



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften



Februar 2019
Stellungnahme

Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik

Strategien für eine nachhaltige Bioenergienutzung

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

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

Redaktion

Julika Witte, acatech

Wissenschaftliche Koordination

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

Produktionskoordinatorin

Marie-Christin Höhne, acatech

Gestaltung und Satz

Atelier Hauer + Dörfler GmbH, Berlin

Druck

Königsdruck – Printmedien und digitale Dienste GmbH, Berlin
Gedruckt auf säurefreiem Papier, Printed in EC

ISBN: 978-3-8047-3917-8

Bibliographische 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.

Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik

Strategien für eine nachhaltige Bioenergienutzung

Vorwort

Beim Klimaschutz ist keine Zeit mehr zu verlieren. Die nächsten Jahre sind entscheidend, damit der Planet nicht weiter aus dem Gleichgewicht gerät. Das zeigt der 2018 veröffentlichte Sonderbericht des Weltklimarates IPCC. Schreiben wir die aktuelle Situation hingegen fort, wird die globale Erwärmung vermutlich schon im Jahr 2030 die 1,5-Grad-Marke überschreiten.

Um diese Fehlentwicklung zu verhindern, fordert der IPCC weitreichende Änderungen in allen gesellschaftlichen Bereichen. Bioenergie kann zum Beispiel dazu beitragen, fossile Energieträger zu ersetzen. Darüber hinaus bietet Bioenergie mit Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (BECCS) dem Weltklimarat zufolge Potenziale, um Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu entfernen. Das wird in Zukunft etwa notwendig, um unvermeidbare Emissionen aus der Landwirtschaft und Industrieprozessen auszugleichen. Auch die EU-Kommission hält „negative Emissionen“ für unumgänglich, um das selbstgesteckte Ziel zu erreichen, bis 2050 ein treibhausgasneutrales Europa zu schaffen.

Doch Biomasse energetisch zu nutzen, ist nicht per se klimafreundlich und birgt Risiken für Umwelt und Natur. Bereits im Jahr 2012 hatte die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina in einer Stellungnahme vor den Folgen einer schlecht durchdachten Bioenergienutzung gewarnt. Erste Vorschläge, wie Bioenergie nachhaltig im Energiesystem genutzt werden kann, hat das Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS) in der 2017 veröffentlichten Stellungnahme „Rohstoffe für die Energiewende“ skizziert.

In der vorliegenden Publikation knüpfen die deutschen Wissenschaftsakademien daran an und zeigen auf, wie Bioenergie am besten zur Energieversorgung und zum Klimaschutz beitragen kann. Sie fordern, die begrenzten Biomassepotenziale systemdienlich einzusetzen. Gleicht Bioenergie die Schwächen anderer Erneuerbarer aus – etwa als Kraftstoff im Flug- oder Schiffsverkehr –, nützt sie dem Energiesystem am meisten. Ökologische Risiken können eingedämmt werden, indem vor allem Rest- und Abfallstoffe energetisch verwendet werden.

Politische Instrumente wie eine umfassende CO₂-Bepreisung und Zertifizierungssysteme sollten ein Anreiz für die weitere Nutzung der Bioenergie sein. Werden sie auf alle land- und forstwirtschaftlichen Erzeugnisse angewendet, haben sie den größten Effekt. Die ESYS-Arbeitsgruppe empfiehlt außerdem, CO₂-Entnahmetechnologien wie BECCS als Klimaschutzoptionen in Betracht zu ziehen. Wir danken den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie den Gutachterinnen und Gutachtern herzlich für ihr Engagement.



Prof. Dr. Jörg Hacker
Präsident
Nationale Akademie der
Wissenschaften Leopoldina



Prof. Dr. Dieter Spath
Präsident
acatech – Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften



Prof. Dr. Dr. Hanns Hatt
Präsident
Union der deutschen Akademien
der Wissenschaften

Inhalt

Abkürzungen und Einheiten	6
Glossar	7
Zusammenfassung	9
1 Einleitung	16
1.1 Bioenergie in der deutschen Energiewende.....	17
1.2 Bioenergie im globalen Klimaschutz	19
1.3 Elemente für eine langfristige Bioenergiestrategie für Deutschland.....	20
2 Wie viel Biomasse soll energetisch genutzt werden?	22
2.1 Globale Bioenergiepotenziale	23
2.2 Treibhausgasbilanz von Bioenergie	29
2.3 Fazit	33
3 Was bedeuten die langfristigen Klimaschutzziele für die Zukunft der Bioenergie?	35
3.1 Vergleich verschiedener Möglichkeiten zur CO ₂ -Entnahme	38
3.2 CCS-Technologie: Die Basis von BECCS	41
3.3 Bioenergie mit CCS.....	42
3.4 Fazit	44
4 Welche Bioenergietechnologien braucht das Energiesystem der Zukunft?.....	46
4.1 Ein umfassender Bewertungsrahmen für Bioenergietechnologien.....	49
4.2 Entwicklungspfade für Lignozellulose und Biogas.....	51
4.3 Fazit	55

5	Handlungsoptionen für eine nachhaltige Bioenergiestrategie.....	59
5.1	Konsistente Klimaschutzpolitik.....	60
5.1.1	CO ₂ -Bepreisung als Leitinstrument.....	60
5.1.2	Alternative Fördermechanismen	62
5.2	Energie- und Agrar-, Forst- und Umweltpolitik als Teile einer integrierten Bioenergiepolitik	66
5.2.1	Maßnahmen in der Agrar- und Forstpolitik.....	69
5.2.2	Maßnahmen im Entsorgungssektor.....	71
5.3	Politisch-gesellschaftlicher Diskurs.....	73
5.4	Wegweiser für Transformationspfade entwickeln.....	77
5.4.1	Nachhaltige Rohstoffbasis nutzbar machen.....	83
5.4.2	Technologien entwickeln und einführen.....	83
5.4.3	Technologieumfeld gestalten.....	84
5.4.4	Systemwissen schaffen	85
5.4.5	CO ₂ -Abscheidung ermöglichen.....	86
6	Fazit	87
	Literatur.....	94
	Das Akademienprojekt	102

Abkürzungen und Einheiten

BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage, Bioenergie mit CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung
BHKW	Blockheizkraftwerk
CCS	Carbon Capture and Storage, CO ₂ -Abtrennung und -Speicherung
CCU	Carbon Capture and Utilization, CO ₂ -Abscheidung und -Verwendung
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DAC	Direct Air Capture
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
ILUC	Indirect Land Use Change, indirekte Landnutzungsänderungen
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, Weltklimarat
Mio.	Millionen
RED	Renewable Energy Directive, Erneuerbare-Energien-Richtlinie (der EU)
THG	Treibhausgas

a	Jahr
EJ	Exajoule (1 EJ entspricht 277,8 TWh)
EJ/a	Exajoule pro Jahr
km ²	Quadratkilometer
MW	Megawatt
MW _{el}	Megawatt elektrischer Leistung
MW _{th}	Megawatt thermischer Leistung
t	Tonne
t/a	Tonnen pro Jahr
TWh	Terawattstunde

Glossar

Anbaubiomasse	Auf Agrarland angebaute Biomasse. Umfasst beispielsweise Getreide und Gräser, aber auch Kurzumtriebsplantagen schnell wachsender Baumarten.
BECCS	Bioenergie mit CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung. Die Funktionsweise: Pflanzen nehmen durch Photosynthese CO ₂ aus der Atmosphäre auf und bilden daraus energiereiche Kohlenstoffverbindungen. Werden diese zur Erzeugung von Strom, Wärme oder Kraftstoff genutzt, wird dieses CO ₂ wieder freigesetzt, aber nicht in die Atmosphäre zurückentlassen, sondern abgetrennt und dauerhaft unterirdisch gelagert. Dadurch wird der Atmosphäre netto CO ₂ entzogen.
Biogas	Durch mikrobielle Vergärung erzeugtes energiehaltiges Gas. Die Hauptbestandteile sind Methan und Kohlendioxid. Biogas kann beispielsweise aus Maissilage, Grassilage, Gülle und Speiseresten erzeugt werden. Biomasse, die hauptsächlich aus Lignozellulose besteht, wie Stroh oder Holz, ist hingegen für die Vergärung nicht oder schlechter geeignet. Lignozellulose kann durch Vergasung bei hohen Temperaturen in ein brennbares Gas umgewandelt werden; dieses bezeichnet man aber nicht als Biogas, sondern als Synthesegas.
Biokohle	Auch als Pflanzenkohle (englisch Biochar) bezeichnet, wird durch Verkohlung aus Biomasse hergestellt. Der holzkohleähnliche Stoff wird in den Boden eingearbeitet. Durch die Verkohlung wird die Verrottung verhindert, der zuvor durch die Pflanzen in Form von CO ₂ aus der Luft aufgenommene Kohlenstoff wird daher nicht (oder erst nach sehr langer Zeit) wieder als CO ₂ freigesetzt. Daher kann mit diesem Verfahren der Atmosphäre dauerhaft CO ₂ entzogen werden.
Biomasse	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. Biomasse umfasst neben den energetisch genutzten Stoffströmen auch die Anteile, die zur Nahrungsmittelproduktion oder Herstellung von Materialien eingesetzt werden.
Biomethan	Aufbereitetes Biogas, besteht größtenteils aus Methan. Bei der Aufbereitung wird das im Biogas enthaltene CO ₂ abgetrennt. Zudem wird das Gas getrocknet, entschwefelt und konditioniert, um die technischen Anforderungen für die Einspeisung in das Erdgasnetz zu erfüllen. Das Biomethan kann dann im Erdgasnetz transportiert und anstelle von Erdgas zu verschiedenen Zwecken eingesetzt werden.
CCS	Kohlendioxid-Abscheidung und -Speicherung (Carbon Capture and Storage). CO ₂ wird aus Energie- oder Industrieanlagen abgeschieden und dauerhaft unterirdisch eingelagert. Als Speicher kommen vor allem leergeförderte Erdöl- und Erdgaslagerstätten sowie tiefliegende, salzwasserführende Aquifere infrage.

CO ₂ -Äquivalent	Maßzahl für das Treibhauspotenzial einer chemischen Verbindung. Das CO ₂ -Äquivalent gibt an, wie stark ein Kilogramm einer chemischen Verbindung im Vergleich zu einem Kilogramm CO ₂ zum Treibhauseffekt beiträgt. Da sich Gase in der Atmosphäre unterschiedlich schnell zersetzen, kann das CO ₂ -Äquivalent nur für einen festgelegten Zeitraum angegeben werden. Üblich sind 100 Jahre nach Freisetzung des Gases. Lachgas (N ₂ O) hat beispielsweise bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren ein CO ₂ -Äquivalent von 265. Das heißt, die Treibhauswirkung von einem Kilogramm Lachgas entspricht derjenigen von 265 Kilogramm CO ₂ . Methan hat bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren ein Treibhausgas-äquivalent von 28. ^{a)}
Direct Air Capture	CO ₂ -Entnahmetechnologie, bei der CO ₂ in technischen Anlagen mit chemischen Bindemitteln aus der Umgebungsluft aufgefangen wird. Es kann dann komprimiert und unterirdisch eingelagert werden (diese Verwendung wird hier betrachtet) oder aber zum Beispiel als Rohstoff für chemische Produkte dienen.
Entwaldung	Landnutzungsänderung, bei der Waldfläche permanent oder auf lange Zeit verloren geht, weil sie beispielsweise in Agrarfläche oder Weideland umgewandelt wird. Forstwirtschaftliche Maßnahmen, bei denen temporär durch Kahlschlag Flächen abgeholzt werden, zählen nicht als Entwaldung, wenn auf der Fläche im Anschluss wieder Wald nachwächst.
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 verarbeiten.
Negative Emissionen	CO ₂ -Entnahme aus der Atmosphäre, beispielsweise durch Bioenergie mit CCS oder Aufforstung. Die Gesamtemissionen sind netto-negativ, wenn insgesamt mehr CO ₂ aus der Atmosphäre entnommen als ausgestoßen wird (der CO ₂ -Gehalt der Atmosphäre also gesenkt wird).
Strombasierte synthetische Kraftstoffe	Für die Herstellung dieser Kraftstoffe dient Strom aus Windkraft oder Photovoltaik als Energiequelle. Die Funktionsweise: Durch Elektrolyse wird Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Für diesen energieintensiven Prozess wird Strom benötigt. Der Wasserstoff wird dann in einem weiteren Prozessschritt mit CO ₂ zu kohlenstoffhaltigen Verbindungen wie Methan oder flüssigen Kraftstoffen weiterverarbeitet.
Waldholz	Als Waldholz wird hier im Wald geerntetes Holz ohne Ernterückstände (Waldrestholz) bezeichnet. Das Waldrestholz wird in den hier verwendeten Bilanzen bei den Rest- und Abfallstoffen erfasst.
Waldrestholz	Ernterückstände bei der Holzernte, die meist im Wald verbleiben. Waldrestholz ist alles Holz unter sieben Zentimetern Durchmesser und Derbholz, das im Bestand verbleibt. Es setzt sich somit aus Schaftholz einschließlich Rinde, Ästen und Zweigen, Ernteresten, Wurzeln und Wurzelstöcken sowie eventuell anhaftenden Nadeln und Blättern zusammen. ^{b)} Die in der Studie verwendeten Potenzialzahlen berücksichtigen keine Wurzeln und Wurzelstöcke.

a) IPCC 2014.

b) Brosowski et al. 2015.

Zusammenfassung

Bioenergie deckt heute etwa ein Zehntel des Energiebedarfs in Deutschland. Damit trägt sie derzeit mehr zur Energieversorgung bei als Windkraft, Solarenergie, Wasserkraft und Geothermie zusammen. Die Vorteile: Energieträger aus Biomasse sind gut speicherbar und können flexibel zur Strom- und Wärmeerzeugung sowie als Kraftstoffe im Verkehr eingesetzt werden.

Die Menge an Biomasse, die mit vertretbaren Folgen für die Umwelt vom Menschen verwertet werden kann, ist allerdings begrenzt. Durch die wachsende Weltbevölkerung wird die **Nachfrage nach Biomasse** zur Nahrungsmittelproduktion, zur Herstellung von Produkten und zur Energieversorgung voraussichtlich weiter steigen – und damit auch die Konkurrenz um Landflächen. Eine Ausweitung oder Intensivierung der Flächennutzung hätte spürbare Folgen: Die Treibhausgasemissionen könnten steigen, die Artenvielfalt wäre bedroht, und die Qualität von Böden und Gewässern könnte beeinträchtigt werden. Zudem sind komplexe Rückwirkungen auf die globale Kohlenstoffspeicherung in Wald, Pflanzen und Boden zu berücksichtigen. Diese sind jedoch teilweise kaum quantifizierbar – verschiedene Ansätze, um sie abzuschätzen, werden in der Wissenschaft kontrovers diskutiert. In welchem Umfang die energetische Nutzung von Agrarbiomasse und Waldholz zukünftig zum Klimaschutz beitragen kann, ist daher unklar.

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 untrennbar mit der globalen Landnutzung verbunden. Bei der Formulierung einer Bioenergiestrategie muss daher berücksichtigt werden, welche Auswirkungen die Bioenergienutzung in der Bundesrepublik im Ausland hat. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass in Deutschland mehr Biomasse verbraucht als erzeugt wird und daher rechnerisch Landflächen im Ausland beansprucht werden.

Schätzungen der weltweiten nachhaltig nutzbaren Bioenergiepotenziale reichen von jährlich etwa 50 Exajoule, was in etwa dem heutigen Bioenergieeinsatz entspricht, bis hin zu mehreren Hundert Exajoule. Großen Einfluss auf die Prognosen hat unter anderem die Frage, inwieweit landwirtschaftliche Erträge in Zukunft gesteigert werden können. Auch die erforderlichen Einschränkungen bei der Landnutzung, um den Erhalt der Ökosysteme und der Artenvielfalt zu sichern, spielen eine wichtige Rolle. Zudem besteht eine hohe Datenunsicherheit, inwieweit es ungenutztes degradiertes Agrar- und Weideland gibt, das zur umweltfreundlichen Produktion von Bioenergie verwendet werden könnte. Einen immensen Einfluss auf den Flächenbedarf für die Nahrungsmittelproduktion haben auch zukünftige Ernährungsweisen. So ist ein Spielraum für eine stärkere energetische Nutzung von Agrarbiomasse am ehesten zu erwarten, wenn es gelänge, den globalen Fleischkonsum spürbar zu reduzieren. So könnten rechnerisch bei

einer rein pflanzlichen Ernährung weltweit etwa doppelt so viele Menschen von der gleichen Fläche ernährt werden wie heute. Ein weiterer Hebel, um den Flächenbedarf für die Nahrungsmittelproduktion zu verringern, ist eine Reduktion der Nahrungsmittelabfälle.

In der Gesamtschau zeigt sich, dass die energetische Nutzung von Waldholz und Agrarrohstoffen erhebliche ökologische und soziale Risiken birgt. Diese können nur reduziert werden, wenn weltweit Nachhaltigkeitsanforderungen für alle Formen der Landnutzung und alle land- und forstwirtschaftlichen Produkte durchgesetzt werden. Im Sinne des Klimaschutzes ist dabei besonders wichtig, die globale Entwaldung einzudämmen. Solange dies nicht gelingt, sollte die Nutzung von Bioenergie aus Waldholz und Agrarrohstoffen nicht verstärkt werden.

Vorrangig Rest- und Abfallstoffe nutzen

Vielmehr sollten vor allem **Rest- und Abfallstoffe** energetisch genutzt werden. Die Risiken für Ökosysteme und Nahrungsmittelsicherheit sind dabei wesentlich geringer als bei Waldholz und Agrarbiomasse. Da es in der Regel unwirtschaftlich ist, sie über längere Strecken zu transportieren, werden Rest- und Abfallstoffe kaum international gehandelt. Daher kann hier, im Gegensatz zu Forst- und Agrarbiomasse, ein Potenzial für Deutschland ermittelt werden. Bereits heute stammt etwa die Hälfte der insgesamt eingesetzten Bioenergie in Deutschland aus Rest- und Abfallstoffen (etwa 150 Terawattstunden pro Jahr). Darüber hinaus gibt es noch ungenutztes Potenzial an Waldrestholz, Getreidestroh und tierischen Exkrementen von 108 bis 189 Terawattstunden jährlich. So ließen sich insgesamt rund 7 bis 9 Prozent des heutigen deutschen Primärenergiebedarfs allein mit Rest- und Abfallstoffen decken. Gelingt es, wie im Energiekonzept der Bundesregierung angestrebt, den Primärenergieverbrauch von heute rund 3.800 Terawattstunden bis 2050 auf jährlich 2.000 Terawattstunden zu senken, könnten Rest- und Abfallstoffe sogar 13 bis 17 Prozent der erforderlichen Primärenergie beitragen.

Unter anderem wegen der höheren Schadstoffgehalte sind Abfälle jedoch teilweise komplizierter und teurer zu verarbeiten als Waldholz und klassische Energiepflanzen. Die Anlagentechnik von Bioenergieanlagen muss an diese Einsatzstoffe angepasst werden. Ein schadstoffarmes, recyclingfreundliches Design von biobasierten Materialien (zum Beispiel Holzprodukten) kann zudem helfen, die anschließende energetische Nutzung zu erleichtern.

Für die Herstellung flüssiger Kraftstoffe ist eine weitere Herausforderung, dass ein Großteil der Rest- und Abfallstoffe aus **Lignozellulose** besteht, die die Zellwände verholzter Pflanzen bildet. Um diese zu verarbeiten, sind völlig andere chemische Prozesse erforderlich als etwa für die Herstellung von Biodiesel aus Raps oder von Bioethanol aus Mais. Einige Verfahren wie die Synthesegas-Bioraffinerie befinden sich noch in der Entwicklung. Hier ist insbesondere die Optimierung des Anlagendesigns für einen funktionstüchtigen und wirtschaftlichen Gesamtanlagenbetrieb entscheidend. Bis wann hier die Markteinführung gelingen wird, ist derzeit nicht absehbar. Feuchte, vergärbare Abfälle können hingegen durch mikrobielle Verfahren zu Biogas umgewandelt werden.

Bioenergie mit CO₂-Abscheidung als Technologieoption berücksichtigen

Um die im Pariser Abkommen formulierten globalen Klimaschutzziele zu erreichen, muss nach heutigem Kenntnisstand spätestens in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts der CO₂-Gehalt der Atmosphäre sinken – das heißt, es muss mehr CO₂ aus der Atmosphäre herausgeholt werden, als noch emittiert wird. Eine Technologie, die dies ermöglicht, ist Bioenergie mit Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (**BECCS**). Die Funktionsweise: Pflanzen nehmen CO₂ aus der Luft auf und bilden daraus energiereiche Kohlenstoffverbindungen. Werden diese zur Erzeugung von Strom, Wärme oder Kraftstoff genutzt, wird das CO₂ wieder freigesetzt, aber nicht zurück in die Atmosphäre entlassen, sondern abgetrennt und dauerhaft unterirdisch gelagert.

Neben BECCS gibt es weitere Möglichkeiten, um der Atmosphäre CO₂ zu entziehen. Dazu zählen die großflächige Aufforstung nicht genutzter Flächen, die Herstellung und Speicherung von sogenannter Biokohle (einer langfristig stabilen Kohlenstoffverbindung ähnlich der Holzkohle) in landwirtschaftlichen Böden sowie die Aufnahme von CO₂ aus der Luft mit chemischen Bindemitteln (Direct Air Capture, DAC), wobei das CO₂ anschließend unterirdisch eingelagert wird. Bei den meisten **CO₂-Entnahmetechnologien** ist nicht eindeutig absehbar, welche Potenziale, Umweltauswirkungen und Kosten mit ihnen einhergehen und wie lange der Kohlenstoff jeweils gespeichert werden kann. Aller Voraussicht nach wird ein Mix aus verschiedenen Technologien eingesetzt werden müssen, um den Gesamtbedarf an CO₂-Entnahme decken zu können. Welche Rolle BECCS dabei spielen wird, ist ungewiss. In vielen Szenarien des Weltklimarates IPCC ist der Einsatz von BECCS mit bis zu 300 Exajoule an Bioenergie pro Jahr (etwa dem Fünffachen des heutigen Bioenergieeinsatzes) gewaltig. Bei der Diskussion über künftige Entwicklungspfade der Bioenergie sollte BECCS daher als Technologieoption mitberücksichtigt werden.

Ob Bioenergie zukünftig mit oder ohne CCS eingesetzt werden soll, wird einen großen Einfluss auf die Weiterentwicklung der Bioenergienutzung haben. Denn nicht alle Bioenergietechnologien eignen sich gleich gut für eine CO₂-Abscheidung. Da sich die CO₂-Abscheidung und Anbindung an die notwendige Transportinfrastruktur nur für größere Anlagen lohnt, müssten gegebenenfalls Biomasseströme aus der heutigen dezentralen Nutzungsstruktur in größere, zentralere Anlagen umgeleitet werden.

Konsistente Klimaschutzpolitik

Eine **Bioenergiepolitik**, die starke Anreize für die energetische Nutzung von Biomasse setzt, muss sicherstellen, dass die gesteigerte Nachfrage nach Bioenergie keine negativen sozialen und ökologischen Folgen hat und tatsächlich den gewünschten Beitrag zum Klimaschutz leistet.

Ausschlaggebend für ökologische Risiken, gesellschaftliche Akzeptanz und Treibhausgasbilanz sind die eingesetzten Rohstoffe und deren Auswirkungen in den Landnutzungssystemen. Eine besondere Herausforderung stellen dabei die **indirekten Landnutzungsänderungen (Indirect Land Use Change, ILUC)** dar. Diese treten auf, wenn der Anbau von Bioenergiepflanzen durch damit verbundene steigende Preise für Biomasse zur Ausweitung von Agrarflächen in anderen Gegenden – oft im außereuropäischen Ausland – führt. Indirekte Landnutzungsänderungen können nicht statistisch oder

empirisch fundiert beziffert werden. Ansätze, um das ILUC-Risiko zu quantifizieren und zu zertifizieren, wurden zwar bereits entwickelt, allerdings sind die Belastbarkeit solcher Ansätze, ihre allgemeine Umsetzbarkeit in Zertifizierungssystemen und ihre Wirksamkeit bisher nicht nachgewiesen. Aus diesem Grund ist es kaum möglich, ILUC durch eine deutsche oder europäische Bioenergiepolitik zuverlässig zu verhindern.

Bisher unterliegt die energetische Biomassenutzung in Deutschland größtenteils dem energiewirtschaftlichen Regelwerk. Damit werden die Auswirkungen außerhalb des Energiesystems aber nicht ausreichend berücksichtigt. Um diese zu erfassen und eine Bioenergienutzung anzureizen, die auch den ökologischen und gesellschaftlichen Anforderungen gerecht wird, müssen Energie- und Landnutzungssysteme integriert betrachtet werden. Durch die voraussichtlich steigende Verwendung von Rest- und Abfallstoffen wird auch die Schnittstelle zwischen Energiewirtschaft und Entsorgungswirtschaft immer wichtiger. Eine stärkere Koordinierung der unterschiedlichen Finanzierungs- und Lenkungsmechanismen in den Bereichen Energie-, Agrar-, Forst- und Umweltpolitik ist daher unerlässlich.

Ein effizientes Instrument, um die Treibhausgasemissionen der Bioenergie über den gesamten Lebenszyklus zu regulieren, wäre ein **einheitlicher und ausreichend hoher CO₂-Preis**. Dabei müssen in jedem Fall die Treibhausgase aus der Landnutzung – vor allem Lachgas – berücksichtigt werden, denn bei landwirtschaftlicher Anbaubiomasse stellen sie die größte Emissionsquelle dar. Langfristig sollten idealerweise alle Treibhausgase in allen Wirtschaftssektoren, also auch die der Nahrungs- und Futtermittelproduktion, bepreist werden. Dies würde zu einer insgesamt klimafreundlichen Land- und Energienutzung führen und eine weitere Entwaldung ökonomisch unattraktiver machen. Auch die Treibhausgasemissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen ließen sich dadurch zuverlässig regulieren.

Auf absehbare Zeit scheint ein globaler CO₂-Preis auf alle Treibhausgasemissionen im Rahmen eines internationalen Abkommens schwer umsetzbar. Immer mehr Länder und Regionen haben jedoch begonnen, Emissionshandelssysteme oder CO₂-Steuern einzuführen, die bereits etwa 20 Prozent der weltweiten Treibhausgasemissionen erfassen. Um die Zeit bis zu einem globalen Abkommen zur CO₂-Bepreisung zu überbrücken, können verschiedene Maßnahmen ergriffen werden. Bei heimisch produzierter Biomasse können gesetzliche Regelungen auf nationaler oder auf EU-Ebene sicherstellen, dass Bioenergie nachhaltig erzeugt wird und in vorgegebenem Maße zur Emissionsminderung beiträgt. Mögliche Instrumente für importierte Biomasse sind eine Zertifizierung, ein Grenzsteuerausgleich oder die Integration von in Importen enthaltenen Treibhausgasemissionen in das Europäische Emissionshandelssystem.

Bereits heute werden Biokraftstoffe, die in der EU eingesetzt werden, **zertifiziert**. Nur Biokraftstoffe, für die eine festgelegte Mindestgröße an Treibhausgaseinsparung gegenüber fossilen Kraftstoffen nachgewiesen wird, können auf die Biokraftstoffquote angerechnet werden. Mit der aktuellen Neufassung der EU-Richtlinie für erneuerbare Energien werden die Nachhaltigkeitsanforderungen, die bisher nur für Flüssigkraftstoffe galten, auf Biogas und feste Energieträger ausgeweitet. Neben Treibhausgasemissionen kann ein Zertifizierungssystem auch soziale und ökologische Nachhaltigkeitskriterien umfassen. In dieser Funktion könnte es auch ergänzend zu einem CO₂-Preis eingesetzt werden.

Um eine Gleichbehandlung von heimischer und importierter Biomasse sicherzustellen und die bei der Herstellung im Ausland verursachten Treibhausgasemissionen angemessen zu berücksichtigen, könnten die Treibhausgasemissionen von Importen über einen **Grenzsteuerausgleich** besteuert werden. Aufgrund des europäischen Binnenmarktes müsste der Grenzsteuerausgleich von der Europäischen Union eingeführt werden. Alternativ könnten die in Importen enthaltenen Treibhausgasemissionen in das **Europäische Emissionshandelssystem integriert** werden. Importeure müssten in diesem Fall Emissionsrechte für die im Ausland bei der Bereitstellung der Biomasse angefallenen Treibhausgasemissionen erwerben. Das Ausmaß der „importierten“ Treibhausgas(THG)-Emissionen könnte – wie auch beim Grenzsteuerausgleich – über eine Zertifizierung nachgewiesen werden.

Treibhausgasemissionen aus ILUC können mithilfe dieser Instrumente nicht verhindert werden, solange sie nur auf Biomasse zur Energiegewinnung angewendet werden. Um dieses Problem zu lösen, müssten alle Importe von Biomasse – inklusive Nahrungs- und Futtermittel – den gleichen Kriterien unterliegen.

Für die Regulierung von Treibhausgasemissionen besteht mit den beschriebenen Instrumenten eine Auswahl an weit entwickelten, größtenteils marktbasieren Verfahren. Um eine ökologisch und volkswirtschaftlich sinnvolle Rohstoffbereitstellung zu fördern, müssen jedoch auch Auswirkungen auf Gewässerqualität, Nährstoffkreisläufe und Biodiversität berücksichtigt werden. Die Einbeziehung dieser **Ökosystemdienstleistungen** in Finanzierungs- und Anreizmodelle ist weitaus schwieriger als bei den Treibhausgasemissionen. Obwohl es theoretische Ansätze zur Bewertung der Ökosystemdienstleistungen gibt, besteht kaum praktische Erfahrung damit, diese in konkreten Politikinstrumenten umzusetzen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Systemdienliche Verwendung der Biomasse

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. Als wichtigste zukünftige Einsatzbereiche gelten 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. Um die Flexibilität zu erhöhen, können KWK-Anlagen mit Wärmespeichern kombiniert werden. Dabei können Brenn- und Kraftstoffe aus Biomasse 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.

In welchen Bereichen Bioenergie zukünftig vorrangig genutzt wird, hängt im Wesentlichen von drei Entwicklungen ab:

Erstens von der Frage, ob die Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (**CCS als Teil der Klimaschutzstrategie**) akzeptiert wird – eine zentrale Voraussetzung für den Einsatz von BECCS. Dies ist vor allem eine gesellschaftliche Entscheidung, mit weitreichenden Folgen für das Energiesystem und die Landnutzung. Entscheidet man sich *dagegen*, entfällt neben BECCS auch Direct Air Capture als eine CO₂-Entnahmetechnologie mit geringem Landbedarf. Es muss dann geprüft werden, ob und wie die Klimaschutzziele auch ohne diese Technologien erreicht werden können. Entscheidet man sich *für* den Einsatz von CCS, müsste zeitnah eine Infrastruktur für CO₂-Transport und -Speicherung aufgebaut und BECCS-Anlagentechnik entwickelt werden. Denn wenn BECCS in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts einen Beitrag zum Klimaschutz in der Größenordnung leisten soll wie in globalen Klimaschuttszenarien vorgesehen, müssten bereits in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren erste großtechnische Anlagen in Betrieb gehen. Als Erprobungsfeld für BECCS eignet sich die Prozesswärmeerzeugung mit Biomasse in der Industrie. Die gesellschaftliche Diskussion, ob und wofür CCS eingesetzt werden soll, sollte daher schnellstmöglich geführt werden.

Zweitens hängt die zukünftige Bioenergienutzung davon ab, ob und wann die Markteinführung flüssiger **Biokraftstoffe aus Lignozellulose** gelingt. Diese können einen wertvollen Beitrag im Energiesystem leisten, weil sie zum Beispiel im Flug- und Schiffsverkehr Alternativen zu fossilen Kraftstoffen bieten. Bei der Herstellung der Biokraftstoffe kann außerdem ein Teil des in der Biomasse enthaltenen Kohlenstoffs als CO₂ abgeschieden und unterirdisch gespeichert werden. Wird statt kohlenstoffhaltiger Kraftstoffe Wasserstoff erzeugt, lässt sich sogar der gesamte in der Biomasse enthaltene Kohlenstoff abscheiden. Kraftstoffe aus Lignozellulose herzustellen, ist allerdings technisch sehr aufwendig und teuer. Um sie zu einer erfolgreichen Markteinführung zu bringen, bedarf es weiterer Entwicklung. Wie auch BECCS lässt sich die Kraftstoffherzeugung aus Lignozellulose nur in großen Anlagen wirtschaftlich realisieren. Auch diese Technologie würde daher zum Teil eine Abkehr von der heute praktizierten und gesellschaftlich bevorzugten kleinskaligen Bioenergienutzung bedeuten und den Trend zur industriellen Bioenergieproduktion verstärken.

Drittens entscheidet der weitere **Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplungsinfrastrukturen (KWK)** darüber, inwiefern Bioenergie zukünftig die Strom- und Wärmeerzeugung unterstützen kann. Flexible Biomasse-KWK-Technologien sind technologisch bereits weit entwickelt. Größere Anlagen zur Versorgung von Industriebetrieben oder städtischen Gebieten könnten langfristig auch mit CCS kombiniert werden. Darüber hinaus ermöglichen KWK-Anlagen eine effiziente dezentrale Bioenergienutzung. Sollen sie eine wichtige Rolle im Energiesystem spielen, müssten die notwendigen Investitionen in den Ausbau der Wärmenetze systematisch unterstützt werden.

Von den vorgestellten Entwicklungspfaden ist der KWK-Ansatz möglicherweise sowohl technisch als auch gesellschaftlich am einfachsten umsetzbar. Durch einen Verzicht auf BECCS und auf die Kraftstoffherzeugung aus Lignozellulose würden aber auch Chancen vertan, mit Bioenergie zum Umbau des Energiesystems und zum Erreichen der langfristigen Klimaschutzziele beizutragen – und zwar gerade in denjenigen Bereichen, in denen alternative Lösungen schwer absehbar sind.

Bei der Lignozellulose sind die Bereitstellungs- und Nutzungskonzepte der Biomasse in den vorgestellten Entwicklungspfaden sehr unterschiedlich: Dezentrale KWK-Anlagen könnten weitgehend aus den heute bestehenden, dezentralen Lieferstrukturen gespeist werden. Bioraffinerie- oder BECCS-Anlagen erfordern hingegen eine industrielle Bioenergieproduktion und überregionale Lieferketten. Dadurch würde sich die Akteursstruktur grundlegend ändern, sodass stärkere soziale Folgen und Widerstände zu erwarten sind.

Bei Biogas aus feuchten, vergärbaren Abfällen hingegen ist ein fließender Übergang von der heutigen dezentralen Nutzung in Blockheizkraftwerken zu neuen Anwendungsbereichen vergleichsweise einfach schrittweise möglich. Das Biogas kann zu Biomethan aufbereitet und ins Erdgasnetz eingespeist werden. Die Technik ist marktreif und wird heute bereits eingesetzt. Wie Erdgas kann Biomethan flexibel zur Strom- und Wärmeerzeugung sowie als Kraftstoff verwendet werden. Eine nationale Biomethanstrategie könnte eine Biomethanherstellung und -nutzung anreizen und so einen wichtigen Baustein einer übergreifenden Bioenergiestrategie bilden. Da das im Biogas enthaltene CO₂ bei der Aufbereitung ohnehin abgetrennt werden muss, bietet es sich an, auch Möglichkeiten für eine Kombination mit CCS zu untersuchen. Allerdings ist die Menge an abgeschiedenem CO₂ pro Anlage relativ gering, sodass eine aufwendige Infrastruktur an CO₂-Leitungen erforderlich wäre. Inwieweit dies wirtschaftlich und logistisch machbar wäre und von der Bevölkerung akzeptiert wird, wäre zu prüfen.

Systemwissen schaffen

Eine umfassende Bioenergiestrategie sollte sicherstellen, dass Bioenergie langfristig die Energiewende und das Erreichen der Klimaschutzziele möglichst gut unterstützt, keine schädlichen Auswirkungen auf Böden, Gewässer und Artenvielfalt hat und von der Gesellschaft akzeptiert wird. Dafür müssen die **Wechselwirkungen zwischen Energiesystem und Landnutzung** besser verstanden werden. Integrierte Modelle von Energie- und Landnutzungssystemen könnten helfen, Entwicklungspfade aufzuzeigen, wie die Klimaschutzziele auf unterschiedliche Weise erreicht werden können. Dabei sollten zukünftig auch BECCS-Technologien und alternative CO₂-Entnahmetechnologien (zum Beispiel Aufforstung) berücksichtigt werden.

