Obwohl jeweils Best-Practice-Konzepte mit einem möglichst nachhaltigen Rohstoffmix untersucht wurden, sind die betrachteten Bioenergie-Technologien aus ökologischer Sicht tendenziell ungünstiger als strombasierte Alternativen – insbesondere bei den Kriterien Flächenbedarf, Auswirkungen auf die Biodiversität und Treibhausgasbilanz. Dies rührt hauptsächlich daher, dass der Einsatz von Anbaubiomassen in geringem Maße bis 2050 angenommen wird. Dadurch wird im Vergleich zu den definierten Referenzsystemen etwas mehr Fläche in Anspruch genommen. Ein umweltverträglicher Anbau und ein verantwortungsvoller Umgang mit allen Biomassen ist für jede Bioenergiestrategie, die primär bereitgestellte Biomassen aus dem Wald oder vom Acker einsetzt, dringend geboten. Partikelemissionen sind aufgrund ihrer gesundheitsschädlichen Wirkung bei allen Technologien ein wichtiges Kriterium; auch für die Akzeptanz kann das entscheidend sein kann.

Ökonomische Kriterien: Die Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen im künftigen Gesamtsystem hängt in hohem Maße davon ab, wie sich die Kosten der Technologien für Batterien und Power-to-Gas beziehungsweise Power-to-Fuel entwickeln. Denn diese Anlagen stellen vergleichbare Produkte her und werden daher künftig direkt mit Bioenergieanlagen konkurrieren. In aktuellen Energieszenarien für 2050 ist die Erzeugung von Biomethan kostengünstiger als synthetisches Methan aus Wind- und Solarstrom.²³¹ Allerdings ist die Kostenentwicklung bis 2050 mit großen Unsicherheiten behaftet. Im Vergleich zu Technologien, die keine Rohstoffe für den Betrieb benötigen, sind die betrieblichen Risiken bei den Bioenergie-Technologien durch den hohen Rohstoffkostenanteil höher. Kleinere Anlagenkonzepte bieten in vergleichsweise vielen Regionen Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenziale. Bei zentralen Anlagenkonzepten konzentrieren sich diese Effekte auf eine geringere Zahl an Akteuren und Anlagenstandorten.

²³¹ Basierend auf Daten aus Erlach et al. 2018 und Elsner et al. 2015.

Soziale Kriterien: Insgesamt zeigt sich, dass die Rohstofffrage und damit verbundene Aspekte wie Konkurrenz zu Lebensmitteln, die Gefahr von Gentechnik, der Flächenbedarf und die Bewertung des Landschaftsbilds zentral sind. Die möglichen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit unterscheiden sich bei den untersuchten Technologien nicht oder kaum von den Referenzsystemen. Autonomie und Verteilungsgerechtigkeit fördern das Entstehen von Akzeptanz bei Bioenergieoptionen enorm und sollten bei der Entwicklung der zukünftigen Pfade eine zentrale Rolle spielen. Während die Bewertung bei allen anderen Technologien hier positiv ist, wurden die Biomethanherzeugung und noch stärker die Bioraffinerie (eher) negativ bewertet. Daher sollte vor allem bei diesen beiden Entwicklungspfaden die Akzeptanz in der Bevölkerung als mögliches Hemmnis beachtet und die konkrete Ausgestaltung dieser Optionen mit der Bevölkerung eng abgestimmt werden, damit eine für alle Beteiligten tragbare Umsetzung gelingen kann.

Potenzial zur CO₂-Abscheidung: Die großskalige Bioraffinerieanlage sowie das Biomethankonzept eignen sich für die CO₂-Abscheidung und damit für die Erzeugung von negativen Emissionen. Ihre Vorteilhaftigkeit hängt jeweils davon ab, welche Energieträger bevorzugt erzeugt werden sollen und wie die Anlagen in eine CCS-Infrastruktur eingebunden werden können. Für die Biomethananlage wäre daher insbesondere zu prüfen, inwieweit die Anbindung an die Transportinfrastruktur für CO₂ logistisch praktikabel und wirtschaftlich vertretbar wäre, da die jährlich anfallenden CO₂-Mengen relativ gering sind. Die kleineren Anlagenkonzepte sind nicht für eine Kombination mit CCS geeignet.

5.4 Schlussfolgerungen

Da Bioenergie in zahlreiche Systeme und Kreisläufe eingebunden ist (Energiesystem, regionale Stoffkreisläufe, Kohlenstoffkreislauf), müssen die Technologieoptionen aus einer umfassenden Systemperspektive betrachtet werden. Auch die damit verbundenen Interessen und Interessenkonflikte sind zu beachten und zu verhandeln.

Die Rohstoffbereitstellung ist ein entscheidender Faktor für eine nachhaltige Bioenergienutzung, und das gilt über alle betrachteten Technologiepfade hinweg. Dies umfasst zum einen die *ökologischen Auswirkungen* der Bioenergienutzung, die selbst unter Best-Practice-Annahmen (Einsatz von Reststoffen, Abfällen und naturschutznahen Anbaubiomassen) tendenziell eher negativere Umweltauswirkungen hat als die Referenztechnologien. Die konsequente Weiterentwicklung und Etablierung von Best-Practice-Konzepten ist daher eine wesentliche Voraussetzung für eine nachhaltige Bioenergiestrategie.

Zum anderen sind auch die *regionalökonomischen und sozialen Effekte* stark von der Rohstoffbereitstellung geprägt. Konfliktpunkte bestehen hier im Hinblick auf die Konkurrenz zu Lebensmitteln sowie der durch den Anbau beanspruchten Fläche. Damit geht auch eine Veränderung des Landschaftsbildes einher. Öffentlich diskutiert wird etwa der Anbau von Mais für die Energiegewinnung in Biogasanlagen oder der Einsatz von Gentechnik beim Anbau von Energiepflanzen. Im Hinblick auf den Rohstoff Holz unterscheiden sich die sozialen Effekte je nach Ausgangslage: Während seine großflächige Verwendung aufgrund der emotionalen Bedeutung von Wäldern auf Ablehnung stoßen könnte, wird der Einsatz von Holz auf individueller Ebene insgesamt

positiv bewertet, weil er mit Autarkie in Verbindung gebracht wird. Offen ist die Frage, inwiefern der Einsatz von Holz für den Mobilitäts- und Kraftstoffbereich in diesem Zusammenhang als kritisch wahrgenommen werden könnte.

Ein weiterer wichtiger Punkt, der im Vergleich zu möglichen Alternativtechnologien und Referenzsystemen diskutiert werden muss, ist der *Gesundheitsaspekt*. Veränderungen in der Wahrnehmung und die ihr zuteilwerdende Aufmerksamkeit können eine Dynamik in Gang setzen, die zu Umdenken und Umlenken führt (siehe Diesel-Debatte²³²). Einen großen Einfluss auf den Gesundheitsaspekt haben die Partikelemissionen. Für 2050 ist jedoch davon auszugehen, dass sich die Konversionstechnologien technisch so weit optimieren lassen, dass Partikelemissionen kein relevantes lokales Risiko mehr darstellen. Vor allem die Gesundheitsaspekte, aber auch die Frage der Waldnutzung ist auf jeden Fall über Beteiligungsverfahren aufzugreifen, damit akzeptable Lösungen gefunden werden, die alle relevanten Bedenken einbeziehen.

Risiken bei der Technologieentwicklung gibt es lediglich bei den Bioraffinerien, alle anderen Technologien sind technisch ausgereift und bereits am Markt etabliert.

Die Systemdienlichkeit ist bei allen betrachteten Konzepten im Jahr 2050 weitgehend gegeben. Allerdings werden unterschiedliche Systeme (Strom/Wärme versus Kraftstoffe) bedient. Strom- und Wärmesysteme erfordern zudem die Bereitstellung von Infrastrukturen wie Wärmenetzen, die nicht für die Bioenergie allein, sondern nur im Rahmen einer übergeordneten KWK-Strategie etabliert werden können. Hinsichtlich der Bedarfe des Energiesystems ist aus heutiger Sicht im Jahr 2050 die Bereitstellung von Kraftstoffen systemdienlicher als die Etablierung von Strom- und Wärmeanwendungen mit Bioenergie.

Unter dem Aspekt, dass die Frage der besten Systemintegration je nach Entwicklungsstand in Zukunft möglicherweise anders eingeschätzt wird als heute, ist der Aufwand für einen Pfadwechsel ein weiterer wichtiger Aspekt für die Bewertung der Technologieoptionen. Die beiden Pfade „feuchte Biomassen“ und Holz zeigen hier grundsätzliche Unterschiede.

Die zukünftige Nutzung „feuchter Biomassen“ für Biomethan kann aus dem bestehenden Biogassystem heraus entwickelt werden und erlaubt daher eine Transformation von einer Biogas- zu einer Biomethanbereitstellung. Die Struktur der Rohstoffbereitstellung und die beteiligten Akteure bei der Rohstoffbereitstellung und beim Anlagenbetrieb unterscheiden sich dabei kaum. Darüber hinaus werden sowohl die Bereitstellung vielfältiger Energieträger als auch eine BECCS-Nutzung ermöglicht. Die Herausforderung liegt damit besonders in der Frage, wie die notwendigen Best-Practice-Anforderungen an die Technologie (unter anderem CO₂-Abscheidung und -Nutzung) sichergestellt und wie Biogassysteme kontinuierlich zu Biomethansystemen weiterentwickelt werden können. Die möglicherweise dabei entstehenden Schwierigkeiten sollten im Rahmen von Dialogverfahren und Diskussionsrunden offen und transparent mit allen Beteiligten ausgelotet werden.

²³² So wurden wissenschaftliche Studien, die die zusätzlichen Todesfälle durch Dieselabgase quantifizieren (zum Beispiel Chossière et al. 2017), in den Medien umfassend aufgegriffen (zum Beispiel Bild 2017, Stuttgarter Nachrichten 2017, Der Standard 2017). Das Bundesverwaltungsgericht urteilte im Februar 2018, dass Kommunen Fahrverbote für ältere Dieselaautos verhängen können und gab damit den Klagen der Umweltschutzorganisation Deutsche Umwelthilfe auf Fahrverbote zur Verbesserung der Luftqualität recht (Süddeutsche Zeitung 2018).

Die gesellschaftliche Debatte zur zukünftigen Nutzung der holzbasierten Ressourcen sollte dringend geführt werden. Die beiden möglichen Transformationspfade (KWK versus Bioraffinerie) unterscheiden sich grundlegend. Vor dem Hintergrund der technischen Unwägbarkeiten ist das Festlegen auf einen Pfad zum heutigen Zeitpunkt nicht sinnvoll. Dies wird verstärkt durch die Unsicherheit, ob und gegebenenfalls in welchem Umfang künftig BECCS eine von der Gesellschaft akzeptierte Maßnahme sein wird. Damit ist es aus heutiger Sicht sinnvoll, in transparenter Weise sowohl die KWK-Optionen als auch die Bioraffinerien systematisch weiter zu verfolgen und einen klaren Entscheidungsprozess zu entwickeln. In diesem Prozess sind Kriterien zu definieren, unter denen eine Präferenz für die Bioraffinerie sinnvoll wäre, etwa wenn die entsprechenden Bioraffinerieverfahren erprobt sind (Technology Readiness Level 9) und CCS-Verfahren in anderen Bereichen aufgenommen und erfolgreich eingeführt wurden. Dies könnte nicht nur einen robusten Weg darstellen, sondern auch hohe und kurzfristig realisierbare Klimagaseinsparungen ermöglichen.

Weil mit der Nutzung in kleinen Anlagen auch bestimmte Bereitstellungskonzepte verbunden sind und regionale Akteure insbesondere in der Land- und Forstwirtschaft von der bisherigen Nutzung ökonomisch profitieren, ändern sich mit den Bereitstellungskonzepten der Bioenergie auch die beteiligten Akteure. Insgesamt lässt sich festhalten, dass Verteilungsgerechtigkeit (Nutzen einer Vielfalt der Akteure, der monetärer oder nicht monetärer Art sein kann) sowie Autonomie (Potenzial zur regionalen beziehungsweise individuellen Selbstversorgung) insbesondere im Hinblick auf Akzeptanz besonders wichtige Kriterien sind.