Darüber hinaus muss dringend eine **gesellschaftliche und politische Diskussion** zu den Chancen und Risiken der verschiedenen Technologien geführt werden. Dies gilt insbesondere für CCS und die verschiedenen CO₂-Entnahmetechnologien, die derzeit sehr kontrovers bewertet werden. Eine **Plattform** zur Diskussion der Transformationspfade könnte eine umfassende Bewertung der Entwicklungspfade aus verschiedenen Perspektiven sicherstellen.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Diskussionsplattform könnte ein systematisches **Monitoringsystem** mit dem Ziel etabliert werden, alle durch die Bioenergie erbrachten Systembeiträge anhand geeigneter Indikatoren zu bewerten. Würde man ein solches Bewertungssystem, das durch Fachleute regelmäßig erweitert und interpretiert wird, regelmäßig auf verschiedene Entwicklungspfade anwenden, könnte dies helfen, die Weiterentwicklung der Bioenergie in eine systemdienliche Richtung zu lenken. Dies könnte ständiges Nachsteuern bei der Bioenergiepolitik reduzieren und die Planungssicherheit für die beteiligten Akteure erhöhen.

1 Einleitung

Biomasse¹ trägt zur Energiebereitstellung in Deutschland derzeit mehr bei als alle anderen erneuerbaren Energien zusammen. Insgesamt rund 60 Prozent der Strom-, Wärme- und Kraftstofferzeugung aus regenerativen Quellen stammen aus Biomasse. Sie deckt etwa ein Zehntel des deutschen Endenergieverbrauchs.²

Welche Rolle wird Bioenergie für das Energiesystem der Zukunft spielen? Welche Sektoren kann sie gut versorgen, wie kann sie konkret eingesetzt werden? Für eine künftig stark auf erneuerbaren Energien basierte Energieversorgung birgt Bioenergie große Potenziale. Sie kann auch über lange Zeiträume gut gespeichert werden und so dazu beitragen, andauernde wind- und sonnenarme Phasen zu überbrücken. Ihre Einsatzgebiete sind vielfältig: Bioenergie kann zur planbaren Stromerzeugung, als Biokraftstoff, zur Wärmeerzeugung und als Kohlenstofflieferant in der Industrie verwendet werden.

Bleiben Nachhaltigkeitskriterien außer Acht, kann der Einsatz von Bioenergie jedoch die Umwelt belasten. Biomasse ist die Nahrungsbasis aller heterotrophen Organismen (Tiere, Pilze, Mikroorganismen). Zudem trägt Biomasse zur Kohlenstoffspeicherung bei, in Form von lebender Biomasse (zum Beispiel Bäume) sowie als Bodenkohlenstoff, der durch den Abbau von pflanzlicher Biomasse im Boden entsteht. Die Entnahme von Biomasse durch den Menschen stellt immer einen Eingriff in Ökosysteme und deren Kohlenstoffbilanz dar. Werden beispielsweise Wälder abgeholzt, um Energiepflanzen anzubauen, trägt die Bioenergienutzung langfristig nicht oder nur wenig zum Klimaschutz bei. Auch Artenvielfalt, Bodenqualität und Gewässer können durch den Anbau von Energiepflanzen – wie auch durch andere Formen der intensiven Landwirtschaft – beeinträchtigt werden.³ Hinzu kommt, dass Biomasse ein gefragtes Gut ist: Sie wird nicht nur zur Energieversorgung, sondern auch in der Nahrungs- und Futtermittelindustrie und zur Herstellung von Produkten eingesetzt. Durch die wachsende Weltbevölkerung werden die Nachfrage nach Biomasse und damit auch die Konkurrenz um Landflächen weiter steigen. Da sowohl Nahrungsmittel als auch Bioenergeträger international gehandelt werden, müssen auch die im Ausland verursachten ökologischen und sozialen Folgen der Bioenergienutzung berücksichtigt werden.

Schätzungen, wie groß die weltweiten Potenziale für eine nachhaltig nutzbare Bioenergie tatsächlich sind, gehen weit auseinander. Sie reichen von jährlich etwa 50 Exajoule, was in etwa dem heutigen Bioenergieeinsatz entspricht, bis hin zu mehreren Hundert Exajoule pro Jahr.⁴ Den meisten Studien zufolge sind die globalen (und

1 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“ (EU 2009). Bioenergie bezeichnet Biomasse, die als Energieträger genutzt wird.

2 BMWI 2017-1.

3 Wasserbedarf und Auswirkungen der intensiven Landwirtschaft auf Böden werden in Leopoldina 2013 diskutiert.

4 Eine Auswertung verschiedener Potenzialschätzungen findet sich in Klepper/Thrän 2019, Kapitel 2.

nationalen) Potenziale jedoch begrenzt. Daher sollte Bioenergie diejenigen Funktionen im Energiesystem übernehmen, die durch andere erneuerbare Energien nicht oder nur zu sehr hohen Kosten erfüllt werden können. Welche Funktionen das in den nächsten Jahren und Jahrzehnten sein werden, lässt sich jedoch nicht ohne Weiteres bestimmen. Es hängt in hohem Maße davon ab, wie sich einzelne Technologien entwickeln werden, die in bestimmten Bereichen mit der Bioenergie konkurrieren. Das sind nach heutigem Stand etwa Speichertechnologien, Technologien zur direkten Elektrifizierung und Verfahren zur Herstellung strombasierter synthetischer Brenn- und Kraftstoffe (Power-to-X-Technologien). Um einen möglichst großen Beitrag zur Energieversorgung und zum Klimaschutz zu leisten, muss Bioenergie künftig so eingesetzt werden, dass es dem sich wandelnden Energiesystem besonders nützt. Eine nationale Bioenergiestrategie muss daher die Einbettung der Bioenergie in die deutsche Energiewende ebenso berücksichtigen wie die globalen Klimaschutzziele.

Im Fokus dieser Studie stehen im Wesentlichen die bereits heute genutzten Bioenergiequellen – pflanzliche Biomasse aus Agrar- und Forstwirtschaft sowie Rest- und Abfallstoffe. Ergänzt wird das hier dargestellte Themenspektrum von anderen Arbeiten der deutschen Wissenschaftsakademien zum Thema Bioenergie und Bioökonomie, die unter anderem zukünftige Möglichkeiten beleuchten, mithilfe von Mikroorganismen Energie zu gewinnen. Zu nennen wäre die Stellungnahme „Bioenergie – Möglichkeiten und Grenzen“ der Leopoldina von 2013, die neben klassischen Energiepflanzen auch die energetische Nutzung von Algen und die biologische Erzeugung von Wasserstoff durch gentechnisch veränderte Mikroorganismen aus einer naturwissenschaftlichen Perspektive diskutiert.⁵ Die Stellungnahme „Künstliche Photosynthese. Forschungsstand, wissenschaftlich-technische Herausforderungen und Perspektiven“ der deutschen Wissenschaftsakademien von 2018 beschreibt detailliert verschiedene Verfahren, aus Sonnenlicht, Wasser und Kohlendioxid chemische Energieträger und Wertstoffe zu gewinnen.⁶ Dabei können biologische Verfahren, technische Verfahren (wie Power-to-X) und biologisch-technische Hybridsysteme zum Einsatz kommen. Diese Verfahren können langfristig in direkte Konkurrenz zu biomassebasierten Verfahren treten.

1.1 Bioenergie in der deutschen Energiewende

Heute werden in Deutschland knapp zwei Drittel der energetisch genutzten Biomasse zur Wärmeerzeugung verwendet, 22 Prozent dienen der Stromerzeugung. Biokraftstoffe haben, obwohl sie in der gesellschaftlichen Diskussion oft im Vordergrund stehen, mit 14 Prozent den geringsten Anteil an der verwendeten Bioenergie.⁷

⁵ Leopoldina 2013.

⁶ acatech/Leopoldina/Akademienunion 2018.

⁷ BMWi 2017-1.

Energieszenarien deuten darauf hin, dass sich die Art der Bioenergienutzung bis 2050 grundlegend wandeln wird.⁸ Als wichtige zukünftige Einsatzbereiche werden heute angesehen

- Bereitstellung von industrieller Wärme,
- Bereitstellung von Kraftstoffen für Verkehrsbereiche, die schwierig zu elektrifizieren sind,
- Ausgleich von fluktuierendem Strom aus Wind und Sonne sowie
- Wärmeversorgung in Gebäuden, die nur eingeschränkt dämmbar sind und wo Wärmepumpen schlecht einsetzbar sind.⁹

Die Bereitstellung industrieller Prozesswärme könnte zukünftig ein Hauptanwendungsfeld für Bioenergie werden. Denn Wärmepumpen, die Strom zum Heizen von Gebäuden sehr effizient nutzen, sind für die Bereitstellung von Wärme oberhalb von 200 Grad Celsius nicht einsetzbar. Biomasse hingegen kann auch bei Temperaturen von mehreren Hundert Grad unkompliziert als Brennstoff eingesetzt werden. Die Prozesswärme in der Industrie macht derzeit ein Fünftel des Endenergieverbrauchs in Deutschland aus. Dieser Bedarf wird heute zu einem großen Teil durch Erdgas gedeckt. In Zukunft kann er sukzessive durch Biogas und/oder synthetisches Methan ersetzt werden, ohne dass die Industrieprozesse dafür geändert werden müssten. Alternativ könnte auch Holz als Brennstoff in der Industrie eingesetzt werden, was dann aber größere Modifikationen an den Industrieprozessen erfordert.

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 in dieser Stellungnahme nicht im Detail betrachtet wird.

Ein weiteres Haupteinsatzgebiet könnten zukünftig Bereiche des Verkehrssektors sein, in denen rein elektrische Antriebe schwierig umzusetzen sind – beispielsweise im Schiff-, Flug- oder Schwerlastverkehr. Auch wenn strombasierte synthetische Flüssigkraftstoffe in Zukunft voraussichtlich immer wichtiger werden, um Schiffe und Flugzeuge anzutreiben, stellen Biokraftstoffe eine kostengünstige Alternative dar. Auch eine Kombination der strombasierten Wasserstofferzeugung mit der Biokraftstofferzeugung ist eine Möglichkeit. So könnte Wasserstoff aus Elektrolyseanlagen dem aus Biomasse gewonnenen Synthesegas beigemischt werden, um das Verhältnis von Wasser- zu Kohlenstoff für die Kraftstofferzeugung zu optimieren. Dadurch lässt sich nahezu der gesamte in der Biomasse enthaltene Kohlenstoff in den Kraftstoff überführen und die Kraftstoffausbeute dadurch verdoppeln.

⁸ Zum Beispiel acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017-1; BMWI 2017-2.

⁹ Eine Umrüstung auf Wärmepumpen kann beispielsweise durch Auflagen des Denkmalschutzes unzulässig sein, weil Radiatorheizungen nicht ohne Veränderung des Erscheinungsbildes gegen eine Flächenheizung ausgetauscht werden können. Im generellen Gebäudebestand kann eine Umrüstung auf Wärmepumpen an Grenzen der möglichen Investitionen, der Umlagefähigkeit (Begrenzung der maximal erlaubten Kaltmietenanhebung) und Sanierungsakzeptanz (Ausbau der Heizkörper und Einbau einer Fußbodenheizung bedeuten, dass der Mieter ausziehen muss) stoßen.

In der Stromversorgung werden Bioenergieanlagen voraussichtlich in Zukunft nicht mehr darauf ausgerichtet sein, möglichst viel Strom zu erzeugen. Vielmehr werden sie flexibel eingesetzt, um die schwankende Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik abzufangen. In der Wärmeversorgung wird Bioenergie vorrangig bei Gebäuden zum Einsatz kommen, die nicht umfassend gedämmt werden können und wo Wärmepumpen allein nicht effizient einsetzbar sind.

Verschiedene Studien versuchen, den Einsatz von Bioenergie einzuordnen.¹⁰ Je nachdem, welche Annahmen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zugrunde legen, ist die optimale Aufteilung der Bioenergie auf die verschiedenen Anwendungsgebiete in den Energieszenarien recht unterschiedlich.¹¹ Einig sind sich die Autorinnen und Autoren der meisten Studien jedoch darin, dass Bioenergie ein wichtiger Energieträger ist, um die Klimaschutzziele zu erreichen.

1.2 Bioenergie im globalen Klimaschutz

Langfristig gesehen – also auch über das Jahr 2050 hinaus – könnte Bioenergie noch eine zusätzliche Rolle im Energiesystem spielen, die bisher in den nationalen Energieszenarien nicht 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 CO_2 entzogen wird.¹² Denn selbst wenn die Energieversorgung komplett auf erneuerbare Energien

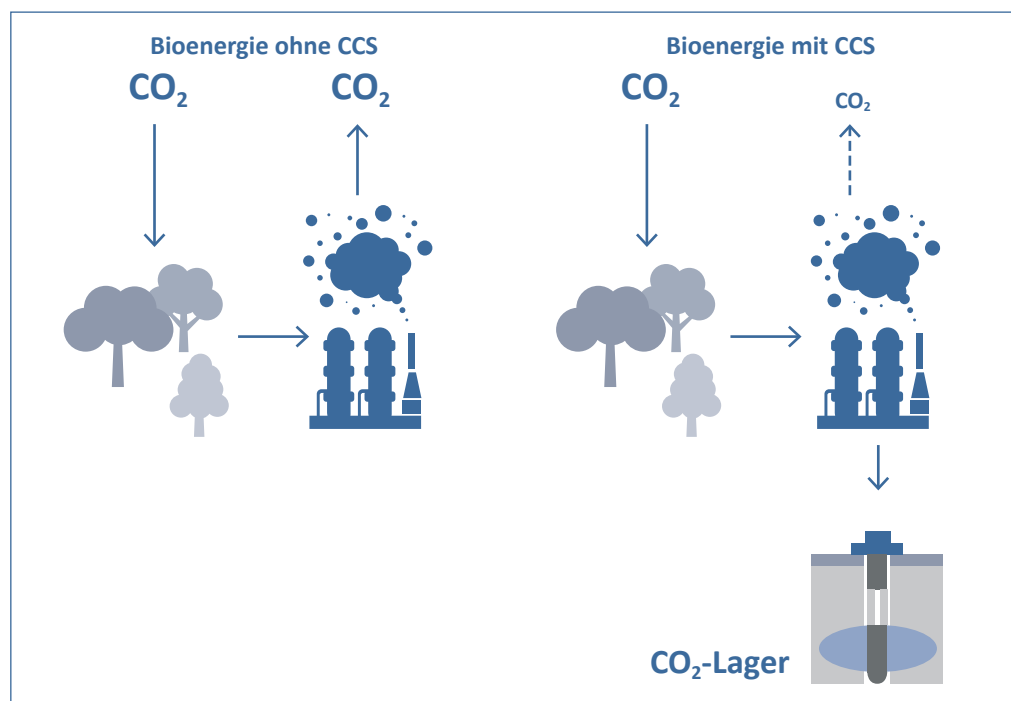


Abbildung 1: Funktionsweise und Kohlenstoffströme von Bioenergie mit und ohne CCS. Emissionen aus der Landnutzung sind nicht abgebildet.

¹⁰ Eine Studie zur Sektorkopplung, die im Projekt ESYS erstellt wurde, untersucht in Modellrechnungen unter anderem den optimalen Einsatz von Bioenergie. In den berechneten kostenoptimalen Szenarien für 2050 wird ein Großteil der Bioenergie in der Industrie eingesetzt. Weitere Anteile werden zur Erzeugung von Biokraftstoffen sowie von Strom und Fernwärme in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen verwendet (acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017-1).

¹¹ Szarka et al. 2017.

¹² UNEP 2017; easac 2018; IPCC 2018.

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 Funktionsweise: Pflanzen nehmen durch Photosynthese CO₂ aus der Atmosphäre auf und bilden daraus energiereiche Kohlenstoffverbindungen. Werden diese zur Erzeugung von Strom, Wärme oder Kraftstoff genutzt, wird dieses CO₂ wieder freigesetzt, aber nicht in die Atmosphäre zurückentlassen, sondern abgetrennt und dauerhaft unterirdisch gelagert (Abbildung 1). Insgesamt wird dadurch der CO₂-Gehalt der Atmosphäre gesenkt, es entstehen „negative Emissionen“. BECCS erfüllt also zwei Funktionen: Erstens stellt sie Energie bereit, zweitens senkt sie den CO₂-Gehalt in der Atmosphäre.

Zwar weisen etablierte Wissenschaftsinstitutionen wie der Weltklimarat IPCC bereits seit Jahren auf die Notwendigkeit negativer Emissionen und die Potenziale von BECCS hin.¹³ In der gesellschaftlichen und politischen Diskussion ist das Thema bisher jedoch kaum angekommen.

Soll die Technologie auch nur annähernd einen Beitrag zum Klimaschutz in der Größenordnung leisten wie in den Szenarien vorgesehen, so müssten bereits in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren erste kommerzielle Anlagen in Betrieb gehen. Bei einer Entscheidung für oder gegen BECCS sind auch die Potenziale, Kosten und Risiken möglicher Alternativen, beispielsweise Aufforstung im großen Stil, zu berücksichtigen.

1.3 Elemente für eine langfristige Bioenergiestrategie für Deutschland

Bioenergie soll nicht nur dem Klima nützen und die Energieversorgung nachhaltiger machen – die Gesellschaft stellt weitere, teils widersprüchliche Erwartungen an den Einsatz von Biomasse im Energiesystem. Öffentlich diskutiert wird etwa, welche Auswirkungen der Energiepflanzenanbau auf das Landschaftsbild („Vermaisung der Landschaft“) und die Artenvielfalt im Agrarland hat. Auch neue Einnahmequellen für Landwirte („vom Landwirt zum Energiewirt“) und die daraus resultierende Wertschöpfung in ländlichen Regionen stehen im Mittelpunkt der Debatte. Ein zukünftiger Einsatz von BECCS hängt in hohem Maße davon ab, ob die in Deutschland bisher sehr umstrittene unterirdische CO₂-Speicherung gesellschaftlich akzeptiert wird. Auch die Frage, ob man an der bisherigen dezentralen Bioenergienutzung festhalten möchte, spielt eine wichtige Rolle. Diese wird zwar von der Bevölkerung bevorzugt, verträgt sich aber nur bedingt mit technisch komplexen Verfahren wie BECCS und der Kraftstoffherstellung, die voraussichtlich überwiegend in großen Anlagen zu vertretbaren Kosten realisiert werden können.

Klimaschutz- und Energieszenarien zeigen, wie eine umweltverträgliche Energieversorgung technisch ausgestaltet werden und welche Rolle die Bioenergie dabei spielen kann. Die unterschiedlichen Vorstellungen verschiedener Akteursgruppen können in diesen Modellen allerdings nicht hinreichend abgebildet werden. Da sich neue Technologien aber nur durchsetzen können, wenn sie von der Gesellschaft unterstützt oder zumindest geduldet werden, entstehen Unsicherheiten, die die Entwicklung von Technologien und Investitionen hemmen können. Eine langfristige Bioenergiestrategie

¹³ Zum Beispiel Azar et al. 2006 und IPCC 2014.

muss daher zahlreiche technische, ökologische, ökonomische und soziale Kriterien berücksichtigen. Dafür ist eine gesellschaftliche Diskussion erforderlich.

Die vorliegende Stellungnahme widmet sich zunächst der Frage, wie viel Bioenergie für die deutsche Energiewende eingesetzt werden sollte. Da Biomasse für Energie ebenso wie Biomasse für andere Zwecke – etwa Nahrungs- und Futtermittel oder Bauholz – im großen Stil international gehandelt wird, müssen dabei auch die globalen Auswirkungen untersucht werden. Als zweite Frage wird erörtert, wie Bioenergie dazu beitragen kann, in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts der Atmosphäre CO₂ zu entziehen. Dieses Thema, das bisher in der Diskussion um Bioenergie kaum beachtet wurde, wird ausführlich behandelt. Neben BECCS werden dabei auch weitere CO₂-Entnahmetechnologien diskutiert, die ergänzend oder alternativ eingesetzt werden können, um unvermeidbare Treibhausgasemissionen auszugleichen.

Im Anschluss daran wird die Frage behandelt, was bei der Transformation der heutigen Bioenergienutzung in künftige Systeme beachtet werden muss. Dazu wird ein Kriterienkatalog vorgestellt, den eine interdisziplinäre Expertengruppe des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“ erarbeitet hat. Anhand der 29 Kriterien werden je zwei Entwicklungspfade für Biogas sowie Holz und andere Lignozellulose bewertet. 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, darunter 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 Bewertung anhand der definierten Kriterien zeigt die Vor- und Nachteile der verschiedenen Entwicklungspfade und offenbart, wo mögliche Hindernisse bei der Umsetzung zu erwarten sind.

Daraus werden im nächsten Schritt Handlungsoptionen für eine nachhaltige Bioenergiestrategie abgeleitet.¹⁴ Schwerpunkte sind dabei eine konsistente Klimaschutzpolitik sowie das Zusammenspiel von Energie-, Agrar-, Ressourcen- und Umweltpolitik. Zudem werden Vorschläge gemacht, wie die heutige Bioenergienutzung bis 2050 schrittweise weiterentwickelt und die gesellschaftliche Diskussion dazu zielführend gestaltet werden kann.

¹⁴ Die vorgestellten Analysen und Optionen beziehen sich auf eine Bioenergienutzung nach Stand der Technik in Deutschland. Weltweit wird ein Großteil der Bioenergie zum Kochen und Heizen in traditionellen Feuerstätten genutzt, was Umwelt und Gesundheit schadet (Thrän 2015).

2 Wie viel Biomasse soll energetisch genutzt werden?

Deutschland importiert und exportiert verschiedene Biomasseprodukte wie Getreide für die Nahrungs- und Futtermittelproduktion, Fleisch und Milchprodukte, Holz und Biokraftstoffe. Über internationale Märkte ist die Bioenergienutzung in Deutschland daher untrennbar mit der globalen Landnutzung verbunden. Insgesamt wird in der Bundesrepublik mehr Biomasse verbraucht als erzeugt. Deutschland beansprucht dadurch rechnerisch Landflächen im Ausland.¹⁵ Vor diesem Hintergrund ist es nicht sinnvoll, nationale Bioenergiepotenziale zu definieren. Eine wissenschaftlich basierte Abschätzung nachhaltig nutzbarer Bioenergiemengen kann nur auf globaler Ebene erfolgen.

Lediglich für Rest- und Abfallstoffe kann ein Potenzial für Deutschland ermittelt werden. Denn insbesondere wenn diese einen hohen Wassergehalt und eine niedrige Energiedichte haben, ist es unwirtschaftlich, sie über längere Strecken zu transportieren. Daher werden sie im Gegensatz zu anderer Biomasse kaum international gehandelt. Derzeit stellen Rest- und Abfallstoffe mit jährlich 0,54 Exajoule (150 Terawattstunden) etwa die Hälfte der insgesamt eingesetzten Bioenergie in Deutschland. Darüber hinaus gibt es ein Potenzial an noch ungenutzten Rest- und Abfallstoffen von etwa 0,39 bis 0,68 Exajoule (108 bis 189 Terawattstunden) pro Jahr.¹⁶ Hauptsächlich handelt es sich dabei um Waldrestholz¹⁷, Getreidestroh und tierische Exkremamente¹⁸. Getreidestroh wird in Deutschland bisher kaum energetisch genutzt, könnte in Zukunft aber an Bedeutung gewinnen.¹⁹

In Dänemark wird Getreidestroh seit den 1990er Jahren energetisch zur Bereitstellung von Strom und Wärme genutzt. In Deutschland standen insbesondere teilweise strengere Emissionsgrenzwerte und Anforderungen beim Einsatz für Stroh im Vergleich zu Holz sowie eine teurere Anlagentechnik einer verstärkten Nutzung von Getreidestroh bisher im Weg.²⁰

¹⁵ Die Schätzungen zu diesem sogenannten virtuellen Landimport unterscheiden sich je nach Datengrundlage und Berechnungsmethodik teilweise erheblich. Lugschitz et al. 2012 kommen zu dem Ergebnis, dass Deutschland etwa das Vierfache der eigenen Agrarfläche (77 Millionen Hektar) im Ausland beansprucht. WWF 2011 schätzt den Landbedarf für die Agrarimporte in die gesamte EU auf 30 Millionen Hektar, wovon 6,4 Millionen Hektar von Deutschland zu verantworten sind.

¹⁶ Brosowski et al. 2016.

¹⁷ Waldrestholz ist im Allgemeinen alles Holz mit weniger als sieben Zentimetern Durchmesser und Derbholz, das im Bestand verbleibt. Es setzt sich somit aus Schaftholz einschließlich Rinde, Ästen und Zweigen, Ernteresten, Wurzeln und Wurzelstöcken und eventuell anhaftenden Nadeln und Blättern zusammen. Das hier zugrunde gelegte Potenzial zu Waldrestholz bezieht alle Ernterückstände bei der Holzentnahme ein, berücksichtigt aber nicht Wurzeln und Wurzelstöcke (Brosowski et al. 2015).

¹⁸ Definition tierische Exkremamente: Flüssig- und Festmist aus der Tierhaltung (Brosowski et al. 2015).

¹⁹ Weiser et al. 2014.

²⁰ Weiser et al. 2014; DBFZ 2012.

Rund 7 bis 9 Prozent des heutigen deutschen Primärenergiebedarfs ließen sich allein mit Rest- und Abfallstoffen decken. Gelingt es, wie im Energiekonzept der Bundesregierung angestrebt, den Primärenergieverbrauch bis 2050 auf jährlich 7,2 Exajoule (2000 Terawattstunden)²¹ zu senken, könnten Rest- und Abfallstoffe sogar 13 bis 17 Prozent der erforderlichen Primärenergie beitragen.²²

Inwieweit darüber hinaus Bioenergie aus Energiepflanzen oder Wald verwendet werden kann, hängt davon ab, welchen Einfluss dies auf Landnutzungssysteme und auf die globale Kohlenstoffbilanz hat. Die wichtigsten Zusammenhänge werden im Folgenden erläutert.

2.1 Globale Bioenergiepotenziale

Es herrscht weitgehend Konsens darüber, dass die Nahrungsmittelproduktion und die stoffliche Nutzung eine höhere Priorität haben als die Gewinnung von Bioenergie und dass Flächen mit besonders hohem ökologischem Wert von der Nutzung ausgenommen sein sollen.²³ Zudem muss Entwaldung ausgeschlossen werden, da sonst der in den Wäldern gespeicherte Kohlenstoff als CO₂ freigesetzt würde. In diesem Fall wäre die gewonnene Bioenergie klimaschädlicher als fossile Brennstoffe. Um zukünftige Bioenergiepotenziale abzuschätzen, müssen daher Annahmen getroffen werden, wie viel Landfläche in Zukunft zur Herstellung von Nahrungsmitteln und Produkten benötigt wird und welche Gebiete dem Schutz von Ökosystemen vorbehalten bleiben.

Abbildung 2 gibt einen Überblick über die Landnutzung und die globalen, vom Menschen verwerteten Biomasseströme. Die abgebildeten Daten stammen aus dem Jahr 2000, da noch keine neueren konsistenten Biomasse- und Landbilanzen verfügbar sind. Die gesamte Menge der geernteten Biomasse ist seit 2000 angestiegen; das Gesamtbild, insbesondere im Hinblick auf die Landnutzung sowie die Größenordnungen und die Relationen der Flüsse zueinander, sollte aber im Wesentlichen nach wie vor gültig sein.

Drei Viertel der globalen Landfläche (außer Grönland und Antarktis) werden bereits durch den Menschen genutzt.²⁴ Die noch ungenutzten Landflächen bestehen zum einen aus unproduktiven Böden wie Wüsten, zum anderen aus den letzten unberührten Urwäldern. Zusätzliche Landflächen können und sollten für die Bioenergieproduktion daher nicht kultiviert werden. Daraus folgt: Eine Ausweitung der Flächen für die Bioenergieproduktion ist nur dann möglich, wenn für andere Nutzungsarten künftig eine geringere Fläche benötigt wird oder wenn eine Doppelnutzung (zum Beispiel gleichzeitige Nahrungsmittel- und Energieproduktion) möglich ist.

²¹ UBA 2018.

²² In einem zukünftigen Energiesystem, in dem Windkraft- und Solaranlagen die dominierenden Energieträger sind, verringert sich der erforderliche Primärenergieeinsatz pro Kilowattstunde Endenergie deutlich. Das liegt zum einen daran, dass Strom aus Windkraft- und Solaranlagen als Primärenergie bilanziert wird. Primär- und Endenergie unterscheiden sich daher nur geringfügig um die Leitungsverluste. Bei Stromerzeugung in Verbrennungskraftwerken werden durch die Umwandlungsverluste hingegen pro Kilowattstunde Endenergie (Strom) zwei bis drei Kilowattstunden Primärenergie (Brennstoff) benötigt. Zum anderen sind Technologien, die Strom einsetzen (beispielsweise Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen), effizienter als Technologien, die Brenn- oder Kraftstoffe einsetzen (Ausfelder et al. 2017).

²³ So empfiehlt beispielsweise der Bioökonomierat, dass Biomasse von landwirtschaftlichen Nutzflächen in erster Linie zur Ernährungssicherung beitragen sollte (Bioökonomierat 2012).

²⁴ Erb et al. 2016.

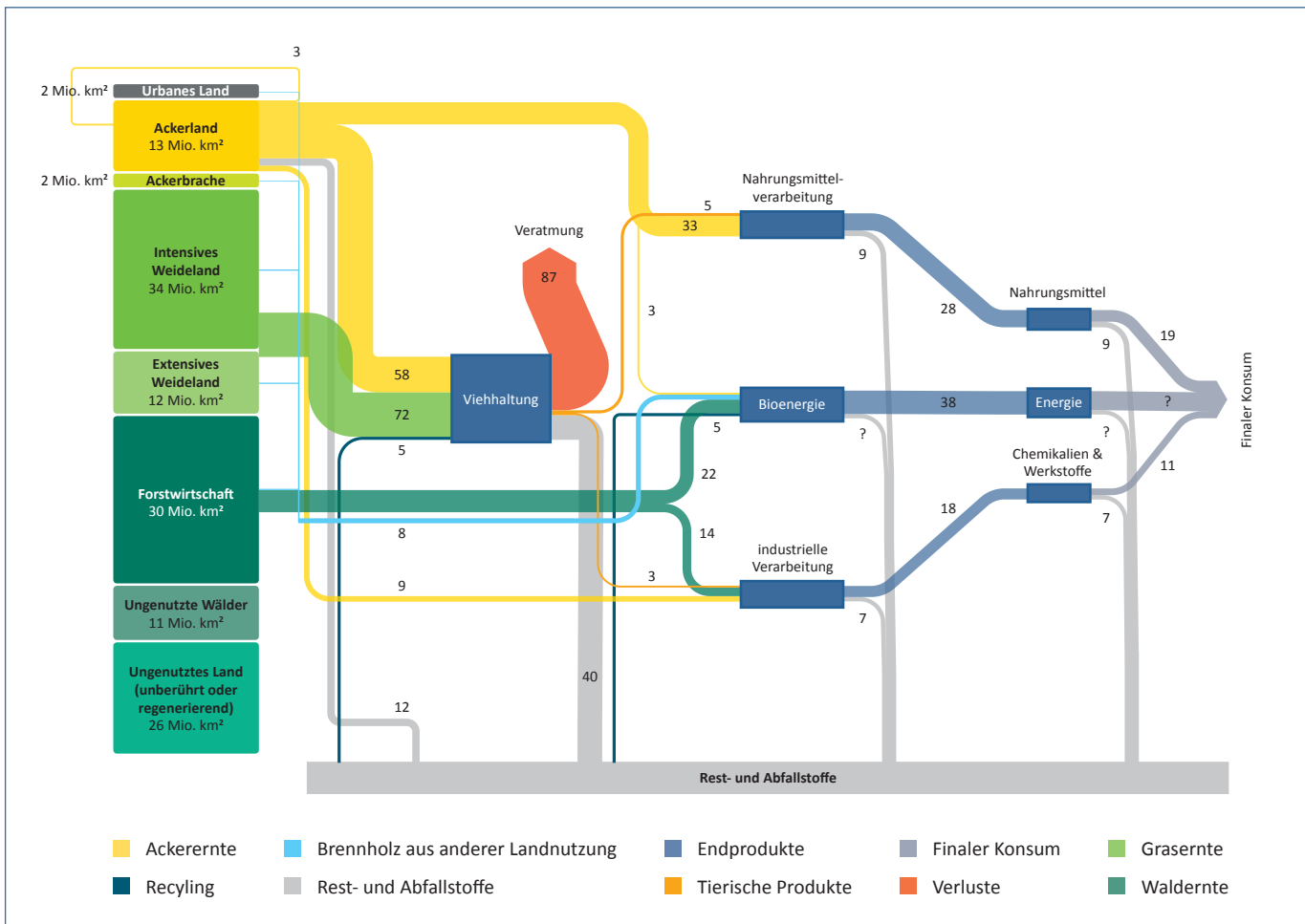


Abbildung 2: Flussdiagramm der geernteten globalen Biomasseflüsse in Exajoule/Jahr für 2000.

Basierend auf Smith et al. 2014 und Daten aus Erb et al. 2007, Schneider et al. 2009, FAO 2010, Wirsenius 2003, Sims et al. 2006, Krausmann et al. 2008, FAOSTAT 2012 und Kummu et al. 2012. Die linke Spalte illustriert die Nutzung der globalen Landflächen. Fragezeichen bedeuten, dass keine Daten vorhanden sind.

Insgesamt werden jährlich 233 Exajoule Biomasse vom Menschen geerntet. Diese Menge besteht zur Hälfte aus Kulturpflanzen von Ackerland, zu einem Drittel aus von Nutztvieh „gegrasten“ Pflanzen und zu 16 Prozent aus Holzernte. Mehr als die Hälfte der insgesamt genutzten Biomasse wird zur Fütterung von Vieh verwendet. Neben den „gegrasten“ Pflanzen von Weideland, die für den Menschen nicht direkt essbar sind, werden rund 50 Prozent der globalen Getreideernte an Nutztvieh verfüttert. Von den jährlich 135 Exajoule verfütterter Biomasse gelangen nur 5 Exajoule (4 Prozent) in Form tierischer Produkte in die menschliche Ernährung – der Rest wird von den Tieren veratmet oder endet als Abfallprodukt.

Diese Zahlen verdeutlichen, dass die zukünftigen Ernährungsgewohnheiten einen immensen Einfluss auf den Landbedarf zur Nahrungsmittelproduktion haben. So könnten rechnerisch bei einer rein pflanzlichen Ernährung weltweit etwa doppelt so viele Menschen von der gleichen Fläche ernährt werden wie heute.²⁵ Entsprechend würden Flächen frei, die zur Bioenergieproduktion oder anderweitig genutzt werden könnten. Im Hinblick auf das Bevölkerungswachstum und die steigende Nachfrage nach tierischen Lebensmitteln in bevölkerungsreichen Ländern wie Indien und China

²⁵ Erb et al. 2016.

geht die Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) jedoch davon aus, dass die globale Agrarproduktion bis 2050 gegenüber 2005 um 60 Prozent steigen muss.²⁶

Aus Abbildung 2 wird ebenfalls ersichtlich, dass weniger als die Hälfte der geernteten Biomasse (84 Exajoule pro Jahr) in Form von Nahrungsmitteln, Energieträgern, Chemikalien und Werkstoffen beim Menschen ankommt. Mindestens ebenso viel Biomasse endet als Rest- und Abfallstoffe, die bei Ernte und Weiterverarbeitung anfallen.²⁷ Ein kleiner Teil davon wird energetisch genutzt, andere Teile erfüllen wichtige Funktionen in der Landwirtschaft, indem sie beispielsweise zur Humusbildung beitragen. Darüber hinaus werden erhebliche Mengen an Nahrungsmitteln von den Verbrauchern weggeworfen – in Deutschland jährlich etwa 70 bis 90 Kilogramm pro Einwohner.²⁸ Die Lebensmittelabfälle zu reduzieren, ist daher ein wichtiger Hebel, um den Nutzungsdruck auf Landflächen zu verringern.²⁹ Viele Reststoffe der Pflanzen- und Holzernte verbleiben auf dem Feld oder im Wald und tragen unter anderem zur natürlichen Düngung des Bodens und zum Erhalt der Artenvielfalt (zum Beispiel Totholzkäfer) bei. Würden sie für eine energetische Nutzung aus dem Ökosystem entnommen, so müsste sichergestellt werden, dass die Nährstoffe (Stickstoff, Phosphor³⁰, Kalium) wiedergewonnen und in die Ökosysteme zurückgeführt werden. Denn wird der Nährstoffverlust durch chemische Dünger kompensiert, bedeutet das entsprechende Kosten und negative Folgen für die Umwelt.³¹

Die weltweite Bioenergieproduktion ist seit 2000 von 38 auf etwa 50 bis 60 Exajoule pro Jahr gestiegen. Der Großteil davon (87 Prozent) stammt aus Holz, welches überwiegend in Entwicklungsländern als Feuerholz und Holzkohle in traditionellen Feuerstätten genutzt wird. Diese sind meist sehr ineffizient – bis zu 90 Prozent der Energie gehen bei offenem Feuer verloren – und zudem durch die starke Rauchentwicklung in Wohnräumen extrem gesundheitsschädlich.³² Energiepflanzen vom Acker spielen mit 7 bis 8 Prozent eine eher untergeordnete Rolle.³³

Tabelle 1 gibt einen Überblick über Schätzungen der globalen Bioenergiepotenziale bis 2050 und deren wichtigste Einflussgrößen. Dabei wird zwischen Anbaubiomasse³⁴ aus Acker- und Weideland, Biomasse aus Wald sowie Rest- und Abfallstoffen unterschieden. Auf Acker- und Weideland können klassische Energiepflanzen wie Mais, Zuckerrohr und Raps, aber auch Gräser wie Miscanthus und schnell wachsende Energiehölzer angebaut werden. Gräser und Energieholzplantagen werden unter ökologischen Gesichtspunkten bevorzugt, da sie weniger Dünger brauchen und auch auf schlechteren Böden (etwa auf degradiertem Land) wachsen. Bei der Agrarbiomasse

²⁶ Diese Schätzungen beruhen auf der Fortschreibung gegenwärtiger Trends und können daher in der Realität stark abweichen (Alexandratos/Bruinsma 2012).