Die Entscheidung, einen oder mehrere der beschriebenen Transformationspfade zu verfolgen, sollte auch auf Grundlage eines nationalen Dialogprozesses getroffen werden. Dazu sollte die Bundesregierung idealerweise einen nationalen Austausch mit Stakeholdern sowie Bürgerinnen und Bürgern zu einer nachhaltigen Biomassestrategie organisieren. In diesem Rahmen kann auch diskutiert werden, welche Auswirkungen der Einsatz von zentralen oder dezentralen Versorgungsstrukturen auf die Akzeptanz von Entwicklungspfaden hätte. Neben Fragen der Verteilungsgerechtigkeit spielen auch Aspekte wie die Landschaftswahrnehmung oder die Ortsidentität eine Rolle für die Akzeptanz einer Technologie.

Die Bewertung der ausgewählten Technologiepfade zeigt, dass es noch große Unsicherheiten bei vielen Kriterien gibt. Es ist mehr Systemwissen notwendig: Durch verbesserte Kenntnisse der Bewertungsaspekte und ihres Zusammenspiels könnten die Ungewissheiten reduziert werden.

Unabhängig von den untersuchten Beispielen wird deutlich, dass für eine erfolgreiche Transformation der Bioenergie ein kohärenter Politikrahmen notwendig ist, der über die Klima- und Energiepolitik hinausgeht und Themen wie Gesundheit, Umwelt, Landwirtschaft und Soziales miteinbezieht.

6 Fazit

In den kommenden Jahrzehnten werden sich die Einsatzgebiete der Bioenergie voraussichtlich stark wandeln. Als flexibel einsetzbarer und gut speicherbarer Energieträger wird Bioenergie vor allem diejenigen Funktionen im Energiesystem übernehmen, die andere erneuerbare Energien nicht oder nur zu sehr hohen Kosten erfüllen können. Das umfasst nach heutigem Kenntnisstand vor allem die Erzeugung von Hochtemperaturwärme für die Industrie sowie von Kraftstoffen für den Flugverkehr und Teile des Schwerlastverkehrs, die flexible Stromerzeugung in wind- und sonnenarmen Wetterperioden sowie die Heizwärmeversorgung von Gebäuden, die sich schlecht dämmen oder kaum mit anderen erneuerbaren Energien versorgen lassen.

Globale Klimaschutzszenarien deuten darauf hin, dass Bioenergie künftig noch eine weitere Aufgabe übernehmen kann: die Erzeugung sogenannter „**negativer Emissionen**“. Um die im Pariser Abkommen formulierten globalen Klimaschutzziele zu erreichen, muss nach heutigem Kenntnisstand spätestens in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts der Atmosphäre CO₂ entzogen werden. Die energetische Nutzung von Biomasse mit angeschlossener Abscheidung und unterirdischer Speicherung des Kohlendioxids (**BECCS**) stellt dafür eine mögliche Technologie dar. Diese Option wird in Deutschland kaum betrachtet, obwohl sie in den Szenarien des Weltklimarats IPCC in großem Maße zum Einsatz kommt. Bei der Diskussion um zukünftige Entwicklungspfade der Bioenergie sollte diese Möglichkeit daher mitberücksichtigt werden.

Bereitstellung der Biomasse

Wie viel Biomasse zukünftig für die energetische Nutzung eingesetzt werden kann und sollte, wird kontrovers diskutiert. Einerseits geht eine starke Bioenergienutzung mit Risiken für Artenvielfalt, Böden und Gewässern einher. Zudem könnten sich Konkurrenzen um Landflächen mit der Nahrungsmittelproduktion negativ auf die Ernährungssicherheit auswirken. Andererseits birgt ein Verzicht auf Bioenergie das Risiko, dass die Energiewende technisch erschwert und verteuert wird und die Klimaschutzziele verfehlt werden, weil weiterhin fossile Energieträger verwendet werden. Diese Risiken gilt es, sorgfältig abzuwägen.

Da Agrarrohstoffe und Holz international gehandelt werden, kann eine wissenschaftsbasierte Abschätzung nachhaltig nutzbarer Bioenergiemengen nur auf globaler Ebene erfolgen. Die Auswirkungen der Bioenergienutzung in Deutschland auf die globale Landnutzung und die damit verbundenen Folgen für Ernährungssicherheit, Ökosysteme und Treibhausgasbilanz müssen dabei berücksichtigt werden.

Ein wesentliches Ziel der Bioenergienutzung ist die Treibhausgaseinsparung gegenüber fossilen Energieträgern. Diese ist aber kompliziert zu ermitteln. Die größte Schwierigkeit stellen indirekte Effekte auf die globale Landnutzung und die Kohlenstoffbilanz von Vegetation und Boden dar, die sich nicht direkt quantifizieren lassen. Modellbasierte Abschätzungen sind stark von den gewählten Annahmen und der Berechnungsmethodik abhängig. Der Klimaschutzbeitrag von Agrarbiomasse und Holz ist daher unter Fachleuten umstritten.

Die geringsten Risiken für Ernährungssicherheit, Ökosysteme und Klima birgt der **Einsatz von Rest- und Abfallstoffen**. Im Gegensatz zu Holz und Agrarprodukten werden sie größtenteils nicht international gehandelt, da ein Transport über weite Strecken aufgrund der geringen Energiedichte nicht wirtschaftlich ist. Werden in Deutschland ungenutzte Potenziale an Rest- und Abfallstoffen erschlossen, stünden jährlich etwa 200 bis 340 Terawattstunden für die energetische Nutzung zur Verfügung. Gelingt es – wie von der Bundesregierung angestrebt –, den Primärenergieverbrauch bis 2050 zu halbieren, könnten damit 13 bis 17 Prozent des Bedarfs gedeckt werden.

Um die Klimaschutzziele zu erfüllen, müssen Materialien und Produkte, die heute aus fossilen Rohstoffen hergestellt werden, durch klimafreundliche Alternativen ersetzt werden. Daher wird auch der Bedarf an Biomasse für die stoffliche Nutzung zukünftig steigen. Durch eine sogenannte **Kaskadennutzung** kann Holz zunächst stofflich und am Ende der Lebensdauer der Produkte energetisch verwertet werden. Auf diese Weise kann die Biomasse insgesamt effizienter eingesetzt und eine Konkurrenz zwischen stofflicher und energetischer Nutzung abgefedert werden.

Nachhaltige Potenziale für eine verstärkte energetische Nutzung von Agrarrohstoffen sind nur zu erwarten, wenn es entweder gelingt, die landwirtschaftlichen Erträge stark zu steigern oder wenn der Biomassebedarf in anderen Nutzungsbereichen reduziert wird. Das größte Potenzial dafür bietet eine **Umstellung der Ernährungsweise auf überwiegend pflanzliche Produkte**. So könnten rechnerisch bei einer rein pflanzlichen Ernährung weltweit etwa doppelt so viele Menschen von der gleichen Fläche ernährt werden wie heute.

Die beschriebenen Unsicherheiten, Risiken, Zielkonflikte und Nutzungskonkurrenzen erfordern **einheitliche Bewertungskriterien**, um festzulegen, wie viel Biomasse in welchen Bereichen durch den Menschen genutzt werden sollte. Nachhaltigkeitsanforderungen sollten dabei nicht nur an Bioenergie gestellt werden, sondern gleichermaßen an alle land- und forstwirtschaftlichen Produkte. Denn für eine „optimale“ Bioenergienutzung muss die Rolle der Bioenergie im Energie- und im Landnutzungssystem berücksichtigt werden. Langfristig wünschenswert wäre daher ein Instrumentarium, das Klimaschutz, den Schutz von Ökosystemen und soziale Aspekte der Ernährungssicherheit als ein integriertes System betrachtet.

Nutzung von Biomasse zur CO₂-Entnahme

Bei der Diskussion um die langfristige Biomasse- und Landnutzung muss berücksichtigt werden, dass in einigen Jahrzehnten der Atmosphäre CO₂ entzogen werden muss, um die internationalen Klimaschutzziele zu erreichen. Neben BECCS kommen dafür eine Reihe von Verfahren infrage, unter anderem die großflächige Aufforstung von nicht

genutzten Flächen oder die direkte Entnahme von CO₂ aus der Luft mit chemischen Bindemitteln. Bei den meisten dieser **CO₂-Entnahmetechnologien** bestehen noch große Unsicherheiten im Hinblick auf Potenziale, Flächenbedarf, Kosten, Umweltauswirkungen und die Dauerhaftigkeit der Kohlenstoffspeicherung.

In der politischen und gesellschaftlichen Diskussion ist das Thema CO₂-Entnahme noch nicht angekommen. Konsensfähige Strategien zum Erreichen der erforderlichen Treibhausgasneutralität können aber nur entwickelt werden, wenn die Bedeutung der CO₂-Entnahme und die Vor- und Nachteile der verschiedenen Technologien **in Politik und Gesellschaft diskutiert** werden. Insbesondere der Einsatz der umstrittenen CCS-Technologie sollte vor diesem Hintergrund neu bewertet werden.

Entscheidet man sich für BECCS als Teil der Klimaschutzstrategie, müsste die kommerzielle Entwicklung zeitnah beginnen. Zwischen 2020 und 2030 müssten erste BECCS-Anlagen kommerziell in Betrieb gehen und eine Infrastruktur für CO₂-Transport und -Einlagerung aufgebaut werden. Unter den derzeitigen Rahmenbedingungen gibt es allerdings keine Anreize, diese Technologie zu entwickeln.

Bewertungsrahmen für zukünftige Bioenergietechnologien

Im zukünftigen Energiesystem sollte Bioenergie die fluktuierenden erneuerbaren Energien möglichst gut ergänzen. Klimaschutz- und Energieszenarien zeigen, wie dies technisch gelingen könnte und welche Kosten in etwa insgesamt zu erwarten sind. Allerdings sind technische Eigenschaften und die Gesamtkosten nicht das einzige Kriterium für den erfolgreichen Einsatz einer Technologie. Viele weitere Faktoren – vom Verhalten verschiedener Akteursgruppen bis zu konkreten Marktmodellen – spielen ebenso eine wichtige Rolle. Daher ist eine umfassende **Bewertung verschiedener Technologieoptionen** erforderlich. Hierdurch könnte ein ständiges Nachsteuern bei der Bioenergiepolitik reduziert und dadurch die Planungssicherheit für Entwickler, Anbieter und Betreiber von Bioenergietechnologien erhöht werden.

Als Grundlage für eine Bewertung verschiedener Bioenergietechnologien hat die interdisziplinär besetzte ESYS-Arbeitsgruppe einen **Kriterienkatalog** entwickelt. Dieser umfasst 29 Kriterien der Ökonomie, Ökologie, Technik, der systemischen Einbindung in das Energiesystem sowie soziale und gesellschaftliche Aspekte. Darüber hinaus wurde bewertet, ob sich die jeweiligen Technologien für eine Kombination mit CCS eignen und damit zur CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre beitragen können. Die Kriterien wurden auf je zwei exemplarische Entwicklungspfade für Holz und Biogas von heute bis 2050 angewendet.

Für den heutigen Einsatz der Biomasse wird dabei jeweils die heute dominierende Technologie zugrunde gelegt: die lokale Erzeugung von Strom und Wärme aus Biogas in einem Blockheizkraftwerk und die Erzeugung von Heizwärme aus Holz in einem Holzheizkessel. Für 2050 wurden folgende Technologien betrachtet:

- flexibel betriebene Biogasanlage mit Blockheizkraftwerk zur lokalen Strom- und Wärmeerzeugung
- Biogasanlage mit Aufbereitung des Biogases zu Biomethan und Einspeisung ins Erdgasnetz
- Holzvergaseranlage zur lokalen Strom- und Wärmeerzeugung
- holzbasierte Bioraffinerie zur Erzeugung von Kraftstoffen

Die Bewertung der Fallbeispiele zeigt:

- **Technisch** sind die betrachteten Technologien weitgehend **ausgereift** und bereits am Markt verfügbar. Lediglich bei der Bioraffinerie besteht Entwicklungsbedarf.
- Alle untersuchten Technologien können auf sinnvolle Weise zur künftigen Energieversorgung beitragen. Die **Kraftstoffherstellung in der Bioraffinerie** und die **Herstellung von Biomethan**, das flexibel in allen Sektoren als Ersatz für Erdgas verwendet werden kann, sind mit der Perspektive bis 2050 vermutlich systemdienlicher als die kleineren Strom- und Wärmeerzeugungsanlagen.
- Die **Umweltfolgen** hängen vor allem von der Rohstoffbereitstellung ab und unterscheiden sich zwischen den verschiedenen Ausbaupfaden nur marginal. Obwohl jeweils Best-Practice-Konzepte mit einem möglichst nachhaltigen Rohstoffmix untersucht wurden, sind die betrachteten Bioenergietechnologien für 2050 aus ökologischer Sicht tendenziell **ungünstiger** als die auf Windkraft und Photovoltaik basierenden Referenzsysteme – insbesondere bei den Kriterien Flächenbedarf, Auswirkungen auf die Biodiversität und Treibhausgasbilanz.
- Auch die **regionalökonomischen und sozialen Effekte** sind stark von der Rohstoffbereitstellung geprägt. Konfliktpunkte bestehen hier unter anderem im Hinblick auf die Konkurrenz zu Lebensmitteln, die Veränderung des Landschaftsbildes und den möglichen Einsatz von Gentechnik. Die Verwendung von Holz auf individueller Ebene zum Heizen wird mit Autarkie in Verbindung gebracht und positiver bewertet als eine großskalige Holznutzung für die Bioraffinerie.
- Die **Wirtschaftlichkeit** von Bioenergieanlagen im künftigen Gesamtsystem hängt in hohem Maße davon ab, wie sich die Kosten konkurrierender Technologien wie Power-to-Gas entwickeln. Die Kostenentwicklung bis 2050 ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Im Vergleich zu Technologien wie Windkraft und Photovoltaik, die über die Errichtung der Anlagen hinaus keine Rohstoffe benötigen, sind die betrieblichen Risiken bei Bioenergietechnologien durch den hohen Rohstoffkostenanteil höher.
- Dezentrale Anlagenkonzepte bieten in vergleichsweise vielen Regionen **Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenziale**. Bei zentralen Anlagenkonzepten konzentrieren sich diese Effekte auf eine geringere Zahl an Akteuren und Anlagenstandorten.

- **Partikelemissionen** sind aufgrund ihrer gesundheitsschädlichen Wirkung bei allen Technologien ein wichtiges Kriterium, das auch für die zukünftige Akzeptanz entscheidend sein kann. Bis 2050 sollten sie sich allerdings durch technologische Optimierung bei allen untersuchten Technologien so weit senken lassen, dass sie kein relevantes lokales Risiko mehr darstellen.
- **Bioraffinerien und Biomethananlagen** eignen sich für die CO₂-Abscheidung und damit für die Erzeugung von **negativen Emissionen**. Für Biomethananlagen wäre zu prüfen, inwieweit die Anbindung an die Transportinfrastruktur für CO₂ logistisch praktikabel und wirtschaftlich vertretbar wäre, da die jährlich anfallenden CO₂-Mengen relativ gering sind. Die Biogas-KWK-Anlage und die Holz-KWK-Anlage sind nicht für eine Kombination mit CCS geeignet.

Bei der Entwicklung bis 2050 gibt es naturgemäß viele Unwägbarkeiten, unter anderem bei der Kostenentwicklung der Bioraffinerien und konkurrierender Power-to-Fuels-Technologien sowie bei der Akzeptanz von CCS und BECCS. Daher ist die Frage von Bedeutung, wie aufwendig es ist, von einem einmal eingeschlagenen Entwicklungspfad auf einen anderen zu wechseln. Dabei zeigen sich grundsätzliche Unterschiede zwischen feuchter Biomasse und Holz.

Die Herstellung und Nutzung von **Biomethan** kann schrittweise aufbauend auf der bestehenden Biogasnutzung entwickelt werden. Die Struktur der Rohstoffbereitstellung und die beteiligten Akteure bei der Rohstoffbereitstellung und beim Anlagenbetrieb unterscheiden sich kaum. Die Herausforderung besteht hier im Wesentlichen darin, die kontinuierliche Weiterentwicklung in Richtung Biomethan zu unterstützen und die Rohstoffbasis nachhaltig zu gestalten.

Bei der Nutzung von **Holz** sind die beiden möglichen Transformationspfade (KWK versus Bioraffinerie) hingegen grundlegend unterschiedlich. Für die Bioraffinerie müssten Biomasseströme aus regionalen Bereitstellungs- und Nutzungskonzepten herausgelöst werden. Regionale Akteure aus der Land- und Forstwirtschaft würden dadurch gegebenenfalls ökonomisch weniger profitieren. Dies wirft Fragen der empfundenen Verteilungsgerechtigkeit und Autonomie auf, und es sind stärkere soziale Folgen und Widerstände zu erwarten. Vor dem Hintergrund der technischen Unwägbarkeiten von holzbasierten Bioraffinerien kann zum heutigen Zeitpunkt keine sinnvolle Entscheidung für einen der beiden Technologiepfade getroffen werden. Dies wird noch verstärkt durch die Unsicherheit, ob und in welchem Umfang BECCS-Technologien künftig gesellschaftlich akzeptiert werden.

In der Gesamtschau bestehen große Ungewissheiten beider Transformationspfade für die künftige Bioenergienutzung. Durch eine regelmäßige, transparente und umfassende Bewertung verschiedener Entwicklungspfade könnten diese reduziert werden. Das vorgestellte Bewertungsinstrument bietet Ansätze dafür. Darüber hinaus ist dringend ein **gesellschaftlicher Dialogprozess** erforderlich, insbesondere zu neuen oder umstrittenen Technologien wie CCS und CO₂-Entnahmetechnologien.

7 Anhang: Ergänzende Angaben zur Kohlenstoffspeicherung in Mooren

Die folgenden Angaben sind der Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland 2050“²³³ entnommen.

Moore speichern pro Hektar etwa dreimal so viel Kohlenstoff wie Wälder (in Vegetation und Boden). In entwässerten Mooren wird der Torfkörper abgebaut, was durch das Pflügen weiter verstärkt wird. Dadurch können über mehrere Jahrhunderte große Mengen an CO₂ emittiert werden. Im Jahr 2010 betrug die Treibhausgasemissionen aus landwirtschaftlich genutzten Moorböden 41,1 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente. Damit verursachten 6 Prozent der landwirtschaftlichen Fläche mehr als 86 Prozent der gesamten Bodenemissionen Deutschlands. Die Wiedervernässung von Moorstandorten ist daher einer der größten Hebel, die Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft zu reduzieren.

Die in der vorliegenden Studie zugrunde gelegten unvermeidbaren Emissionen aus UBA 2014 wurden bereits mit der Annahme berechnet, dass bis 2050 85 Prozent der Moorstandorte (über eine Million Hektar Landwirtschaftsfläche) komplett aus der Nutzung genommen und wiedervernässt sind, während die restlichen 15 Prozent als Grünland extensiv bewirtschaftet werden. Insgesamt können die Treibhausgasemissionen dadurch auf 6,5 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente reduziert werden.

Eine Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre durch Moore kann nur durch einen Zuwachs des Torfkörpers erreicht werden. Je nach klimatischen Bedingungen, Art des Moores und Vegetation kann ein intaktes Moor jährlich zwischen 0,7 und 2 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Hektar binden. Gelingt es, die aus der Nutzung genommenen Moorstandorte in Deutschland wieder in einen naturnahen Zustand zu versetzen, könnten der Atmosphäre 1 bis 2 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente im Jahr entzogen werden.

Die Daten zu den Kohlenstoffflüssen und zur Treibhausgasbilanz von renaturierten Mooren sind allerdings noch sehr unsicher, hier besteht weiterer Forschungsbedarf. So können über lange Zeit landwirtschaftlich genutzte Moore nach der Wiedervernässung zunächst große Mengen an Methan ausstoßen, die sogar die Treibhausgasemissionen des trockengelegten, bewirtschafteten Moores übersteigen. Ein weiterer Unsicherheitsfaktor ist die Wasserverfügbarkeit, die nicht zuletzt durch den Klimawandel beeinflusst wird. Denn die Dauerhaftigkeit der Kohlenstoffspeicherung ist an den Wasserspiegel gebunden. Sinkt der Wasserspiegel und gelangt Sauerstoff an den Torfkörper, wird dieser wieder zersetzt.

²³³ UBA 2014.

Literatur

acatech 2018

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie. Analyse, Handlungsoptionen und Empfehlungen*, acatech POSITION, München 2018.

acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Hrsg.): »Sektorkopplung« – Optionen für die nächste Phase der Energiewende (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2017.

acatech/Leopoldina/Akademienunion 2019

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Hrsg.): *Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Strategien für eine nachhaltige Bioenergienutzung* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2019.

AEE 2017

Agentur für Erneuerbare Energien (AEE): *Umfrage von Kantar Emnid im Auftrag der AEE: Akzeptanzumfrage*, Stand 07/2017. URL: <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/grafik-dossier-akzeptanzumfrage-2017> [Stand: 08.11.2018].

Alexantratos/Bruinsma 2012

Alexantratos, N./Bruinsma, J.: *World agriculture towards 2030/2050: The 2012 revision*, 2012, ESA Working Paper, 12: 03, Rom 2012. URL: <http://www.fao.org/docrep/016/ap106e/ap106e.pdf> [Stand: 13.09.2018].

Anttila et al. 2009

Anttila, P./Karjalainen, T./Asikainen, A.: *Global Potential of Modern Fuelwood*, Finnish Forest Research Institute, 2009. URL: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2009/mwp118.pdf> [Stand: 13.09.2018].

Arvizu et al. 2011

Arvizu, D./Bruckner, T./Edenhofer, O.: „Technical Summary“. In: *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, United Kingdom/ New York: Cambridge University Press 2011. URL: https://www.researchgate.net/publication/301197848_Technical_Summary_In_IPCC_Special_Report_on_Renewable_Energy_Sources_and_Climate_Change_Mitigation [Stand: 13.09.2018].

Azar et al. 2006

Azar, C./Lindgren, K./Larson, E./Möllersten, K.: „Carbon Capture and Storage From Fossil Fuels and Biomass- Costs and Potential Role in Stabilizing the Atmosphere“. In: *Climatic Change*, 74: 1-3, 2006, S. 47–79. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-005-3484-7> [Stand: 13.09.2018].

Bais et al. 2015

Bais, A. L./Lauk, C./Kastner, T.: „Global patterns and trends of wood harvest and use between 1990 and 2010“. In: *Ecological Economics*, 119, 2015, S. 326–337.

Bauer et al. 2018

Bauer, N./Rose, S. K./Fujimori, S./van Vuuren, D. P./Weyant, J./Wise, M./Cui, Y./Daiglou, V./Gidden, M. J./Kato, E./Kitous, A./Leblanc, F./Sands, R./Sano, F./Strefler, J./Tsutsui, J./Bibas, R./Fricko, O./Hasegawa, T./Klein, D./Kurosawa, A./Mima, S./Muratori, M.: „Global energy sector emission reductions and bioenergy use- overview of the EMF-33 model comparison – Submitted to Climate Change“. In: *Climatic Change*, Springer-Verlag 2018.

Benemann 2013

Benemann, John: „Microalgae for Biofuels and Animal Feeds“. In: *Energies*, 6: 11, 2013, S. 5869–86. doi:10.3390/en6115869.

Bentsen 2017

Bentsen, N.: „Carbon debt and payback time- Lost in the forest?“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73: C, 2017, S. 1211–1217. URL: https://econpapers.repec.org/article/eeerensus/v_3a73_3ay_3a2017_3ai_3ac_3ap_3a1211-1217.htm [Stand: 07.08.2018].

Bild 2017

Bild: *Studie belegt Fast 5000 Tote durch Diesel-Gate*, 18.09.2017. URL: <https://www.bild.de/geld/wirtschaft/dieselmotor/5000-tote-in-europa-durch-diesel-gate-53245700.bild.html> [Stand: 26.11.2018].

BMWi 2017-1

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): *Erneuerbare Energien in Zahlen, nationale und internationale Entwicklung in 2016*, Berlin 2017. URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2016.pdf?__blob=publicationFile&v=8 [Stand: 13.09.2018].