²⁷ Die bei der energetischen Nutzung anfallenden Reststoffe sind bis dato nicht quantifiziert und daher mit einem Fragezeichen versehen.

²⁸ Kranert et al. 2012, S. 16.

²⁹ Müller et al. 2017.

³⁰ Phosphor ist nicht unbegrenzt verfügbar und wird von der EU als einer der zwanzig kritischen Rohstoffe eingestuft. Ein kontinuierliches Monitoring der Lagerstätten und Rückgewinnung von Phosphat aus Klärschlamm könnten helfen, die Versorgung zu sichern (acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017-2).

³¹ OECD/IEA 2017; WBA 2017.

³² REN21 2016.

³³ WBA 2017.

³⁴ Als Anbaubiomasse bezeichnet man Pflanzen, die zum Zweck der energetischen Nutzung landwirtschaftlich angebaut werden.

sind die Unterschiede in verschiedenen Potenzialschätzungen wesentlich größer als bei Waldholz und Rest- und Abfallstoffen. Gründe sind die größeren Unsicherheiten in Bezug auf zukünftige Ertragssteigerungen, aber auch den zukünftigen Bedarf an Biomasse für die Nahrungs- und Futtermittelproduktion (abhängig von Ernährungsgewohnheiten und Bevölkerungsentwicklung).

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 in Richtung einer stofflichen statt einer energetischen Nutzung der Algen. 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.³⁵ Zudem ist der Energiebedarf für die Kultivierung und Verarbeitung in derzeit betriebenen Algenproduktionsanlagen so hoch, dass die Energiebilanz für einen energetischen Einsatz ungünstig erscheint.³⁶

	Globale Potenzialschätzungen bis 2050 (Exajoule/Jahr)	Wichtige Einflussfaktoren
Anbaubiomasse von Acker- und Weideland	30 bis über 1.000 (die meisten neueren Studien schätzen das nachhaltige Potenzial auf unter 200 EJ)	<ul style="list-style-type: none"> • Prognosen zum Nahrungsmittelbedarf (Bevölkerungswachstum, Ernährungsweise) • Prognosen zu Ertragssteigerungen bei Agrarpflanzen • Datenunsicherheit bei Weideland
Wald (ohne Restholz)	bis zu 40 ^{a)}	<ul style="list-style-type: none"> • ungeklärte Fragen zur Kohlenstoffbilanz • Entwicklung der Nachfrage zur stofflichen Nutzung (zum Beispiel Bauholz) • Erfolge beim Stopp der weltweiten Entwaldung (gelingt es, weltweit die Entwaldung zu stoppen, geht das Angebot an Holz zukünftig zurück)
Rest- und Abfallstoffe	40 bis 140 ^{b)}	<ul style="list-style-type: none"> • Annahmen, welcher Anteil an Agrarreststoffen zum Erhalt der Bodenqualität und Kohlenstoffspeicherung auf dem Feld verbleiben sollte • Annahmen zur zukünftigen Agrarproduktion

Tabelle 1: Schätzungen für globale Bioenergiepotenziale

a) 40 EJ/a entspricht der heutigen Nutzung. Im Hinblick auf die Bedeutung der Wälder für die Artenvielfalt und die ungeklärte Kohlenstoffbilanz der energetischen Holznutzung (siehe Abschnitt 2.2) ist es fraglich, inwieweit eine energetische Nutzung von Waldholz (abgesehen von Restholz) nachhaltig möglich ist. b) 12–39 EJ/a Waldrestholz, 9–39 EJ/a Tierexkremate, 46–67 EJ/a Agrarreststoffe (davon 19–40 EJ/a für Tierfütterung und traditionelle Nutzung benötigt), 11–17 EJ/a Müll.

Potenziale von Acker- und Weideland

Bei den Bioenergiepotenzialen von Weide- und Ackerland gehen die Schätzungen am weitesten auseinander. Hohe Schätzungen von mehreren Hundert Exajoule pro Jahr beruhen meist auf der Annahme, dass die landwirtschaftlichen Erträge (auch bei Vieh) sehr stark gesteigert werden können. Teilweise werden Erträge angenommen, die fast

³⁵ Die Kosten für die Erzeugung von Algenbiomasse werden auf 480 bis 20.100 Euro pro Tonne Trockenmasse geschätzt (basierend auf Sun et al. 2011, Norsker et al. 2011, Benemann 2013 sowie unveröffentlichten Berechnungen des DBFZ 2011). Sie liegen damit deutlich über dem Erzeugerpreisniveau international gehandelter Rohstoffe wie beispielsweise Ölsaaten (Raps) mit etwa 329 Euro pro Tonne Trockenmasse oder Weizen mit etwa 169 Euro pro Tonne Trockenmasse (Thrän/Pfeiffer 2015).

³⁶ Es gibt derzeit verschiedene Prozessbestandteile in der Algenproduktion, die eine energetische Optimierung erfordern (Rocca et al. 2015). Dazu gehören die Pumpenleistung, Ernte und Entwässerung sowie die Wahl des Nährmediums unter energetischen Gesichtspunkten (Slade/Bauen 2013).

dem Vierfachen der gegenwärtigen durchschnittlichen oberirdischen Biomasseproduktion entsprechen.³⁷ Diese Ertragssteigerungen sind künftig aber allenfalls durch eine gesteigerte Anbauintensität, Bewässerung und Düngung möglich. Dies ist insbesondere in Entwicklungsländern schwer umsetzbar und kann sich zudem negativ auf Umwelt und Artenvielfalt auswirken.

Zudem gibt es große Datenunsicherheiten bei der Landnutzung. So existieren einigen Studien zufolge in großem Ausmaß Brachflächen, die für den Anbau von Energiepflanzen genutzt werden könnten. Andere Studien gehen jedoch davon aus, dass diese Flächen bereits als Weideland genutzt werden und daher nicht ohne Weiteres beziehungsweise oft gar nicht verfügbar sind.³⁸

Verlässliche Schätzungen zu den langfristigen Potenzialen an agrarischer Bioenergie sind aufgrund der Datenunsicherheiten und Unwägbarkeiten beim Nahrungsmittelbedarf und bei den Ertragssteigerungen nicht möglich. Dennoch legt ein Vergleich verschiedener Studien den Schluss nahe, dass eine energetische Nutzung von Agrarbiomasse in größerem Umfang nur dann nachhaltig möglich ist, wenn sich in Zukunft eine fleischärmere Ernährung durchsetzt. Dazu müsste der Fleischkonsum in den Industrieländern sinken und in Schwellenländern der Trend zu steigendem Fleischkonsum unterbrochen werden. Hierdurch würden auch weitere Spielräume in der Landnutzung, zum Beispiel für einen Ausbau der ökologischen Landwirtschaft, eröffnet.

Holzpotenziale

Biomasse aus Holz (ohne holzartige Rest- und Abfallstoffe) nimmt mit circa 40 Exajoule pro Jahr den größten Anteil an der heutigen energetischen Nutzung von Biomasse ein.³⁹ Inwieweit Biomasse aus Wäldern energetisch genutzt werden sollte, ist allerdings umstritten.⁴⁰ Denn Wälder binden große Mengen an Kohlenstoff. Wird die Nutzung intensiviert, so reduziert dies den Kohlenstoffbestand. In der Folge wird zusätzliches CO₂ freigesetzt und der Klimawandel verstärkt. Wird hingegen in einem intensiv genutzten Wald die Holzernte reduziert, kann sich der Kohlenstoffbestand im Wald erhöhen – der Atmosphäre wird dann CO₂ entzogen. Nicht bewirtschaftete Wälder erreichen allerdings nach einigen Jahrzehnten oder Jahrhunderten einen Gleichgewichtszustand, indem zwar große Mengen an Kohlenstoff im Wald gespeichert sind, sie aber netto kein weiteres CO₂ aufnehmen. Zuwachs wird in diesem Fall durch die Verrottung von absterbenden Pflanzenteilen ausgeglichen. Viele genutzte Wälder sind aber weit von diesem Gleichgewichtszustand entfernt. Wird Waldholz für die Herstellung langlebiger Produkte (zum Beispiel für Gebäude) genutzt, bleibt der darin enthaltene Kohlenstoff für die Lebensdauer der Produkte gebunden – hier bietet sich daher eine Möglichkeit, über die Speicherfähigkeit des Waldes hinaus Kohlenstoff langfristig der Atmosphäre

37 Die möglichen Ertragssteigerungen werden kontrovers diskutiert (siehe auch Klepper/Thrän 2019, Abschnitt 2.2.1). Zwar konnten seit den sechziger Jahren die Erträge einzelner Pflanzen um bis zu 80 Prozent gesteigert werden, in den letzten Jahren ist die Steigerungsrate aber abgeflacht. Zudem gibt es physikalische Obergrenzen für die maximal mögliche Produktion (Leopoldina 2013). Mueller et al. (2012) schätzen, dass die Produktion der wichtigsten pflanzlichen Agrarerzeugnisse um 45 bis 70 Prozent gesteigert werden könnte, wenn die Lücke zwischen tatsächlichen Erträgen und den Erträgen, die mit heutiger Technologie (Sorten, Anbaumethoden und weitere) erreichbar wären, geschlossen wird. Inwieweit technische Möglichkeiten nachhaltiger Ertragssteigerungen umgesetzt werden können, hängt allerdings auch immer von der politischen und gesellschaftlichen Situation ab. Zudem ist zu berücksichtigen, dass eine Intensivierung der Landwirtschaft, insbesondere ein verstärkter Einsatz von Düngemitteln, höhere Treibhausgasemissionen und Umweltfolgen verursachen kann. Ansätze wie Präzisionslandwirtschaft (Precision Farming) können dazu beitragen, die Intensivierung nachhaltiger zu gestalten.

38 Erb et al. 2009.

39 Bais et al. 2015.

40 Bentsen 2017.

zu entziehen. Bei der Gesamtbilanz ist diese Kohlenstoffspeicherung in Produkten zu berücksichtigen. Welche Auswirkungen die energetische Holznutzung auf die Kohlenstoffbilanz von Wäldern hat, wird kontrovers diskutiert.⁴¹ Hier ist insbesondere die Festlegung von Bilanzgrenzen und Betrachtungszeiträumen entscheidend, was aber immer subjektive Werturteile beinhaltet (siehe Abschnitt 2.2).

Wie viel Waldbiomasse nachhaltig nutzbar ist, lässt sich daher kaum beziffern. Neben den offenen Fragen der Kohlenstoffbilanz ist auch zu beachten, dass Wälder eine zentrale Rolle beim Erhalt der Biodiversität spielen. Tropische Regenwälder sind die artenreichsten Ökosysteme der Erde, aber auch in Mitteleuropa ist die Artenvielfalt in Wäldern groß.⁴² Zudem speichern und reinigen Wälder Regenwasser und tragen so zur Sicherung der Trinkwasserversorgung bei. Darüber hinaus ist die energetisch nutzbare Holzmenge abhängig von der Entwicklung des Bedarfs für die stoffliche Nutzung (zum Beispiel Bauholz). Da Holz energie- und CO₂-intensive Materialien wie Stahlbeton ersetzen kann,⁴³ wird im Sinne des Klimaschutzes in Zukunft mehr Holz stofflich genutzt werden müssen. In der Gesamtschau ist daher fraglich, ob eine Steigerung der derzeitigen Bioenergienutzung aus Waldbeständen nachhaltig möglich ist.

Rest- und Abfallstoffe

Ein zuverlässiges, nachhaltiges Potenzial bieten hingegen Abfälle des Holzeinschlags und der Holzverarbeitung sowie Altholz. Indem Holz zunächst stofflich und erst danach energetisch genutzt wird (sogenannte „Kaskadennutzung“), werden Nutzungskonkurrenzen verringert, was die Wertschöpfung steigert.⁴⁴ Allerdings werden Holzreststoffe großenteils schon sehr effizient genutzt, etwa zur Spanplattenherstellung. Eine Erhöhung der Nachfrage nach Reststoffen, die das Angebot übersteigt, kann letztendlich zu einem erhöhten Holzeinschlag führen.

Neben Holzreststoffen können Agrarreststoffe (zum Beispiel Stroh), Tierexkremente und Hausmüll energetisch genutzt werden. Bei den Agrarreststoffen ist zu beachten, dass sie teilweise bereits zur Tierfütterung oder als Ersatz für Brennholz eingesetzt werden. Zudem muss zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit und Kohlenstoffspeicherung ein Teil der Ernterückstände auf dem Feld verbleiben. Daher kann die energetische Nutzung mit bisherigen Nutzungsarten oder anderen Umweltzielen konkurrieren. Zudem können Rest- und Abfallstoffe (zum Beispiel Altholz) Schadstoffe enthalten, die bei der energetischen Nutzung entfernt werden müssen, damit sie nicht in die Umwelt gelangen. Trotz dieser Einschränkungen ist die energetische Nutzung von Rest- und Abfallstoffen aus ökologischer Sicht weit weniger problematisch als die Nutzung von Waldholz und Energiepflanzen vom Acker. Auch die gesellschaftliche Akzeptanz in Deutschland ist für die Nutzung von Rest- und Abfallstoffen hoch.⁴⁵ Insgesamt ließen sich mit Rest- und Abfallstoffen 5 bis 20 Prozent des globalen Energiebedarfs decken.⁴⁶

41 Eine Methodik zur Bewertung der Zielkonflikte zwischen Holznutzung und der Erhöhung des Kohlenstoffbestands des Waldes für verschiedene forstwirtschaftliche Bewirtschaftungsweisen wird am Beispiel südfinnischer Wälder in Pingoud 2018 erläutert.

42 UFZ 2015.

43 IPCC 2014, Kapitel 11.

44 UBA 2014.

45 Wüste 2012.

46 Im Jahr 2016 betrug der weltweite Primärenergiebedarf 560 Exajoule, bis 2040 könnte er bei Umsetzung der von den Staaten angekündigten Klimaschutzmaßnahmen auf etwa 700 Exajoule pro Jahr steigen (IEA 2017, S. 79, New Policies Scenario).

2.2 Treibhausgasbilanz von Bioenergie

Da Bioenergie mit dem Ziel genutzt wird, Treibhausgasemissionen zu vermeiden, sind diese ein wichtiges Bewertungskriterium. Um den Klimaschutzbeitrag von Bioenergie einzuschätzen, muss die Treibhausgasbilanz über den gesamten Lebenszyklus möglichst vollständig erfasst werden. Die Treibhausgase, die bei der Bereitstellung und Umwandlung der Biomasse entstehen, müssen dann gegengerechnet werden gegen die Einsparung fossiler Brennstoffe, die durch die Bioenergie ersetzt werden. Treibhausgase entstehen bei der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung und bei der Umwandlung in und Anwendung von Nutzenergie. Diese sogenannten Prozessemissionen sind relativ gut erfassbar, weil die meisten relevanten Prozesse direkten Messungen zugänglich sind. Für die Bestimmung der Höhe der Treibhausgasemissionen existieren über internationale Normen (ISO 14040/44) standardisierte Ökobilanzierungsregeln. Diese Industrienormen dienen unter anderem zur Herstellung von Vergleichbarkeit.

Zum anderen kann die Nachfrage nach Bioenergie zu Änderungen in der Landnutzung führen, beispielsweise beim Anbau von Energiepflanzen oder bei einer verstärkten Entnahme von Holz aus Wäldern. Dadurch wird die Menge an Kohlenstoff, die in Vegetation und Boden gespeichert ist, verändert. Wird die Kohlenstoffspeicherung reduziert, so führt dies zur Freisetzung von Treibhausgasen. Diese Effekte können teilweise nicht gemessen, sondern nur modellbasiert geschätzt werden, wobei die jeweils verwendeten Berechnungsmethoden und Annahmen einen großen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Dies gilt insbesondere für indirekte Landnutzungsänderungen (ILUC). In der ISO 14040/44 werden die THG-Emissionen aus ILUC nicht berücksichtigt. Der Ansatz, auf Annahmen basierende Vorhersagen für die Zukunft zu treffen, der den ILUC-Modellierungen zugrunde liegt, ist bislang nicht mit dem Charakter einer Norm vereinbar.⁴⁷

Verschiedene Ansätze zur Bestimmung von THG-Emissionen aus ILUC werden kontrovers diskutiert. Dies sollte allerdings nicht dazu verleiten, die Emissionen aus Gründen fehlender Datensicherheit pauschal mit null anzunehmen: Diese Annahme ist praktisch immer falsch.⁴⁸ Trotz der bestehenden Unsicherheiten ist es aber möglich, Biomasse mit niedrigem ILUC-Risiko zu identifizieren. Dazu gehören unter anderem Rest- und Abfallstoffe sowie Biomasse, die auf zuvor ungenutztem Land angebaut wird (siehe auch Abschnitt 5.2.1).

Prozessemissionen

Bei der Produktion von landwirtschaftlicher Anbaubiomasse ist der Einsatz von Stickstoffdünger die größte Emissionsquelle.⁴⁹ Denn die Anwendung von Stickstoffdünger führt teilweise zu Emissionen von Lachgas (N_2O), einem starken Treibhausgas. Die Höhe der Lachgasemissionen variiert sehr stark je nach Pflanzenart, Standortbedingungen sowie Menge, Art und Zeitpunkt der Düngung.⁵⁰

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

⁴⁷ Finkbeiner 2014.

⁴⁸ Plevin et al. 2010; Plevin et al. 2014.

⁴⁹ Creutzig et al. 2015.

⁵⁰ Creutzig et al. 2015, S. 925.

immer linear mit steigenden Düngermengen. Neueste Untersuchungen deuten darauf hin, dass die Lachgasemissionen für Raps mit den vom IPCC empfohlenen Pauschalwerten⁵¹ überschätzt werden.⁵² 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 Umwandlung von Biomasse zu Energie sind vor allem die Bereitstellung der Prozessenergie mit fossilen Energieträgern sowie die Nutzung weiterer Hilfs- und Betriebsstoffe von Bedeutung. Zudem können bei bestimmten Prozessen weitere direkte Emissionen auftreten, beispielsweise kann bei der Biogaserzeugung das Treibhausgas Methan entweichen.

Aufgrund der gesetzlichen Vorgaben der Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU (Renewable Energy Directive – RED) war die Bestimmung der Prozessemissionen in den letzten Jahren insbesondere für Biokraftstoffe relevant. Hier gibt es mannigfaltige Publikationen mit Berechnungen zu den Treibhausgasemissionen beziehungsweise -einsparungen für die Bereitstellung verschiedener Biokraftstoffe. Eine Auswertung verschiedener internationaler Studien liefern die in Tabelle 2 aufgeführten Bandbreiten. Die teilweise großen Spannweiten sind auf Unterschiede bei den eingesetzten Roh- beziehungsweise Reststoffen, aber auch auf die gewählten Allokationsmethoden und Systemgrenzen sowie die getroffenen Annahmen bei noch in der Entwicklung befindlichen Biokraftstoffkonzepten zurückzuführen.⁵³

Biokraftstoff	Kilogramm CO ₂ -Äquivalente
Biomethan aus Rest- und Abfallstoffen	3–55
Bioethanol aus Lignozellulose	0–32
Biodiesel aus verschiedenen Ölpflanzen	8–78
Fossile Referenz (Mix aus Benzin und Diesel)	84

Tabelle 2: THG-Prozessemissionen verschiedener Biokraftstoffe basierend auf Mueller-Langer et al. 2014

Rückwirkungen auf die Kohlenstoffspeicherung in Vegetation und Boden

Verbrennt man Biomasse, entsteht dabei zunächst pro bereitgestellte Energieeinheit etwa so viel CO₂ wie bei der Verbrennung von Kohle. Die Energiegewinnung aus Biomasse ist also nur dann CO₂-neutral, wenn die bei der Verbrennung und vorangehenden Ernte⁵⁴ und Aufbereitung (heute meist unter Verwendung fossiler Energieträger) entstehenden Emissionen kompensiert werden, indem Pflanzen und Böden zusätzlich CO₂ aufnehmen. Dies ist nur dann der Fall, wenn Pflanzen verbrannt werden, die entweder zusätzlich zu den Pflanzen, die ohne Bioenergie gewachsen

51 IPCC Tier 1 Methode (IPCC 2006).

52 Ruser et al. 2017.

53 Mueller-Langer et al. 2014.

54 Eine verstärkte Ernte kann zu einer Änderung der Wasserbilanz des Bodens und in der Folge zu Emissionen der Treibhausgase Methan und Lachgas führen (Bentsen 2017). Auch Auswirkungen auf die Kohlenstoffbilanz des Bodens sind zu berücksichtigen. So kann beispielsweise eine Erwärmung des Waldbodens nach Kahlschlag zu CO₂-Emissionen führen, weil sich Bodenkohlenstoff schneller zersetzt (Covington 1981; Hararuk et al. 2017).

wären, gewachsen sind oder die ansonsten rasch biologisch abgebaut worden wären, wodurch das CO₂ ohne Energiegewinn frei geworden wäre.⁵⁵

Wie viel Kohlenstoff in Vegetation und Boden gespeichert ist, hängt von der Art der Vegetation ab. In der Regel ist in von Menschen genutztem Land weniger Kohlenstoff gespeichert als in natürlicher Vegetation.⁵⁶ Führt die Nachfrage nach Bioenergie dazu, dass zuvor ungenutztes Land mit natürlicher Vegetation – insbesondere unberührter Wald – erschlossen wird, besteht daher das Risiko, dass die gespeicherte Kohlenstoffmenge reduziert und CO₂ freigesetzt wird. Um den Einfluss der Bioenergienutzung auf den globalen Kohlenstoffhaushalt zu bestimmen, ist ein Referenzszenario erforderlich, das beschreibt, wie sich die Vegetation ohne Bioenergienutzung entwickelt hätte. Um die Treibhausgaseinsparung zu berechnen, die durch den Einsatz von Bioenergie erzielt wird, wird zusätzlich ein Referenzszenario benötigt, das beschreibt, wie die Energiemenge ohne Bioenergie erzeugt worden wäre, also welche fossilen Energieträger durch die Bioenergie verdrängt werden. Die Wahl der Referenzszenarien kann großen Einfluss auf die Ergebnisse haben.

Bei Anbaubiomasse kann insbesondere die Rodung von Wald den Beitrag zum Klimaschutz stark mindern. Man unterscheidet dabei zwischen direkten und indirekten Landnutzungsänderungen. Wird ein Wald gerodet und die gleiche Fläche für Anbaubiomasse genutzt, so ist das eine direkte Landnutzungsänderung. 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 (ILUC) 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 Agrarfläche, auf der bisher Pflanzen für die Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln angebaut wurden, für den Bioenergiepflanzenanbau genutzt, kann dies dazu führen, dass an anderer Stelle ein Wald gerodet wird, um neue Flächen für die Produktion der Nahrungs- und Futtermittel zu erschließen. Diese indirekten Landnutzungsänderungen sind nicht nachweisbar, da man nicht zuordnen kann, inwieweit beispielsweise eine Entwaldung durch die Nachfrage nach Bioenergie verursacht wurde. Seit Ende der ersten Dekade der 2000er Jahre werden unter Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern verschiedene Ansätze zur Bestimmung von THG-Emissionen aus ILUC kontrovers diskutiert.⁵⁷ Die Konsequenz: Bei Energieträgern aus landwirtschaftlicher Biomasse stellen die indirekten Landnutzungsänderungen das größte Problem für die Abschätzung der Treibhausgasemissionen dar.

Um die Kohlenstoffbilanz bei Waldbiomasse zu erfassen, sind die langsamen Wachstumszyklen von Bäumen zu berücksichtigen. So kann es mehrere Jahrzehnte dauern, bis das freigesetzte CO₂ wieder durch die Vegetation gebunden ist. Selbst wenn

⁵⁵ Gemäß den Bilanzierungsregeln der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) werden Emissionen aus dem Energiesystem und der Landnutzung separat bilanziert. Wird beispielsweise ein Wald gerodet, um Bioenergie zu erzeugen, wird der im Wald abgebaute Kohlenstoff als CO₂-Emission dem Landnutzungssektor, nicht dem Energiesektor angerechnet.

⁵⁶ Neue Forschungsergebnisse zeigen, dass global in der aktuellen Vegetation, die größtenteils aus von Menschen genutzten Wäldern, Weide- und Agrarflächen besteht, nur etwa halb so viel Kohlenstoff gespeichert ist, als in der natürlichen, vom Menschen unberührten Vegetation gebunden wäre. Ohne Landnutzung könnten rechnerisch unter heutigen klimatischen Bedingungen zusätzliche 466 Gigatonnen Kohlenstoff (entspricht 1.700 Gigatonnen CO₂) gebunden sein (Erb et al. 2018).

⁵⁷ Finkbeiner 2014; Wicke et al. 2014.

die gleiche Menge an Holz nachwächst, wie entnommen wurde, kann daher nicht pauschal angenommen werden, dass die gewonnene Bioenergie CO₂-neutral ist. Vielmehr hängt die Treibhausgasbilanz vom Betrachtungszeitraum ab.⁵⁸ Fachleute sprechen hierbei von einer „Kohlenstoffschuld (Carbon Debt)“, die abgegolten werden muss, bis Bioenergie durch die Verdrängung fossiler Energieträger zu einer wirklichen Emissionsminderung beiträgt. Insbesondere im Hinblick auf die kurz- und mittelfristigen Klimaschutzziele – etwa 2030 oder 2050 – kann die „Kohlenstoffschuld“ den möglichen Beitrag der Bioenergie zum Klimaschutz erheblich mindern. Abhängig von den klimatischen Bedingungen und der Art der Waldbewirtschaftung, aber auch von der verwendeten Berechnungsmethodik wird die Kohlenstoffschuld sehr unterschiedlich eingeschätzt.⁵⁹ Das Spektrum reicht von der Position, dass die CO₂-Amortisationszeit⁶⁰ für die Nutzung von Bioenergie aus Waldbiomasse in vielen Fällen vernachlässigbar ist, bis hin zu Zweifeln, ob die energetische Nutzung von Forstprodukten überhaupt einen Beitrag zum Klimaschutz leistet.⁶¹ Die Verwendung von Durchforstungsrückständen wird dabei in der Regel als weniger kritisch gesehen als die direkte energetische Verwertung ganzer Stammholzkompartimente.⁶²

Zusammenfassend bietet Bioenergie in den folgenden Fällen ein hohes Potenzial zur Einsparung von Treibhausgasemissionen:

- Wenn Abfälle und Reststoffe eingesetzt werden, die sonst ohne Energiegewinnung zersetzt (wobei sie gegebenenfalls Methan emittieren) oder verbrannt würden.
- Wenn Holz aus Koppel- und Kaskadennutzung verwendet wird. Bei der Koppelnutzung werden hochwertige Holzfraktionen (Rundholz) stofflich verwertet, minderwertige Fraktionen (zum Beispiel Durchforstungsrückstände) energetisch. Bei der Kaskadennutzung wird Holz zunächst stofflich und am Ende der Lebensdauer der Produkte energetisch verwertet.
- Wenn degradiertes Agrarland für den Anbau von Bioenergiepflanzen eingesetzt wird, insbesondere wenn dadurch Kohlenstoff im Boden angereichert wird (zum Beispiel durch mehrjährige Gräser oder Gehölze).
- Wenn die Bioenergieproduktion zum Beispiel durch zusätzliche Einnahmen eine Bewirtschaftungsweise mit höheren Erträgen ermöglicht, sodass die energetisch genutzte Biomasse zusätzlich zur bisherigen Landnutzung erzeugt wird.⁶³

58 Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass in den forstwirtschaftlich optimalen Zyklen Bäume zu einem Zeitpunkt geschlagen werden, zu dem sie gerade stark wachsen (mit etwa siebzig Jahren in Mitteleuropa). Nachwachsender Jungwald nimmt in den ersten Jahren weniger CO₂ auf, als der ältere Wald (bei Verzicht auf die Holzentnahme) aufgenommen hätte. Nach einigen Jahrzehnten würde sich aber der ältere Wald der Sättigung nähern und nur noch wenig und langfristig gar kein zusätzliches CO₂ aus der Atmosphäre aufnehmen. Der jüngere Wald (nach Holzentnahme) würde hingegen noch wesentlich länger der Atmosphäre CO₂ entziehen.

59 Bentsen 2017.

60 Die CO₂-Amortisationszeit ist die Zeit, die benötigt wird, bis die Kohlenstoffschuld beglichen ist. Erst ab diesem Moment trägt die Bioenergienutzung über ihre gesamte Lebenszeit gesehen wirklich zur CO₂-Einsparung bei.

61 Naudts et al. 2016; Bentsen 2017.

62 Siehe zum Beispiel Forest Research 2018.

63 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. Der Nachweis kann beispielsweise erfolgen, indem die Ertragssteigerungen, die mit Bioenergieproduktion erreicht werden, mit durchschnittlichen historischen Ertragssteigerungen verglichen werden (Ecofys 2016).

- Wenn Land und Vegetation so bewirtschaftet werden, dass sie mehr CO₂ aufnehmen, als sie ohne die Bioenergienutzung aufnehmen würden (unter Berücksichtigung indirekter Landnutzungseffekte). Ein Beispiel ist der Anbau schnell wachsender Baumarten wie Pappeln oder Weiden (Kurzumtriebsplantagen) auf Weideland.⁶⁴
- Wenn der Bedarf an Stickstoffdünger möglichst gering ist.
- Wenn ein optimales Verhältnis zwischen dem Einsatz an Stickstoffdünger und Biomassertrag besteht und Lachgasemissionen durch Stickstoffverluste möglichst gering gehalten werden.

Die tatsächlich erzielte Treibhausgaseinsparung ist auch davon abhängig, welche fossilen Energieträger durch die Bioenergie ersetzt werden. Wird Kohle ersetzt, sind die CO₂-Einsparungen höher, als wenn Erdöl oder Erdgas ersetzt werden.

Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob man durch alternative Formen der Landnutzung (beispielsweise Aufforstung) stärker zum Klimaschutz beitragen könnte als durch den Anbau von Biomasse zur Energiegewinnung. Der Klimaschutzbeitrag, der durch den Ersatz von Erdgas, Erdöl und Kohle mit Biomasse erzielt wird, sollte daher mit einer möglichen CO₂-Aufnahme durch die Erhöhung des Kohlenstoffbestands in der Vegetation gegengerechnet werden. In vielen Wäldern in OECD-Ländern ist beispielsweise der Kohlenstoffbestand durch intensive Forstwirtschaft und frühere Übernutzung viel geringer, als er in einem natürlichen, nicht bewirtschafteten Wald wäre.⁶⁵ Diese Wälder könnten daher große Mengen an zusätzlichem CO₂ aufnehmen.⁶⁶ Anstatt Holz für die energetische Nutzung zu entnehmen, könnte man es daher auch im Wald belassen und damit möglicherweise einen ebenso großen oder sogar größeren Beitrag zum Klimaschutz leisten.

Den größten Nutzen können jedoch integrierte Nutzungskonzepte von Wäldern bieten, bei denen die Forstbiomasse stofflich und energetisch genutzt wird. In diesem Fall können drei Mechanismen zur Treibhausgasreduktion beitragen: Erstens können Materialien wie Stahl und Beton, deren Herstellung sehr hohe Treibhausgasemissionen verursacht, durch Holz ersetzt werden. Zweitens kann Kohlenstoff langfristig gespeichert werden, zum Beispiel als Bauholz in Gebäuden. Und drittens können Holzprodukte am Ende ihrer Lebenszeit sowie Nebenprodukte der Holzernte energetisch verwertet werden und fossile Energieträger ersetzen.⁶⁷

2.3 Fazit

Das Bioenergiepotenzial aus Rest- und Abfallstoffen kann relativ zuverlässig abgeschätzt werden und birgt nur geringe Risiken für Ökosysteme und Nahrungsmittelsicherheit. Werden bisher ungenutzte Potenziale erschlossen, so könnten damit in Deutschland etwa 10 bis 15 Prozent des zukünftigen Primärenergiebedarfs gedeckt werden.

⁶⁴ Haberl et al. 2012.

⁶⁵ Dies gilt allerdings nicht in jedem Fall. So wurde gezeigt, dass sibirischer Nadelwald im Durchschnitt weniger Kohlenstoff speichert als ein Wirtschaftswald (Korpel 1995, S. 295).

⁶⁶ Creutzig et al. 2015, S. 928.

⁶⁷ IPCC 2014, Kapitel 11; Schulze et al. 2019.

Bei der Nutzung von Agrarrohstoffen und Waldholz (abgesehen von Waldrestholz) hingegen sind die nachhaltig nutzbaren Potenziale sehr unsicher, da komplexe Rückwirkungen auf globale Landnutzungssysteme berücksichtigt werden müssen. Diese sind jedoch teilweise kaum quantifizierbar, da indirekte Effekte teilweise nicht gemessen, sondern nur modellbasiert geschätzt werden können, wobei die jeweils verwendeten Berechnungsmethoden und Annahmen einen großen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Verschiedene Ansätze zur Bestimmung von THG-Emissionen aus ILUC und der Kohlenstoffschuld werden kontrovers diskutiert. Der Beitrag der energetischen Nutzung von Agrarbiomasse und Waldholz zum Klimaschutz ist daher unklar.

Im Hinblick auf die Ungewissheiten und ökologischen Risiken bei der Nutzung von Anbaubiomasse sollte stattdessen verstärkt eine Bioenergienutzung basierend auf Rest- und Abfallstoffen angestrebt werden. Spielraum für eine stärkere energetische Nutzung von Agrarbiomasse ist nur dann zu erwarten, wenn es gelingt, den globalen Fleischkonsum spürbar zu reduzieren. Die Nutzung von Waldholz zur Energieversorgung substanziell zu steigern, könnte die Kohlenstoffspeicherung von Wäldern reduzieren und wichtige Funktionen der Wald-Ökosysteme gefährden. Daher ist es im Hinblick auf die ökologischen Folgen wenig sinnvoll.

Für eine nachhaltige Bioenergienutzung muss die Rolle der Bioenergie im Energie- und im Landnutzungssystem berücksichtigt werden. 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. Langfristig wünschenswert wäre daher ein Instrumentarium, das Klimaschutz, den Schutz von Ökosystemen und soziale Aspekte der Ernährungssicherheit als ein integriertes System betrachtet. Nur bei Berücksichtigung der ökologischen, sozialen⁶⁸ und wirtschaftlichen Aspekte kann Bioenergie umwelt- und sozialverträglich eingesetzt werden.

68 Wichtige soziale Aspekte, die in Zusammenhang mit Bioenergie diskutiert werden, sind Landrechte und Zugang zu Nahrungsmitteln.

3 Was bedeuten die langfristigen Klimaschutzziele für die Zukunft der Bioenergie?

Klimaschutzszenarien globaler integrierter Assessmentmodelle⁶⁹ (IAM) zeigen, dass voraussichtlich zukünftig Technologien benötigt werden, um der Atmosphäre CO₂ zu entziehen. Ohne diese Technologien wird es sehr schwierig bis nahezu unmöglich, das 2°C-Ziel zu erreichen. Für das 1,5°C-Ziel gilt das in noch viel stärkerem Ausmaß. Um diese Technologien in der notwendigen Menge zur Verfügung zu haben, müssen sie frühzeitig entwickelt werden. 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 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 aus der Atmosphäre wieder entfernt werden.