BMWi 2017-2

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland*, 2017. URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-10-a-bericht-reduktion-der-treibhausgasemissionen-deutschlands-langfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=4 [Stand: 13.09.2018].

BMWi 2017-3

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): *Energiedaten: Gesamtausgabe Berlin*, Mai 2017. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html> [Stand: 13.09.2018].

BMWi 2018-1

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland*, Stand Februar 2018. URL: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html [Stand: 28.09.2018].

BMWi 2018-2

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): *Energiedaten: Gesamtausgabe Berlin*, 2018. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html> [Stand: 28.09.2018].

BMU 2015

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU) (Hrsg.): *Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht*. Studie durchgeführt durch Ökoinstitut e. V. und Fraunhofer ISI, Dezember 2015. URL: <https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf> [Stand: 24.09.2018].

Bollen/Aalbers 2017

Bollen, J./Aalbers, R.: *Biomass-energy with carbon capture and storage should be used immediately*, Policy Brief 2017/02, CPB Netherlands Bureau for Economic Policy Analysis 2017.

Bonsch et al. 2014

Bonsch, M./Humpeöder, F./Popp, A./Bodirsky, B./Dietrich, J. P./Rolinski, S./Biewald, A./Lotze-Campen, H./Weindl, I./Gerten, D./Stevanovic, M.: „Trade-Offs between Land and Water Requirements for Large-Scale Bioenergy Production“. In: *GCB Bioenergy Press*, 2014 URL: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12226>. [Stand: 13.09.2018].

Böll-Stiftung 2016

Böll-Stiftung: *Last-ditch climate option or wishful thinking*, 2016. URL: <https://www.boell.de/sites/default/files/beccs-report.pdf> [Stand: 13.09.2018].

Braun et al. 2017

Braun, C./Merk, C./Pönitzsch, G./Rehdanz, K./Schmidt, U.: „Public perception of climate engineering and carbon capture and storage in Germany: survey evidence“. In: *Climate Policy*, 4, 2017, S. 471–484.

Brosowski et al. 2016

Brosowski, A./Thrän, D./Mantau, U./Mahro, B./Erdmann, G./Adler, P./Stinner, W./Reinhold, G./Hering, T./Blanke, C.: „A review of biomass potential and current utilisation – Status quo for 93 biogenic wastes and residues in Germany“. In: *Biomass and Bioenergy*, 95, 2016, S. 257–272.

Brouwer et al. 2016

Brouwer, A./van den Broek, S./Zappa, M./Turkenburg, W. C./Faaij, A.: „Least-cost options for integrating intermittent renewables in low-carbon power systems“. In: *Applied Energy*, 161, 2016, S. 48–74.

Buck 2016

Buck, H. J.: „Rapid scale-up of negative emissions technologies: social barriers and social implications“. In: *Climatic Change*, 139: 2, 2016, S. 155–167.

Bundesregierung 2010

Bundesregierung: *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*, 2010. URL: https://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/_Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.pdf?__blob=publicationFile&v=5 [Stand: 24.09.2018].

Carbonbrief 2017

Carbonbrief: „The Swiss company hoping to capture 1% of global CO₂ emissions by 2025“, 22. Juni 2017. URL: <https://www.carbonbrief.org/swiss-company-hoping-capture-1-global-co2-emissions-2025> [Stand: 24.09.2018].

Carus et al. 2014

Carus, M./Raschka, A./Fehrenbach, H.: *Ökologische Innovationspolitik – Mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzungen von Biomasse*, Umweltbundesamt 2014. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_01_2014_druckfassung_uba_stofflich_abschlussbericht_lang_20_2_2014_2.pdf [Stand: 13.09.2018].

Chossière et al. 2017

Chossière, G. P./Malina, R./Ashok, A./Dedoussi, I. C./Eastham, S. D./Speth, R. L./Barrett, S.: „Public health impacts of excess NO_x emissions from Volkswagen diesel passenger vehicles in Germany“. In: *Environmental Research Letters*, 12 034014, 2017.

Climeworks 2017

Climeworks AG, Zurich: *Our Technology*, 2017. URL: <http://www.climeworks.com/our-technology/> [Stand: 24.09.2018].

Coelho et al. 2012

Coelho, S. T./Agbenyega, O./Agostini, A./Erb, K.-H./Haberl, H./Hoogwijk, M./Lal, R./Lucon, O./Masera, O./Moreira, J. R.: „Land and Water: Linkages to Bioenergy“. In: *Global Energy Assessment – Toward a Sustainable Future*, Austria, Cambridge University Press 2012, S. 1459–1526. URL: http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/Flagship-Projects/Global-Energy-Assessment/GEA_Chapter20_bioenergy_hires.pdf [Stand: 13.09.2018].

Consoli/Wildgust 2017

Consoli, C./Wildgust, N.: „Current Status of Global Storage Resources“. In: *Energy Procedia*, 114, 2017, S. 4623–4628.

Creutzig et al. 2015

Creutzig, F./Ravindranath, N./Benders, G./Bolwig, S./Bright, R./Cherubini, F./Chum, H./Corbera, E./Delucchi, M./Faaij, A./Fargione, J./Haberl, H./Heath, G./Lucon, O./Plevin, R./Popp, A./Robledo-Abad, C./Rose, S./Smith, P./Stromman, A./Suh, A./Masera, O.: „Bioenergy and climate change mitigation: an assessment“. In: *GCB Bioenergy*, 7, 2015, S. 916–944.

Creutzig 2016

Creutzig, F.: „Economic and ecological views on climate change mitigation with bioenergy and negative emissions“. In: *GCB Bioenergy*, 8, 2016, S. 4–10.

Daioglou et al. 2016

Daioglou, V./Stehfest, E./Wicke, B./Faaij, A./van Vuuren, D. P.: „Projections of the availability and cost of residues from agriculture and forestry“. In: *GCB Bioenergy*, 8, 2016, S. 456–470. URL: https://www.researchgate.net/publication/279225343_Projections_of_the_availability_and_cost_of_residues_from_agriculture_and_forestry [Stand: 13.09.2018].

DBFZ 2015

Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ): *Stromerzeugung aus Biomasse*, Vorhaben IIA Biomasse Zwischenbericht Mai 2015, 2015. URL: https://www.dbfz.de/fileadmin/eeg_monitoring/berichte/01_Monitoring_ZB_Mai_2015 [Stand: 18.07.2018].

DBFZ 2016

Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ): *Monitoring Biokraftstoffsektor*, 3. Auflage, DBFZ Report Nr. 11, 2016. URL: https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_11_3.pdf [Stand: 09.08.2018].

DBFZ 2017

Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ): *Anlagenbestand Biogas und Biomethan – Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland*, DBFZ Report Nr. 30, 2017. URL: https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Schriftenreihen/Report/DBFZ_Report_30.pdf [Stand: 09.08.2018].

DBFZ 2018

Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ): *Spektrum der Bioenergietechnologien*. Eigene Darstellung, 2018.

DeLucia et al. 2014

DeLucia, E. H./Gomez-Casanovast, N./Greenberg, J. A./Hudiburg, T. W./Ilsa, B./Kantola, I. B./Long, S. P./Miller, A. D./Ort, D. R./Parton, W. J.: „The Theoretical Limit to Plant Productivity“. In: *Environmental Science & Technology*, 48: 16, 2014, S. 9471–77.

Der Standard 2017

Der Standard: *Studie: Mehr Stickoxide sorgen jährlich für 5.000 zusätzliche Tote in Europa*, 18.09.2017. URL: <https://www.derstandard.de/story/2000064139416/abgasskandal-sorgt-fuer-5000-zusaetzliche-tote-in-europa-jaehrlich> [Stand: 26.11.2018].

Dütschke et al. 2015

Dütschke, E./Schumann, D./Pietzner, K.: „Chances for and Limitations of Acceptance for CCS in Germany“. In: Liebscher, A./Münch, U. (Hrsg.): *Geological Storage of CO₂ – Long Term Security Aspects. Advanced Technologies in Earth Sciences*, Cham: Springer International Publishing Switzerland 2015, S. 229–245.

Dütschke et al. 2016

Dütschke, E./Wohlfahrt, K./Höller, S./Viebahn, P./Schumann, D./Pietzner, K.: „Differences in the public perception of CCS in Germany depending on CO₂ source, transport option and storage location“. In: *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 53, 2016, S. 149–159.

easac 2018

European Academies Science Advisory Council (easac): *Negative emission technologies: What a role in meeting Paris Agreement targets?*, 2018. URL: https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Negative_Carbon/EASAC_Report_on_Negative_Emission_Technologies.pdf [Stand: 13.09.2018].

El Takriti et al. 2016

El Takriti, S./Malins, C./Searle, S.: *Understanding options for ILUC mitigation. ICCT working paper*, 2016. URL: https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ILUC-Mitigation-Options_ICCT_nov2016_o.pdf [Stand: 13.09.2018].

Elsner et al. 2015

Elsner, P./Fischedick, M./Sauer, D. U. (Hrsg.): *Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050. Technologien – Szenarien – Systemzusammenhänge* (Analyse aus der Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2015.

Erb et al. 2007

Erb, K.-H./Gaube, V./Krausmann, F./Plutzer, C.: „A comprehensive global 5 min resolution land-use dataset for the year 2000 consistent with national census data“. In: *Journal of Land Use Science*, 2: 3, 2007, S. 191–224.

Erb et al. 2008

Erb, K.-H./Gingrich, S./Krausmann, F./Haberl, H.: „Industrialization, Fossil Fuels, and the Transformation of Land Use. An Integrated Analysis of Carbon Flows in Austria 1830–2000“. In: *Journal of Industrial Ecology*, 12: 5–6, 2008, S. 686–703.

Erb et al. 2009

Erb, K.-H./Haberl, H./Krausmann, F./Lauk, C./Plutzer, C./Steinberger, J./Müller, C./Bondeau, A./Waha, K./Pollack, G.: *Eating the planet: Feeding and fuelling the world sustainably, fairly and humanely – a scoping study*. Studie im Auftrag von Compassion in World Farming and Friends of the Earth, UK. Institute of Social Ecology, Vienna, Austria and Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Potsdam 2009.

Erb et al. 2012

Erb, K.-H./Haberl, H./Plutzer, C.: „Dependency of global primary bioenergy crop potentials in 2050 on food systems, yields, biodiversity conservation and political stability“. In: *Energy Policy*, 47, 2012, S. 260–269. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512003710> [Stand: 13.09.2018].

Erb et al. 2013

Erb, K.-H./Kastner, T./Luyssaert, S./Houghton, R. A./Kuemmerle, T./Olofsson, P./Haberl, H.: „Bias in the attribution of forest carbon sinks“. In: *Nature Climate Change*, 3, 2013, S. 854–856. URL: https://www.researchgate.net/publication/282274482_Bias_in_the_attribution_of_forest_carbon_sink [Stand: 13.09.2018].

Erb et al. 2016-1

Erb, K.-H./Luyssaert, S./Meyfroidt, P./Pongratz, J.: „Land management: data availability and process understanding for global change studies“. In: *Global Change Biology*, 23, 2016, S. 512–533.

Erb et al. 2016-2

Erb, K.-H./Lauk, C./Kastner, T.: „Exploring the biophysical option space for feeding the world without deforestation“. In: *Nature Communications*, 7: 11382, 2016.

Erb et al. 2018

Erb, K.-H./Kastner, T./Plutzer, C.: „Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass“. In: *Nature*, 2018, S. 73–76.

Erlach et al. 2018

Erlach, B./Henning, H.-M./Kost, C./Palzer, A./Stephanos, C.: *Optimierungsmodell REMod-D. Materialien zur Analyse »Sektorkopplung« – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2018.

Ernsting/Munnion 2015

Ernsting, A./Munnion, O.: *Last-ditch climate option or wishful thinking? Bioenergy with carbon capture and storage. A report by Biofuelwatch*, 2015. URL: <http://www.biofuelwatch.org.uk/wp-content/uploads/BECCS-report-web.pdf> [Stand: 24.09.2018].