Die CO₂-Entnahme kann die Abkehr von fossilen Energieträgern und die Reduktion des Energieverbrauchs keinesfalls ersetzen, sondern lediglich ergänzen. Der Ausstoß von Treibhausgasen muss in jedem Fall deutlich schneller reduziert werden als bisher. Abbildung 3 zeigt am Beispiel eines Szenarios für das 2°C-Ziel, wie das gesamte weltweite CO₂-Budget durch das Zusammenspiel von CO₂-Vermeidung und CO₂-Entnahme eingehalten werden kann.

Um 2020 gelingt in dem in Abbildung 3 gezeigten Beispielszenario durch CO₂-Vermeidungstechnologien eine Trendwende bei den Treibhausgasemissionen: Die jährlichen CO₂-Emissionen sinken ab diesem Zeitpunkt rapide. Um 2030 beginnt der Einsatz von CO₂-Entnahmetechnologien. Zunächst ist die jährliche CO₂-Entnahme aber noch geringer als der CO₂-Ausstoß. Es gibt zwar brutto negative Emissionen, aber die Netto-Emissionen, das heißt die Differenz zwischen Ausstoß und Entnahme, sind immer noch positiv. Allerdings sinken diese Netto-Emissionen durch die CO₂-Entnahme schneller. In den folgenden Jahrzehnten finden CO₂-Entnahmetechnologien mehr und mehr Verbreitung – die jährliche Menge an CO₂-Entnahme (negative Emissionen) steigt. Gleichzeitig werden die Treibhausgasemissionen aus Energieversorgung, Industrie und Landwirtschaft immer weiter reduziert. Bei CO₂ gelingt dies in größerem Maße als bei den anderen Treibhausgasen. Um 2090 ist schließlich Treibhausgasneutralität erreicht – es wird der Atmosphäre genauso viel CO₂ entzogen, wie ausgestoßen wird. Zum Ende des Jahrhunderts werden dann netto-negative Emissionen erreicht, das heißt, der Atmosphäre wird mehr CO₂ entnommen, als noch ausgestoßen wird. Dadurch sinkt der CO₂-Gehalt der Atmosphäre

⁶⁹ IAM-Szenarien sind Computersimulationen, die die Zusammenhänge zwischen sozioökonomischer Entwicklung, der Entwicklung des Energiesystems, dem Ausstoß von Treibhausgasen, deren Konzentration in der Atmosphäre sowie den resultierenden Temperaturänderungen abbilden. IAM 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.

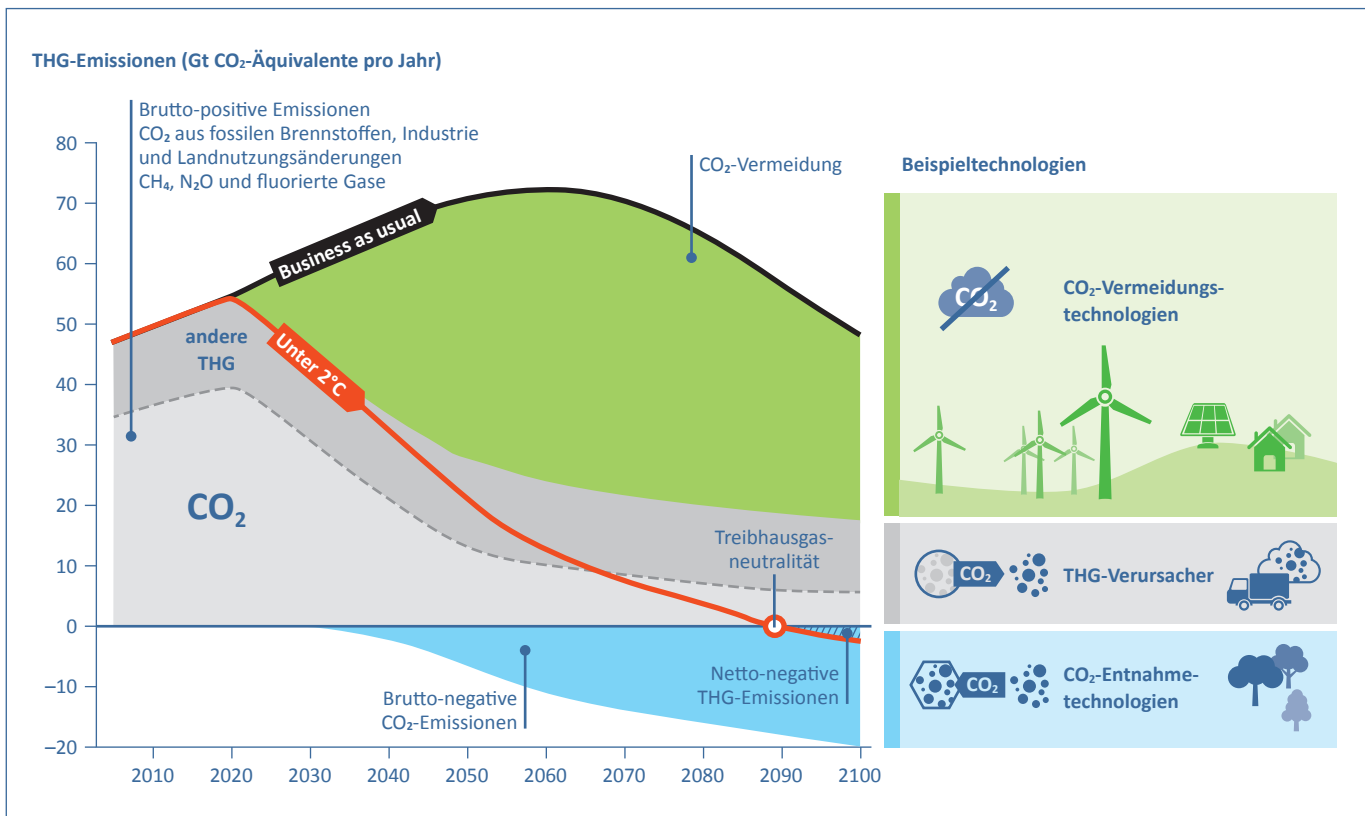


Abbildung 3: CO₂-Vermeidung und negative Emissionen zum Erreichen der Klimaschutzziele. Das dargestellte Szenario führt mit mindestens 66 Prozent Wahrscheinlichkeit dazu, dass die Erderwärmung auf unter 2 °C gegenüber vorindustriellen Temperaturen begrenzt wird. Die weltweiten CO₂-Emissionen werden gegenüber 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 jedoch bereits ab etwa 2030 zum Einsatz. (Grafik in Anlehnung an UNEP 2017).

wieder ab. Um das 1,5°C-Ziel zu erreichen, müsste der Zeitpunkt der Treibhausgasneutralität früher erreicht werden, und es müssten in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts größere Mengen an netto-negativen Emissionen erzielt werden.

Da es in den letzten zwanzig Jahren nicht gelungen ist, die globalen Emissionen in ausreichendem Maße einzuschränken, ist bereits ein Großteil des weltweiten CO₂-Budgets verbraucht. Daher erscheinen nach heutigem Kenntnisstand CO₂-Entnahmetechnologien zum Erreichen der Klimaschutzziele unverzichtbar. In keinem einzigen bisher gerechneten Klimaschuttszenario kann die Erderwärmung ohne CO₂-Entnahmetechnologien bis 2100 auf unter 1,5 °C begrenzt werden.⁷⁰ Unter sehr optimistischen Annahmen zu technologischem Fortschritt und klimafreundlichem Verbraucherverhalten lässt sich der Bedarf an CO₂-Entnahme zwar stark reduzieren, aber nicht vermeiden.⁷¹ Selbst um das 2°C-Ziel zu erreichen, werden in 99 von 116 Klimaschuttszenarien, die im Sachstandsbericht AR5 des IPCC analysiert werden, in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts netto-negative Emissionen benötigt.⁷² Je später die Emissionen ihr Maximum erreichen und je langsamer sie sinken, desto stärker steigt

⁷⁰ UNEP 2017, S. 60.

⁷¹ Untersucht wurden unter anderem die Auswirkungen einer sehr schnellen Weiterentwicklung und Kostensenkung bei erneuerbaren Energien, Speichertechnologien und Energieeffizienz, umfassende Änderungen im Verbraucherverhalten (weniger Fleischkonsum, Nutzung umweltfreundlicherer Verkehrsmittel, weniger Heizen und Klimatisierung), Intensivierung von Viehhaltung und Getreideanbau, Einführung von In-vitro-Fleisch als Lebensmittel (van Vuuren et al. 2018).

⁷² IPCC 2014, Kapitel 6, Abbildung 6.31.

der Bedarf an negativen Emissionen. Die im Rahmen des Pariser Klimaschutzabkommens national festgelegten Beiträge (Nationally Determined Contributions) sind in keinem Fall ausreichend, um das 2°C-Ziel ohne netto-negative Emissionen zu erreichen.

Wie kann Deutschland treibhausgasneutral werden?

Im Rahmen der Verhandlungen zu der Governance-Verordnung forderte das Europäische Parlament im Januar 2018, gemäß dem Pariser Klimaabkommen bis 2050 die Nettotreibhausgasemissionen in der EU auf null zu reduzieren und wenig später der Atmosphäre CO₂ zu entziehen, um bis 2100 die Erderwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen. In der finalen Fassung der Governance-Verordnung 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.⁷³

Für Deutschland prognostizierten optimistische Szenarien für das Jahr 2050 und darüber hinaus unvermeidbare Emissionen in Höhe von mindestens 60 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten pro Jahr.⁷⁴ Sie 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 sowie 3 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten aus Abfall und Abwasser. Dabei werden beispielsweise eine komplette Umstellung des Energie- und Verkehrssektors auf erneuerbare Energien und die Halbierung des Energieverbrauchs in Haushalten, Verkehr, Industrie sowie in Gewerbe, Handel und Dienstleistungen gegenüber 2010 vorausgesetzt. Weitere zugrunde liegende Annahmen sind die Reduktion des Fleischkonsums um 25 bis 55 Prozent, ein massiver Ausbau der Elektrostahlerzeugung sowie eine komplette Umstellung der chemischen Industrie auf regenerative Kohlenstoffquellen⁷⁵ bis 2050. Die tatsächlichen Emissionen dürften daher höher ausfallen.

Sollen die Netto-Treibhausgasemissionen auf null reduziert werden, müssen der Atmosphäre Emissionen entzogen werden, die mindestens genauso hoch sind wie die unvermeidbaren Emissionen. Gibt es Restemissionen aus weiteren Sektoren, gilt es, CO₂-Entnahmetechnologien in noch größerem Umfang einzusetzen. Während die industriebedingten Emissionen mit konventioneller Technologie zur Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (CCS) reduziert werden können,⁷⁶ erfordern die Emissionen der anderen Sektoren, die nicht lokal konzentriert auftreten, Technologien, die CO₂ aus der Luft aufnehmen können. Im Vergleich zu den bisherigen Klimaschutzzielen der EU und Deutschlands, die CO₂-Emissionen um 80 bis 95 Prozent gegenüber 1990 zu reduzieren, kann eine vollständige Treibhausgasneutralität daher erfordern, das Technologieportfolio um CO₂-Entnahmetechnologien zu ergänzen.⁷⁷

⁷³ Verordnung (EU) 2018/1999.

⁷⁴ Zum Beispiel die Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ (UBA 2015).

⁷⁵ Als regenerative Kohlenstoffquelle kommt kurz- bis mittelfristig vorrangig Biomasse, langfristig auch CO₂ infrage.

⁷⁶ Das CO₂ wird dabei zum Beispiel aus dem Abgas abgetrennt.

⁷⁷ Verschiedene Studien kommen zu dem Ergebnis, dass sich in Deutschland etwa 60 Millionen Tonnen an CO₂-Äquivalenten großenteils aus der Landwirtschaft nach heutigem Kenntnisstand kaum vermeiden lassen (UBA 2015; BMWI 2017-2: Berichtsmodul 10.a). Somit würde eine Treibhausgasminderung um mehr als 95 Prozent gegenüber 1990 den Einsatz von CO₂-Entnahmetechnologien erfordern.

3.1 Vergleich verschiedener Möglichkeiten zur CO₂-Entnahme

Für die CO₂-Entnahme kommen verschiedene Verfahren infrage; Tabelle 3 zeigt einen Überblick. Neben der Funktionsweise und Vor- und Nachteilen der verschiedenen Verfahren ist angegeben, wie viel Landfläche oder Energie beispielsweise erforderlich wäre, um die unvermeidbaren Emissionen in Deutschland auszugleichen.⁷⁸

Verfahren	CCS benötigt?	Flächenkonkurrenz	
Aufforstung/ Wiederaufforstung	nein	ja	<p>Funktionsweise: Bäume nehmen CO₂ aus der Atmosphäre auf und speichern den Kohlenstoff im Holz. Durch Ernte von Holz und Verbauen in langlebigen Produkten kann das Potenzial erhöht werden.</p> <p>Vorteile: Sofort machbar (bis neu gepflanzte Bäume signifikante Mengen an CO₂ aufnehmen, vergehen je nach Klimazone allerdings zehn Jahre bis mehrere Jahrzehnte), relativ kostengünstig.</p> <p>Nachteile: Hoher Flächenbedarf. Durch Abholzung, Feuer und Schädlinge kann der gespeicherte Kohlenstoff wieder als CO₂ in die Atmosphäre gelangen. Durch den Albedoeffekt von Waldflächen kann die Erwärmung beschleunigt werden.</p> <p>Voraussetzungen für den Ausgleich der unvermeidbaren Emissionen in Deutschland: Etwa ein Viertel der Landwirtschaftsfläche Deutschlands müsste aufgeforstet werden.</p>
Kohlenstoffbindung im Boden (Soil Carbon Sequestration)	nein	nein	<p>Funktionsweise: Durch spezielle Formen der Landbewirtschaftung (zum Beispiel Anbau bestimmter Kulturfolgen, pfluglose Bodenbearbeitung) wird Kohlenstoff im Boden angereichert.</p> <p>Vorteile: Sofort machbar, relativ kostengünstig. Das Land kann gleichzeitig landwirtschaftlich genutzt werden. Wasser- und Nährstofffähigkeit des Bodens können verbessert werden.</p> <p>Nachteile: Potenzial ungewiss. Es handelt sich nur um einen Einmaleffekt und nicht um eine kontinuierliche Aufnahme, da der Boden nach einigen Jahren bis Jahrzehnten gesättigt ist. Zudem kann durch Änderung der Bewirtschaftung der gespeicherte Kohlenstoff wieder als CO₂ in die Atmosphäre gelangen.</p> <p>Voraussetzungen für den Ausgleich der unvermeidbaren Emissionen in Deutschland: Potenzial für Deutschland ungewiss.</p>
Restoration von Mooren und marinen Habitaten	nein	ja	<p>Funktionsweise: Ökosysteme wie Moore oder Mangrovenwälder speichern sehr viel Kohlenstoff in Vegetation und Boden.</p> <p>Vorteile: Kann sofort begonnen werden, allerdings ist die Kohlenstoffbindung ein langwieriger Prozess. Trägt zum Erhalt der Artenvielfalt und zum Wasserschutz bei.</p> <p>Nachteile: Großes THG-Vermeidungspotenzial, darüber hinausgehendes Potenzial für CO₂-Entnahme aber unsicher und eher gering. Könnte durch zusätzliche Methan- und Stickoxidemissionen kurzfristig eine höhere Erderwärmung verursachen. Flächen, die derzeit zur Produktion von Nahrungsmitteln genutzt werden, müssten aufgegeben werden.</p> <p>Voraussetzungen für den Ausgleich der unvermeidbaren Emissionen in Deutschland: Bei der zugrunde liegenden Berechnung der unvermeidbaren Emissionen wurde bereits angenommen, dass 85 Prozent der Moore (> 1 Million Hektar) wiedervernässt sind. Darüber hinausgehende CO₂-Aufnahme durch Torfaufbau ungewiss und eher gering (weniger als 5 Prozent der unvermeidbaren Emissionen).</p>
Biochar/ Biokohle	nein	ja	<p>Funktionsweise: Verkohlte Biomasse (Holzkohle) 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 CO₂ freigesetzt.</p> <p>Vorteile: Bei der Holzkohleproduktion wird Energie gewonnen, allerdings weniger als bei BECCS (lediglich ausreichend, um den Eigenbedarf des Prozesses zu decken). Verbesserung der Wasser- und Nährstoffspeicherfähigkeit des Bodens möglich.</p> <p>Nachteile: Negative Effekte auf Boden möglich, wenn Biokohle schlecht an Boden angepasst ist. Forschungsbedarf bei der Langzeitstabilität der Biokohle. Konkurrenz mit BECCS um die Biomasse.</p> <p>Voraussetzungen für den Ausgleich der unvermeidbaren Emissionen in Deutschland: Potenzial für Deutschland ungewiss.</p>

⁷⁸ Dabei wurden die unvermeidbaren Emissionen aus UBA 2015 zugrunde gelegt. Es wurde angenommen, dass bei Verfahren, die CCS einsetzen (BECCS und Direct Air Capture), die 14 Millionen Tonnen CO₂ aus der Industrie direkt an der Quelle abgeschieden werden und daher nur 46 Millionen Tonnen CO₂ aus der Luft aufgenommen werden müssen. Für die anderen Verfahren wurde angenommen, dass keine Infrastruktur für den CO₂-Transport und die -Speicherung besteht und daher die gesamten 60 Millionen Tonnen aus der Atmosphäre entfernt werden. Die Zahlen sind mit hohen Unsicherheiten behaftet und sollen lediglich die Größenordnung der erforderlichen Maßnahmen veranschaulichen.

Verfahren	CCS benötigt?	Flächenkonkurrenz	
Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung (BECCS, Bio-CCS)	ja	ja	<p>Funktionsweise: Biomasse wird zur Energiegewinnung eingesetzt (zum Beispiel in einem Kraftwerk verbrannt), das dabei entstehende CO₂ wird abgetrennt und unterirdisch eingelagert.</p> <p>Vorteile: Energie wird gewonnen. Das CO₂ wird unterirdisch eingespeichert und bleibt der Atmosphäre langfristig entzogen.</p> <p>Nachteile: Die gesamte Prozesskette ist lediglich für die Ethanolherstellung aus Mais technisch erprobt (die Abscheidung wird auch bei der Biomethanherstellung bereits realisiert). Für andere Konzepte (zum Beispiel Bioraffinerie) besteht Forschungs- und Entwicklungsbedarf.</p> <p>Voraussetzungen für den Ausgleich der unvermeidbaren Emissionen in Deutschland: Die Hälfte bis mehr als die gesamte derzeit genutzte Bioenergie müsste um CCS erweitert werden.</p>
Direct Air Capture	ja	nein	<p>Funktionsweise: CO₂ wird in technischen Anlagen mit chemischen Bindemitteln aus der Umgebungsluft aufgefangen, komprimiert und unterirdisch eingelagert.</p> <p>Vorteile: Potenzial nahezu unbegrenzt, da keine Flächenkonkurrenz. Das CO₂ wird unterirdisch eingespeichert und bleibt der Atmosphäre langfristig entzogen.</p> <p>Nachteile: Da der CO₂-Anteil in der Luft gering ist, müssen sehr große Mengen Luft mit hohem Energiebedarf und entsprechend hohen Kosten in den Anlagen gefiltert werden.</p> <p>Voraussetzungen für den Ausgleich der unvermeidbaren Emissionen in Deutschland: Energiebedarf von mehr als 100 Terawattstunden, der zusätzlich durch erneuerbare Energien gedeckt werden müsste (entspricht mehr als einem Sechstel des heutigen Stromverbrauchs). Allerdings können die Anlagen flexibel betrieben werden, sodass auch Überschussstrom aus Wind und Photovoltaik genutzt werden kann.</p>
Enhanced Weathering	nein	nein	<p>Funktionsweise: Natürliche Mineralien reagieren mit CO₂ und binden auf diese Weise den Kohlenstoff im Gestein (Verwitterung). Dieser Prozess arbeitet in der Natur sehr langsam. Um die Reaktion zu beschleunigen, werden die Mineralien fein zermahlen und großflächig verteilt.</p> <p>Vorteile: Land kann gleichzeitig landwirtschaftlich genutzt werden. Düngereffekt durch die Mineralien möglich. Das CO₂ wird als Kohlenstoff sicher im Gestein gebunden und bleibt der Atmosphäre langfristig entzogen.</p> <p>Nachteile: Gegebenenfalls hoher Energiebedarf für Abbau, Mahlen und Ausbringung der Mineralien; hohe Kosten. Großer Forschungsbedarf.</p> <p>Voraussetzungen für den Ausgleich der unvermeidbaren Emissionen in Deutschland: Etwa 200 Millionen Tonnen Gestein müssten gefördert, vermahlen und verteilt werden (entspricht in der Größenordnung in etwa der gesamten Kohleförderung in Deutschland).</p>

Tabelle 3: CO₂-Entnahmetechnologien im Vergleich. Eine ausführlichere Beschreibung der verschiedenen CO₂-Entnahmetechnologien befindet sich beispielsweise in easac 2018.

Eine Bewertung der verschiedenen CO₂-Entnahmetechnologien mit Angaben zu weltweitem Potenzial, Flächenverbrauch, Energiebilanz, Kosten, Umweltauswirkungen, Dauerhaftigkeit der CO₂-Bindung und technologischem Reifegrad wurde in der Arbeitsgruppe basierend auf der aktuellen Literatur vorgenommen und ist in der parallel zu diesem Dokument erscheinenden Analyse ausführlich dargestellt.⁷⁹

Bei den meisten CO₂-Entnahmetechnologien besteht noch großer Forschungsbedarf im Hinblick auf Potenziale, Umweltauswirkungen und Kosten. Verfahren, die darauf abzielen, den Kohlenstoffgehalt in Boden und Vegetation zu erhöhen, sind nach heutiger Schätzung meist kostengünstiger als Verfahren wie BECCS oder Direct Air Capture, bei denen das CO₂ technisch abgetrennt und unterirdisch eingelagert wird. Zudem werden sie als risikoärmer empfunden, weil sie „natürlich“ sind. Die gesellschaftliche Akzeptanz ist daher höher.⁸⁰ Allerdings ist bei diesen Verfahren ungewiss, wie lange der Kohlenstoff gespeichert bleibt und wie groß das Potenzial ist, die erforderlichen Mengen in Boden und Vegetation zu speichern.⁸¹

⁷⁹ Klepper/Thrän 2019, Abschnitt 4.2.

⁸⁰ Humboldt-Viadrina Governance-Plattform 2018.

⁸¹ UNEP 2017, Chapter 7.

Bei Aufforstung, Biokohle und BECCS wird das CO₂ durch Photosynthese – also den Aufbau von Biomasse – aus der Atmosphäre aufgenommen. Alle drei Verfahren benötigen daher Flächen in sehr großem Ausmaß für den Anbau der Pflanzen.⁸² Sie konkurrieren um diese Anbauflächen sowohl untereinander als auch mit der Land- und Forstwirtschaft. Die Risiken für Nahrungsmittelsicherheit und Biodiversität sind daher bei allen drei Verfahren ähnlich.⁸³ Da es in Deutschland kaum ungenutzte Flächen gibt, ist das Potenzial dieser Verfahren begrenzt. Wenn zusätzliche Potenziale an Rest- und Abfallstoffen erschlossen werden, können BECCS und Biokohle ohne Flächenbedarf einen Beitrag zur CO₂-Entnahme leisten.

Direct Air Capture und Enhanced Weathering sind nicht auf landwirtschaftliche Flächen angewiesen, gehen aber mit hohem logistischem Aufwand, hohen Kosten und einem hohen Energiebedarf einher. Aller Voraussicht nach wird ein Mix aus CO₂-Entnahmetechnologien zum Einsatz kommen müssen, um die unvermeidbaren Emissionen auszugleichen. Müssen zusätzlich noch weitere Emissionen kompensiert werden, weil die Emissionen nicht schnell genug reduziert werden und das Gesamtbudget überschritten wird, so gilt das in noch stärkerem Ausmaß.

Biokohle: Kohlenstoffspeicher und Bodenhilfsstoff

Die Grundidee der Speicherung von Kohlenstoff in Form von Biokohle (englisch: Biochar) basiert auf Erkenntnissen zu historischen Terra-Preta-Böden im Amazonasgebiet. Diese enthalten stabile, auf Holzkohlen zurückgehende Strukturen anthropogenen Ursprungs, die zur hohen Fruchtbarkeit der Terra-Preta-Böden beitragen. Es wird intensiv daran geforscht, wie dieses Konzept in großem Maßstab angewendet und auf verschiedene Böden in anderen Weltregionen übertragen werden kann. Denn es ist aus zwei Gründen attraktiv: Zum einen wird durch die sogenannte Inkohlung der Biomasse deren mikrobieller Abbau im Boden verhindert beziehungsweise erheblich verzögert. Das von den Pflanzen aufgenommene CO₂ bleibt damit langfristig als Kohlenstoff in der Biokohle gespeichert und gelangt nicht wieder in die Atmosphäre. Zum anderen können durch die Einarbeitung der Biokohle in den Boden die Bodenfunktionen, insbesondere die Fruchtbarkeit, verbessert werden. In der Folge können sich die landwirtschaftlichen Erträge erhöhen. Um die positiven Auswirkungen auf den Boden zu optimieren, kann die Biokohle zum Beispiel durch Kompostierung mit leichter umsetzbaren nährstoffreichen, organischen Stoffen ergänzt werden, die im Boden wieder freigesetzt werden können.

Für den langfristigen Klimaschutzbeitrag ist wichtig, dass der Kohlenstoff in der Biokohle über viele Jahrzehnte oder Jahrhunderte gebunden bleibt. Stabile Kohlenstoffverbindungen können durch Verschwelung (Pyrolyse) von Biomasse hergestellt werden, das heißt durch thermische Zersetzung in einer sauerstofffreien Atmosphäre. Die stoffliche Zusammensetzung und physikalischen Eigenschaften der erzeugten Biokohlen hängen dabei stark vom eingesetzten Ausgangsstoff sowie insbesondere von der Behandlungstemperatur und -dauer ab. Je höher die Herstellungstemperatur, umso stabiler sind die Biokohlen.⁸⁴ Unter Freilandbedingungen können mittlere Verweilzeiten von mehr als 100 bis über

⁸² Globale Klimaschutzzszenarien zeigen, dass in den kommenden Jahrzehnten 5 bis 7 Millionen Quadratkilometer Land aufgeforstet werden könnten, um der Atmosphäre 100 bis 300 Gigatonnen CO₂ zu entziehen (Fuss et al. 2018). Das entspricht etwa 10 bis 15 Prozent des derzeit vom Menschen weltweit genutzten Weidelandes.

⁸³ Aufforstung kann sich nachteilig auf die Biodiversität auswirken, denn in Deutschland beherbergt Offenland die größte Anzahl von Arten (Schulze et al. 2015).

1.000 Jahre angenommen werden. Etwa drei Viertel der in der Bioenergie enthaltenen Energie verbleiben in der Biokohle, der übrige Anteil verbleibt in einem brennbaren Gas. Dieses wird benötigt, um den Energiebedarf der Biokohleherstellung zu decken; der Prozess liefert daher keine zusätzliche Energie. Biokohle wird somit nicht zu den BECCS-Verfahren gerechnet.

Für die Herstellung von derzeit weltweit über 40 Millionen Tonnen Holzkohle pro Jahr sind kommerzielle Prozesse von einfachen Meilern über Öfen bis hin zu prozesstechnisch effizienteren Retorten im Einsatz. Für Restbiomassen und andere biogene Einsatzstoffe befinden sich zahlreiche Verfahren in der Entwicklung. Neben der hier beschriebenen Anwendung von Biokohle als Kohlenstoffspeicher und Bodenverbesserer werden auch andere Einsatzbereiche erforscht, wie die Herstellung von Aktivkohlen oder energiereichen Pellets als Brennstoffe. Dafür werden neben der Verschwelung auch weitere Verfahren wie Torrefizierung, hydrothermale Carbonisierung oder dampfunterstützte Prozesse untersucht. Aufgrund der niedrigeren Prozesstemperaturen sind nicht alle Verfahren zur Herstellung langlebiger Biokohlen geeignet. Die Vielzahl der Ausgangsstoffe, Herstellungsverfahren und Konditionierungsoptionen erfordert systematische Untersuchungen, um ein besseres Prozessverständnis zur Wirkung von Biokohlen in Böden zu erlangen. 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.^{b)}

a) EBC 2012.

b) UBA 2016-1.

3.2 CCS-Technologie: Die Basis von BECCS

Die CCS-Technologie besteht aus den Prozessschritten CO₂-Abscheidung, -Transport und -Speicherung. Das technische Verfahren der CO₂-Abscheidung muss an die jeweilige CO₂-Quelle – insbesondere die CO₂-Konzentration – angepasst werden. Bei BECCS und bei unvermeidbaren Emissionen aus der Industrie⁸⁴ findet die Abscheidung im Abgasstrom statt, bei Direct Air Capture wird das CO₂ aus der Luft aufgenommen. Transport und Speicherung hingegen sind von der Art der CO₂-Quelle unabhängig. Weltweit gibt es derzeit 17 großskalige CCS-Projekte.⁸⁵ Diese dienen überwiegend dem Ziel einer zusätzlichen Erdöl- oder Erdgasgewinnung (Enhanced Oil Recovery, kurz EOR, beziehungsweise Enhanced Gas Recovery, kurz EGR). Nur vier der großskaligen CCS-Projekte zielen ausschließlich auf die dauerhafte geologische CO₂-Speicherung. Obwohl bei EOR- und EGR-Projekten ein Teil des verpressten CO₂ mit dem gewonnenen Erdöl beziehungsweise Erdgas wieder zurückgefördert wird, kommt es typischerweise auch bei diesen Projekten zu einer Netto-CO₂-Speicherung. Wie dauerhaft diese Speicherung ist, hängt im Wesentlichen davon ab, ob die zahlreichen für die Öl- beziehungsweise Gasförderung benötigten Bohrungen dauerhaft versiegelt werden können. Aus geologischer Sicht spricht auch bei EOR- und EGR-Projekten nichts gegen eine dauerhafte Speicherung.

⁸⁴ Der Einsatz von CCS in der Industrie wird in acatech 2018 im Detail diskutiert.

⁸⁵ Global CCS Institute 2017.

Das CO₂ kann in leergeförderten Erdöl- und Erdgaslagerstätten oder in tiefliegenden, salzwasserführenden Aquiferen⁸⁶ gespeichert werden. Einen Überblick über die Speicherkapazitäten gibt Tabelle 4. Für die vom Umweltbundesamt geschätzten unvermeidbaren Emissionen in Höhe von 60 Millionen Tonnen pro Jahr reichen die Speicherkapazitäten in Deutschland für 150 bis 250 Jahre. Darüber hinaus liegen große Speicherpotenziale unter der Nordsee und der Norwegischen See, von denen Deutschland einen Teil nutzen könnte. Die Voraussetzung: Es muss sichergestellt werden, dass der grenzüberschreitende CO₂-Transport rechtlich ermöglicht wird.⁸⁷

	Milliarden Tonnen
Erschöpfte Erdgasfelder, deutsche Nordsee	2,8
Saline Aquifere, Deutschland	6–12
Erdgas- und Erdöllagerstätten unter der Nordsee und der Norwegischen See	38
Saline Aquifere, Europa	165

Tabelle 4: CO₂-Speicherkapazitäten in Deutschland und Europa. Knopf et al. 2010; acatech 2018.

Insgesamt kommen Fachleute zu dem Schluss, dass die CCS-Technologie mit Pipeline-Transport und geologischer Speicherung bereits heute einsatzfähig ist und ausreichend Speicherkapazitäten vorhanden sind, um CO₂ in der Höhe der unvermeidbaren Emissionen und darüber hinaus einzulagern.⁸⁸ Das größte Hindernis für den Einsatz der Technologie in Deutschland ist vermutlich die niedrige gesellschaftliche Akzeptanz. Das mag auch daran liegen, dass die CCS-Technologie bisher im Zusammenhang mit der Emissionsreduktion bei Kohlekraftwerken diskutiert und als Argument für den weiteren Einsatz von Kohle als Energieträger angesehen wurde.

3.3 Bioenergie mit CCS

Zur CO₂-Abscheidung in Bioenergieanlagen kommen verschiedene chemische Verfahren infrage.⁸⁹ Dabei gilt: Je geringer die CO₂-Konzentration (zum Beispiel im Abgas eines Verbrennungsprozesses), desto höher ist der Energiebedarf für die Abscheidung. Bisher existiert weltweit nur eine großskalige BECCS-Anlage in den USA, in der jährlich etwa eine Million Tonnen CO₂ bei der Ethanolproduktion aus Maisstärke abgeschieden werden.⁹⁰

Demgegenüber ist der Einsatz von BECCS in vielen Klimaschuttszenarien gewaltig: So werden darin bis zu 300 Exajoule an Bioenergie pro Jahr allein in BECCS-Anlagen verarbeitet.⁹¹ Zum Vergleich: Heute werden weltweit etwa 59 Exajoule

86 Gesteinskörper mit grundwasserführenden Hohlräumen.

87 Derzeit geregelt im London-Protokoll zum Londoner Übereinkommen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen.

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

89 Unter anderem Waschverfahren zum Beispiel mit Aminen, Carbonat, Methanol, physikalische Absorption, sowie Oxyfuel-Verfahren.

90 „Illinois Industrial Carbon Capture and Storage“-Projekt in Decatur, Illinois.

91 IASA 2015.

an Bioenergie genutzt. Um die dafür nötigen Kapazitäten aufzubauen, beginnt die großskalige Nutzung von BECCS in diesen Szenarien bereits zwischen 2020 und 2030. Der Bioenergieeinsatz beträgt mit insgesamt bis zu 400 Exajoule in diesen Szenarien 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.

In vielen Klimaschutzszenarien wird BECCS als einzige CO₂-Entnahmetechnologie berücksichtigt. Im Prinzip ließe sich die CO₂-Entnahme aber auch durch andere, in Tabelle 3 aufgeführte Technologien realisieren. Der Verzicht auf BECCS würde nicht notwendigerweise dazu führen, dass der Bedarf an Bioenergie sinkt. So zeigen Klimaschutzszenarien, die auf BECCS verzichten, einen ähnlich hohen – wenn nicht höheren – Bioenergieeinsatz wie Szenarien mit BECCS.⁹² Die Verfügbarkeit anderer CO₂-Entnahmetechnologien hingegen könnte den Bedarf an BECCS und auch an Bioenergie insgesamt senken. Fragestellungen im Hinblick auf nachhaltig nutzbare Bioenergiepotenziale, Umweltauswirkungen und Nahrungsmittelkonkurrenz sind daher unabhängig davon zu untersuchen, ob Bioenergie in Zukunft mit oder ohne CCS genutzt wird.

Für die künftige Art der Bioenergienutzung kann jedoch entscheidend sein, welche Rolle die CO₂-Entnahme durch BECCS in Zukunft spielen soll. Denn eine BECCS-Anlage liefert immer zwei Produkte: Energie und negative Emissionen. Verschiedene Bioenergieechnologien sind für die CO₂-Abscheidung in unterschiedlichem Maße zugänglich.

Eine effiziente CO₂-Abscheidung ist nur bei großen, stationären Anlagen möglich. Dies umfasst Kraftwerke, große KWK-Anlagen und industrielle Prozesswärmeerzeugung. Auch bei der Erzeugung von Wasserstoff aus Biomasse wird der gesamte Kohlenstoff, der in der Biomasse enthalten ist, zu CO₂ umgesetzt und kann abgeschieden werden.⁹³

Bei der Herstellung von kohlenstoffhaltigen Energieträgern wie Biomethan⁹⁴, Bioethanol oder sonstigen Biokraftstoffen hingegen wird nur ein Teil des Kohlenstoffs aus der Biomasse in CO₂ umgewandelt und kann abgeschieden werden. Der restliche Kohlenstoff verbleibt im Kraftstoff und wird erst bei der Verbrennung in CO₂ umgewandelt. Bei Einsatz in Fahrzeug oder Flugzeug könnte das CO₂ allenfalls mit sehr hohem Aufwand und sehr hohen Kosten abgeschieden und einem CO₂-Speicher zugeführt werden. Realistisch ist daher nur das bei der Herstellung und Aufbereitung der Biokraftstoffe/-brennstoffe abgeschiedene CO₂ sammel- und lagerfähig. Die negativen

⁹² Bauer et al. 2018.

⁹³ Für eine umfassende Nutzung von Wasserstoff im Energiesystem wäre der Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur erforderlich. Diese ist jedoch nach heutigem Kenntnisstand auch unabhängig von Wasserstoff aus Biomasse notwendig, denn mittel- bis langfristig werden große Mengen an überschüssigem Windkraft- und Solarstrom anfallen, die mittels Elektrolyse in Wasserstoff umgewandelt und gespeichert werden können, unter anderem für den Einsatz in Brennstoffzellenfahrzeugen (Ausfelder et al. 2017).

⁹⁴ Biomethan ist aufbereitetes Biogas und besteht hauptsächlich aus Methan. Bei der Aufbereitung wird das im Biogas enthaltene CO₂ abgetrennt. Zudem wird das Gas getrocknet, entschwefelt und konditioniert, um die technischen Anforderungen für die Einspeisung in das Erdgasnetz zu erfüllen. Das Biomethan kann dann im Erdgasnetz transportiert und anstelle von Erdgas zu verschiedenen Zwecken eingesetzt werden.

Emissionen sind bei diesen Verfahren entsprechend niedriger. Wird Biomethan in Kraftwerken oder Industrieanlagen eingesetzt, wäre eine Abtrennung des bei der Verbrennung entstehenden CO₂ hingegen möglich.

Andererseits sind biogene Kraftstoffe für das zukünftige Energiesystem wertvoller als Strom aus Biomasse. Denn Strom kann relativ einfach durch Wind und Photovoltaik erzeugt werden. Zur Herstellung von Kraftstoffen aus Wind- und Solarstrom hingegen benötigt man aufwendige und teure Power-to-X-Verfahren.⁹⁵ Wie wertvoll die CO₂-Abscheidung aus Systemsicht im Verhältnis zum energetischen Produkt ist, hängt davon ab, wie viel CO₂ für das Erreichen der Klimaschutzziele aus der Atmosphäre abgeschieden werden muss und in welchem Umfang und zu welchen Kosten andere CO₂-Abscheidungstechnologien wie zum Beispiel Direct Air Capture zur Verfügung stehen. Welche BECCS-Technologie den größten Beitrag für das Gesamtsystem leisten kann, hängt daher auch von der Entwicklung dieser Technologien ab.

3.4 Fazit

Um die globalen Klimaschutzziele zu erreichen, muss nach heutigem Kenntnisstand spätestens in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts der CO₂-Gehalt der Atmosphäre gesenkt werden – das heißt, es muss mehr CO₂ aus der Atmosphäre herausgeholt werden, als noch emittiert wird. Energetische Biomassenutzung mit CCS ist eine von mehreren Technologien, die dies ermöglichen.

Bei den meisten CO₂-Entnahmetechnologien bestehen noch große Unsicherheiten in Bezug auf Potenziale, Umweltauswirkungen, Kosten und die Dauer der Kohlenstoffspeicherung. Um die Technologien in künftigen Energieszenarien abzubilden und so plausible Mengengerüste aufzustellen, wie die Klimaschutzziele erreicht werden können, besteht daher weiterer Forschungsbedarf. Aller Voraussicht nach wird ein Mix aus verschiedenen Technologien eingesetzt werden müssen, um den Gesamtbedarf an CO₂-Entnahme abdecken zu können. Bei allen CO₂-Entnahmetechnologien ist zu berücksichtigen, dass sie lange Vorlaufzeiten benötigen, bis sie der Atmosphäre signifikante Mengen an CO₂ entziehen können. Bei den technischen Verfahren ist zunächst weitere Forschung und Entwicklung erforderlich, und es müssten kommerzielle Anlagen in großem Umfang errichtet werden. Mit Aufforstung könnte zwar sofort begonnen werden, aber bis heute gepflanzte Bäume in nennenswertem Umfang CO₂ aufnehmen, vergehen zehn Jahre bis mehrere Jahrzehnte.

Zudem kann eine konsensfähige Strategie zum Erreichen der langfristigen Klimaschutzziele nur entwickelt werden, wenn eine gesellschaftliche und politische Diskussion zu den Chancen und Risiken der verschiedenen CO₂-Entnahmetechnologien geführt wird. Unter anderem ist dabei zu klären, ob CCS in Deutschland zum Einsatz kommen soll oder nicht.

⁹⁵ acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017-1; dena 2017.

Soll BECCS in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts einen Beitrag zum Klimaschutz in der Größenordnung leisten wie in den globalen Klimaschutzszenarien vorgesehen, so müssten bereits in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren erste großtechnische Anlagen in Betrieb gehen. Auch die Infrastruktur für den CO₂-Transport und die Lagerung müsste entwickelt werden. Bei der Diskussion über künftige Entwicklungspfade der Bioenergie sollte BECCS daher als Technologieoption mitbetrachtet werden. Da sich die CO₂-Abscheidung und -Anbindung an die notwendige Transportinfrastruktur nur für größere Anlagen lohnt, müssten gegebenenfalls Biomasseströme aus der heutigen, dezentralen Nutzungsstruktur in größere, zentralere Anlagen umgeleitet werden. Die Entscheidung, ob Bioenergie zukünftig in Verbindung mit CCS genutzt werden soll, kann daher großen Einfluss auf die Struktur der Bioenergienutzung allgemein haben.

4 Welche Bioenergietechnologien braucht das Energiesystem der Zukunft?

Bioenergie wurde in der Vergangenheit als ein erneuerbarer Energieträger unter vielen verstanden und mit dem Ziel verbunden, möglichst viel Energie bereitzustellen und dadurch fossile Energieträger zu ersetzen. Dabei wurde die Bioenergienutzung mit positiven Effekten auf die Technologieentwicklung und die Wertschöpfung im ländlichen Raum etabliert. Aktuell erfolgt die Bereitstellung in über elf Millionen Anlagen (siehe Tabelle 5) mit entsprechender Einbindung in Strom-, Wärme- und Gasnetze. Parallel wird intensiv an Verfahren zur Gewinnung von flüssigen Biokraftstoffen aus Lignozellulose geforscht.

Feuchte, vergärbare Biomasse wird derzeit in Deutschland zur Stromerzeugung (meist in Kraft-Wärme-Kopplung) im Rahmen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) sowie zur Erzeugung von Niedertemperaturwärme genutzt. Die staatliche Förderung zielte dabei in erster Linie auf eine maximale Energiebereitstellung ab. In den letzten Jahren hat jedoch eine flexible, an den Bedarf angepasste Stromerzeugung an Bedeutung gewonnen (Abbildung 4). Ein großer Teil des energetisch genutzten Holzes wird in häuslichen Kaminen verbrannt. Diese Art der Nutzung wird staatlich nicht gefördert. Dass sie dennoch weit verbreitet ist, liegt zum einen daran, dass ein Kaminfeuer von vielen Menschen als Komfort empfunden wird. In diesem Fall ist die Kostensensitivität in vielen Fällen vermutlich gering. Zum anderen bieten moderne Bioenergieanlagen eine kostengünstige Möglichkeit erneuerbare Wärme mit häufig lokal verfügbaren Ressourcen bereitzustellen. Anders als in weiten Teilen der Welt sind effiziente und emissionsarme Technologien in Deutschland umfassend etabliert (sogenannte „moderne Bioenergie“ wie unter anderem Scheitholzvergaserkessel, Holzpelletkessel und -öfen sowie Holzhackschnitzelheizungen).⁹⁶

Mit der im Dezember 2018 verabschiedeten Neufassung der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED II) der EU werden zaghafte Anreize für eine Nutzung von abfall- und reststoffbasierten Kraftstoffen gesetzt. So soll der Anteil der fortschrittlichen Biokraftstoffe im Verkehrssektor bis 2030 mindestens 3,5 Prozent betragen⁹⁷. Gleichzeitig wird der Einsatz von konventionellen Kraftstoffen aus Nahrungs- und Futtermittelpflanzen auf maximal 7 Prozent des Endenergieverbrauchs im Bereich Straßen- und Schienenverkehr begrenzt⁹⁸. Darüber hinaus wird eine stufenweise Senkung des Beitrags von Biokraftstoffen mit einem hohen ILUC-Risiko angestrebt.⁹⁹ Mit diesen Vorgaben wird insbesondere der Einsatz von Biodiesel und Bioethanol und damit von konventionellen Biokraftstoffen (Biokraftstoffen der ersten Generation) begrenzt. Zukünftig könnten sich die Anforderungen an die Bioenergienutzung im Verkehrssektor daher deutlich wandeln.

⁹⁶ Vgl. auch Thrän 2015.

⁹⁷ Artikel 25

⁹⁸ Artikel 26 (1)

⁹⁹ EU 2018-1.

	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 Bio- methan)	Landwirtschaftliche Biogasproduktionsanlagen	7.640	4.379 MW _{el}
	Güllekleinanlagen (≤ 75 kW)	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}
Kraft- stoffe^{e)}	Biodieselanlagen (Rapsöl ^{f)} , Palmöl, Altspeisefette/-öle)	30	4 Mio. t/a
	Bioethanolanlagen (Zucker, Stärke)	5	0,7 Mio. t/a

Tabelle 5: 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 am DBFZ, 2018).

b) Lenz et al. 2018; Rönsch 2019. c) DBFZ 2017. d) DBFZ 2015. e) DBFZ 2016. f) Rapsöl als Reinkraftstoff ist in Deutschland aktuell nicht mehr von Relevanz.

Zukünftig sollte der Fokus darauf liegen, mit den begrenzten Biomassepotenzialen einen möglichst hochwertigen Beitrag zur Energiewende zu 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. Viele aktuelle Energieszenarien sehen daher eine wachsende Bedeutung der Bioenergie in der Kraftstofferzeugung für Flug- und Schwerlastverkehr und in der Bereitstellung von industrieller Prozesswärme.¹⁰⁰ Die dezentrale Strom- und Wärmeerzeugung aus Bioenergie hingegen wird den Studien zufolge künftig flexibel erfolgen, um die fluktuierende Einspeisung aus Windkraft- und Solaranlagen auszugleichen. Im Detail widersprechen sich die Szenarien jedoch erheblich. Zusätzlich wird – wie im vorherigen Kapitel dargestellt – in den Klimaszenarien eine Verknüpfung von Bioenergiebereitstellung und CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre für notwendig erachtet. Dafür müssten Bioenergieanlagen mit CCS-Technologien ausgestattet werden. In Abbildung 4 ist dargestellt, wie sich eine systemdienliche Nutzung der Bioenergie im Laufe der kommenden Jahrzehnte ändern könnte.

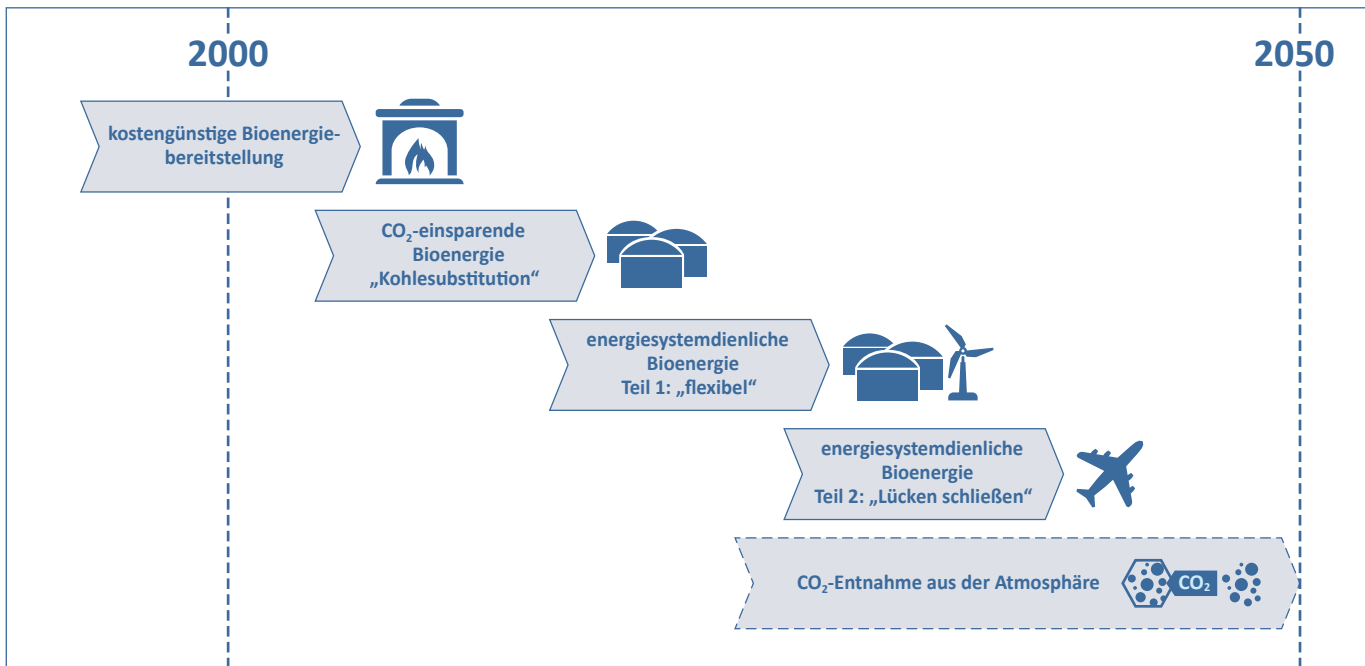


Abbildung 4: Phasen der Bioenergieentwicklung

Die bisherigen Klimaschutz- und Energieszenarien zeigen, welche Rolle Bioenergie und „negative Emissionen“ in Zukunft spielen und wie die zukünftige Bioenergienutzung technisch gestaltet werden könnte. Außerdem liefern sie einen Überblick über die zu erwartenden Kosten. Den erforderlichen gesellschaftlichen Transformationsprozess – vom Verhalten verschiedener Akteursgruppen bis zu konkreten Marktmodellen – bilden die Modelle jedoch in der Regel nicht ab.

Diese gesellschaftlichen Prozesse können jedoch für die Umsetzbarkeit der technischen Konzepte ausschlaggebend sein, insbesondere wenn sich die etablierte Bioenergienutzung grundlegend ändern sollte. Denn die Anforderungen des Energiesystems und des Klimaschutzes führen voraussichtlich dazu, dass in Zukunft komplexere Verfahren zur Umwandlung der Biomasse (insbesondere Lignozellulose) mit entsprechend größeren, zentraleren Anlagen an Bedeutung gewinnen. Dies könnte allerdings ein Hindernis für die gesellschaftliche Akzeptanz darstellen, denn kleine, dezentrale Anlagen werden von der Mehrheit der Bevölkerung gegenüber großen, zentralen Anlagen bevorzugt.¹⁰¹ Hinzu kommt, dass regionale Akteure, insbesondere in den Bereichen Land- und Forstwirtschaft, Biomasse für die dezentralen Anlagen bereitstellen und auf diese Weise ökonomisch profitieren. So wird Holz beispielsweise oft mittels Selbstwerbung¹⁰² oder von regionalen Brennholzhändlern bereitgestellt. Soll die Biomasse zukünftig auch in größeren, zentraleren Anlagen genutzt werden, müssten die Biomasseströme entsprechend umgelenkt werden und dadurch beispielsweise Teile der heutigen lokalen Holznutzung zum Heizen wegfallen. Dies kann auf gesellschaftliche Widerstände stoßen. Denn die Bereitstellung und Nutzung der Bioenergie innerhalb der Region durch lokal verwurzelte Akteure wird von großen Teilen der Bevölkerung als positiv für

¹⁰¹ Ohlhorst 2009; Wüste 2012.

¹⁰² Bei der Selbstwerbung erntet der Kunde das Holz selbst. Dafür erwirbt er beim Waldbesitzer das Recht, eine bestimmte Menge Brennholz zu ernten, oder es wird eine bestimmte Fläche vertraglich festgelegt, auf der er ernten darf. Der Preis ist bei Selbstwerbung meist deutlich geringer als im Holzhandel.

die regionale Wertschöpfung interpretiert.¹⁰³ Es ist jedoch gesamtwirtschaftlich nicht eindeutig, ob die regionale Wertschöpfung bei den dezentralen Nutzungskonzepten tatsächlich höher ist als bei zentraleren.¹⁰⁴

Angesichts der Herausforderungen, negative Emissionen zu erreichen, sollten Entscheidungen für den Aufbau von Infrastrukturen – das betrifft etwa CO₂-Transport und -Lagerung, Wasserstoff- und Erdgasnetze sowie Wärmenetze – rechtzeitig gefällt werden. Dadurch können Lock-in-Effekte¹⁰⁵ in Entwicklungspfaden vermieden werden, die vielleicht kurzfristig Vorteile bringen, aber zum Erreichen der langfristigen Klimaschutzziele ungeeignet sind.¹⁰⁶ Eine langfristig angelegte Strategie würde außerdem dabei helfen, ein ständiges Nachsteuern bei der Bioenergiepolitik zu vermindern und die Planungssicherheit für Entwickler, Anbieter und Betreiber von Bioenergietechnologien zu erhöhen.

4.1 Ein umfassender Bewertungsrahmen für Bioenergietechnologien

Die Transformation der heutigen Bioenergienutzung hin zu den Technologien, die nach heutigem Kenntnisstand in Zukunft dem Gesamtsystem am meisten Nutzen bringen können, hat viele Facetten. Um diese in ihrer Gesamtheit zu bewerten, haben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der interdisziplinär besetzten ESYS-Arbeitsgruppe einen ausführlichen Kriterienkatalog erstellt. Dazu haben sie ökologische, ökonomische, soziale, technische, systemische und BECCS-bezogene Kriterien definiert und mit entsprechenden Indikatoren versehen.

Abbildung 5 fasst alle Kriterien zusammen. Für die Bewertung der Bioenergietechnologien wurde ein Ampelschema mit fünf Abstufungen von Dunkelgrün bis Rot entwickelt. Dabei bedeutet Grün jeweils, dass die Technologie in Bezug auf das jeweilige Kriterium stark zur Zielerreichung beiträgt, während Rot bedeutet, dass die Technologie nicht zur Zielerreichung beiträgt. Bei vielen Kriterien wird die Bioenergietechnologie dabei mit einem Referenzsystem verglichen, das die gleichen Beiträge zum Energiesystem leistet. Rot bedeutet dann, dass die Bioenergietechnologie bezüglich des jeweiligen Kriteriums weniger zur Zielerreichung beiträgt als das Referenzsystem, Grün bedeutet, dass es mehr und Gelb, dass es etwa gleich viel zur Zielerreichung beiträgt wie das Referenzsystem. Sinnvolle Referenzsysteme für Bioenergietechnologie sind nicht statisch, sondern entwickeln sich entlang der Zeitachse. Kurzfristig können es fossile Referenzsysteme sein, die durch die Bioenergietechnologien verdrängt werden. Langfristig werden es aber eher alternative Technologien sein, die ebenfalls auf erneuerbaren Energien beruhen (zum Beispiel Power-to-Gas) und perspektivisch auch gleiche Funktionen im Energiesystem übernehmen können wie die betrachtete Bioenergietechnologie.¹⁰⁷

¹⁰³ Bei einigen Technologiepfaden wird Biomasse dezentral zu einem Energieträger wie Biomethan oder Pyrolyseöl aufbereitet, der eine hohe Energiedichte hat und sich gut transportieren lässt. Die weitere Verarbeitung oder Nutzung kann dann in großen, zentralen Anlagen erfolgen. Bei solchen Konzepten wird der Transport verringert und ein Teil der Wertschöpfung in der Region belassen.

¹⁰⁴ Im Projekt „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS) vergleicht eine Arbeitsgruppe die Auswirkungen zentraler und dezentraler Energiesysteme. Die Ergebnisse werden voraussichtlich Ende 2019 veröffentlicht.

¹⁰⁵ Lock-in-Effekte bezeichnen Barrieren, die es erschweren, einen einmal eingeschlagenen Entwicklungspfad wieder zu verlassen, selbst wenn es bessere Alternativen gäbe. Gründe können unter anderem einmal errichtete Infrastrukturen oder getätigte Investitionen sein, die sich nur über einen langen Zeitraum amortisieren.

¹⁰⁶ Zum Umgang mit Pfadabhängigkeiten siehe auch Fishedick/Grunwald 2017.

¹⁰⁷ Beispielsweise wird für die Holzheizung heute ein Ölkessel als Referenz zugrunde gelegt, für die holzbasierte Bio-raffinerie 2050 hingegen die Herstellung strombasierter synthetischer Kraftstoffe.

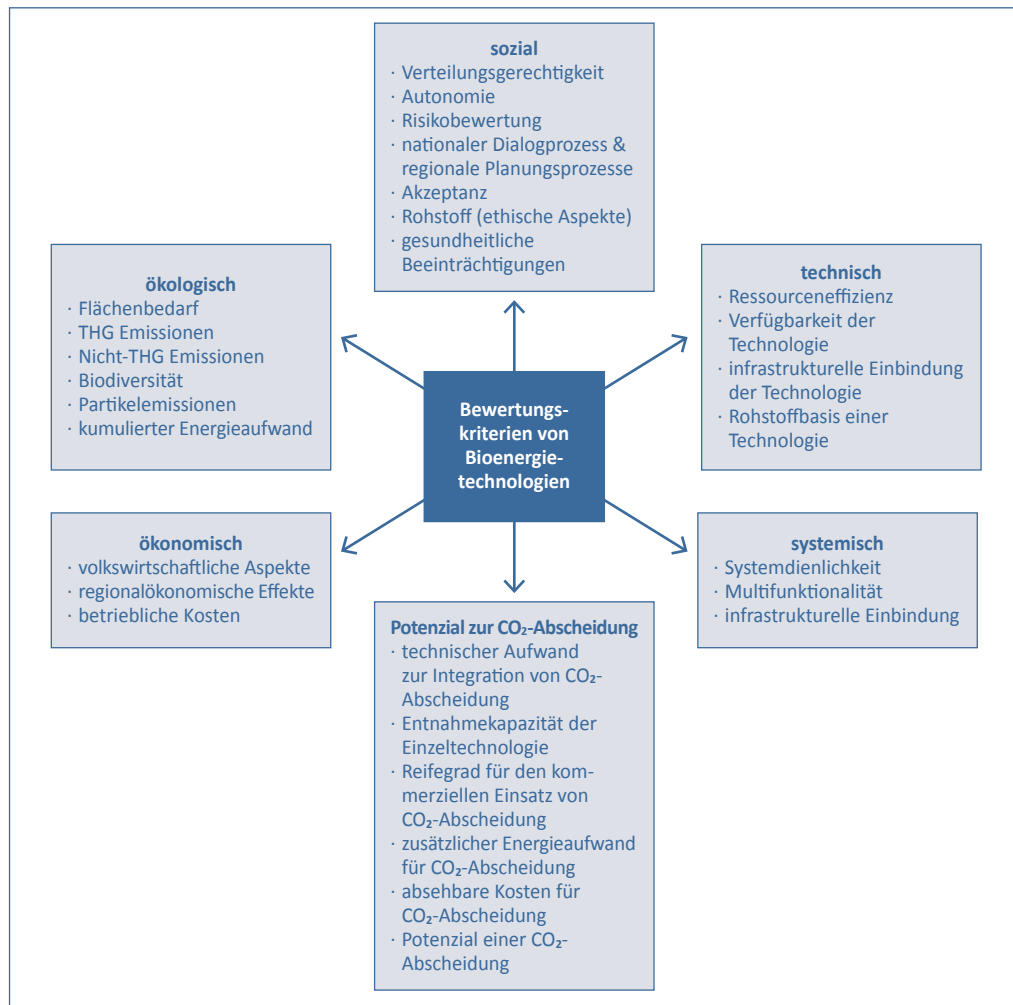


Abbildung 5: Kriterien zur Bewertung von Bioenergietechnologien

Das Ampelschema wurde auf ausgewählte Entwicklungspfade für Lignozellulose und Biogas (siehe Kapitel 4.2) angewendet, wobei jeweils die Ausgestaltung der Technologie heute und im Jahr 2050 analysiert wurde. Bei der Bewertung wurde auch berücksichtigt, dass der erwartete Energiemix im Jahr 2050 weitgehend erneuerbar ist und zum Beispiel deutlich weniger Treibhausgase emittiert als der im Jahr 2018. Damit fallen die Treibhausgaseinsparungen durch den Einsatz von Bioenergie künftig geringer aus. Die Bewertung insbesondere der Technologien für 2050 ist naturgemäß mit großen Unsicherheiten behaftet und spiegelt die Einschätzung der beteiligten Expertinnen und Experten wider. Die Bewertung bezieht sich auf den Einsatz der untersuchten Technologien in Deutschland.

In der Analyse „Bioenergie Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Potenziale – Technologien – Zielkonflikte“¹⁰⁸ sind die Kriterien und ihre Indikatoren sowie die Bedeutung der Farbbewertungen für die einzelnen Kriterien ausführlich beschrieben und die Ergebnisse der Bewertung dargestellt.

Eine Gewichtung der Kriterien wurde durch die Arbeitsgruppe bewusst nicht vorgenommen, sondern muss durch die Politik erfolgen. So 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 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 abgepuffert 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 Bewertung kann zudem Aufschluss darüber geben, wie sich Transformationspfade verändern, wenn sich politische Prioritäten wandeln – und damit andere Kriterien in den Vordergrund treten.

4.2 Entwicklungspfade für Lignozellulose und Biogas

Die ESYS-Arbeitsgruppe hat für ihre Bewertung zwei Bioenergieverfahren ausgewählt: Technologien auf Basis von Lignozellulose und vergärbare Feuchtbioasse für die Biogasproduktion. Diese stellen sowohl aktuell als auch zukünftig die wesentliche Rohstoffbasis dar.¹⁰⁹ Holz stellt dabei mengenmäßig den größten Anteil der Lignozellulose. Bei den betrachteten Fallbeispielen kommen daher für die Lignozellulose-Anlagen im Jahr 2050 vornehmlich Wald- und Industrierestholz, aber auch anteilig Holz aus Kurzumtriebsplantagen¹¹⁰ infrage.¹¹¹ Für die Biogaserzeugung werden ein Mix aus Gülle und anderen feuchten Abfall- und Reststoffen sowie naturverträgliche Anbaubioasse (zum Beispiel Gräser oder Leguminosen) zugrunde gelegt.

Lignozellulose

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.

¹⁰⁹ Technologien für Biokraftstoffe der sogenannten ersten Generation, beispielsweise Biodiesel und Bioethanol aus stärke- und ölhaltigen Agrarpflanzen wie Raps und Mais, wurden hier nicht betrachtet. Insbesondere aufgrund der aktuellen politischen Debatte ist erkennbar, dass der Einsatz von Biodiesel und Bioethanol und damit von konventionellen Kraftstoffen (Biokraftstoffen der ersten Generation) zukünftig begrenzt sein wird und damit langfristig eine untergeordnete Rolle spielen wird (EU 2018-1).

¹¹⁰ In Kurzumtriebsplantagen werden schnell wachsende Baumarten wie Pappel- oder Weidesorten angebaut und im Alter einiger Jahre geerntet. Sie können in Form von Hackschnitzeln energetisch verwertet werden. Die Treibhausgasemissionen sind gering, da kaum Dünger benötigt wird und sich Kohlenstoff im Boden anreichert. Durch die Verwendung für den Ackerbau ungeeigneter Flächen (degradierte Acker- oder Weideflächen) sind die Nutzungskonkurrenzen gering.

¹¹¹ Bei den hier vorgestellten Fallbeispielen wird eine holzbasierte Bioraffinerie betrachtet; grundsätzlich kann zukünftig aber auch Stroh in Bioraffinerien eingesetzt werden.

Für Lignozellulose und feuchte Biomasse wurden typische Anlagenkonzepte für die Nutzung im Jahr 2018 definiert. Jeweils zwei Entwicklungspfade wurden für das Zieljahr 2050 betrachtet: zum einen eine Weiterentwicklung der heute genutzten Technologie zur Strom- und/oder Wärmeerzeugung, zum anderen eine Transformation hin zu anderen perspektivischen Anwendungen, die die Erzeugung von Kraftstoffen ermöglichen. Dabei wird die Möglichkeit zur CO₂-Abscheidung der jeweiligen Entwicklungspfade berücksichtigt und untersucht. Die Technologien mit Potenzial zur Kraftstoffherzeugung erfordern tendenziell größere, zentralere Anlagen, wobei dieser Effekt bei der Nutzung von Lignozellulose sehr viel stärker ausgeprägt ist als bei der Verarbeitung feuchter Biomasse.¹¹² Der Grund: Feuchte Biomasse lässt sich unter anderem wegen der geringen Energiedichte nicht gut über große Distanzen transportieren. Tabelle 6 gibt einen Überblick über die analysierten Technologien. Eine detaillierte Beschreibung der Anlagenkonzepte ist der parallel zu diesem Dokument erscheinenden Analyse¹¹³ zu entnehmen.

	2018		2050	
	Status quo	Weiterentwicklung heute genutzter Technologie zur Strom-/Wärmeerzeugung	Technologie mit Potenzial zur Kraftstoffherzeugung	
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	
Lignozellulose	Holzheizkessel zur Erzeugung von Niedertemperaturwärme	Holzvergaseranlage zur lokalen Strom- und Wärmeerzeugung	Synthesegas-Bioraffinerie zur Erzeugung von Kraftstoffen (inklusive Treibstoffe für den Flugverkehr)	

Tabelle 6: Untersuchte Technologien für die energetische Nutzung von Lignozellulose und feuchter, vergärbare Biomasse heute und 2050

Alle betrachteten Entwicklungspfade sind prinzipiell für die Verwertung von Rest- und Abfallstoffen geeignet. Dies ist ein wichtiges Kriterium, da Rest- und Abfallstoffe im Gegensatz zu Waldholz und Agrarrohstoffen ein relativ gut abschätzbares, nachhaltig nutzbares Potenzial bieten (siehe Kapitel 2). Technisch gesehen sind Rest- und Abfallstoffe jedoch oft schwieriger zu nutzen als Anbaubiomasse. Zum einen ist ihre Energiedichte teilweise gering, sodass Sammlung und Transport sehr aufwendig sind. Zum anderen weisen sie sehr unterschiedliche und außerdem schwankende Inhaltsstoffe auf, die die Verarbeitung erschweren.¹¹⁴ Aufbereitungsverfahren zu definierten Zwischenprodukten (durch Wasch- und Trocknungsverfahren, Torrefizierung, Pelletierung) können Transport und Verarbeitung erleichtern, werden hier aber nicht weiter betrachtet.

¹¹² 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.

¹¹³ Klepper/Thran 2019, Abschnitt 5.2.1.

¹¹⁴ Zum Beispiel höhere Luftemissionen, geringe Ausbeuten, Versinterung des Brennraums, Schaumbildung in Biogasanlagen.

Bioraffinerien

Biomasse ist ein komplexer Rohstoff, aus dem sich neben Nahrungs- und Futtermitteln die verschiedensten Materialien, Werkstoffe und Energieträger sowie viele Bausteine für Chemikalien gewinnen lassen. Sogenannte Bioraffinerien verbinden verschiedene Wertschöpfungsketten, indem sie mehrere Produkte parallel herstellen (Koppelprodukte). Dadurch wird es möglich, die eingesetzte Biomasse vollständig zu nutzen und aus allen Bestandteilen der Ausgangsbiomasse möglichst hochwertige Produkte und Zwischenprodukte zu erzeugen. Biokraftstoffe werden bereits heute in der Regel gekoppelt mit anderen Produkten erzeugt.

Bioraffinerien können je nach Anlagenkonzept zwischen 10.000 und mehreren 100.000 Tonnen Biomasse pro Jahr verarbeiten. Der Teil des Kohlenstoffs aus der eingesetzten Biomasse, der nicht in den Produkten gebunden ist, kann als CO₂ abgeschieden werden. Wird die Hälfte des Kohlenstoffs in Produkten gebunden, ergäbe sich für eine Raffinerie, die eine halbe Million Tonnen Holz pro Jahr verarbeitet, beispielsweise ein Potenzial von mehr als 400.000 Tonnen abgeschiedenes CO₂.

Um verschiedene Arten von Einsatzstoffen (zum Beispiel zucker- und stärkehaltige Rohstoffe, Ölsaaten, Lignozellulose oder Algen) möglichst effizient zu verwerten, existieren unterschiedliche Bioraffinerie-Konzepte.^{a)} In sogenannten *Lignozellulose-Bioraffinerien* werden holz- und halmgutartige Biomassen (etwa Stroh) über verschiedene Aufschlussverfahren in Zellulose, Hemizellulose und Lignin umgewandelt, die vorzugsweise über biotechnologische Verfahren (zum Beispiel Fermentation) weiterverarbeitet werden. In der sogenannten *Synthesegas-Bioraffinerie* hingegen wird die aufbereitete Lignozellulose thermo-chemisch in kohlen- und wasserstoffreiche Gase umgewandelt. Diese werden im nächsten Schritt zu Kraftstoffen und/oder chemischen Grundstoffen weiterverarbeitet.^{b)}

Lignozellulose-Bioraffinerien sind technisch weiter ausgereift als Synthesegas-Bioraffinerien. Ungeachtet dessen besteht zum Teil umfangreicher Entwicklungs- und Demonstrationsbedarf, insbesondere hinsichtlich der Integration der verschiedenen Prozesse und der Senkung der Kosten.^{c)} Dies gilt besonders für fortschrittliche Konzepte wie Synthesegas-Bioraffinerien, die ein breites Rohstoffspektrum wie Rest- und Abfallstoffe, Holz- und Halmgut sowie Algenbiomasse verarbeiten und/oder Hybridkonzepte mit Power-to-X sowie eine höhere Diversifizierung der Produkte realisieren können. Wichtige Aspekte sind dabei

- die Einbindung innovativer Anlagenkomponenten in Bezug auf Up-/Downstreaming-Prozesse;
- die Erhöhung der Anlagengröße und -verfügbarkeit (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);
- sinkende Investitionsaufwendungen durch an lokale Standorte angepasste Anlagendesigns;
- adäquate Rohstoff- und Produktkosten verbunden mit entsprechend verfügbaren und stabilen Märkten bei gleichzeitig hohen Treibhausgasminderungspotenzialen.

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

b) Bundesregierung 2012; DBFZ 2016.

c) Mueller-Langer et al. 2017; Bundesregierung 2012.

Die Bewertung der ausgewählten Technologiepfade anhand der 29 Kriterien ist in der parallel zu dieser Stellungnahme erscheinenden Analyse sowie zusätzlichen Materialien online ausführlich dargestellt.¹¹⁵ Im Folgenden werden die wichtigsten Schlussfolgerungen zusammengefasst.

Technische Kriterien: Die betrachteten Technologien sind weitgehend technisch ausgereift und am Markt verfügbar. Lediglich die Synthesegas-Bioraffinerie auf Basis von Holz ist noch nicht im Markt implementiert. Alle betrachteten Technologien für 2050 ermöglichen eine effiziente Ressourcennutzung mit Gesamtwirkungsgraden von mindestens 80 Prozent.

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, sind mit der Perspektive bis 2050 vermutlich systemdienlicher als die kleineren Strom- und Wärmeerzeugungsanlagen. Sie erzeugen Produkte, die durch Windkraft und Solarstrom schwieriger zu ersetzen sind, und sind daher wertvoller für das Energiesystem. Denn Strom und Wärme können effizienter durch Windkraft- und Photovoltaikanlagen sowie Wärmepumpen bereitgestellt werden, während die Herstellung von Methan oder Kraftstoffen aus Wind- und Solarstrom aufwendig ist. Zudem können Bioraffinerie und Biomethananlage mit CCS kombiniert werden und auf diese Weise künftig einen größeren Beitrag zur Erfüllung der langfristigen Klimaschutzziele leisten. Insbesondere für die KWK-Anlagen 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 vorantreibt. 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 Technologien nur marginal. Für alle Anlagenkonzepte für 2050 wurde ein möglichst nachhaltiger Rohstoffmix zugrunde gelegt. Mindestens die Hälfte der eingesetzten Biomasse sind Rest- und Abfallstoffe, der Rest naturschutznahe Anbaubiomassen (wie Gräser) und Holz aus Kurzumtriebsplantagen. Trotzdem sind die betrachteten Bioenergiotechnologien für 2050 aus ökologischer Sicht tendenziell ungünstiger als die erneuerbaren Referenzsysteme basierend auf Wind- und Solarenergie – insbesondere bei den Kriterien Flächenbedarf, Auswirkungen auf die Biodiversität und Treibhausgasbilanz. Dies rührt hauptsächlich daher, dass für die Herstellung der gleichen Produkte aus Wind- oder Solarenergie weniger Fläche in Anspruch genommen wird. Wird Waldholz oder Anbaubiomasse vom Acker eingesetzt, ist ein umweltverträglicher Anbau daher dringend geboten. Partikelemissionen sind aufgrund ihrer gesundheitsschädlichen Wirkung bei allen Technologien ein wichtiges Kriterium; auch für die Akzeptanz kann das entscheidend sein.