Europäische Kommission 2010

Europäische Kommission: Bericht der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament über Nachhaltigkeitskriterien für die Nutzung fester und gasförmiger Biomasse bei Stromerzeugung, Heizung und Kühlung (KOM2010(11)).

EU 2018-1

Europäische Union: *Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung)*. 2018. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN> [Stand: 02.01.2019].

EU 2018-2

Europäische Union: *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources*, 4-Spaltendokument, 2018. URL: <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/10102/2016/EN/SWD-2016-419-F1-EN-MAIN-PART-2.PDF> [Stand: 01.08.2018].

Ewens 2013

Ewens, H.-P.: „Anforderungen an Kleinfeuerungsanlagen. Stand der Umsetzung und Ausblick.“ Präsentation beim *LAI-Fachgespräch*, Essen, 2. Oktober 2013. URL: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/luft/pdf/lai_fachgesprach/10_Ewens_Anforderungen_Kleinfeuerungsanlagen.pdf [Stand: 24.09.2013].

FAO 2010

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): *Global Forest Resources Assessment 2010*. Rom 2010.

Fetzel et al. 2017-1

Fetzel, T./Havlik, P./Herrero, M./Kaplan, J. O./Kastner, T./Kroisleitner, C./Rolinski, S./Searchinger, T./van Bodegom, P. M./Wiersenius, S./Erb, K.-H.: „Quantification of uncertainties in global grazing systems assessment“. In: *Global Biogeochemical Cycles*, 31: 7, 2017, S. 1089–1102.

Fetzel et al. 2017-2

Fetzel, T./Havlik, P./Herrero, M./Erb, K.-H.: „Seasonality constraints to livestock grazing intensity“. In: *Global Change Biology*, 23, 2017, S. 1636–1647.

FAOSTAT 2012

FAO Statistics. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rom, 2012, S. 352. URL: <http://www.fao.org/home/en/> [Stand: 01.08.2018].

Finkbeiner 2014

Finkbeiner, A.: „Indirect land use change-Help beyond the Hype?“. In: *Biomass and Bioenergy*, 62, 2014, S. 218–221.

Fridahl 2017

Fridahl, M.: „Socio-political prioritization of bioenergy with carbon capture and storage“. In: *Energy Policy*, 104, 2017, S. 89–99.

Fuss et al. 2014

Fuss, S./Canadell, J./Peters, G.: „Betting on negative emissions“. In: *Nature Climate Change*, 4, 2014, S. 850–853.

Fuss et al. 2018

Fuss, S./Lamb, W./Callaghan, M./Hilaire, J./Creutzig, F./Amann, T./Beringer, T./de Oliveira Garcia, W./Hartmann, J./Khanna, T./Luderer, G./Gregory F Nemet, G. F./Rogelj, J./Smith, P./Vicente, J. L. V./Wilcox, J./del Mar Zamora Dominguez, M./Min, J. C.: „Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects“. In: *Environmental Research Letters*, 13: 063002, 2018.

Gawel/Purkus 2013

Gawel, E./Purkus, A.: „Promoting the market and system integration of renewable energies through premium schemes – A case study of the German market premium“. In: *Energy Policy*, 61, 2013, S. 599–609.

Geden et al. 2018

Geden, O./Peters, G./Scott, V.: „Targeting carbon dioxide removal in the European Union“. In: *Climate Policy*, 2018.

Gingrich et al. 2007

Gingrich, S./Erb, K.-H./Krausmann, F./Gaube, V./Haberl, H.: „Long-term dynamics of terrestrial carbon stocks in Austria: a comprehensive assessment of the time period from 1830 to 2000“. In: *Regional Environmental Change*, 7, 2007, S. 37–47.

Global CCS Institute 2016

Global CCS Institute: *Global storage portfolio: a global assessment of the geological CO₂ storage resource potential*, 2016.

Global CCS Institute 2017

Global CCS Institute: *The Global Status of CCS: 2017*, 2017. URL: https://www.globalccsinstitute.com/sites/www.globalccsinstitute.com/files/uploads/global-status/1-0_4529_CCS_Global_Status_Book_layout-WAW_spreads.pdf [Stand: 24.09.2018].

Griesen 2010

Griesen, M.: „Akzeptanz von Biogasanlagen“. In: *Bonner Studien zur Wirtschaftssoziologie*, Band 34, Aachen: Shaker Verlag 2010.

Haberl et al. 2007

Haberl, H./Erb, K.-H./Krausmann, F./Gaube, V./Bondeau, A./Plutzer, C./Gingrich, S./Lucht, W./Fischer-Kowalski, M.: „Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104: 31, 2007, S. 12942–12947. URL: <http://www.pnas.org/content/pnas/104/31/12942.full.pdf> [Stand: 13.09.2018].

Haberl et al. 2010

Haberl, H./Beringer, T./Bhattacharya, S./Erb, K.-H./Hoogwijk, M.: „The global technical potential of bioenergy in 2050 considering sustainability constraints“. In: *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2, 2010, S. 394–403.

Haberl et al. 2011

Haberl, H./Erb, K.-H./Krausmann, F./Bondeau, A./Lauk, C./Müller, C./Plutzer, C./Steinberger, J. K.: „Global bioenergy potentials from agricultural land in 2050: Sensitivity to climate change, diets and yields“. In: *Biomass and Bioenergy*, 35: 12, 2011, S. 4753–4769.

Haberl et al. 2012

Haberl, H./Sprinz, D./Bonazountas, M./Cocco, P./Desaubies, Y./Henze, M./Hertel, O./Johnson, R. K./Kastrup, U./Laconte, P./Lange, E./Novak, P./Paavola, J./Reenberg, A./van den Hove, S./Vermeire, T./Wadhams, P./Searchinger T. D.: „Correcting a fundamental error in greenhouse gas accounting related to bioenergy“. In: *Energy Policy*, 45–222: 5, 2012, S. 18–23. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23576835> [Stand: 07.08.2018].

Haberl et al. 2013

Haberl, H./Erb, K.-H./Krausmann, F./Running, S./Searchinger, T. D./Smith, W. K.: „Bioenergy: How Much Can We Expect for 2050?“. In: *Environmental Research Letters*, 8: 3, 2013. URL: https://www.researchgate.net/publication/260516963_Bioenergy_How_much_can_we_expect_for_2050 [Stand: 13.09.2018].

Haberl et al. 2014

Haberl, H./Erb, K.-H./Krausmann, F.: „Human Appropriation of Net Primary Production: Patterns, Trends, and Planetary Boundaries“. In: *Annual Review of Environment and Resources*, 39, 2014, S. 363–391.

Haberl/Geissler 2000

Haberl, H./Geissler, S.: „Cascade utilization of biomass: strategies for a more efficient use of a scarce resource“. In: *Ecological Engineering*, 16, Supplement 1, 2000, S. 111–121.

Hahn et al. 2014

Hahn, H./Krautkremer, B./Hartmann, K./Wachendorf, M.: „Review of concepts for a demand-driven biogas supply for flexible power generation“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, S. 383–393.

Hakala et al. 2009

Hakala, K./Kontturi, M./Pahkala, K.: „Field biomass as global energy source“. In: *Agriculture Food Science*, 18, 2009, S. 347–365.

Hildebrand et al. 2018

Hildebrand, J./Rau, I./Schweizer-Ries, P.: Akzeptanz und Beteiligung – ein ungleiches Paar. In: Holstenkamp, L./Radtke, J. (Hrsg.): *Handbuch Energiewende und Partizipation*, Wiesbaden: Springer VS 2017, S. 195–209.

Hirth et al. 2015

Hirth, L./Ueckerdt, F./Edenhofer, O.: „Integration costs revisited An economic framework for wind and solar variability“. In: *Renewable Energy*, 74, 2015, S. 925–93.

Holzhammer 2014

Holzhammer, U.: „Biogas in einer zukünftigen Energieversorgungsstruktur mit hohen Anteilen fluktuierender erneuerbarer Energien“. In: *Schriftenreihe Umweltingenieurwesen*, 56, Fraunhofer Institute 2014.

Hoogwijk et al. 2005

Hoogwijk, M./Faaij, A./Eickhout, B.: „Potential of biomass energy out to 2100, for four IPCC SRES land-use scenarios“. In: *Biomass and Bioenergy*, 29: 4, 2005, S. 225–257.

IAASTD 2009

International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development (IAASTD): *Agriculture at a Crossroads. Global Report*, Washington 2009. URL: <https://www.weltagrabericht.de/fileadmin/files/weltagrabericht/IAASTDBerichte/GlobalReport.pdf> [Stand: 13.09.2018].

IEA 2009

International Energy Agency (IEA): *Technology Roadmap – Carbon Capture and Storage*, 2009. URL: <https://webstore.iea.org/technology-roadmap-carbon-capture-and-storage-2009> [Stand: 24.09.2018].

IEA 2017

International Energy Agency (IEA): *World Energy Outlook 2017*. URL: http://www.iea.org/media/weoweb/2017/Chap1_WEO2017.pdf [Stand: 13.09.2018].

IEA 2018

International Energy Agency (IEA): *Global Energy & CO₂ Status Report 2017*, 2018. URL: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GECO2017.pdf> [Stand: 24.09.2018].

IIASA 2015

International Institute of Applied System Analysis (IIASA): *AR5 Scenario Database, version 1.0.2.*, 2015 URL: <https://tntcat.iiasa.ac.at/AR5DB/dsd?Action=htmlpage&page=about#> [Stand: 08.08.2018].

Irisarri et al. 2017

Irisarri, N./Aguiar, S./Oosterheld, M./Derner, J. D./Golluscio, R. A.: „A narrower gap of grazing intensity. Reply to Fetzel et al. Seasonality constrains to livestock grazing intensity“. In: *Global Change Biology*, 23, 2017, S. 3965–3966.

IPCC 2006

Weltklimarat (IPCC): *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*. In: Egglestone (Ed.), IGES, Japan, 2006.

IPCC 2014

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press 2014.

IPCC 2018

Weltklimarat (IPCC): *Global Warming of 1.5°C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, 2018. URL: <https://www.ipcc.ch/sr15/> [Stand: 04.02.2019].

Ishimoto et al. 2017

Ishimoto, Y./Sugiyama, M./Kato, E./Moriyama, R./Tsuzuki, K./Kurosawa, A.: „Putting costs of direct air capture into context“. In: *FCEA Working Paper Series*, 002, Forum for Climate Engineering Assessment 2017. URL: <https://ssrn.com/abstract=2982422> [Stand: 06.11.2018].

Itaoka et al. 2009

Itaoka, K./Okuda, Y./Saito, A./Akai, M.: „Influential information and factors for social acceptance of CCS: the 2nd round survey of public opinion in Japan“. In: *Energy Procedia*, 1: 1, 2009, S. 4803–4810.

Kastner et al. 2015

Kastner, T./Erb, K.-H./Haberl, H.: „Global Human Appropriation of Net Primary Production for Biomass Consumption in the European Union“. In: *Journal of Industrial Ecology*, 19, 2015, S. 825–836.

Keith et al. 2018

Keith, D./Holmes, J./Heidel, K.: *A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere*, 2018. URL: [https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351\(18\)30225-3](https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351(18)30225-3) [Stand: 13.09.2018].

Klein et al. 2014

Klein, D./Luderer, G./Kriegler, E./Strefler, J./Bauer, N./Leimbach, M./Popp, A./Dietrich, J. P./Humpeöder, F./Lotze-Campen, H./Edenhofer, O.: „The value of bioenergy in low stabilization scenarios: an assessment using REMIND-MAgPIE“. In: *Climatic Change*, 123: 3–4, S. 705–718.

Knopf et al. 2010

Knopf, S./May, F./Müller, C./Gerling, J. P.: „Neuberechnung möglicher Kapazitäten zur CO₂-Speicherung in tiefen Aquifer-Strukturen“. In: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 60: 4, 2010, S. 76–80.

Koopmans/Koppejan 1997

Koopmans, A./Koppejan, J.: „Agricultural and Forest Residues – Generation, Utilization and Availability“. Paper presented at the *Regional Consultation on Modern Applications of Biomass Energy*, Kuala Lumpur, 6.–10. Januar 2017. URL: <http://www.fao.org/docrep/006/AD576E/ad576e00.pdf> [Stand: 13.09.2018].