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

¹¹⁵ Thrän 2019.

mit Bioenergieanlagen konkurrieren. In aktuellen Energieszenarien für 2050 ist die Erzeugung von Biomethan kostengünstiger als synthetisches Methan aus Wind- und Solarstrom.¹¹⁶ 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 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.

Soziale Kriterien: Die sozialen Effekte sind stark von der Rohstoffbereitstellung geprägt. Konfliktpotenzial besteht hier im Hinblick auf ethische Aspekte wie die Konkurrenz zu Lebensmitteln und die durch den Anbau beanspruchte Fläche. Auch eine Veränderung des Landschaftsbildes (etwa durch „Vermaisung“) wird kritisch gesehen. Ebenso kann die Sorge vor Gentechnik eine Rolle für die Akzeptanz spielen. Bei Holz wird die Verwendung auf regionaler Ebene mit Autarkie in Verbindung gebracht und ist positiv besetzt. Zudem haben gerade einkommensschwache Haushalte im ländlichen Raum zum Heizen kaum Alternativen zu Brennholz. Eine großskalige Verwendung von Bioenergie zur Kraftstofferzeugung könnte jedoch zur emotionalen Bedeutung von Wäldern im Widerspruch stehen. Insgesamt sind bei der Lignozellulose-Bioraffinerie als „Großtechnologie“ ohne Bezug zu persönlicher oder regionaler Autarkie die größten Widerstände zu erwarten. Bei dezentraleren Anlagen können mehr unterschiedliche Akteure (auch Kleinunternehmer) von Anlagenbetrieb und Biomassebereitstellung profitieren. Dies kann zu höherer Akzeptanz dezentraler Konzepte führen.

Potenzial zur CO₂-Abscheidung: Die Bioraffinerie und die Biomethananlage 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 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 beiden dezentralen Konzepte sind nicht für eine Kombination mit CCS geeignet.

4.3 Fazit

Die Art der Rohstoffbereitstellung ist aus ökologischer Sicht der entscheidendste Einflussfaktor. Sie ist zudem relevant für die soziale Akzeptanz und für regionalökonomische Effekte der Bioenergienutzung. Die konsequente Weiterentwicklung und Etablierung von Best-Practice-Konzepten beim Rohstoffeinsatz ist daher eine Voraussetzung für eine nachhaltige Bioenergiestrategie. Energiesystem und Landnutzung müssen zusammengedacht werden.

Aus systemischer Sicht erscheinen die beiden zentraleren Konzepte – Biomethananlagen und Bioraffinerie – der dezentralen Strom- und Wärmeerzeugung überlegen. Sie erzeugen Produkte, die durch Windkraft und Solarstrom schwieriger zu

¹¹⁶ Basierend auf Daten aus Erlach et al. 2018 und Elsner et al. 2015.

ersetzen sind, und sind daher wertvoller für das Energiesystem. Zudem können sie mit CCS kombiniert werden und auf diese Weise künftig einen größeren Beitrag zur Erfüllung der langfristigen Klimaschutzziele leisten.

Bei der feuchten Biomasse unterscheiden sich die Technologiepfade in vielen Kriterien nicht grundlegend. Damit ist ein schrittweiser Übergang von der heutigen, dezentralen Biogasanlage zu einer zukünftigen, dezentralen Biomethanherstellung relativ einfach möglich. Die Struktur der Rohstoffbereitstellung und die beteiligten Akteure bei der Rohstoffbereitstellung und beim Anlagenbetrieb unterscheiden sich kaum. Ziel sollte es sein, die Rohstoffbasis möglichst nachhaltig zu gestalten.

Bei der Nutzung von Lignozellulose hingegen unterscheiden sich die beiden Technologiepfade grundlegend. Für die Bioraffinerie müssten Biomasseströme aus regionalen Bereitstellungs- und Nutzungskonzepten herausgelöst werden. Dadurch würden sich die beteiligten Akteure grundlegend ändern, sodass stärkere soziale Folgen und Widerstände zu erwarten sind. 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.

Damit ist es aus heutiger Sicht bei der Lignozellulosenutzung sinnvoll, sowohl die dezentralen Optionen als auch die Bioraffinerie zunächst weiterzuverfolgen. Eine effiziente dezentrale Bioenergienutzung ist nur in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen möglich. Für den Betrieb von KWK-Anlagen werden aber Wärmenetze benötigt. Der Ausbau der Wärmenetze ist daher eine wichtige Voraussetzung dafür, dass eine effiziente, dezentrale Bioenergienutzung einen substanziellen Beitrag zur Energiewende leisten kann. Auch ohne den Einsatz von Bioenergie im Niedertemperaturbereich werden Wärmenetze für eine künftige klimaverträgliche Wärmeversorgung voraussichtlich benötigt. Sie erhöhen die Flexibilität des Gesamtsystems, da sie sowohl die Einbindung kostengünstiger großer Wärmespeicher als auch verschiedener Wärmequellen wie Großwärmepumpen, Elektrodenheizkessel, KWK-Anlagen, Abwärme aus der Industrie, Geothermie und Solarthermie ermöglichen.¹¹⁷ Sollte zu einem späteren Zeitpunkt entschieden werden, die Biomasse vorrangig für Bioraffinerien einzusetzen, können die Wärmenetze aus einer Vielzahl anderer umweltfreundlicher Wärmequellen gespeist werden.

Die Entscheidung für kleinskalige, dezentralere oder stärker zentralisierte, großskalige Bioenergienutzungsfade hängt zum einen von der weiteren technischen Entwicklung ab, insbesondere bei den Bioraffineriekonzepten. Hier ist weitere Entwicklung erforderlich, um die Technologie zur erfolgreichen Markteinführung zu bringen. Zum anderen ist die weitere Entwicklung von einer grundsätzlichen Entscheidung zur Nutzung der CCS-Technologien abhängig. Eine zeitnahe Entscheidung zum Ausbau von CCS an Emissionsquellen in der Industrie würde nahelegen, auch den zentralen Entwicklungspfad der energetischen Biomasse verstärkt zu nutzen. So würde eine Möglichkeit geschaffen, mit BECCS den gemäß Klimaschutzzensarien vorhandenen Bedarf an negativen Emissionen (zumindest teilweise) zu erfüllen. Ohne eine Entscheidung für CCS sind dezentrale Lösungen wahrscheinlich einfacher umzusetzen.

117 Untersuchungen zur Sektorkopplung zeigen, dass 2050 bis zu einem Drittel der Gebäude an ein Wärmenetz angeschlossen sein könnten (acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017-1, S. 27).

Die Diskussion der Bewertungskriterien und deren Anwendung auf die ausgewählten Technologien in der Arbeitsgruppe haben gezeigt, dass es neben Unsicherheiten bei der Definition und Auswahl der Kriterien und deren Zusammenspiel auch noch erhebliche Wissenslücken bei der Datenbasis für die Bewertung (insbesondere bei der zukünftigen technologischen Entwicklung und der damit verbundenen Entwicklung bei den Kosten) gibt. Der Kriterienkatalog kann nur Informationen über die vielfältigen Aspekte des Einsatzes verschiedener Technologien und Bioenergiestrategien geben und damit Transparenz schaffen. Die Abwägung darüber, welche Kriterien mit welchem Gewicht in die Bewertung eingehen, bleibt eine gesellschaftliche Entscheidung, die nicht aus der Charakterisierung verschiedener Technologien anhand des Kriterienkatalogs direkt abgeleitet werden kann. Kriterienkatalog und Bewertungsschema können als strukturierte Informations- und Diskussionsgrundlage in gesellschaftliche Beteiligungsprozesse einfließen.

Kosten von Bioenergie

Eine nationale Bioenergiestrategie sollte zum Ziel haben, mit den vorhandenen Bioenergiepotenzialen einen möglichst großen Nutzen für das Gesamtsystem zu erzielen. Aus der Kostenperspektive bedeutet das, dass die Gesamtkosten der Energieversorgung möglichst gering gehalten werden sollten. Dazu muss die Bioenergie in denjenigen Bereichen eingesetzt werden, wo alternative Lösungen besonders teuer sind und folglich durch den Einsatz der Bioenergie die höchsten Mehrkosten vermieden werden können. Während es aus betriebswirtschaftlicher Sicht ausreicht, eine Bioenergiotechnologie mit alternativen Technologien für die gleiche Energiedienstleistung zu vergleichen (beispielsweise eine Holzheizung mit einer Wärmepumpe oder einer solarthermischen Heizung), muss aus gesamtwirtschaftlicher Sicht das gesamte Energiesystem berücksichtigt werden, mit allen potenziellen Einsatzfeldern für die Bioenergie zur Strom-, Wärme- und Kraftstoffbereitstellung.

Die Kosten des zukünftigen Energiesystems werden voraussichtlich stark davon abhängen, wie die volatile Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik ausgeglichen werden kann. Sogenannte Flexibilitätstechnologien wie Reservekraftwerke und -speicher werden einen großen Teil der Gesamtkosten des Energiesystems ausmachen.^{a)} Als speicherbarer Energieträger kann Bioenergie den Bedarf an sonstigen Flexibilitätstechnologien reduzieren und damit die Kosten des Gesamtsystems senken. Dieser Effekt lässt sich nur in zeitlich hoch aufgelösten Modellrechnungen quantifizieren.

Die Ergebnisse solcher Modellrechnungen hängen stark von den Annahmen zur Kostenentwicklung von Bioenergiotechnologien, aber auch von den konkurrierenden Technologien ab. Verschiedene Energieszenarien zeigen einen recht unterschiedlichen „kostenoptimalen“ Einsatz der Bioenergie.^{b)} Dies deutet darauf hin, dass mit dem heutigen Kenntnisstand aus wissenschaftlicher Sicht nicht eindeutig beurteilt werden kann, in welchen Bereichen Bioenergie zukünftig eingesetzt werden sollte, um die Gesamtkosten des Energiesystems zu minimieren.

Eine weitere Schwierigkeit: Die Kosten von Strom, Wärme oder Kraftstoff aus Biomasse hängen sehr stark von den Kosten der eingesetzten Rohstoffe ab. Beispielsweise beträgt der Anteil der Biomasse an den Produktionskosten bei einer Biogasanlage mit Strom- und Wärmeerzeugung aus Mais 43 bis 56 Prozent, bei einem Holzheizkraftwerk 34 bis 50 Prozent und bei der Biodieselerzeugung aus Raps 85 Prozent.^{c)}

a) Elsner et al. 2015; Ausfelder et al. 2017.

b) Szarka et al. 2017.

c) Hennig/Gawor 2012; DBFZ 2016.

Die Rohstoffpreise schwanken aber sehr stark. Bei international gehandelten Agrarrohstoffen wie Getreide oder Pflanzenölen sind sie abhängig von Entwicklungen auf den internationalen Agrarmärkten. Zudem sind die Einsatzstoffe insbesondere zur Herstellung von Biokraftstoffen meist Kuppelprodukte aus landwirtschaftlichen Prozessen, in denen aus einer Agrarpflanze mehrere Produkte und Zwischenprodukte erzeugt werden. Beispielsweise ist Sojaöl, das zur Herstellung von Biodiesel verwendet wird, ein Nebenprodukt der Futtermittelproduktion – nur ein Fünftel der eingesetzten Sojapflanzenmasse wird als Öl gewonnen, vier Fünftel als proteinreiches Viehfutter. Aus Raps werden Pflanzenöl und Futtermittel etwa zu gleichen Teilen hergestellt. Die Kosten für den Anbau der Pflanzen können nicht eindeutig auf die verschiedenen Kuppelprodukte aufgeteilt werden. Die Marktpreise der einzelnen Produkte werden daher stark von der Angebots- und Nachfragesituation bei den gekoppelt erzeugten Produkten beeinflusst. So sind beispielsweise die Marktpreise der Pflanzenöle für die Biokraftstoffgewinnung von den Marktpreisen der Futtermittel abhängig.

Nicht zuletzt ist für die zukünftige Kostenentwicklung von biogenen Rohstoffen ausschlaggebend, inwieweit in den kommenden Jahren und Jahrzehnten externe Kosten von Umweltauswirkungen und Treibhausgasemissionen eingepreist werden.

Als Indikator für die Kosteneffizienz von Klimaschutzmaßnahmen werden häufig die CO₂-Vermeidungskosten angegeben. Dafür müssten Annahmen getroffen werden, welche Technologien und Energieträger durch die Bioenergie ersetzt werden. Das ließe sich jedoch lediglich für einen sehr kurzfristigen Zeithorizont unter bekannten Marktbedingungen belastbar feststellen. Beispielsweise könnte beim heutigen Zubau eines Biogas-BHKW ermittelt werden, ob dieses bei dem derzeit gültigen Strommarktdesign Kohlestrom oder Erdgasstrom aus dem Markt verdrängt. Mittel- bis langfristig wird jedoch das gesamte konventionelle Energiesystem durch erneuerbare Energien und Flexibilitätstechnologien ersetzt werden müssen, die in ihrem Zusammenspiel die geforderten Energiedienstleistungen erbringen. Marktdesigns werden im Zuge dieser Transformation ebenfalls geändert werden. Welche fossilen Energieträger in diesem Prozess durch Bioenergie ersetzt werden und welche beispielsweise durch Windstrom in Kombination mit Batteriespeichern oder Power-to-Gas, lässt sich nicht zuordnen. Für eine langfristige Betrachtung bis 2050 lassen sich die CO₂-Vermeidungskosten daher nur für das Gesamtsystem, nicht aber für eine einzelne Technologie wissenschaftlich fundiert bestimmen.

5 Handlungsoptionen für eine nachhaltige Bioenergiestrategie

Aus den dargestellten Zusammenhängen lassen sich folgende Herausforderungen für eine Bioenergiestrategie ableiten:

Die meisten Risiken der Bioenergienutzung betreffen Auswirkungen in den Landnutzungssystemen. Die Rohstoffbasis ist entscheidend für ökologische Folgen und gesellschaftliche Akzeptanz. Daher müssen **Energie- und Landnutzungssysteme integriert betrachtet werden**. Dies setzt ein Zusammenwirken von Energie-, Agrar-, Forst- und Umweltpolitik voraus.

Auch die Treibhausgasbilanz hängt in hohem Maße von den eingesetzten Rohstoffen ab. Um durch den Einsatz von Bioenergie möglichst viele Klimagase einzusparen, ist eine **konsistente Klimaschutzpolitik** erforderlich, die alle Treibhausgase erfasst und reguliert. Insbesondere müssen dabei auch die Treibhausgase aus der Landnutzung berücksichtigt werden.

Mit Rest- und Abfallstoffen besteht ein erhebliches Potenzial an Bioenergie, bei dem die Risiken durch Wechselwirkungen mit alternativen Landnutzungen nicht oder nur stark vermindert auftreten. Durch eine verstärkte stoffliche Nutzung von Biomasse und eine anschließende energetische Verwertung der Produkte am Ende ihrer Lebensdauer (Kaskadennutzung) könnte dieses Potenzial zukünftig noch steigen. Die **Schnittstelle zwischen Energiewirtschaft und Entsorgungswirtschaft** wird daher in Zukunft an Bedeutung gewinnen.

Unter anderem wegen der höheren Schadstoffgehalte sind Abfälle jedoch meist komplizierte Einsatzstoffe, die teurer zu verarbeiten sind als beispielsweise Waldholz. **Die Bioenergieanlagen müssen an diese Einsatzstoffe angepasst werden**. Bisher sind die Konversionstechnologien für den Einsatz von Reststoffen nur teilweise entwickelt. Hier besteht weiterer **Forschungs- und Entwicklungsbedarf**.

Wie Bioenergie für das Gesamtsystem den größten Nutzen bringen kann, ändert sich in Abhängigkeit von der Entwicklung des restlichen Energiesystems. Aus systemischer Sicht erscheint mittel- bis langfristig eine Erzeugung von Kraftstoffen sinnvoll, da diese Energieträger nur sehr aufwendig und mit hohen Kosten aus Wind- und Solarstrom erzeugt werden können. Die dafür erforderlichen Bioraffinerien wären aber große, industrielle Anlagen, die ein Stück weit eine Abkehr von der derzeit gesellschaftlich bevorzugten dezentralen Bioenergienutzung bedeuten würden. Flexibel betriebene dezentrale KWK-Anlagen können schon kurzfristig zur Stabilisierung der Strom- und Wärmeversorgung beitragen. Zum heutigen Zeitpunkt kann nicht beurteilt werden, wann und in welchem Ausmaß ein Übergang zu Bioraffinerien vorteilhaft wäre. Das hängt unter anderem von der Entwicklung bei der Bioraffinerietechnik,

aber auch bei strombasierten synthetischen Kraftstoffen ab. Daraus resultiert eine **große Unsicherheit für die beteiligten Akteure**, die Innovationen und die kontinuierliche Entwicklung hemmt und investitionshemmend wirkt.

Neben den Funktionen im Energiesystem könnte langfristig die **Erzeugung negativer Emissionen**, also die CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre, als Anforderung an die Bioenergie an Bedeutung gewinnen. Neben Bioenergie mit CCS (BECCS) gibt es verschiedene weitere Methoden wie Aufforstung und Direct Air Capture, mit denen der Atmosphäre CO₂ entzogen werden kann. Es ist daher unklar, ob und in welchem Ausmaß die zukünftig erforderlichen negativen Emissionen durch Bioenergie erbracht werden sollen. Da nicht alle Bioenergietechnologien gleichermaßen für die CO₂-Entnahme geeignet sind, hat die Entscheidung, ob Bioenergie in Verbindung mit CCS genutzt werden soll, einen großen Einfluss auf die zukünftige Art der Bioenergienutzung. Die CCS-Technologie ist in Deutschland sehr umstritten, daher ist schwer abschätzbar, ob der Einsatz von BECCS von der Bevölkerung akzeptiert würde. Dies erhöht die Unsicherheit für die Akteure der Bioenergiewirtschaft. Zudem ist für den Transport und die Speicherung von CO₂ eine Infrastruktur notwendig, die zeitnah aufgebaut werden müsste. Denn falls BECCS in einigen Jahrzehnten einen relevanten Beitrag zum Klimaschutz leisten soll, müssen schon bald erste großskalige Anlagen in Betrieb gehen. Es ist daher dringend erforderlich, die **CCS-Technologie, BECCS und alternative CO₂-Entnahmetechnologien gesellschaftlich und politisch zu diskutieren**.

Für die Bewertung verschiedener Transformationspfade der Bioenergie fehlt Systemwissen. Eine umfassende Bewertung, die ökologische, ökonomische, soziale, technische und systemische Kriterien einbezieht, könnte als Orientierungshilfe für Bioenergieakteure dienen und die mittelfristige Vorhersehbarkeit der Entwicklungen erhöhen.

5.1 Konsistente Klimaschutzpolitik

Die Verwendung von Bioenergie im Energiesystem dient dem Klimaschutz. Deshalb sollte Bioenergie so eingesetzt werden, dass auch wirklich Treibhausgase in dem Maße eingespart werden, wie es gemäß Pariser Klimaschutzabkommen erforderlich ist.¹¹⁸ Dabei muss der gesamte Lebenszyklus der Bioenergie berücksichtigt werden. Das gilt sowohl für in Deutschland angebaute Biomasse als auch für importierte Energieträger.¹¹⁹

5.1.1 CO₂-Bepreisung als Leitinstrument

Langfristig kann eine einheitliche und ausreichend hohe CO₂-Bepreisung effizient und zielgenau dazu beitragen, die Klimaschutzziele zu erreichen. Diese Bepreisung kann entweder durch eine Ausweitung des Europäischen Emissionshandels (EU-ETS) oder

¹¹⁸ Mindestanforderungen, welchen Anteil an Treibhausgasemissionen biogene gegenüber fossilen Brenn- und Kraftstoffen einsparen müssen, sind in der Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU definiert.

¹¹⁹ Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass Biomasse (insbesondere Holz) in Zukunft voraussichtlich vorrangig stofflich genutzt werden wird und die energetische Nutzung erst in einem zweiten Schritt erfolgt (Kaskadennutzung). Die ökologischen Auswirkungen eines erhöhten Bedarfs an Biomasse in den forstwirtschaftlichen und agrarwirtschaftlichen Systemen sind unabhängig davon, ob die geerntete Biomasse zunächst stofflich oder direkt energetisch genutzt wird. Daher sollten auch für die stoffliche Nutzung rechtzeitig entsprechende Nachhaltigkeitskriterien definiert werden.

durch eine Steuer erfolgen.¹²⁰ Bei dem Emissionshandel müsste das Europäische Emissionshandelssystem (EU-ETS) auf alle THG-Emissionen aus allen Sektoren ausgeweitet werden, um Anreize für eine effiziente Vermeidung von Treibhausgasen zu setzen.

Da die Lachgasemissionen beim Anbau von Energiepflanzen einen großen Einfluss auf die gesamte Treibhausgasbilanz von Bioenergie haben, ist es unerlässlich, diese in die Bepreisung einzubeziehen. Idealerweise sollten langfristig alle Treibhausgase in allen Sektoren einschließlich der Landwirtschaft bepreist werden. Der Vorteil: Versieht man alle Treibhausgase aus der Landwirtschaft umfassend mit einem Preis, würde eine klimafreundliche Landnutzung angereizt – auch bei der Nahrungsmittelproduktion. Gelänge es, weltweit einen CO₂-Preis zu etablieren, würde dies auch das Problem der Treibhausgasemissionen durch „indirekte Landnutzungsänderungen“ beheben (vgl. Kapitel 2.2). Denn fallen für Treibhausgasemissionen, die beispielsweise durch das Abholzen von Wäldern entstehen, Kosten an, würde der Anreiz für solche Landnutzungsänderungen sinken. Im Energiesystem würde ein wirksamer CO₂-Preis dazu führen, dass Bioenergie dort eingesetzt wird, wo sie den größten Nutzen für den Klimaschutz hat. Ökologische Auswirkungen wie den Verlust von Biodiversität bildet allerdings auch ein global einheitlicher CO₂-Preis nicht ab. Daher müssen diese gesondert betrachtet und reguliert werden.

Wird die Bepreisung der CO₂-Emissionen auf Methan und Lachgas aus der gesamten Landwirtschaft ausgeweitet, steigen die Kosten der Nahrungsmittelproduktion und damit auch die Nahrungsmittelpreise. Dies kann zu positiven Effekten für Klima, Umwelt und Gesundheit¹²¹ führen: So könnte der Fleischkonsum durch erhöhte Kosten und Preise sinken. In ärmeren Ländern könnte dies dazu führen, dass insbesondere arme Haushalte stärker durch die Preiserhöhung auf Grundnahrungsmittel belastet werden. In Deutschland und Europa wäre ein solcher Effekt zwar geringer,¹²² dennoch sollten die Auswirkungen auf einkommensschwache Haushalte geprüft und gegebenenfalls abgefedert werden.

Ein ausreichend hoher CO₂-Preis ist außerdem nötig, um die für die Erreichung der Klimaziele erforderliche Abscheidung von CO₂ aus der Atmosphäre finanzieren zu können (vgl. Kapitel 3). Konkret sind dafür folgende Mechanismen denkbar:

- 1. Integration negativer Emissionen in ein erweitertes Europäisches Emissionshandelssystem (EU-ETS).** So wird sichergestellt, dass die Vergütung für die CO₂-Entnahme gleich dem Preis für Emissionen ist. Liegt beispielsweise der CO₂-Preis bei 80 Euro, würde man für den Ausstoß einer Tonne CO₂ 80 Euro bezahlen und für die Entfernung einer Tonne CO₂ aus der Atmosphäre 80 Euro ausgezahlt bekommen. Eine entfernte Tonne CO₂ wäre in diesem

120 acatech/Leopoldina/Akademienunion (2017-1) fasst die Vor- und Nachteile beider Instrumente zusammen (S. 56–63). Abgesehen von den allgemeinen Unterschieden zwischen den beiden Instrumenten ist nicht zu erwarten, dass sie sich auf die Herstellung und Nutzung von Bioenergie unterschiedlich auswirken. Daher wird im Folgenden eine Bepreisung diskutiert, ohne auf das spezifische Instrument einzugehen. Eine direkte CO₂-Steuer wäre in Deutschland nach Einschätzung von Rechtsexperten verfassungswidrig (Rodi 2017; UBA 2017; Kahl/Simmel 2017), es werden aber Möglichkeiten diskutiert, die Besteuerung durch Anbindung an eine Verbrauchssteuer (zum Beispiel für fossile Brenn- und Kraftstoffe) zu ermöglichen. Es wäre zu prüfen, wie eine Besteuerung für die verschiedenen Treibhausgasquellen in der Landwirtschaft realisiert werden kann. Eine EU-weite CO₂-Steuer müsste zudem einstimmig durch die Mitgliedsstaaten beschlossen werden.

121 Die Deutsche Gesellschaft für Ernährung empfiehlt, den Fleischkonsum zu senken (DGE 2015).

122 Durch einen CO₂-Preis von 50 Euro pro Tonne würden sich beispielsweise die Kosten eines Kilogramms Rindfleisch um 66 Cent erhöhen, die Kosten eines Kilogramms Kartoffeln um einen Cent (basierend auf Daten aus Fritsche/Eberle 2007).

System immer genauso viel wert wie eine vermiedene Tonne CO₂. Dies wäre ökonomisch effizient. Allerdings könnte eine solche Regelung dazu führen, dass CO₂-Entnahmetechnologien erst dann entwickelt werden, wenn der Preis sehr hoch ist. In diesem Fall würden sie nicht rechtzeitig für einen großskaligen Einsatz zur Verfügung stehen. Daher ist zu prüfen, ob eine staatliche Förderung für die Forschung und Entwicklung zu BECCS und anderen CO₂-Entnahmetechnologien erforderlich ist. Gleiches gilt für den Aufbau der notwendigen Infrastruktur, um Kohlendioxid transportieren und speichern zu können.

2. **Ausschreibung einer festgelegten Menge für die CO₂-Entnahme.** Auf diese Weise können Technologien zur CO₂-Entnahme frühzeitig gefördert und erprobt werden. Zwar würden die Kosten zunächst deutlich über den CO₂-Preisen im Emissionshandel liegen. Allerdings liegen auch heute beispielsweise im Verkehrssektor die Kosten der CO₂-Vermeidung deutlich höher als im ETS-Sektor. Es ist aber zu erwarten, dass die CO₂-Preise in Zukunft steigen werden, während die Kosten für die CO₂-Entnahme mit zunehmender Reife der Technologien eher sinken. Mit der Zeit und nach dem Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur würden sich die Preise angleichen.

Zu den Vor- und Nachteilen konkreter Regulierungs- und Anreizinstrumente für die CO₂-Entnahme durch BECCS gibt es bisher keine Untersuchungen. Verschiedene Instrumente, wie die CO₂-Entnahme in der EU durch die Restaurierung degradierter Wälder reguliert werden könnte, werden hingegen in der Fachliteratur bereits diskutiert.¹²³

5.1.2 Alternative Fördermechanismen

Derzeit ist nicht zu erwarten, dass ein globaler CO₂-Preis auf Treibhausgasemissionen im Rahmen eines internationalen Abkommens auf absehbare Zeit umsetzbar ist. Daher sollten kurzfristig realisierbare alternative Maßnahmen etabliert werden, um die Zeit bis zu einem globalen Abkommen zu überbrücken. Ziel dieser Maßnahmen wäre es, sicherzustellen, dass Bioenergie in Ländern, die ambitionierte Klimaziele verfolgen, auch klimafreundlich hergestellt und eingesetzt wird. Ein weiteres Ziel: Unerwünschte soziale und ökologische Nebeneffekte einer Ausweitung der Bioenergieproduktion – zum Beispiel die Einschränkung der Nahrungsmittelproduktion durch den vermehrten Anbau von Energiepflanzen oder der Verlust von Biodiversität durch Landnutzungsänderungen – sollten durch diese Instrumente vermieden werden. In dieser Funktion können die hier beschriebenen Maßnahmen auch ergänzend zu einem CO₂-Preis eingesetzt werden. Wichtig ist, dass alternative Fördermechanismen immer auch Effekte, die außerhalb des eigenen Landes verursacht werden, miteinbeziehen. Dies gilt vor allem für Länder und Länderverbünde, die einen großen Anteil ihrer Biomasse aus dem Ausland beziehen, etwa die EU und insbesondere Deutschland.

Voraussetzung ist zunächst, dass innerhalb der EU beziehungsweise Deutschlands entsprechende Anreize für den Klimaschutz durch den Einsatz von Bioenergie gesetzt werden. Bei heimisch produzierter Biomasse sollten gesetzliche Regelungen auf nationaler oder auf EU-Ebene sicherstellen, dass die Bioenergie nachhaltig erzeugt wird und in vorgegebenem Maße zur Emissionsminderung beiträgt. Für Importe von Biomasse oder von Bioenergieträgern sind hingegen komplexere Instrumente nötig. Diese Maßnahmen werden zurzeit diskutiert beziehungsweise schon eingesetzt:

¹²³ Meyer-Ohlendorf/Relih-Larsen 2017.

- die Erhebung eines Grenzsteuerausgleichs (Border-Tax-Adjustment) in Höhe der THG-Emissionen, die in importierten Produkten enthalten sind;
- die Integration von Importen in nationale oder europäische Klimainstrumente wie eine THG-Steuer oder das Europäische Emissionshandelssystem;
- die Zertifizierung von Importprodukten bezüglich ihrer THG-Emissionen sowie ihrer ökologischen und sozialen Effekte im Rahmen von Quotenregelungen¹²⁴;
- Importverbote für bestimmte Energieträger.

Grenzsteuerausgleiche¹²⁵ und Zertifizierungen sollen es ermöglichen, den Einsatz von importierter Biomasse oder Bioenergie zu fördern – aber nur in dem Maße, in dem diese auch einen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Dabei werden Importe zunächst mit den bei der Produktion anfallenden THG-Emissionen belastet, können dann aber unter gleichen Bedingungen am Markt teilnehmen wie einheimisch erzeugte Bioenergie. Voraussetzung dafür ist, dass es im Inland entsprechende wirtschaftliche Anreize für den Einsatz von Bioenergie gibt, etwa einen Preis auf THG-Emissionen oder Quotenregelungen, wie sie bei Biokraftstoffen in der EU bestehen.

Der Vorschlag, über einen **Grenzsteuerausgleich** den THG-Gehalt von Importen zu besteuern, wurde bisher noch nicht umgesetzt. Diese Regelung müsste von der Europäischen Union eingeführt werden, da diese im Rahmen des Binnenmarktes die Außengrenze aller Mitgliedstaaten darstellt. Zudem ist bei der Ausgestaltung des Grenzsteuerausgleichs darauf zu achten, dass er mit den Regeln der Welthandelsorganisation kompatibel ist. Die praktische Umsetzung würde komplexe Maßnahmen erfordern – je nachdem, ob der Grenzsteuerausgleich nur auf Importe erhoben werden soll, die direkt energetisch genutzt oder zu Bioenergie umgewandelt werden, oder ob er alle Importe umfassen soll. Darüber hinaus können ökologische und soziale Aspekte der Produktion der importierten Güter nur schwer im Rahmen eines Grenzsteuerausgleichs erfasst werden.

Die **Integration von Importen in ein System der THG-Besteuerung oder in ein Emissionshandelssystem** ist eine Möglichkeit, heimische und importierte Biomasse beziehungsweise Bioenergie gleich zu behandeln. Voraussetzung dafür ist, dass die im Ausland anfallenden THG-Emissionen genauso behandelt werden wie die im Inland anfallenden. Die dafür notwendige Information muss verfügbar und überprüfbar sein. Beispielsweise könnte sie durch ein Zertifizierungssystem bereitgestellt werden. Alternativ könnten Exporteure verpflichtet werden, diese Information verifizierbar vorzulegen. Eine weitere Option wäre, den THG-Gehalt von Importen mit Standardwerten zu berechnen und entsprechend der Behandlung inländischer Güter bei den klimapolitischen Instrumenten zu berücksichtigen. So müssten zum Beispiel im Falle eines Emissionshandelssystems Importeure Emissionsrechte für die im Ausland angefallenen THG-Emissionen vorhalten, wenn sie Produkte in den europäischen Markt bringen wollen.

¹²⁴ Eine Quotenregelung gibt vor, dass ein festgelegter Anteil des Absatzes eines Energieträgers aus erneuerbaren Energien stammen muss. Ein Beispiel ist die Biokraftstoffquote im Rahmen der Umsetzung der Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU (RED) in Deutschland.

¹²⁵ Bei einem Grenzsteuerausgleich für THG-Emissionen werden importierte Güter mit einem Zoll belegt, dessen Höhe bestimmt wird durch die in dem Importgut enthaltenen THG-Emissionen multipliziert mit dem im Importland geltenden CO₂-Preis.

Die dritte Option, den THG-Gehalt von Importen (ebenso wie von heimisch produzierter Biomasse) zu erfassen, zu regulieren und im Rahmen einer **Zertifizierung** nachzuweisen, wird für den Einsatz von Biokraftstoffen in der EU schon praktiziert und hat sich inzwischen trotz einiger Umsetzungsprobleme etabliert. Die in der Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU (Renewable Energy Directive RED)¹²⁶ festgelegte Verpflichtung einer Nachhaltigkeitszertifizierung aller Biokraftstoffe ist die Voraussetzung dafür, dass diese Kraftstoffe auf die Biokraftstoffquote angerechnet werden können und damit beim Verkauf an die Mineralölindustrie eine Preisprämie erzielen können. In diesem Fall muss nachgewiesen werden, dass die Importe eine festgelegte Einsparung von Treibhausgasen gegenüber fossilen Kraftstoffen erreichen, die zurzeit bei 60 Prozent liegt. Biokraftstoffe, die diese Vorgabe nicht erfüllen, können nicht zertifiziert werden.¹²⁷ Dies schließt unter anderem Biokraftstoffe aus, die auf Flächen erzeugt werden, die seit dem Jahr 2008 entwaldet wurden. Der Grund: Die dadurch entstehenden Emissionen verschlechtern die THG-Bilanz so stark, dass die Mindesteinsparung nicht erreicht werden kann.¹²⁸ Gleichzeitig werden damit unerwünschte ökologische Nebeneffekte reduziert.

Eine Zertifizierung erfüllt drei grundlegende Ziele: Sie stellt Informationen über den Beitrag von Bioenergie zum Klimaschutz zur Verfügung, sie benennt klare Anforderungen an die Exporteure, welche Bedingungen sie erfüllen müssen, um Bioenergie beziehungsweise Biomasse in der EU anbieten zu können, und sie schafft Anreize für Produzenten in den Exportländern, ihre Produktion klimafreundlicher zu gestalten. Die Informationsfunktion der Zertifizierung kann beispielsweise für die Bestimmung der Importzölle beim Grenzsteuerausgleich eingesetzt werden. Gegenwärtig wird sie bei Biokraftstoffen für die Quotenregelung der RED genutzt. Die Informationen aus der Zertifizierung könnten aber auch für die Integration von heimischen und importierten Bioenergieträgern in das EU-ETS nützlich sein. Dadurch würde bestimmt, wie viele Emissionsrechte für einen bestimmten Bioenergieträger vorgehalten werden müssen, damit er in der EU verwendet werden kann.¹²⁹

Die Zertifizierung von Biokraftstoffen im Rahmen der RED wurde vielfach kritisiert und diskutiert. Ein Kritikpunkt lautete, sie könne die Entwaldung von Gebieten im Ausland insbesondere für den Anbau von Pflanzenölen wie Palm- und Sojaöl für die Biodieselproduktion nicht aufhalten. Da die zertifizierten Pflanzenöle, die zur Herstellung von Biodiesel verwendet werden, nur einen kleinen Teil der gesamten Produktion ausmachen, würde ein „Rosinenpicken“ stattfinden. Die Pflanzenöle von Flächen, die die Kriterien der Zertifizierung erfüllen, werden für die Herstellung von Biodiesel zertifiziert, während der überwiegende Teil der Produktion weiterhin die Anforderungen der Zertifizierung nicht erfüllt und für andere, nicht zertifizierungspflichtige Zwecke genutzt wird. Um diese Probleme zu lösen, müssten alle Importe von Biomasse – inklusive Nahrungs- und Futtermittel – den gleichen Kriterien unterliegen. Damit könnte zumindest für die Importe der EU ein zusätzlicher Anreiz für eine klimafreundliche Produktion gesetzt werden. Die Exportmengen in andere Länder werden davon jedoch weiterhin nicht erfasst.

126 EU 2009.

127 Während die RED nur für flüssige Bioenergieträger gilt, werden in der RED II die Nachhaltigkeitsanforderungen auch auf Biogas und feste Energieträger ausgeweitet.