Krause et al. 2014

Krause, R. M./Carley, S. R./Warren, D. C./Rupp, J. A./Graham, J. D.: „Not in (or under) my backyard: geographic proximity and public acceptance of carbon capture and storage facilities“. In: *Risk Analysis*, 34: 3, 2014, S. 529–540.

Krausmann et al. 2008

Krausmann F./Erb, K.-H./Gingrich, S./Lauk, C./Haberl, H.: „Global patterns of socioeconomic biomass flows in the year 2000: A comprehensive assessment of supply, consumption and constraints“. In: *Ecological Economics*, 65, 2008, S. 471–487.

Krausmann et al. 2013

Krausmann, F./Erb, K.-H./Gingrich, S./Haberl, H./Bondeau, A./Gaube, V./Lauk, C./Plutzer, C./Searchinger, T. D.: „Global Human Appropriation of Net Primary Production Doubled in the 20th Century“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110: 25, 2013, S. 10324–10329.

Kreidenweis et al. 2016

Kreidenweis, U./Humpenöder, F./Stevanovic, M.: „Afforestation to mitigate climate change: impacts on food prices under consideration of albedo effects“. In: *Environmental Research Letters*, 2016.

Kreyenberg et al. 2015

Kreyenberg, D./Lischke, A./Bergk, F.: *Erneuerbare Energien Im Verkehr – Potenziale Und Entwicklungsperspektiven Verschiedener Erneuerbarer Energieträger Und Energieverbrauch Der Verkehrsträger*, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin 2015. URL: <http://www.lbst.de/download/2015/mks-kurzstudie-ee-im-verkehr.pdf> [Stand: 24.09.2018].

Kriegler et al. 2014

Kriegler, E./Weyant, J./Blanford, G.: „The role of technology for achieving climate policy objectives: overview of the EMF 27 study on global technology and climate policy strategies“. In: *Climatic Change*, 123: 3–4, 2014, S. 353–367.

Kummu et al. 2012

Kummu, M./de Moel, H./Porkka, M./Siebert, S./Varis, O./Ward P. J.: „Lost food, wasted resources: Global food supply chain losses and their impacts on freshwater, cropland, and fertiliser use“. In: *Science of The Total Environment*, 438, 2012, S. 477–489.

Lauer et al. 2017

Lauer, M./Dotzauer, M./Hennig, C./Lehmann, M./Nebel, E./Postel, J./Szarka, N./Thrän, D.: „Flexible power generation scenarios for biogas plants operated in Germany“. In: *International Journal of Energy Research*, 41: 1, 2017.

Lauer/Thrän 2017

Lauer, M./Thrän, D.: „Biogas plants and surplus generation: Cost driver or reducer in the future German electricity system?“. In: *Energy policy*, 2017, S. 342–336.

Lenz et al. 2018

Lenz, V./Naumann, K./Denysenko, V./Daniel-Gromke, D./Rensberg, N./Rönsch, C./Janczik, S./Maslaton, M./Hilgedieck, J./Kaltschmitt, M.: „Erneuerbare Energien“. In: *BWK*, 70: 5, 2018.

Long et al. 2006

Long, S. P./Ainsworth, E. A./Leakey, A. D./Nösberger, J./Ort, D. R.: „Food for Thought: Lower-Than-Expected Crop Yield Stimulation with Rising CO₂ Concentrations“. In: *Science*, 312, 2006, S. 1918–1921.

Lunz 2016

Lunz, B.: *Deutschlands Stromversorgung im Jahr 2050. Ein szenariobasiertes Verfahren zur vergleichenden Bewertung von Systemvarianten und Flexibilitätsoptionen*, Aachener Beiträge des ISEA, Band 82, Aachen: Shaker Verlag 2016.

Lugschitz et al. 2012

Lugschitz, R./Bruckner, M./Giljum, S.: *Europe's Global Land Demand. A study on the actual land embodied in European imports and exports of agricultural and forestry products. Final Report*, Sustainable Europe Research Institute (SERI) 2011. URL: https://www.foeeurope.org/sites/default/files/publications/europe_global_land_demand_oct111.pdf [Stand: 21.09.2018].

Mantau et al. 2010

Mantau, U./Saal, U./Prins, K./Steierer, F./Lindner, M./Verkerk, H./Eggers, J./Leek, N./Oldenburger, J./Asikainen, A./Antila, P.: *EUwood - Real potential for changes in growth and use of EU forests*, Final report, Hamburg 2010.

Matondi et al. 2011

Matondi, B./Havnevik, K./Beyene, A. (Hrsg.): *Biofuels, Land Grabbing and Food Security in Africa*, London 2011. URL: <https://www.zedbooks.net/shop/book/biofuels-land-grabbing-and-food-security-in-africa/> [Stand: 13.09.2018].

Mauser et al. 2015

Mauser, W./Klepper, G./Zabel, F./Delzeit, R./Hank, T./Putzenlechner, B./Calzadilla, A.: „Global biomass production potentials exceed expected future demand without the need for cropland expansion“. In: *Nature Communications*, 6, 2015.

Millennium Ecosystem Assessment 2005

Millennium Ecosystem Assessment: *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*, World Resource Institute, Washington, DC: Island Press 2005. URL: <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf> [Stand: 21.09.2018].

Mueller et al. 2012

Mueller, N. D./Gerber, J. S./Johnston, M./Ray, D. K./Ramankutty, N./Foley, J. A.: „Closing yield gaps through nutrient and water management“. In: *Nature*, 490, 7419: 254–7, 2012.

Mueller-Langer et al. 2017

Mueller-Langer, F./Majer, S./Perimenis, A.: „Biofuels: A Technical, Economic, and Environmental Comparison“. In: *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, Springer 2017. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2493-6_257-3.

NERC 2017

Natural Environment Research Council (NERC): *Greenhouse Gas Removal from the Atmosphere*, UK Research Programme, 2017. URL: <https://nerc.ukri.org/research/funded/programmes/ggr/> [Stand: 24.09.2018].

Niedertscheider et al. 2016

Niedertscheider, M./Kastner, T./Fetzel, T./Haberl, H./Kroisleitner, C./Plutzer, C./Erb, K.-H.: „Mapping and analyzing cropland use intensity from a NPP perspective Environ“. In: *Environmental Research Letters*, 11: 014008, 2016.

Norsker et al. 2011

Norsker, N. H./Barbosa, M. J./Vermü, M. H./Wijffels, R. H.: „Microalgal Production – A Close Look at the Economics“. In: *Biotechnology Advances*, 29: 1, 2011, S. 24–27.

Nyrud et al. 2008

Nyrud, A. Q./Roos, A./Sande, J. B.: „Residential bioenergy heating: A study of consumer perceptions of improved woodstoves“. In: *Energy Policy*, 36: 8, 2008, S. 3169–3176.

OECD/IEA 2017

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)/International Energy Agency (IEA): *Technology Roadmap- Delivering Sustainable Bioenergy*, 2017. URL: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Technology_Roadmap_Delivering_Sustainable_Bioenergy.pdf [Stand: 13.09.2017].

Ohlhorst 2009

Ohlhorst, D.: *Windenergie in Deutschland. Konstellationen, Dynamiken und Regulierungspotenziale im Innovationsprozess* (Reihe Energiepolitik und Klimaschutz), Wiesbaden: VS-Verlag 2009.

Olsson et al. 2018

Olsson, O./Roos, A./Guisson, R.: „Time to tear down the pyramids? A critique of cascading hierarchies as a policy tool“. In: *WIREs Energy and Environment*, 7: 2, 2018.

Oltra et al. 2012

Oltra, C./Upham, P./Riesch, H./Boso, À./Brunsting, S./Dütschke, E./Lis, A.: „Public responses to CO₂ storage sites: lessons from five European cases“. In: *Energy & Environment*, 23: 2–3, 2012, S. 227–248.

Peters/Geden 2017

Peters, G./Geden, O.: „Catalysing a political shift from low carbon to negative carbon“. In: *Nature Climate Change*, 7, S. 619–621.

Pietzner 2012

Pietzner, K.: *Folgeprojekt CCS-Kommunikation – Multivariate Analysen der Einflussfaktoren auf die Akzeptanz von CCS* („Folgeprojekt CCS-Kommunikation“), Abschlussbericht, 2012. URL: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/4521/file/4521_CCS-Kommunikation.pdf [Stand: 24.09.2018].

Pietzner/Schumann 2012

Pietzner, K./Schumann, D. (Hrsg.): *Akzeptanzforschung zu CCS in Deutschland. Aktuelle Ergebnisse, Praxisrelevanz, Perspektiven*, München: Oekom-Verlag 2012.

Plutzer et al. 2016

Plutzer, C./Kroisleitner, C./Haberl, H./Fetzel, T./Bulgheroni, C./Beringer, T./Hostert, P./Kastner, T./Kuemmerle, T./Lauk, C./Levers, C./Lindner, M./Moser, D./Müller, D./Niedertscheider, M./Paracchini, M. L./Schaphoff, S./Verburg, P. H./Verker, P. J./Erb, K.-H.: „Changes in the spatial patterns of human appropriation of net primary production (HANPP) in Europe 1990–2006“. In: *Regional Environmental Change*, 16: 5, 2016, S. 1225–1238.

Ponitka et al. 2015

Ponitka, J./Arendt, O./Thrän, D.: „Detailstudie: Elemente und Meilensteine für die Entwicklung einer tragfähigen, nachhaltigen Bioenergiestrategie (Meilensteine 2030): Schlussbericht“, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum 2015.

Potapov et al. 2017

Potapov, P./Hansen, M. C./Laestadius, L./Turubanova, S./Yaroshenko, A./Thies, C./Smith, W./Zhuravleva, I./Komarova, A./Minnemeyer, S./Eispova, E.: „The last frontiers of wilderness: Tracking loss of intact forest landscapes from 2000 to 2013“. In: *Science Advances*, 3: 1, 2017.

Proskurina et al. 2018

Proskurina, S./Junginger, M./Heinimö, J./Tekinel, B./Vakkilainen, E.: „Global biomass trade for energy— Part 2: Production and trade streams of wood pellets, liquid biofuels, charcoal, industrial roundwood and emerging energy biomass“. In: *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, 2018. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bbb.1858> [Stand: 13.09.2018].

Radics et al. 2015

Radics, R./Dasmohapatra, S./Kelley, S.: „Systematic Review of Bioenergy Perception Studies“. In: *BioResources*, 10: 4, 2015.

Rautiainen et al. 2010

Rautiainen, A./Saikku, L./Kauppi, P. E.: „Carbon gains and recovery from degradation of forest biomass in European Union during 1990–2005“. In: *Forest Ecology and Management*, 259, 2010, S. 1232–1238.

Reid et al. 2005

Reid, W./Mooney, H. A./Cropper, A./Capistrano, D./Carpenter, S. R./Chopra, K./Dasgupta, P./Dietz, T./Duraiappah, A. K./Hassan, R./Kasperson, R./Leemans, R./May, R. M./McMichael, T. A. J./Pingali, P./Samper, C./Scholes, R./Watson, R. T./Zakri, A. H./Shidong, Z./Ash, N. J./Bennett, E./Kumar, P./Lee, M. J./Raudsepp-Hearne, C./Simons, H./Thonell, J./Zurek, M. B.: *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis- Millennium Ecosystem Assessment*, Washington DC: Island Press 2005. URL: <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf> [Stand: 13.09.2018].

Renn 2014

Renn, O.: „Gesellschaftliche Akzeptanz für die bevorstehenden Phasen der Energiewende.“ In: *Beiträge zur FVEE- Jahrestagung*, 2014, S. 75–78. URL: http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2014/th2014_06_01.pdf [Stand: 06.11.2018].

REN21 2016

Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (RNE21): *Renewables 2016 Global Status Report*, Paris 2016. URL: <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/> [Stand: 13.09.2018].

Rocca et al. 2015

Rocca, S./Agostini, A./Giuntoli, A./Marelli, L.: *Biofuels from algae: technology options, energy balance and GHG emissions. Insights from a literature review*, JRC Science for Policy report, Joint Research Centre of the European Commission, 2015.

Rogelj et al.

Rogelj, J./Luderer, G./Pietzcker, R.: „Energy system transformations for limiting end-of-century warming to below 1.5°C“. In: *Nature Climate Change*, 5, 2015, S. 519–527.

Rogner et al. 2012

Rogner, H.-H./Aguilera, F./Bertani, A.-C.: „Energy Resources and Potentials“. In: *Global Energy Assessment – Toward a Sustainable Future*, Cambridge University Press, 2012, S. 423–512.

Rosegrant et al. 2008

Rosegrant, M. W./Zhu, T./Msangi, S./Sulser, T.: „Global scenarios for biofuels: Impacts and implications“. In: *Revision Agricultural Economics*, 30: 3, 2008, S. 495–505.

Rönsch 2018

Rönsch, C.: *Entwicklung einer Methode zur Verwendung der Daten des Schornsteinfegerhandwerks für die energiewirtschaftliche Berichterstattung*, 2018 (in Veröffentlichung).

Ruser et al. 2017

Ruser, R./Fuß, R./Andres, M./Hegewald, H./Kesenheimer, K./Köbke, S./Räbiger, T./Suarez Quinones, T. et al.: „Nitrous oxide emissions from winter oilseed rape cultivation“. In: *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 249, 2017, S. 57–69.

Schlesinger 2018

Schlesinger, W. H.: „Are wood pellets a green fuel?“. In: *Science*, 359, 2018, S. 1328–1329.

Schmidt et al. 2016

Schmidt, K./Kastner, I./Nachreiner, M.: „Bedeutung und Besonderheiten wahrgenommener Quellenglaubwürdigkeit bei umweltrelevanten Verhaltensentscheidungen“. In: *Umweltpsychologie*, 20: 1, 2016, S. 105–124.

Schleussner et al. 2018

Schleussner, C.-F./Deryng, D./Müller, C./Elliott, J./Saeed, F./Folberth, C./Liu, W./Wang, X./Pugh, T. A. M./Thiery, W./Seneviratne, S. I./Rogelj, J.: „Crop productivity changes in 1.5°C and 2°C worlds under climate sensitivity uncertainty“. In: *Environmental Research Letters*, 2018, S. 1–9.

Schneider et al. 2009

Schneider A./Friedl, M. A./Potere, D.: „A new map of global urban extent from MODIS satellite data“. In: *Environmental Research Letters*, 4: 4, 2009.

Schuenemann et al. 2017

Schuenemann, F./Thurlow, J./Zeller, M.: „Leveling the Field for Biofuels: Comparing the Economic and Environmental Impacts of Biofuel and Other Export Crops in Malawi“. In: *Agricultural Economics*, 48: 3, 2017, S. 301–315.

Schulze et al. 2012

Schulze, E.-D./Körner, C./Law, B. E./Haberl, H./Luyssaert, S.: „Large-scale bioenergy from additional harvest of forest biomass is neither sustainable nor greenhouse gas neutral“. In: *Global Change Biology Bioenergy*, 4, 2012, S. 611–616.

Searle/Malins 2014

Searle, Y./Malins C.: „Will Energy Crop Yields Meet Expectations?“. In: *Biomass and Bioenergy*, 2014, S. 3–12.

Searle/Malins 2015

Searle, S./Malins, C.: „A Reassessment of Global Bioenergy Potential in 2050“. In: *GCB Bioenergy*, 7: 2, S. 328–36.

Shepon et al. 2016

Shepon, A./Eshel, G./Noor, E.: „Energy and protein feed-to-food conversion efficiencies in the US and potential food security gains from dietary changes“. In: *Environmental Research Letters*, 11: 10, 2016.

Slade/Bauen 2013

Slade, A./Bauen, A.: „Micro-algae cultivation for biofuels: Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects“. In: *Biomass and Bioenergy*, 53, 2013, S. 29–38.

Smeets et al. 2007

Smeets, E. M. W./Faaij, A. P. C./Lewandowski, I. M./Turkenburg, W. C.: „A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050“. In: *Progress in Energy and Combustion Science*, 33: 1, 2007, S. 56–106.

Sims et al. 2006

Sims R. E. H./Hastings, A./Schlamadinger, B./Taylor, G./Smith, P.: „Energy crops: current status and future prospects“. In: *Global Change Biology*, 12, 2006, S. 2054–2076.

Smith et al. 2012-1

Smith, W. K./Zhao, M./Runnig, S. W.: „Global Bioenergy Capacity as Constrained by Observed Biospheric Productivity Rates“. In: *BioScience*, 62: 10, 2012, S. 911–22.

Smith et al. 2012-2

Smith, W. K./Cleveland, C. C./Reed, S. C.: „Bioenergy Potential of the United States Constrained by Satellite Observations of Existing Productivity“. In: *Environmental Science & Technology*, 46: 6, S. 3536–3544.

Smith et al. 2014-1

Smith, W. K./Cleveland, C. C./Reed, S. C./Running, S. W.: „Agricultural Conversion without External Water and Nutrient Inputs Reduces Terrestrial Vegetation Productivity“. In: *Geophysical Research Letters*, 41: 2, 2012, S. 449–455.

Smith et al. 2014-2

Smith, P./Bustamante, M./Ahmmed, H./Clark, H./Dong, H./Elsiddig, E. A./Haberl, H./Harper, R./House, J./Jafari, M./Masera, O./Mbow, C./Ravindranath, N. H./Rice, C. W./Robledo Abad, C./Romanovskaya, A./Sperling, F./Tubiello, F. N.: „Agriculture, forestry and other land use (AFOLU)“. In: *Climate Change 2014: Mitigation for Climate Change*, IPCC Working Group III Contribution to AR5, Cambridge University Press 2014. URL: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter11.pdf [Stand: 13.09.2018].

Smith et al. 2015

Smith, P./Davies, S./Yongsung, C.: „Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions“. In: *Nature Climate Change*, 6, 2016, S. 42–50.

Smith 2016

Smith, P.: „Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies“. In: *Global Change Biology*, 22: 3, 2016, S. 1315–1324.

Solano Rodriguez et al. 2017

Solano Rodriguez, B./Drummond, P./Ekins, P.: „Decarbonizing the EU energy system by 2050: An important role for BECCS“. In: *Climate Policy*, 17, 2017, S. 93–110.

Sopha/Klößner 2011

Sopha, B. M./Klößner, C. A.: „Psychological factors in the diffusion of sustainable technology: A study of Norwegian households' adoption of wood pellet heating“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15: 6, 2011, S. 2756–2765.

Statistisches Bundesamt 2016

Statistisches Bundesamt (Hrsg.): *FS 3 Land und Forstwirtschaft, Fischerei: 1 Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung 2015*, Wiesbaden 2016. URL: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/Flaechennutzung/Bodenflaechennutzung2030510167004.pdf?__blob=publicationFile [Stand: 13.09.2018].

Stehfest et al. 2009

Stehfest, E./Bouwman, L./Vuuren, D.- P./den Elzen, M. G. J./Eickhout, B./Kabat, P.: „Climate Benefits of Changing Diet“. In: *Climatic Change*, 95: 1–2, 2009, S. 83–102.

Stehfest 2014

Stehfest, E.: „Diet: Food Choices for Health and Planet“. In: *Nature*, 515: 7528, 2014, S. 501–502.

Strefler et al. 2018

Strefler, J./Bauer, N./Kriegler, E./Popp, A./Anastasis Giannousakis, A./Edenhofer, O.: „Between Scylla and Charybdis: Delayed mitigation narrows the passage between large-scale CDR and high costs“. In: *Environmental Research Letters*, 2018. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aab2ba/pdf> [Stand: 13.09.2018].

Stuttgarter Nachrichten 2017

Stuttgarter Nachrichten: *Feinstaub-Studie: 5000 Europäer sterben jährlich durch Dieselmotoren*, 18.09.2017. URL: <https://www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt.feinstaub-studie-5000-europaeer-sterben-jaehrlich-durch-dieselmotoren.4a7c2857-1aad-40b1-be63-4a5224e61e6a.html> [Stand: 26.11.2018].

Süddeutsche Zeitung 2018

Süddeutsche Zeitung: *Bundesverwaltungsgericht erlaubt Diesel-Fahrverbote*, 27.02.2018. URL: <https://www.sueddeutsche.de/auto/eil-bundesverwaltungsgericht-erlaubt-diesel-fahrverbote-1.3878154> [Stand: 26.11.2017].

Sun et al. 2011

Sun, A./Davis, R./Starbuck, M./Ben-Amotz, A./Pate, R./Pienkos, P. T.: „Comparative Cost Analysis of Algal Oil Production for Biofuels“. In: *Energy*, 36: 8, 2011, S. 5169–79.

Szarka et al. 2017

Szarka, N./Eichhorn, M./Kittler, R./Bezama, A./Thrän, D.: „Interpreting long-term energy scenarios and the role of bioenergy in Germany“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 68: 2, 2017, S. 1222–1233. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116002240> [Stand: 07.08.2018].

Thrän 2015

Thrän, D. (Hrsg.): *Smart Bioenergy: Technologies and concepts for a more flexible bioenergy provision in future energy systems*, Springer International Publishing 2015.

Thrän 2019

Thrän, D. (Hrsg.): *Interdisziplinäres Bewertungsinstrument für Bioenergie-Entwicklungspfade. Materialien zur Analyse „Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Potenziale – Technologien – Zielkonflikte“* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2019.

Thrän et al. 2015

Thrän, D./Arendt, O./Ponitka, J.: *Meilensteine 2030. Elemente Und Meilensteine Für Die Entwicklung Einer Tragfähigen Und Nachhaltigen Bioenergiestrategie*, Vol. 18. Schriftenreihe des Förderprogramms ‚Energetische Biomassenutzung‘, Leipzig: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH Programmbegleitung des Förderprogramms ‚Energetische Biomassenutzung‘ 2015.

Thrän et al. 2018

Thrän, D./Eric Billig, E./Brosowski, A./Klemm, M./Seitz, S. B./Witt, J.: „Bioenergy Carriers – From Smoothly Treated Biomass towards Solid and Gaseous Biofuels“. In: *Chemie, Ingenieur, Technik*, 90: 1-2, Special Issue: Energieträger, 2018, S. 68–84

Terwel et al. 2009

Terwel, B. W./Harinck, F./Ellemers, N./Daamen, D. D.: „Competence based and integrity based trust as predictors of acceptance of carbon dioxide capture and storage (CCS)“. In: *Risk Analysis: An International Journal*, 29: 8, 2009, S. 1129–1140.

Tetzlaff et al. 2015

Tetzlaff, B./Holsten, B./Trepel, M.: „Bedeutung der Moore für den Gewässerschutz“. In: *TELMA*, Beiheft 5, 2015, S. 113–132.

Tubiello et al. 2015

Tubiello, F./Salvatore, M./Ferrara, A./House, J./Federici, S./Rossi, S./Biancalani R./Condor Golec, R. D./Jacobs, H./Flammini, A./Prosperi, P./Cardenas Galindo, P./Schmidhuber J./Sanz Sanchez, M. J./Srivastava, N./Smith, P.: „The Contribution of Agriculture, Forestry and other Land Use activities to Global Warming, 1990–2012“. In: *Global Change Biology* 21: 7, 2015, S. 2655–2660.

UBA 2015

Umweltbundesamt (UBA): *Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050*, 2015. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/treibhausgasneutrales_deutschland_im_jahr_2050_langfassung.pdf [Stand: 01.08.2018].

UBA 2016

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.): *Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden*, Texte 04/2016, Dessau-Roßlau 2016. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_04_2016_chancen_und_risiken_des_einsatzes_von_biokohle.pdf (Stand: 24.09.2018).

UBA 2018-1

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.): *Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung im Jahr 2017*, Dessau-Roßlau 2018. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/180315_uba_hg_einzahlen_2018_bf.pdf [Stand: 28.09.2018].

UBA 2018-2

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.): *Emissionen aus der Landwirtschaft im Jahr 2016*, 2018. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/landforstwirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas#textpart-1> [Stand: 28.09.2018].

Ueckerdt et al. 2013

Ueckerdt, F./Hirth, L./Luderer, G./Edenhofer, O.: „System LCOE: What are the costs of variable renewables?“ In: *Energy*, 63, 2013, S. 61–75.