128 Allerdings wird durch die RED nur die Biomasse für den Bioenergieeinsatz kontrolliert. Da aber beispielsweise über 90 Prozent der Palmölproduktion weltweit in den Nahrungs- und Futtermittelsektor gehen, ist ein Erhalt der Waldflächen alleine auf der Basis der Energieanteile kaum wirksam.

129 Die Integration des Verkehrssektors in das EU-ETS ist Gegenstand eines Antrags der FDP-Fraktion im Deutschen Bundestag (Deutscher Bundestag 2018).

Zunächst wurde die Zertifizierung von den betroffenen Unternehmen als administrativ kaum umsetzbar und zu teuer kritisiert. Außerdem wurde bemängelt, dass die für die Treibhausgasbilanzierung angesetzten Standardwerte zu pessimistisch und diskriminierend seien. In der Praxis hat sich allerdings herausgestellt, dass die Zertifizierung von Bioenergie nur sehr geringe Kosten erzeugt. Die Möglichkeit für Produzenten, tatsächliche Treibhausgasemissionen, die unterhalb der Standardwerte liegen, durch Zertifizierungsstellen verifizieren zu lassen, hat zu mehr Transparenz und zu größeren Anstrengungen bei der Verbesserung der THG-Bilanzen vieler Produzenten geführt.

Problematisch bleiben indirekte Landnutzungsänderungen, solange die Treibhausgasemissionen der Land- und Forstwirtschaft nicht global kontrolliert und die Regulierungen nicht auf alle Agrarprodukte angewendet werden. Um diesen Effekt in die Bilanzierung von Biokraftstoffen einzubeziehen, werden sogenannte ILUC-Faktoren diskutiert. Sie geben an, wie viele Emissionen durch indirekte Landnutzungsänderungen entstehen. Der ILUC-Effekt beruht darauf, dass die Preise für agrarische Rohstoffe durch die Förderung von Biokraftstoffen der ersten Generation – also Kraftstoffe aus agrarischen Rohstoffen wie Pflanzenölen oder Getreiden – weltweit steigen. Dadurch steigen auch die Anreize, Agrarflächen auszuweiten, was zu Treibhausgasemissionen führt. Das Ausmaß dieser Effekte ist umstritten und kann nicht direkt gemessen werden. Lediglich eine Abschätzung durch numerische Simulationsmodelle ist möglich, wobei aber deren Ergebnisse wiederum von umstrittenen Annahmen abhängen. Als Alternative wird diskutiert, sogenannte ILUC-freie Produkte zu zertifizieren. Dabei muss der Produzent sicherstellen, dass die Herstellung von Biomasse zur energetischen Verwendung keine Nahrungsmittelproduktion verdrängt.¹³⁰ Darüber hinaus ist in der RED II vorgesehen, die Nachhaltigkeitszertifizierung beizubehalten, aber den Einsatz von Rest- und Abfallstoffen stärker zu fördern, um die Gefahr von indirekten Landnutzungsänderungen zu reduzieren.

Im Rahmen der Verhandlungen zur RED II forderte das Europäische Parlament, die Einfuhr von Palmöl zur energetischen Nutzung zu verbieten¹³¹ setzte sich damit aber nicht durch. Ein solches Importverbot ist umstritten, denn dadurch würden zum einen Hersteller, die Bioenergie bereits nachhaltig produzieren, vom Markt ausgeschlossen. Zum anderen würde ein Importverbot zu Substitutionseffekten führen: Statt Palmöl würden andere Pflanzenöle wie Soja- oder Rapsöl auf den europäischen Markt kommen, die ähnlichen Gefahren von ILUC unterliegen. Und schließlich würde sich die Nutzung von Palmöl nur verschieben: Denn das Palmöl, das bisher in die Bioenergienutzung ging, würde durch ein Verbot verstärkt in der Lebensmittelindustrie eingesetzt und dort andere Pflanzenöle verdrängen, die dann zur Bioenergieproduktion dienen. Fazit: Ein Importverbot könnte die Entwaldung in den Hauptexportländern von Pflanzenölen kaum eindämmen. Die Kontrolle der Entwaldung über die Regulierung von Bioenergie hat letztlich nur einen geringen Einfluss, weil nur ein kleiner Teil der Agrarproduktion tatsächlich in die energetische Nutzung geht. Der Schutz der Wälder müsste eher durch direkte politische Maßnahmen auf nationaler und internationaler Ebene erfolgen. Als eine der notwendigen Maßnahmen sollte beispielsweise die Ausweitung bestehender Zertifizierungsansätze in alle Bereiche der Biomassenutzung geprüft werden.¹³² Primär

¹³⁰ Dies kann zum Beispiel der Fall sein, wenn Rest- und Abfallstoffe eingesetzt werden, die Biomasse auf zuvor ungenutztem Land angebaut wird oder nachgewiesen werden kann, dass die Biomasse für die energetische Nutzung zusätzlich zu den zuvor auf der Fläche angebauten Pflanzen angebaut wird.

¹³¹ EU 2018-2.

¹³² Majer et al. 2018.

ist es Aufgabe aller Nationalstaaten, bestehende und zukünftige Verbote der Entwaldung auch tatsächlich umzusetzen. Dies könnte auch durch Kompensationszahlungen im Rahmen des Pariser Klimaabkommens unterstützt werden.

5.2 Energie- und Agrar-, Forst- und Umweltpolitik als Teile einer integrierten Bioenergiepolitik

Durch die vielfältigen Quellen der Biomassebereitstellung betrifft Bioenergie auch die Agrar-, Forst- und Abfallpolitik sowie Naturschutzaspekte. Diese Schnittstellen stellen einen Sonderfall im Vergleich zu anderen Energiequellen dar. Neben den Funktionen im Energiesystem liefert Bioenergie weitere Systembeiträge: mögliche positive Effekte im Landnutzungssystem¹³³, eine Entsorgungs- oder Verwertungsfunktion am Ende von Kaskadenprozessen¹³⁴ sowie bei BECCS die CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre. Abbildung 6 fasst die verschiedenen Wirksektoren der Bioenergie zusammen. Langfristig wünschenswert wäre daher eine Bioenergiepolitik, die Energiesystem, Treibhausgasemissionen, Entsorgungsstrategien und Landnutzung als ein integriertes System zusammen denkt. Dies erfordert ein Zusammenwirken der vielen für Teilbereiche zuständigen politischen Ressorts und eine **Koordinierung oder Harmonisierung der unterschiedlichen Finanzierungs- beziehungsweise Lenkungsmechanismen.**

Bisher wird die energetische Biomassenutzung in Deutschland größtenteils durch energiewirtschaftliche Anreizsysteme und Regulierungen gesteuert. Dazu zählen insbesondere das Erneuerbare-Energien-Gesetz, das Marktanzreizprogramm zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt (kurz MAP) und das Biokraftstoffquoten-Gesetz. Dies wird den Auswirkungen außerhalb des Energiesystems nicht gerecht. Einerseits steigt der Druck auf die Betreiber von Bioenergieanlagen, weil Bioenergie mit anderen erneuerbaren Energien konkurriert und die Rohstoffkosten einen großen Einfluss darauf haben, ob und inwiefern Bioenergie wirtschaftlich genutzt werden kann. Andererseits werden über energiewirtschaftliche Vergütungen bereits heute Leistungen finanziert, die anderen Sektoren zugutekommen und dort zu Kostendämpfungen führen. Ein Beispiel: Biogasanlagen, in denen Gülle und Festmist eingesetzt werden, tragen zur Einsparung von Treibhausgasen im Agrarsektor bei. Durch die Verarbeitung zu Biogas werden Emissionen, die bei der konventionellen Lagerung und Ausbringung von Gülle und Festmist entstehen, vermieden.

Wird der Einsatz von Bioenergie ausschließlich anhand der ökonomischen Wirkung in einem Bereich (beispielsweise der Strompreisentwicklung) bemessen, bleiben externe Kosten und Nutzen in den anderen Bereichen meist unzureichend berücksichtigt. Die **Kenntnis und Einbeziehung dieser externen Kosten und Nutzen** wäre aber erforderlich, um zu entscheiden, ob ein Politikinstrument zur Förderung der Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig produzierter Bioenergie volkswirtschaftlich sinnvoll ist.¹³⁵

133 Beispiele sind Auflockerung von Fruchtfolgen in Ackerbaugebieten, gewässerschonender Anbau, Bereitstellung organischen Düngers, Anbau bienenfreundlicher Energiepflanzen (zum Beispiel durchwachsene Sylphie).

134 Inklusive der Vermeidung von Treibhausgasemissionen durch Rest- und Abfallstoffe (zum Beispiel bei Biogaserzeugung aus Gülle und Festmist).

135 So empfiehlt auch der Bioökonomierat, einen einheitlichen Bewertungsrahmen zu entwickeln, bei dem externe Kosten berücksichtigt werden und mit den Bioenergieoptionen und Alternativen zur Bioenergie verglichen werden können (Bioökonomierat 2015).



Abbildung 6: Mögliche Wirksektoren von Bioenergie. Basierend auf IZES et al. 2018-1.

Selbst umfassende klimapolitische Maßnahmen wie ein CO₂-Preis allein können das komplexe Geflecht alternativer Landnutzungen und des Einsatzes von Bioenergie nicht angemessen kontrollieren; sie müssen mit Instrumenten zur Erfüllung der anderen Politikziele koordiniert werden. Von besonderer Relevanz sind hier die **Gewässerqualität, Nährstoffkreisläufe und Biodiversität**.

Hinsichtlich der **ökonomischen Effekte dieser sogenannten Ökosystemdienstleistungen** gibt es – über die Bioenergie hinaus – noch erheblichen Diskussionsbedarf. Zwar gibt es Ansätze, die Zusammenhänge zwischen Ökosystemen und menschlichem Wohlergehen zu kategorisieren und transparent zu machen.¹³⁶ Eine Übertragung auf konkrete Finanzierungs- und Anreizmodelle ist derzeit jedoch nicht verfügbar. Vereinzelt Ansätze, Biomassen aus naturnahen Ökosystemen besser zu vergüten (zum Beispiel im EEG 2012), fielen schnell der Kostendiskussion zum Opfer und liefern nicht ausreichend Erfahrungen.

¹³⁶ Beispielsweise im Projekt „Naturkapital Deutschland – TEEB DE 2016“ des UFZ (<https://www.ufz.de/teebde/>).

Derzeit gibt es kaum **Anreize, Biomasse möglichst umweltfreundlich bereitzustellen**. So zeigen Untersuchungen, dass die Nutzung naturverträglicher Fruchtfolgen und Anbaumethoden unter den aktuellen Finanzierungsmechanismen kaum wirtschaftlich ist. Ergänzende oder alternative Instrumente sind daher erforderlich.¹³⁷

Marktbasierte Instrumente wie beispielsweise der Emissionshandel sind in der Regel kosteneffizienter als ordnungsrechtliche Regulierungen. Die Einpreisung der externen Kosten im Hinblick auf Gewässer- und Bodenqualität, Nährstoffkreisläufe und Biodiversität ist allerdings wesentlich komplexer und schwieriger umsetzbar als die Bepreisung von Treibhausgasen. Volkswirtschaftliche Schäden durch die Beeinträchtigung der Ökosystemdienstleistungen lassen sich daher in vielen Fällen effektiver durch ordnungsrechtliche Vorgaben verhindern (zum Beispiel Grenzwerte oder Nutzungsrestriktionen für ökologisch wertvolle Flächen).

Bei den möglichen Auswirkungen einer zukünftigen Biomassenutzung besteht teilweise noch großer Forschungsbedarf – das betrifft nicht nur die energetische Nutzung. So herrscht zum Beispiel **große Unkenntnis darüber, welche mittelfristigen Effekte sich möglicherweise aus einer verstärkten stofflichen Nutzung von Anbaubiomasse ergeben**. Bisher wird Biomasse vor allem zur Erzeugung von Holzwerkstoffen, Papier- und Zellstoff sowie in der Verpackungsindustrie als Rohstoff eingesetzt. Zunehmend gewinnen jedoch Einsatzfelder zum Ersatz kunststoffbasierter Produkte und Chemikalien (im Sinne einer Bioökonomie) an Bedeutung. Soll diese Entwicklung dem Markt überlassen werden, oder werden – wie von verschiedenen Seiten¹³⁸ gefordert – auch hier Fördermodelle installiert? Beide Mechanismen können ohne entsprechende Restriktionen durch Nachhaltigkeitskriterien gegebenenfalls zu ähnlichen Landnutzungseffekten führen wie bei dem Ausbau von Biogasanlagen.

Für eine volkswirtschaftlich sinnvolle Einordnung und Förderung der Bioenergie sollten nach Möglichkeit alle durch die Bioenergienutzung erbrachten Systembeiträge bewertet und gegeneinander abgewogen werden. Zudem sollten sie den Systembeiträgen alternativer Formen der Landnutzung (zum Beispiel Aufforstung) und Verwendungen der Biomasse (zum Beispiel stoffliche Verwendung, Biokohle) gegenübergestellt werden. Um die verschiedenen Systembeiträge zu bewerten, wäre ein **Bewertungssystem mit Indikatoren für alle relevanten Systembeiträge zu entwickeln**.¹³⁹ Energiesystemmodelle, die bisher ausschließlich den Beitrag der Bioenergie im Energiesystem berücksichtigen, sollten zu **integrierten Modellen des Energie- und Landnutzungssystems** ausgebaut werden oder die Erkenntnisse von existierenden Energie-Landnutzungsmodellen nutzen. So könnten beispielsweise verschiedene Szenarien mit mehr oder weniger Energiepflanzenanbau, Aufforstung oder Biokohleeinsatz zunächst in einem Landnutzungsmodell berechnet werden. Darauf basierend könnten unter anderem die Treibhausgasemissionen aus der Landnutzung in den verschiedenen Szenarien bestimmt werden. Die resultierende Menge an Bioenergie, die im jeweiligen Szenario zur Verfügung steht, sowie die damit konsistenten Treibhausgasemissionen und CO₂-Entnahme durch Biokohle und Aufforstung könnten dann als Eingangsgrößen im Energiesystemmodell verwendet werden. Dies würde ermöglichen, verschiedene Szenarien unter Berücksichtigung der Auswirkungen im Gesamtsystem zu vergleichen.

¹³⁷ Zum Beispiel IZES et al. 2018-2.

¹³⁸ UBA 2014.

¹³⁹ Ansätze dafür bietet das in der Arbeitsgruppe entwickelte Bewertungsinstrument (Klepper/Thrän 2019).

5.2.1 Maßnahmen in der Agrar- und Forstpolitik

Da Biomasse zum Teil auf landwirtschaftlich genutzten Acker- und Weideflächen produziert wird, entstehen Schnittstellen zwischen der Agrarpolitik und einer Politik zur Förderung der Bioenergie. Im Rahmen der EU-Agrarpolitik werden Maßnahmen eingesetzt, die schon heute die Landnutzung beeinflussen und die daher prinzipiell auch dazu verwendet werden könnten, die Herstellung nachhaltiger Bioenergie zu fördern.

Die **EU-Agrarpolitik** ist mit einem großzügigen Finanzrahmen ausgestattet: Jährlich werden im Rahmen der sogenannten „Ersten Säule“ der Agrarpolitik etwa 40 Milliarden Euro für Direktzahlungen an Landwirte ausgegeben, davon circa 5 Milliarden allein in Deutschland. Diese Direktzahlungen werden zum einen als Einkommensunterstützung für landwirtschaftliche Haushalte und seit 2013 zusätzlich im Rahmen des sogenannten „Greening“ als Zahlungen für ökologische Leistungen gerechtfertigt. Allerdings wurde mehrmals nachgewiesen, dass beide Effekte nur sehr eingeschränkt erreicht werden.¹⁴⁰ Es herrscht daher ein breiter Konsens, dass ein erheblicher Teil des EU-Agrarbudgets zielgerichteter ausgegeben werden könnte als bisher. Unter anderem ist vorstellbar, dass eine Politik zur Förderung der nachhaltigen Biomasseproduktion mit EU-agrarpolitischen Maßnahmen und Mitteln gestaltet werden könnte.

Über Agrarpolitik wird auf EU-Ebene entschieden. Um Direktzahlungen der Ersten Säule in nennenswertem Umfang zur Förderung einer nachhaltigen Biomasseproduktion und -verwendung umzuwidmen, bräuchte es Mehrheiten im Ministerrat und im EU-Parlament. Im Rahmen der sogenannten „Zweiten Säule“ der EU-Agrarpolitik stehen jedoch jährlich etwa 12 Milliarden Euro zur Förderung ländlicher Entwicklung zur Verfügung. Mit diesen Mitteln können einzelne Mitgliedsländer wie Deutschland spezielle nationale und regionale Maßnahmen umsetzen. Ab 2018 kann so in Deutschland bereits der Anbau bestimmter Energiepflanzen wie Miscanthus und durchwachsene Sylphie gefördert werden.¹⁴¹

Agrarpolitische Maßnahmen und Mittel könnten wie beschrieben verwendet werden, um eine nachhaltige Produktion von Biomasse für die energetische Nutzung zu fördern. Durch stringente Nachhaltigkeitsanforderungen könnte auf diese Weise sichergestellt werden, dass der Anbau von Energiepflanzen klimafreundlicher und naturverträglicher erfolgt als bisher. Es ist jedoch ungewiss, ob hierdurch die höchste Wirksamkeit im Sinne des Klimaschutzes pro ausgegebenen Euro erzielt werden könnte. Statt die Produktion von Bioenergie zu subventionieren, könnten agrarpolitische Mittel daher verwendet werden, um Landnutzungsänderungen zu fördern, die die Kohlenstoffspeicherung in Vegetation und Boden erhöhen, beispielsweise durch Aufforstung und die Wiedervernässung von Mooren. Diese gehen in vielen Fällen mit Gewinneinbußen für Landwirte einher, die durch die Förderung kompensiert werden könnten. Bei beiden Alternativen müssten mögliche direkte und indirekte klimarelevante Landnutzungsänderungen im In- und Ausland berücksichtigt werden. Auch weitere Auswirkungen auf Ökosysteme sollten in die Bewertung einfließen.

Die **Forstpolitik** in Deutschland wird sich durch die Nutzung von Bioenergie erwartungsgemäß nicht wesentlich ändern. Holz wird zukünftig vorrangig zunächst stofflich verwendet und erst am Ende der Nutzungskaskade energetisch. Bei der Verjüngung

140 Zum Beispiel Europäischer Rechnungshof 2016, Pe'er et al. 2016 und EU Commission 2017.

141 Neumann 2017.

des Waldes sollte daher berücksichtigt werden, welche Baumarten für welche Arten der stofflichen Nutzung geeignet sind. Ein zusätzliches Potenzial für Holz zur direkten energetischen Nutzung, aber auch für die stoffliche Verwendung besteht in Deutschland vor allem in Form von Kurzumtriebsplantagen. Diese werden auf Agrarflächen angebaut und somit durch die Agrarpolitik, nicht durch die Forstpolitik reguliert. Bei der Verwendung von Waldholz sollte der Schwerpunkt darauf liegen, die begrenzten Potenziale für das Energiesystem möglichst nutzbringend einzusetzen. Dazu sollte es statt wie bisher in offenen Kaminen in effizienteren Anlagen (zum Beispiel KWK) genutzt werden.

Die **Ausweitung der Nachhaltigkeitskriterien für Biokraftstoffe** auf die gesamte Bioenergie im Rahmen der Neufassung der Erneuerbare-Energien-Richtlinie¹⁴² ist ein notwendiger und richtiger Schritt, um eine nachhaltige Rohstoffbasis zu gewährleisten. Die größten Risiken der Bioenergie liegen aber vor allem in indirekten Effekten wie indirekten Landnutzungsänderungen oder anderen Verdrängungseffekten. Diese lassen sich nur durch **nachhaltige Landnutzungspolitiken und Nachhaltigkeitsanforderungen an die Landwirtschaft insgesamt** reduzieren. Das Potenzial an Flächen, auf denen Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion und schwerwiegende Umweltfolgen ausgeschlossen werden können, ist sehr begrenzt. Vollständig frei von ILUC-Risiken ist streng genommen nur die Nutzung von Rest- und Abfallstoffen. Allerdings unterscheidet sich das ILUC-Risiko bei Anbaubiomasse je nach Situation erheblich. Ein nachhaltiger Ausbau mit geringem ILUC-Risiko wäre beispielsweise auf degradiertem Land möglich, auf dem Nutzungskonkurrenzen ausgeschlossen beziehungsweise minimiert werden können – die Datenbasis zur Abschätzung dieser Flächen ist jedoch unsicher. Wenn beispielsweise durch verbessertes Management die Produktivität einer Agrarfläche gesteigert werden kann, ist für die zusätzlich produzierte Biomasse ebenfalls das ILUC-Risiko gering. Ansätze, um das ILUC-Risiko zu quantifizieren und zu zertifizieren, wurden bereits entwickelt.¹⁴³ Allerdings sind die Belastbarkeit solcher Ansätze, ihre allgemeine Umsetzbarkeit in Zertifizierungssystemen der RED und ihre Wirksamkeit bisher nicht nachgewiesen.

Dennoch sind die ILUC-Modelle hilfreiche Instrumente, um Risiken zu beschreiben. Die Erklärung der Auswirkungen der Bioenergienutzung auf die globale Landnutzung auf Basis dieser Modelle hat jedoch zum einen klare Grenzen, zum anderen liefert sie auch nicht zwangsläufig Ansätze, um die Risiken zu vermeiden. Andere Disziplinen oder ein geeigneter Methodenverbund könnten hier unterstützend wirken, um adäquate Politiken und Strategien zu entwickeln. ILUC-Modelle können als Frühwarnsystem für Politiksznarien dienen. So könnte möglicherweise mit den ILUC-Modellen untersucht werden, inwieweit verschiedene Klimaschutzstrategien mit einem ILUC-Risiko einhergehen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Bei der energetischen Nutzung von Waldholz besteht bisher kein wissenschaftlicher Konsens, ob und unter welchen Umständen dies Treibhausgase einspart (Carbon-Debt-Debatte, siehe Abschnitt 2.2). Sollte es in Zukunft gelingen, weltweit einen effektiven Schutz von Wäldern als Kohlenstoffspeicher und von Ökosystemen zu etablieren, kann ein vorsichtiger Ausbau der energetischen Nutzung von Anbaubiomasse und Waldholz in Erwägung gezogen werden. Dabei sollte vorrangig Biomasse mit möglichst geringem ILUC-Risiko verwendet werden. Es muss dann allerdings sorgfältig

142 EU 2018-1.

143 Zum Beispiel ECOFYS 2016, Ernst & Young 2011 und RSB 2018.

geprüft werden, inwieweit Nachhaltigkeit sichergestellt werden kann und ob weniger riskante Alternativen (zum Beispiel andere Erneuerbare-Energie-Technologien) zur Verfügung stehen. Mit einer nachhaltigen Gestaltung der Rohstoffbasis lassen sich auch gesellschaftliche Konflikte um den Einsatz von Anbaubiomasse (Stichworte „Vermaisung“ und „Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion“) entschärfen.

Messprogramme für Lachgasemissionen in der Landwirtschaft könnten dazu beitragen, die durch den Einsatz von Stickstoffdünger verursachten Treibhausgasemissionen genauer zu erfassen (siehe auch Abschnitt 2.2). Je genauer die Treibhausgasbilanz ermittelt wird, desto besser kann ein CO₂-Preis dazu beitragen, die Emissionen zu reduzieren.

Ein nachhaltiger Einsatz von Biomasse aus Land- und Forstwirtschaft erfordert, dass **Nährstoffkreisläufe** geschlossen werden. Mit jeder Entnahme von Biomasse werden einem Ökosystem auch Pflanzennährstoffe entzogen. Diese sollten ins System zurückgeführt werden. Wird Biomasse verbrannt, verbleiben die Mineralstoffe in der Asche. Der Einsatz von Asche als Dünger könnte dazu beitragen, die Nährstoffkreisläufe zu schließen.

5.2.2 Maßnahmen im Entsorgungssektor¹⁴⁴

In Anlagen zur energetischen Abfallverwertung werden bereits heute mehr als 50 Prozent biobasierte Abfälle¹⁴⁵ eingesetzt. Durch eine zunehmende stoffliche Verwendung von Biomasse wird sich zukünftig voraussichtlich auch die Menge an biogenen Abfällen sowohl prozentual als auch absolut weiter erhöhen. Insbesondere bei Lignozellulose stellen **Nutzungskaskaden**, bei denen Anbaubiomasse sowie Holz¹⁴⁶ zunächst stofflich genutzt und am Ende der Produktlebensdauer energetisch verwertet werden, eine effiziente Form der Biomassenutzung dar. Allerdings können sich, zum Beispiel durch die Behandlung von Holz mit Imprägnier- und Farbstoffen, Schadstoffe in den Kaskadenstufen anreichern. Dies lässt sich durch ein **schadstoffarmes, recyclingfreundliches Design von biobasierten Materialien** und Produkten vermeiden. Für die energetische Nutzung von Rest- und Abfallstoffen sind Anlagen vorzuhalten, die an die jeweiligen Einsatzstoffe (insbesondere Schadstoffgehalte) angepasst sind.

Wie in Kapitel 2 dargestellt, gibt es weitere Potenziale an **Rest- und Abfallstoffen** mit nur geringen Risiken für Umwelt und Nahrungsmittelsicherheit. In Deutschland könnten über 100 Terawattstunden an Waldrestholz, Getreidestroh und tierischen Exkrementen zusätzlich energetisch genutzt werden. Sollen sie zukünftig verstärkt in Bioenergieanlagen eingesetzt werden, bedarf es **ökonomisch tragfähiger Finanzierungsmodelle**, die einen sukzessiven Übergang der Nutzung von Energiepflanzen oder Waldholz hin zu Rest- und Abfallstoffen ermöglichen. Politische Maßnahmen, die eine verstärkte Nutzung von Rest- und Abfallstoffen anreizen, sollten ausschließlich dazu führen, dass vorhandene Rest- und Abfallstoffe effizienter genutzt werden. Anreize, die zur Generierung zusätzlicher Rest- und Abfallstoffe führen, sollten vermieden werden.

¹⁴⁴ Bezug auf organische Rest- und Abfallstoffe im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes.

¹⁴⁵ Im Sinne von Biomasse; nach Dehoust et al. 2010.

¹⁴⁶ Website: <https://www.charta-fuer-holz.de>.

Derzeit tragen im Entsorgungssektor die energiewirtschaftlichen Finanzierungsmechanismen (insbesondere das EEG) maßgeblich dazu bei, das gemäß § 8 Absatz 1 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) geforderte Hochwertigkeitsgebot¹⁴⁷ umzusetzen. Werden Bioabfälle in Biogasanlagen eingesetzt, werden gegenüber anderen Entsorgungsmethoden Treibhausgase eingespart. Bei der energetischen Altholznutzung lassen sich durch die Bereitstellung von erneuerbarer Energie Treibhausgasreduktionen bereits mit sehr geringen Förderanreizen realisieren. In der Vergangenheit führten allerdings fehlende Anforderungen an eine effiziente energetische Nutzung sowie zu hohe Fördersätze zum Bau von Altholzanlagen, bei denen teilweise die erzeugte Wärme nicht umfänglich genutzt wurde. Energetisch sinnvolle Nutzungskonzepte zu etablieren, ist daher eine wichtige Voraussetzung für eine effiziente Nutzung von Altholz.

Als Folge der Neufassung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) aus dem Jahr 2017 könnten die zurzeit energetisch genutzten Abfall- und Reststoffströme (wie beispielsweise Gülle und Altholz) teilweise in den kommenden Jahren freigesetzt werden. Zum einen läuft die EEG-Förderung für die Bioenergieanlagen, die aktuell diese Stoffströme nutzen, in den nächsten Jahren aus. Zum anderen sind der Zubau von neuen Bioenergieanlagen sowie der weiterführende Betrieb bestehender Anlagen durch die Teilnahme an EEG-Ausschreibungen aufgrund der aktuellen gesetzlichen Regelungen beschränkt. So ist unter anderem in der aktuellen Fassung der Biomasseverordnung Altholz nicht mehr unter den anerkannten Biomassen aufgeführt,¹⁴⁸ und es besteht damit kein Zahlungsanspruch nach dem EEG (§ 19 EEG 2017).¹⁴⁹ Zwar bewirkt das bestehende Deponierungsverbot, dass Altholz dann vermehrt stofflich genutzt würde. Allerdings ist die stoffliche Nutzung vornehmlich für nicht verunreinigtes Altholz möglich.¹⁵⁰

Damit diese Abfall- und Reststoffströme auch zukünftig energetisch genutzt werden können, müssten kurzfristig entsprechende gesetzliche Maßnahmen implementiert werden. Eine Möglichkeit wäre eine umfängliche Anerkennung von Rest- und Abfallstoffen als Biomasse im Sinne der Biomasseverordnung.

Mittel- bis langfristig bedarf es allerdings eines Gesamtkonzepts für den Entsorgungssektor, das folgende Aspekte berücksichtigen sollte:

- Verfolgung eines ganzheitlichen Förderansatzes im Sinne einer Kreislaufwirtschaft (Circular Economy). Aktuell liegt eine sehr kleinteilige Regulierungs- und Förderlandschaft vor, die eine effiziente Nutzung von organischen Rest- und Abfallstoffen nicht ermöglicht.
- Umsetzung einer faktischen Kreislaufwirtschaft durch Schließung der Stoffkreisläufe.
- Intensivierung der Kaskadennutzung innerhalb der Kreislaufwirtschaft. Das heißt viele Stufen, ein hoher Grad der stofflichen Nutzung, viel Wertschöpfung. Die organischen Abfälle und Reststoffe der Kaskade sollten dann einer energetischen Verwendung zugeführt werden (unter Berücksichtigung der Emissionsgrenzwerte der 17. Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV).

¹⁴⁷ Danach ist die Verwertungsmaßnahme umzusetzen, welche die beste Option zum Schutz für Mensch und Umwelt darstellt.

¹⁴⁸ Biomasseverordnung 2016.

¹⁴⁹ EEG 2017.

¹⁵⁰ Altholzkategorien I und II.

- Reduktion der Schadstofffrachten innerhalb der Kreislaufwirtschaft. Daher bedarf es eines zusätzlichen Verwertungskonzepts für stark verunreinigte beziehungsweise belastete organische Rest- und Abfallstoffe.
- Verbesserung der Sammlung von biogenen Abfällen (unter anderem Umsetzung einer Getrenntsammlung des biogenen Restabfalls der Privathaushalte).

5.3 Politisch-gesellschaftlicher Diskurs

Biomassenutzung steht im gesellschaftlichen Diskurs immer wieder an. Nicht selten schlagen die Gemüter hoch, wenn es um Geruchsbelästigung, Landschaftsveränderung oder „Teller-Tank“-Diskussionen geht. Die in der Wissenschaft aktuell im Zusammenhang mit Biomassenutzung relevanten Themen wie CCS oder BECCS haben die breite Masse der Bevölkerung noch nicht erreicht und sind auch in der sonstigen politisch-gesellschaftlichen Debatte weitestgehend ungeklärt. Die bisherigen Erfahrungen zeigen eine große Breite an gesellschaftlichen Reaktionen und Aktivitäten: Zu Beginn der vermehrten Nutzung von Bioenergie im Rahmen des Ausbaus erneuerbarer Energien lag eine eher neutrale Bewertung seitens der Bevölkerung vor. Mit steigender Verbreitung der Bioenergie nahmen anteilig die lokalen Widerstände zu. So wurde im Hinblick auf konkrete Biogasanlagen Kritik der Anwohnenden laut, weil durch den Anlagenbetrieb Geruchsbelästigung und Lärm verursacht werden. Dies wirkte sich ebenfalls negativ auf die Akzeptanz aus.¹⁵¹ Gleichzeitig entwickelte sich aber die Akzeptanz für Bioenergieanlagen im Zusammenhang mit Bioenergiedörfern, die einen Großteil ihres Strom- und Wärmebedarfs aus regional erzeugter Biomasse gewinnen, positiv.¹⁵² Zentrale Akteure, Anwohnerinnen und Anwohner beziehungsweise ganze „Bioenergieregionen“ werden gemeinsam aktiv und bringen hier die Energiewende auf lokaler Ebene im Sinne einer aktiven Akzeptanz¹⁵³ voran.¹⁵⁴ Beim Einsatz im Mobilitätsbereich (Beimischung zum Benzin, „E10-Debatte“) kam es jedoch zu einem Einbruch der Akzeptanz.¹⁵⁵

Die Nutzung von Brennholz wird gemeinhin als eher ökologisch und positiv bewertet, obwohl Fachleute dies eher anzweifeln. Aber auch bei den Expertinnen und Experten herrscht Uneinigkeit in einigen Bereichen (beispielsweise beim Klimaschutzbeitrag der Bioenergie). Daher lassen sich aus dem derzeitigen heterogenen Kenntnisstand in der Wissenschaft nicht immer eindeutigen Empfehlungen ableiten. Gerade aber für eine fundierte Entscheidungsfindung braucht es das sorgfältige Abwägen von Vor- und Nachteilen sowie von verschiedenen gesellschaftlichen Bedarfen und möglichen „Zumutungen“. Für eine gelingende gesellschaftliche Transformation ist es notwendig, dass die Bevölkerung diese aktiv mitgestaltet.¹⁵⁶ Auch im Hinblick darauf sind ein breiter gesellschaftlicher Diskurs, die weitere Meinungsbildung und die Verknüpfung mit gesellschaftlichen Werten erforderlich. Der Diskurs bräuchte zudem dringend eine gesellschaftswissenschaftliche Begleitung, die neuere technische Ansätze

151 Kabasci et al. 2011.

152 Wüste et al. 2011.

153 Aktive Akzeptanz umfasst sowohl eine positive Bewertung des Akzeptanzgegenstands als auch ein Handeln in diesem Sinne, das heißt eigenes Engagement und Unterstützung für eine konkrete Anlage oder hier für die Entwicklung hin zu einem Bioenergiedorf (vgl. Hildebrand et al. 2018).

154 Kortsch et al. 2015.

155 Schütte et al. 2011.

156 Lutz/Bergmann 2017.

ebenso ins Spiel bringt wie verhaltensbezogene Maßnahmen, welche dazu beitragen, den sogenannten großen gesellschaftlichen Herausforderungen gerecht zu werden. Die Ergebnisse der Klimaschutzszenarien, die die Notwendigkeit negativer Emissionen aufzeigen, scheinen einer breiten Öffentlichkeit kaum bekannt. Die Neuentwicklung von Szenarien, die sowohl alle möglichen technischen Optionen (inklusive der Optionen für BECCS und andere CO₂-Entnahmetechnologien) abwägt als auch mit gesellschaftlichen Interessen (Werten) und Möglichkeiten (Verhaltensveränderungen) kombiniert, fehlt weitestgehend.

Die Diskussionen bedürfen einer breiten Beteiligung unterschiedlichster Akteursgruppen und politischer Entscheidungsträger in professionell durchgeführten Formaten. Diese sollten verschiedene Ebenen (lokal, regional, national und international) einbeziehen und helfen, die Querschnittsthemen wie Energiewende, Klimaschutz und Landwirtschaft (und damit verbunden Ernährungsgewohnheiten) zu integrieren. Dabei ist zu beachten, dass sich die Beteiligungsmöglichkeiten zwischen Technologieoptionen unterscheiden: Technologien zur Herstellung von Biokraftstoffen und zur Abscheidung von CO₂ erfordern oft relativ große Anlagen. Sie haben daher ein deutlich geringeres Potenzial für die Beteiligung verschiedener Akteurinnen und Akteure und für Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte auf regionaler Ebene als beispielsweise kleinere KWK-Anlagen. Ebenso müssten Zielkonflikte auf verschiedenen Ebenen transparent gemacht und reflektiert sowie die politischen Zielstellungen deutlich kommuniziert und als richtungsgebende Rahmen gesetzt werden. Beispielsweise bedeutet ein möglicher Verzicht auf BECCS, dass es gegebenenfalls nicht möglich oder zumindest wesentlich schwieriger und teurer sein könnte, der Atmosphäre CO₂ zu entziehen. In dem Fall müssten die Klimaschutzziele verstärkt über andere Strategien erreicht werden, zum Beispiel über eine signifikante Änderung des individuellen Konsumverhaltens bezüglich des Fleischkonsums oder der Flugverkehrsnutzung. Solche Zusammenhänge sollten anschaulich dargestellt, diskutiert und abgewogen werden.

Für eine konstruktive gesellschaftliche Auseinandersetzung sind ganzheitlich alle relevanten Aspekte transparent offenzulegen. Denn erst auf dieser Basis ist eine fundierte Diskussion um gesellschaftliche Werte (was ist besonders schützenswert, erstrebenswert etc.) sowie Handlungsoptionen und deren Konsequenzen möglich.