UFOP 2012

Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen e. V. (UFOP): *Biodiesel 2011/2012 Sachstandbericht und Perspektive – Auszug aus dem UFOP-Jahresbericht*, Berlin 2012. URL: https://www.ufop.de/files/9613/5867/5138/Auszug_Biodiesel_13_D.pdf [Stand: 24.09.2018].

UNEP 2017

United Nations Environment Programme (UNEP): *Emission Gap Report 2017: A UN Environment Synthesis Report*, Nairobi 2017. URL: <https://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report> [Stand: 13.09.2018].

Upham/Roberts 2011

Upham, P./Roberts, T.: „Public perceptions of CCS: Emergent themes in pan-European focus groups and implications for communications“. In: *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5, 2011, S. 1359–1367.

Vitousek et al. 1986

Vitousek, P.-M./Ehrlich, R./Ehrlich, A./Matson, P. A.: „Human Appropriation of the Products of Photosynthesis“. In: *Bioscience*, 36: 6, 1986, S. 368–73.

van Vuuren et al. 2009

van Vuuren, D. P./van Vliet, J./Stehfest, E.: „Future bioenergy potential under various natural constraints“. In: *Energy Policy*, 37: 11, 2009, S. 4220–4230.

Wallquist et al. 2012

Wallquist, L./Seigo, S. L. O./Visschers, V. H./Siegrist, M.: „Public acceptance of CCS system elements: a conjoint measurement“. In: *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 6, 2012, S. 77–83.

WBA 2017

World Bioenergy Association (WBA): *Global Bioenergy Statistics*, 2017. URL: http://worldbioenergy.org/uploads/WBA%20GBS%202017_hq.pdf [Stand: 13.09.2018].

WBAE/WBW 2016:

Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlichen Verbraucherschutz beim BMEL und Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik beim BMEL: *Klimaschutz in der Land- und Forstwirtschaft sowie den nachgelagerten Bereichen Ernährung und Holzverwendung*, Gutachten. 2. Auflage, November 2016.

WBGU 2008

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU): *Welt im Wandel. Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung*, Berlin 2008.

Weiser et al. 2014

Weiser, U./Zeller, V./Reinicke, F./Wagner, B./Majer, S./Vetter, A./Thrän, D.: „Integrated assessment of sustainable cereal straw potential and different straw-based energy applications in Germany“. In: *Applied Energy*, 114, 2014, S. 749–762.

Wicke et al. 2014

Wicke, B./Verweijl, P./van Meijl, H./van Vuuren, D./Faaij, A.: „Indirect land use change: review of existing models and strategies for mitigation“. In: *Biofuels*, 3:1, 2014, S. 87–100.

Wirsenius 2003

Wirsenius, S.: „Efficiencies and biomass appropriation of food commodities on global and regional levels“. In: *Agricultural Systems*, 77, 2003, S. 219–255.

Wüste 2012

Wüste, A.: *Gesellschaftliche Akzeptanz unterschiedlicher Biomassennutzungsformen und Erfolgsfaktoren dezentraler Bioenergieprojekte*, 2012. URL: http://www.bioenergie.uni-goettingen.de/fileadmin/user_upload/admin/Konferenz/Vortraege_24-01-12/Wueste_BIS_Tagung_Goe12-01-24.pdf [Stand: 13.09.2018].

Wüstenhagen et al. 2007

Wüstenhagen, R./Wolsink, M./Bürer, M.: „Social acceptance of renewable energy innovation: An Introduction to the concept“. In: *Energy Policy*, 35: 5, 2007, S. 2683–2691.

Wurster et al. 2014

Wurster, R./Weindorf, W./Zittel, W.: *LNG als Alternativkraftstoff für den Antrieb von Schiffen und schweren Nutzfahrzeugen – Aktualisierung auf Verkehrsprognose 2030*, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), München/Ottobrunn, Heidelberg, Berlin, 17. Oktober 2014. URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/mks-kurzstudie-lng.pdf?__blob=publicationFile [Stand: 24.09.2018].

WWF 2011

WWF Deutschland (Hrsg.): *Fleisch frisst Land*, Berlin 2011. URL: https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Fleischkonsum_web.pdf [Stand: 27.09.2018].

Verordnung (EU) 2018/1999

Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates, der Richtlinien 94/22/EG, 98/70/EG, 2009/31/EG, 2009/73/EG, 2010/31/EU, 2012/27/EU und 2013/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates, der Richtlinien 2009/119/EG und (EU) 2015/652 des Rates und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates, ABl. L 328 vom 21. Dezember 2018, S. 1.

Yang et al. 2016

Yang, L./Zhang, X./McAlinden, K. J.: „The effect of trust on people's acceptance of CCS (carbon capture and storage) technologies: Evidence from a survey in the People's Republic of China“. In: *Energy*, 96, 2016, S. 69–79.

Zilberman et al. 2013

Zilberman, D./Hochman, G./Rajagopal, D./Sexton, S./Timilsina, G.: „The impact of biofuels on commodity food prices: Assessment of findings“. In: *American Journal Agricultural Economics*, 95, 2013, S. 275–281.

Zech et al. 2015

Zech, K./Naumann, K./Müller-Langer, F.: *Biokerosin und EE-Kerosin für die Luftfahrt der Zukunft – von der Theorie zu Pilotvorhaben*, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Leipzig, München, Berlin, Heidelberg, 2015. URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/studie-biokerosin-ee-kerosin.pdf?__blob=publicationFile [Stand: 24.09.2018].

Zipp 2016

Zipp, A.: „Markt- und Systemintegration von erneuerbaren Energien im Rahmen der Systemtransformation. Ein Beitrag zur definitorischen Abgrenzung“. In: *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, 40, 2016, S. 233–243.

Zoellner et al. 2011

Zoellner, J./Rau, I./Schweizer-Ries, P.: „Zur Akzeptanz von Erneuerbaren Energien: Beteiligungsprozesse und Entwicklungschancen für Kommunen und Regionen“. In: *Ökologisches Wirtschaften*, 2011, S. 25–27.

Das Akademienprojekt

Mit der Initiative „Energiesysteme der Zukunft“ geben acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften Impulse für eine faktenbasierte Debatte über Herausforderungen und Chancen der Energiewende in Deutschland. In interdisziplinären Arbeitsgruppen erarbeiten rund 100 Expertinnen und Experten Handlungsoptionen für den Weg zu einer umweltverträglichen, sicheren und bezahlbaren Energieversorgung.

Die Arbeitsgruppe „Bioenergie“

Die interdisziplinär zusammengesetzte Arbeitsgruppe bearbeitete drei Themenschwerpunkte: Erstens die Abschätzung der verfügbaren Bioenergiepotenziale, zweitens die Bewertung der möglichen Rolle von Bioenergie mit Kohlendioxid-Abscheidung und Speicherung (BECCS), und drittens die Entwicklung eines umfassenden Bewertungsinstruments für Entwicklungspfade der energetischen Biomassenutzung aus technischer, ökologischer, ökonomischer und gesellschaftlicher Perspektive.

Die Ergebnisse der Arbeitsgruppe wurden in drei Formaten aufbereitet:

1. Die **Analyse** „*Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Potenziale – Technologien – Zielkonflikte*“ dokumentiert in umfassender Form den wissenschaftlichen Kenntnisstand zu globalen Bioenergiepotenzialen, Bioenergietechnologien sowie BECCS und anderen CO₂-Entnahmetechnologien. Zudem stellt sie das von der Arbeitsgruppe entwickelte Bewertungsinstrument für Bioenergietechnologien dar und leitet darauf basierend Herausforderungen für die deutsche Energie- und Klimapolitik ab.
2. Die **Stellungnahme** „*Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Strategien für eine nachhaltige Bioenergienutzung*“ stellt die Ergebnisse in kompakter Form dar und zeigt Handlungsoptionen für eine nachhaltige Bioenergiestrategie auf.
3. Die online verfügbaren **Materialien** „*Interdisziplinäres Bewertungsinstrument für Bioenergie-Entwicklungspfade*“ enthalten eine detaillierte Beschreibung der entwickelten Bewertungsmethodik inklusive der Kriterien und Bewertungsskalen und der Ergebnisse deren Anwendung auf ausgewählte Bioenergietechnologien.

Mitwirkende des Projekts

Mitglieder der Arbeitsgruppe

Prof. Gernot Klepper, Ph.D. (AG-Leiter)	Institut für Weltwirtschaft Kiel
Prof. Dr. Daniela Thrän (AG-Leiterin)	Deutsches Biomasseforschungszentrum DBFZ/ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ
Prof. Dr. Stephan von Cramon-Taubadel	Universität Göttingen
Prof. Dr. Nicolaus Dahmen	Karlsruher Institut für Technologie
Prof. Dr. Karlheinz Erb	Universität für Bodenkultur Wien
Dr. Oliver Geden	Stiftung Wissenschaft und Politik
Prof. Dr. Helmut Haberl	Universität für Bodenkultur Wien
Prof. Dr. Bernd Hirschl Katharina Heinbach	Institut für ökologische Wirtschaftsforschung IÖW
Prof.-Ing. Bernd Krautkremer	Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme IWES
Dr. Axel Liebscher	Helmholtz-Zentrum Potsdam – GFZ
Prof. Dr.-Ing. Jörg Sauer	Karlsruher Institut für Technologie
Prof. Dr. Ernst-Detlef Schulze	Max-Planck-Institut für Biogeochemie
Prof. Dr. Petra Schweizer-Ries Irina Rau, Jan Hildebrandt	IZES – Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme
Dr. Jessica Strefler	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Weitere Mitwirkende

Prof. Dr. Frank Baur	IZES – Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme
Prof. Dr. Michael Nelles	Deutsches Biomasseforschungszentrum

Wissenschaftliche Referentinnen

Dr. Berit Erlach	acatech
Christiane Henning	Deutsches Biomasseforschungszentrum DBFZ
Dr. Franziska Schünemann	Institut für Weltwirtschaft Kiel

Institutionen und Gremien

Beteiligte Institutionen

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Federführung)

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

Direktorium

Das Direktorium leitet die Projektarbeit und vertritt das Projekt nach außen.

Prof. Dr. Dirk Uwe Sauer (Vorsitzender)	RWTH Aachen
Prof. Dr. Christoph M. Schmidt (Stellvertreter)	RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung
Prof. Dr. Carl Friedrich Gethmann	Universität Siegen
Prof. Dr. Karen Pittel	ifo Institut
Prof. Dr. Indra Spiecker genannt Döhmann (seit Januar 2019)	Goethe-Universität Frankfurt am Main
Prof. Dr. Eberhard Umbach	ehemaliger Präsident KIT

Kuratorium

Das Kuratorium verantwortet die strategische Ausrichtung der Projektarbeit.

Prof. Dr. Reinhard F. Hüttl (Vorsitzender)	acatech Vizepräsident
Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath	acatech Präsident
Prof. Dr. Jörg Hacker	Präsident Leopoldina
Prof. Dr. Dr. Hanns Hatt	Präsident Union der deutschen Akademien der Wissenschaften
Prof. Dr. Bärbel Friedrich	Altpräsidialmitglied Leopoldina
Prof. Dr. Martin Grötschel	Präsident Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften
Prof. Dr. Andreas Löschel	Universität Münster, Vorsitzender der Expertenkom- mission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“
Prof. Dr. Robert Schlögl	Direktor Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft und Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion
Dr. Georg Schütte (Gast)	Staatssekretär BMBF
Dr. Rodoula Tryfonidou (Gast)	Referatsleiterin Energieforschung BMWi

Projektkoordination

Dr. Ulrich Glotzbach

Leiter der Geschäftsstelle „Energiesysteme der Zukunft“,
acatech

Rahmendaten**Projektlaufzeit**

03/2016 bis 02/2020

FinanzierungDas Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung
(Förderkennzeichen EDZ2016) gefördert.

GEFÖRDERT VOM

 Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Geschäftsstelle:

Dr. Ulrich Glotzbach

Leiter der Geschäftsstelle „Energiesysteme der Zukunft“

Markgrafenstraße 22, 10117 Berlin

Tel.: +49 (0)30 206 79 57 - 0

E-Mail: glotzbach@acatech.de

Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft

ISBN: 978-3-9820053-0-0