Für die Entwicklung einer von der Gesellschaft getragenen nachhaltigen Bioenergiestrategie sind **breit geführte Diskussionen auf unterschiedlichen Ebenen und mit verschiedenen Akteurinnen und Akteuren** von zentraler Bedeutung. Beteiligungsprozesse sollten zum einen die übergeordneten gesellschaftlichen Themen zur großen gesellschaftlichen Transformation enthalten und Wertediskussionen vertiefen. Zum anderen sollten sie aber auch ganz konkret in regionalen und lokalen Planungsverfahren Eingang finden. Entscheidend ist auch, dass die Beteiligungsprozesse professionell umgesetzt werden. Nur solche Lösungen, die auf einem breiten Konsens aufbauen, sind auf Dauer auch akzeptabel für die Mehrheit der Bevölkerung. Gestaltungsspielräume sind dabei sehr wichtig. Sie sollten möglichst konkret und transparent aufgezeigt werden. Das betrifft Ziele und Maßnahmen, aber auch die Grenzen möglicher Mitentscheidung und Mitgestaltung. Dort, wo Grenzen der Mitentscheidung vorhanden sind, sollten diese klar kommuniziert werden. Es geht darum, zu vermitteln, dass es unterschiedliche Verantwortlichkeiten gibt und

die getroffenen Entscheidungen immer für die erforderliche große gesellschaftliche Transformation dienlich sein sollen.

Im **gesamtgesellschaftlichen Dialog** wird es eine wichtige Rolle spielen, inwieweit Dezentralität als Eigenschaft der zukünftigen Energieversorgung explizit gesellschaftlich gewünscht wird.¹⁵⁷ Für eine ganzheitliche Betrachtung sind die Aspekte Klimaschutz und Landwirtschaft unbedingt in diese Diskussion einzubeziehen. Ergänzend sollte es **akteursspezifische Dialoge** geben, die unter anderem in den Bereichen Erzeugung, Transport und Nutzung (im Fall von BECCS zudem auch Lagerung) mögliche zukünftige Entwicklungen und damit verbundene Konsequenzen beleuchten. Dies berührt ganz verschiedene Themen – von Flächenkonkurrenzen über Rohstoffe und Netzkapazitäten bis hin zu Sicherheit und Konsumverhalten. Auch Möglichkeiten der ökonomischen Teilhabe unterschiedlicher Akteursgruppen sollten adressiert werden. Diese Themen stehen in Zusammenhang mit verschiedenen akzeptanzrelevanten Kriterien wie Risikobewertung, Autonomie, Kosten und wahrgenommener Verteilungsgerechtigkeit.¹⁵⁸

Der Aufwand, der betrieben werden muss, um Akteurinnen und Akteure der Bioenergiewirtschaft und die breite Bevölkerung einzubeziehen, ist je nach Transformationspfad unterschiedlich. Bei Biogas erscheint eine Transformation von einer lokalen Biogasnutzung zu einer Biomethanbereitstellung in der Zusammenschau der Bewertungskriterien relativ einfach möglich. Die Auswirkungen auf die Akteursstrukturen sind eher gering. Hinsichtlich möglicher Betreiber und Lieferketten der Rohstoffversorgung unterscheidet sich eine Biomethananlage kaum von einer Biogasanlage. Die Akteurinnen und Akteure und die Bevölkerung sind jedoch insbesondere im Hinblick auf die Frage der verwendeten Rohstoffe gut einzubinden, um eine nachhaltige Rohstoffbasis sicherzustellen und Vorbehalten in der Bevölkerung entgegenzuwirken. Eine Entwicklung hin zu holzbasierten Bioraffinerien zur Kraftstoffbereitstellung ist eine grundsätzlichere Entscheidung mit größeren Auswirkungen auf die beteiligten Akteurinnen und Akteure. Hier würden mehr Fragen zur Vielfalt der beteiligten Akteure, Verteilungsgerechtigkeit, Autonomie und zum Rohstoffeinsatz aufgeworfen als beim Übergang von der Biogas- zur Biomethanherzeugung.¹⁵⁹ Intensive Diskussionsprozesse wären daher unabdingbar.¹⁶⁰

Eine Entscheidung mit weitreichenden Folgen für die Gestaltung der Klimaschutzoptionen ist, ob die CCS-Technologie eingesetzt werden soll oder nicht. Entschieden man sich dagegen, entfällt neben BECCS auch Direct Air Capture als eine CO₂-Entnahmetechnologie mit großem Potenzial für den Klimaschutz und geringem Landbedarf. Daher muss eine **gesellschaftliche Diskussion dazu geführt werden, ob und wofür CCS eingesetzt werden soll**, da CCS in Deutschland aktuell

157 Wie stark der Trend zur Dezentralisierung der Energieversorgung in Zukunft sein wird, hängt von vielen Faktoren ab, unter anderem von der Entwicklung von kleinteiligeren digitalen Geschäftsmodellen. Die ESYS-Arbeitsgruppe „Dezentralität im Energiesystem“ untersucht diesen Themenkomplex.

158 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 Aspekte wie Lebensgefühl, Stolz oder Identifikation. Auf der Seite der wahrgenommenen Kosten stehen Aspekte wie Landschaftsveränderung und Abnahme von Lebensqualität. Die Bewertungen sind hier subjektiv zu verstehen und meist auf die lokale beziehungsweise regionale Ebene bezogen.

159 Importbiomasse für Bioraffinerien in Form von Holzhackschnitzeln und Restholz könnte hier angesprochen werden, da sie die angesprochenen Aspekte berühren und auch Fragen der Gerechtigkeit auf die globale Ebene heben.

160 Dies geht aus der Anwendung des in Kapitel 4 vorgestellten Ampelschemas auf die Entwicklungspfade hervor und ist in Klepper/Thran 2019, Kapitel 5 detailliert dargestellt.

sehr umstritten ist. Bisher wurde CCS hierzulande insbesondere im Zusammenhang mit Braunkohleverstromung diskutiert. Weitere Forschung sollte unter anderem der Frage nachgehen, wie die Technik akzeptiert wird, wenn das CO₂ nicht aus dem Stromsektor (Kohle und Gas) stammt, sondern aus BECCS oder DAC-Anlagen. Zwar wurde im Zusammenhang mit CCS nicht zuletzt die Lagerung kritisch diskutiert. Ein Teil des Unbehagens dürfte aber auch daher rühren, dass im Stromsektor mit Wind und Photovoltaik emissionsarme Alternativen zur Verfügung stehen. Eine kritische Diskussion zu CO₂-Entnahmetechnologien mit CCS wird deshalb immer auch die alternativen CO₂-Entnahmetechnologien ohne CCS mit in die Bewertung einbeziehen. Zu der Frage, unter welchen Bedingungen CCS akzeptiert würde, besteht Forschungsbedarf. Beispielsweise wäre denkbar, dass glaubwürdig sichergestellt werden müsste, dass alle anderen Möglichkeiten des Klimaschutzes zuerst ausgeschöpft werden und CCS nur als letzte Notfalllösung eingesetzt wird. Auch denkbar wäre, dass durch Gesetze sichergestellt werden müsste, dass CCS nur für Bioenergie und unvermeidbare Industrieemissionen eingesetzt wird, nicht aber für Kohlekraftwerke.¹⁶¹

Insofern sollten von Beginn an auch die **Potenziale und Risiken alternativer CO₂-Entnahmetechnologien** wie DAC, Renaturierung von Mooren, Aufforstung und Biokohle untersucht und kommuniziert werden. Denn derzeit sind vor allem die Umweltauswirkungen, die langfristige Kohlenstoffbilanz und die Kosten dieser Technologien noch sehr unsicher. Auch im Hinblick auf das wahrgenommene gesellschaftliche Risiko und die Akzeptanz der verschiedenen Technologien sollte umfassender geforscht werden.

In der gesellschaftlichen Diskussion werden neue Technologien teilweise losgelöst vom Kontext möglicher alternativer zukünftiger Entwicklungen diskutiert. Damit wird implizit als Referenzszenario für den Einsatz von BECCS eine Welt unterstellt, die „wie heute“ ist. Die Risiken von BECCS werden absolut betrachtet, nicht aber den Risiken des Verzichts auf BECCS (Einsatz alternativer CO₂-Entnahmetechnologien oder weniger Klimaschutz) gegenübergestellt. Dem kann man nur entgegenwirken, indem der klimapolitische Handlungsdruck deutlich herausgestellt wird. Dabei sollten die politischen Zielsetzungen klar kommuniziert und die damit einhergehenden Verpflichtungen betont werden. Die **politische Einigung auf ein Nullemissionsziel** (im Sinne einer nationalen Umsetzung von Artikel 4 des Pariser Klimaabkommens) wäre ein vielversprechender Orientierungspunkt.¹⁶² Im Mittelpunkt stünden dann weiterhin klassische Emissionsminderungsstrategien. Sogenannte „residuale“ Emissionen (etwa aus dem Luftverkehr oder der Landwirtschaft) müssten jedoch mit zunächst begrenztem Einsatz von CO₂-Entnahmetechnologien ausgeglichen werden. Die **Komplementarität der verschiedenen Maßnahmen sollte klar hervorgehoben werden**: eine CO₂-Entnahme etwa durch BECCS stellt keinen Ersatz für andere Klimaschutzmaßnahmen dar. Energiesparen, der Ausbau von Wind- und Solarenergie, Energieeffizienz und Suffizienz sind zusätzlich notwendig. Der Verzicht auf CO₂-Entnahmeoptionen verringert die Chance, breit akzeptierte Klimaschutzziele zu erreichen. **Die Risiken der CO₂-Entnahmetechnologien stehen daher den**

161 Bei der Diskussionsveranstaltung „Dialog zur Energiewende: Bioenergiepotenziale richtig bewerten und nutzen, Nebenwirkungen eindämmen. Wie soll eine langfristige Bioenergiestrategie gestaltet sein?“, die am 23.02.2018 vom Projekt „Energiesysteme der Zukunft“ und von der HUMBOLDT-VIADRINA Governance Platform durchgeführt wurde, wurden solche Aspekte von den Teilnehmenden genannt.

162 Geden 2017.

Risiken des Klimawandels gegenüber. Diesen Zielkonflikt thematisieren bislang auch die politischen Akteurinnen und Akteure nicht.

Hilfreich wäre es, verschiedene Szenarien mit konsistenten Mengengerüsten zum Erreichen der Klimaschutzziele zu erstellen. Wie viele zusätzliche Wind- und Photovoltaikanlagen wären etwa erforderlich, wenn man Bioenergie weiterhin dezentral nutzt und die erforderlichen negativen Emissionen mit Direct Air Capture umsetzt? Könnte man durch eine umfassende Umstellung des Verbraucherverhaltens – zum Beispiel der Ernährungsgewohnheiten – den Einsatz von CCS substanziell reduzieren oder sogar überflüssig machen?¹⁶³ Ein **Vergleich verschiedener Szenarien** könnte dazu beitragen, die Folgen des Einsatzes oder Verzichts auf bestimmte Technologien transparent und anschaulich darzustellen. Dies könnte als Entscheidungsgrundlage in den gesellschaftlichen Diskurs einfließen. Abschließend ist zu betonen, dass ein gesellschaftlicher Diskurs nicht im Widerspruch zu dem bereits für den jetzigen Zeitpunkt notwendigen aktiven Handeln seitens der politischen Akteure steht, sondern dieses vielmehr ergänzt und in einem kontinuierlichen Prozess als Korrektiv wirken kann.

5.4 Wegweiser für Transformationspfade entwickeln

Die vorhandenen nachhaltigen Biomassepotenziale sind in Zukunft entscheidend für den Umfang der möglichen Bioenergienutzung. Das größte Potenzial wird dabei im Bereich der Lignozellulose-Biomassen erwartet. Feuchte, vergärbare Abfälle und Reststoffe stellen einen zweiten wichtigen Bereich dar. Die Technologien müssen sich diesen schwierigeren und unkonventionellen Einsatzstoffen anpassen.

Die Art der Biomasseverwendung hängt in erster Linie von **drei Entwicklungen** ab:

1. Wird die Kraft-Wärme-Kopplung als eine tragende Säule der Energiewende implementiert?
2. Gelangen flüssige Biokraftstoffe aus Lignozellulose (Holz, Rest- und Abfallstoffe) zur Markteinführung?
3. Verständigt sich die Gesellschaft darauf, CCS als Teil der Klimaschutzstrategie einzusetzen?

Abhängig von diesen Entwicklungen werden unterschiedliche Bioenergietechnologien prioritär genutzt werden. Abbildung 7 stellt die Abhängigkeiten zwischen den drei übergeordneten Entwicklungen und den Technologien dar.

Flexible KWK-Technologien auf Basis von Erdgas, Biomasse oder weiteren erneuerbaren Energien können schon zeitnah zur Stabilisierung der schwankenden Stromversorgung aus regenerativen Quellen beitragen und gleichzeitig die Wärmeenergie substanziell unterstützen. Dabei können sowohl kleine, dezentrale Anlagen als auch größere Anlagen Industriebetriebe oder städtische Gebiete versorgen. Dies setzt

¹⁶³ Eine Studie zu dieser Fragestellung zeigt, dass selbst bei sehr umfangreichen Änderungen im Verbraucherverhalten (weniger Fleischkonsum, Nutzung umweltfreundlicherer Verkehrsmittel, weniger Heizen und Klimatisierung, Einführung von In-vitro-Fleisch als Lebensmittel) und sehr optimistischen Annahmen zum Fortschritt bei klimafreundlichen Energietechnologien zum Erreichen des 1,5°C-Ziels CO₂-Entnahmetechnologien in geringem Umfang notwendig werden (van Vuuren et al. 2018).

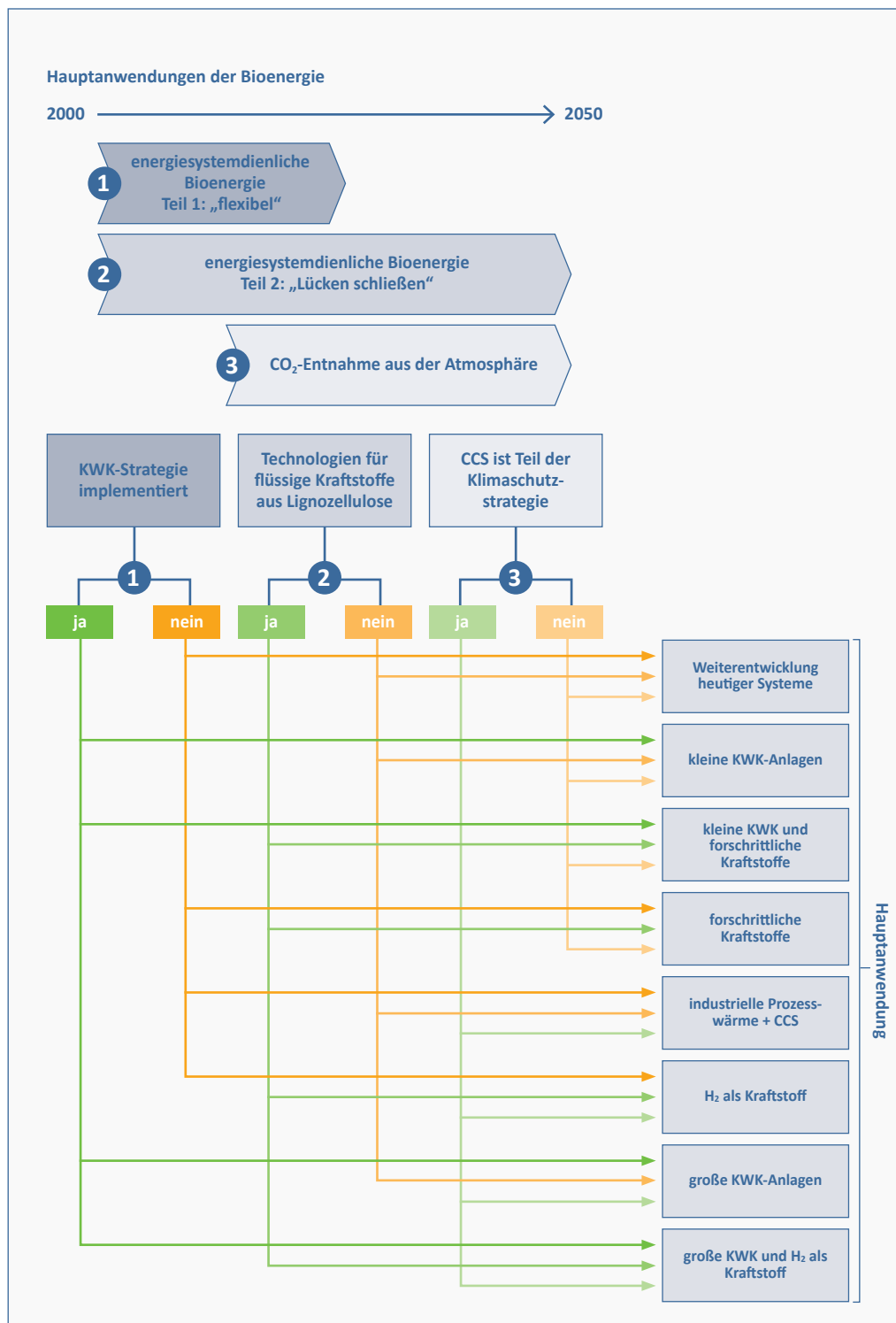


Abbildung 7: Priorisierung von Bioenergie-Nutzungsoptionen

einen Ausbau von modernen Gaskraftwerken und Wärmenetzen voraus. Gegenwärtig werden Investitionen in Kraft-Wärme-Kopplung nicht systematisch unterstützt, obwohl die Technologie in vielen Energieszenarien eine wichtige Rolle spielt. Sollte CCS ein Teil der Klimaschutzstrategie werden, können große Biomasse-KWK-Anlagen mit einer CO₂-Abscheidung ausgestattet werden und zur Erzeugung negativer Emissionen beitragen. Während Biogas über die Aufbereitung zu **Biomethan** bereits heute sowohl in der Kraft-Wärme-Kopplung als auch als Kraftstoff einsetzbar ist, ist beim Einsatz von Lignozellulose (insbesondere Holzreststoffe) unklar, ob und wann flüssige Kraftstoffe marktverfügbar sind.

Flüssige Biokraftstoffe aus Lignozellulose können sowohl mit als auch ohne CCS einen wertvollen Beitrag zum Energiesystem leisten. Für Bioraffinerien mit CCS bietet es sich an, statt kohlenstoffhaltiger Kraftstoffe Wasserstoff zu erzeugen – so könnten höhere negative Emissionen erreicht werden. Inwieweit Wasserstoff zukünftig im Energiesystem eingesetzt wird, hängt davon ab, ob eine entsprechende Infrastruktur errichtet wird.

Die Prozesswärme in der Industrie mit Biomasse zu erzeugen, könnte ein erstes Erprobungsfeld für BECCS sein, sofern **CCS** zukünftig zur Anwendung kommen soll. Denn falls CCS Teil der Klimaschutzstrategie wird, werden viele Industrieanlagen aus heutiger Sicht ohnehin an eine CCS-Infrastruktur angebunden werden, um prozessbedingte Emissionen abzuscheiden.

Falls die **CCS-Technologie** gesellschaftlich abgelehnt wird, ein Durchbruch bei der Erzeugung von Kraftstoffen aus Lignozellulose ausbleibt und die Biomasse-KWK wegen fehlender Wärmenetze nicht großflächig ausgebaut werden kann, werden vor allem die dezentralen Systeme weiterentwickelt, um Biomasse systemdienlich für die Energiewende einzusetzen. In diesem Fall kann Bioenergie zwar zu Klimaschutz und Energieversorgung beitragen, jedoch die weiteren Anforderungen für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung wie Kraftstoffanwendungen oder BECCS weniger gut erfüllen. Beiträge zum Energiesystem wären dann zum Beispiel über gasförmige Biokraftstoffe (Biomethan oder Produkte der Biomassevergasung) möglich, Biokohle könnte zu negativen Emissionen beitragen. Fällt mindestens eine der oben genannten Fragen positiv aus, ergeben sich verschiedene Entwicklungspfade für eine systemdienliche Transformation der Bioenergienutzung.

Die nachhaltig nutzbaren Biomassepotenziale reichen nicht aus, um den Gesamtbedarf in den diskutierten Anwendungsfeldern komplett zu decken. Tabelle 7 gibt einen Überblick über den zu erwartenden Endenergiebedarf im Jahr 2050. Der Einsatz von Bioenergie erscheint vor allem interessant in Bereichen, die auch langfristig auf Brenn- und Kraftstoffe angewiesen sein werden. Dazu zählen insbesondere der Luft-, Schiffs- und Schwerlastverkehr sowie die Erzeugung von Hochtemperaturwärme in der Industrie. Auch in der Strom- und Wärmeversorgung gibt es jedoch Teilbereiche, für die Biomasse ein attraktiver Energieträger ist.

Anwendungsbereich	Jährlicher Endenergiebedarf 2050 (in TWh)
Luftverkehr ^{a)}	100–120
Schiffsverkehr ^{a)}	ca. 140
Straßenfernverkehr	90–130
Straßennahverkehr	160–250
Schienerverkehr und Linienbusse	15–20
Mittel- und Hochtemperaturwärmebedarf in der Industrie	ca. 320
Niedertemperaturwärmebedarf (Heizwärme, Warmwasser im Gebäudesektor sowie Niedertemperaturwärme in Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen)	ca. 400
Originäre Stromanwendungen ^{b)} (inklusive Netz- und Speicherverluste)	ca. 450

Tabelle 7: Endenergiebedarf in Deutschland für verschiedene Anwendungsbereiche in Energieszenarien 2050^{b)}

a) inklusive Anteil am internationalen Verkehr

b) „Originäre Stromanwendungen“ bezeichnen Bereiche, die auch heute größtenteils mit Strom versorgt werden, wie Beleuchtung, IKT, Haushaltsgeräte, Kühlgeräte, Pumpen, Lüftung und Klimatisierung. Nicht eingeschlossen ist ein Strombedarf durch „elektrifizierte Anwendungen“ wie Elektroautos oder strombetriebene Heizungen.

Basierend auf acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017-1, Ausfelder et al. 2017, UBA 2016-2, UBA 2015 und BMWI 2017-2 (Referenzszenario mit 85 Prozent Treibhausgaseinsparung).

Verkehrsprognosen gehen davon aus, dass die Verkehrsleistung im Luft-, Schiffs- und Schwerlastverkehr in den kommenden Jahrzehnten stark ansteigen wird. Bis 2050 könnte sie sich mehr als verdoppeln. Trotz erheblicher Effizienzgewinne, durch die der spezifische Energiebedarf der verschiedenen Fahrzeuge, Flugzeuge und Schiffe um ein Viertel bis die Hälfte gesenkt werden könnte, wird der Gesamtenergiebedarf in diesen Bereichen mindestens auf heutigem Niveau bleiben und tendenziell sogar eher steigen.¹⁶⁴ Damit wird langfristig ein Energiebedarf von 300 bis 400 Terawattstunden pro Jahr bestehen, der großenteils durch Kraftstoffe gedeckt werden muss. Die jährlich etwa 300 Terawattstunden an Rest- und Abfallstoffen, die in Deutschland bei Erschließung bisher ungenutzter Potenziale zur Verfügung stehen, könnten bei Berücksichtigung von Umwandlungsverlusten rund die Hälfte dieses zukünftigen Kraftstoffbedarfs decken. Sollte es nicht gelingen, den Nahverkehr weitestgehend auf Elektromobilität umzustellen, so würde ein erheblicher zusätzlicher Kraftstoffbedarf resultieren.

Daher müssen für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung in jedem Fall zusätzlich zu Biokraftstoffen auch strombasierte synthetische Kraftstoffe (Power-to-Gas, Power-to-Fuels) entwickelt werden. Neben Flüssigkraftstoffen können zumindest im Schiffs- und Straßenverkehr perspektivisch auch Wasserstoff oder Methan – aus Biomasse oder Strom – eingesetzt werden.

In der Industrie kann Bioenergie vor allem eingesetzt werden, um den Bedarf an Mittel- und Hochtemperaturwärme zu decken. Niedertemperaturwärme kann effizient über Wärmepumpen oder Abwärme bereitgestellt werden. Der Bedarf an Prozesswärme bei Temperaturen von über 100 °C bis zu über 1.000 °C beträgt heute etwa 420 Terawattstunden pro Jahr. Gelingt es, bis 2050 den Bedarf um ein Viertel zu senken, verbleiben etwa 320 Terawattstunden. Bei einem Wirkungsgrad von 85 Prozent können die verfügbaren biogenen Rest- und Abfallstoffe rechnerisch diesen Bedarf zu etwa

164 UBA 2016-2.

80 Prozent decken. Insbesondere bei Hochtemperaturprozessen wäre allerdings zu prüfen, ob sie technisch geeignet sind. Ein Teil der Prozesswärme könnte langfristig auch mit Strom erzeugt werden (zum Beispiel Elektrostahlerzeugung).¹⁶⁵ Wird die Bioenergie vorrangig in anderen Bereichen (zum Beispiel Kraftstofferzeugung oder KWK) eingesetzt, müssten für eine klimafreundliche Prozesswärmeerzeugung voraussichtlich strombasierte Energieträger (Wasserstoff oder Methan) oder fossile Brennstoffe mit CCS zum Einsatz kommen.

Der Wärmebedarf im Gebäudebereich wird voraussichtlich in Zukunft zu einem großen Teil durch Wärmepumpen gedeckt werden. Dennoch kommen in einigen Energieszenarien auch im Jahr 2050 noch über 100 Terawattstunden Brennstoffe in Gebäudeheizungen zum Einsatz.¹⁶⁶ Hier könnte Bioenergie einen Beitrag leisten. Effizienter ist jedoch der Einsatz in KWK-Anlagen mit Einspeisung der erzeugten Wärme in Nah- oder Fernwärmenetze. Bis 2050 könnte ein Drittel der Gebäude an Wärmenetze angeschlossen sein, was einem Wärmebedarf von etwa 180 Terawattstunden entspricht.¹⁶⁷

Die Stromerzeugung wird voraussichtlich stark steigen, da neben den originären Stromanwendungen zunehmend auch Elektrofahrzeuge, Wärmepumpen und Power-to-Gas-Anlagen versorgt werden müssen. Bis 2050 könnte dadurch der gesamte Strombedarf auf 700 bis 1.000 Terawattstunden ansteigen. Bioenergie ist in der Stromerzeugung vor allem als Flexibilitätstechnologie attraktiv, um die schwankende Einspeisung von Windkraft- und Solarstrom auszugleichen. Wie hoch der Bedarf an Brennstoffen zur Stromerzeugung zukünftig sein wird, hängt unter anderem stark davon ab, inwieweit Ausgleichseffekte im europäischen Verbundnetz genutzt werden können. Verschiedene Szenarien deuten darauf hin, dass 2050 rund 10 Prozent der Stromerzeugung in regelbaren Verbrennungskraftwerken erfolgen könnte (teilweise in KWK-Anlagen).¹⁶⁸

Sollen die gesamten unvermeidbaren Emissionen aus Landwirtschaft und Industrie mit BECCS gedeckt werden, müsste etwa die Hälfte bis hin zur gesamten energetisch genutzten Biomasse in Bioenergieanlagen mit CCS verarbeitet werden.¹⁶⁹ Da die CO₂-Abscheidung Energie verbraucht, würden sich die möglichen Beiträge zur Energieversorgung verringern.

Die vorangegangenen Betrachtungen zeigen, dass der Energiebedarf in den Einsatzgebieten, in denen Bioenergie grundsätzlich attraktiv erscheint, in der Summe weitaus größer ist als die zu erwartenden Bioenergiepotenziale. Die Anwendungsfelder werden daher um die Biomassepotenziale konkurrieren. Für neue Anwendungen müssen teilweise die aktuellen Biomasseströme umgelenkt werden. Dadurch ändern sich auch die beteiligten Akteure und die erforderlichen Geschäftsmodelle sowie die Integration vor Ort. Sowohl in der Wissenschaft als auch in der Politik liegt der Fokus der Betrachtung oft auf der „Welt“ von heute und der, die für das Jahr 2050 gewünscht wird. Der für die praktisch betroffenen Akteure wichtige Zeitraum dazwischen wird

165 Die Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland“ zeigt beispielsweise, wie durch eine grundlegende Umstellung vieler Produktionsprozesse der Bedarf an Brennstoffen in der Industrie auf 200 Terawattstunden reduziert werden könnte (UBA 2015).

166 BMWI 2017-2.

167 Ausfelder et al. 2017.

168 Ausfelder et al. 2017; BMWI 2017-2; acatech/Leopoldina/Akademienunion 2015-2.

169 Siehe Klepper/Thrän 2019, Tabelle 5, abgeschätzt mit unvermeidbaren Emissionen von 60 Millionen Tonnen pro Jahr nach UBA 2016.

oftmals vernachlässigt, was potenziell zu Akzeptanzproblemen führt. Für die betroffenen Stakeholder ist vor allem Planbarkeit wichtig. Dafür müssen klima-, energie- und umweltpolitische Ziele durch die Politik verbindlich vorgegeben und Maßnahmen zum Erreichen dieser Ziele transparent und konsequent umgesetzt werden.

Dabei steht die Politik jedoch vor folgender Herausforderung: Bei den dargestellten Entwicklungspfaden der Bioenergie ist ungewiss, ob sie erfolgreich umgesetzt werden können. So kann trotz massiver Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen nicht garantiert werden, dass ein Durchbruch bei der Herstellung von Kraftstoffen aus Lignozellulose erreicht wird. Der Einsatz von BECCS kann an gesellschaftlichen Widerständen gegen CCS scheitern. Legt man sich zu früh auf einen dieser Entwicklungspfade fest, besteht daher das Risiko, in eine „Sackgasse“ zu geraten. Nachträglich auf eine KWK-Strategie umzuschwenken, ist aufgrund der langen Investitionszyklen im Gebäudesektor sehr zeitaufwendig. Der Einsatz der KWK-Technologien ist weniger mit technischen oder gesellschaftlichen Unsicherheiten behaftet. Entschließt man sich dafür, diesen Entwicklungspfad zu unterstützen, ist das Risiko des Scheiterns geringer. Allerdings ist aus systemischer Sicht der Beitrag von KWK-Systemen zu einer klimaneutralen, zuverlässigen und möglichst kostengünstigen Energieversorgung begrenzt. Bioenergie kann dann zur Kraftstofferzeugung und zur CO₂-Entnahme keinen Beitrag leisten. Das technologische und gesellschaftliche Risiko wird damit lediglich von der Bioenergie zu anderen Technologien und Energieträgern verschoben. Denn bei der strombasierten Herstellung synthetischer Kraftstoffe ist die Markteinführung ebenso unsicher wie bei der Bioraffinerie. Ob alternative Technologien der CO₂-Entnahme von der Bevölkerung eher akzeptiert werden als BECCS und wie groß ihre Potenziale sind, ist ebenso ungewiss.

Werden alle Entwicklungspfade gleichermaßen unterstützt und gelingt es, alle Technologien erfolgreich zum Einsatz zu bringen, konkurrieren sie jedoch um die Biomasse. Denn die nachhaltig nutzbaren Biomassepotenziale reichen nicht aus, um alle Entwicklungspfade vollumfänglich zu bedienen. Hier ergibt sich daher das Risiko, Technologiepfade zu fördern, für die letztendlich keine oder nur wenig Biomasse zur Verfügung stehen wird.

Bei der Formulierung einer Bioenergiestrategie ist daher abzuwägen zwischen dem Risiko, sich zu früh in eine Pfadabhängigkeit zu begeben, und dem höheren Aufwand, um sich zusätzliche Optionen offenzuhalten. Für ein sequenzielles Vorgehen, bei dem zunächst ein Entwicklungspfad ausprobiert und bei Misserfolg auf einen anderen Pfad gewechselt wird, bleibt zu wenig Zeit. Denn bereits in etwa dreißig Jahren muss das Energiesystem nahezu klimaneutral sein.

Um sowohl kurzfristig als auch langfristig einen größtmöglichen Beitrag der Bioenergie zu Energiesystem und Klimaschutz sicherzustellen, sollten die bestehenden Konzepte zur Bioenergienutzung schrittweise weiterentwickelt werden. Dazu gehört der zunehmende Einsatz umweltfreundlicher Rohstoffe wie Abfall- und Reststoffe sowie naturschutzverträglicher Anbaubiomasse anstelle klassischer Energiepflanzen. Der Beitrag zum Energiesystem kann erhöht werden, indem zum einen die eingesetzte Biomasse effizienter genutzt wird (vollständige Nutzung der Wärme bei Biogasanlagen, effiziente Holz-KWK statt reiner Wärmeerzeugung) und zum anderen Strom und Wärme flexibel erzeugt werden, um das Zusammenspiel mit Windkraft und Photovoltaik zu optimieren.

Parallel sollten Konzepte für die zukünftige Biomassenutzung in einem THG-neutralen Wirtschaftssystem entwickelt und erprobt werden. Denn bis 2050 muss nicht nur das Energiesystem, sondern auch der industrielle Sektor weitestgehend THG-neutral gestaltet werden. Für kohlenstoffhaltige Produkte und Materialien, die heute aus fossilen Rohstoffen hergestellt werden, müssen Produktionsverfahren etabliert werden, die Biomasse oder CO₂ (Carbon Capture and Utilization, CCU) als Kohlenstoffquelle verwenden. Eine Schlüsselrolle können hierbei Bioraffinerien spielen, die Kraftstoffe (insbesondere für den Flugverkehr) in Kombination mit anderen Produkten (zum Beispiel chemische Grundstoffe) erzeugen. Entscheidend für die Entwicklung langfristig tragfähiger Lösungen ist, das Energiesystem und die Industrie der Zukunft, Biomasse und CCU, zusammen zu denken und integrierte Konzepte zu entwickeln.

Zudem ist dringend zu klären, inwieweit BECCS eine Rolle in der Klimaschutzstrategie spielen kann und soll. Dazu ist ein Vergleich von BECCS mit alternativen Technologien, mit denen der Atmosphäre CO₂ entnommen werden kann (unter anderem Aufforstung, Biokohle, Direct Air Capture), erforderlich. Bisher gibt es allerdings große Unsicherheiten in Bezug auf Potenziale, Kosten und Risiken der verschiedenen CO₂-Entnahmetechnologien. Um eine bessere Wissensgrundlage für den Vergleich zu schaffen, sollten sie weiter erforscht werden. Auch Möglichkeiten, den Einsatz von CCS substanziell zu reduzieren oder sogar überflüssig zu machen – beispielsweise durch umfassende Änderungen des Verbraucherverhaltens –, sollten hinsichtlich ihrer Potenziale untersucht und in den Vergleich einbezogen werden. Auf dieser Basis sollte neu diskutiert werden, ob und unter welchen Bedingungen CCS in Kombination mit Bioenergie oder Direct Air Capture für die Gesellschaft akzeptabel ist. Eine technische Erprobung von BECCS bietet sich insbesondere in der Industrie an. Hier können auch Synergien zwischen CCU und CCS genutzt werden, da sie sich lediglich in der Verwendung des CO₂ unterscheiden, nicht aber in dessen Gewinnung.

Die folgenden Maßnahmen können schrittweise die Nachhaltigkeit und den Nutzen der Bioenergie für das Gesamtsystem erhöhen.

5.4.1 Nachhaltige Rohstoffbasis nutzbar machen

Die Analyse der Biomassepotenziale hat gezeigt, dass künftig vermehrt Rest- und Abfallstoffe zur Bioenergiebereitstellung zum Einsatz kommen dürften. Diese werden in anderen Sektoren bereitgestellt (siehe Kapitel 5.2), haben aber eine niedrigere und weniger stabile Qualität als beispielsweise klassische Energiepflanzen. Technologien für die Aufbereitung der Rest- und Abfallstoffe müssen daher entwickelt und Bioenergietechnologien an den Umgang mit einem breiteren Rohstoffspektrum angepasst werden. Zudem werden Technologien und Infrastruktur benötigt, um die Rest- und Abfallströme erschließen, lagern und transportieren zu können.

5.4.2 Technologien entwickeln und einführen

Biokraftstoffe aus Rest- und Abfallstoffen. Der Übergang von etablierten Biokraftstofftechnologien, die beispielsweise Mais und Raps nutzen, zu fortschrittlichen Biokraftstoffen auf Basis von Rest- und Abfallstoffen ist mit großen Herausforderungen verbunden. Die Ressourcenbasis ist auf der Ebene der Marktakteure deutlich schwieriger dauerhaft abzusichern. Zudem sind, mit Ausnahme von Biomethan, die meisten Technologiekonzepte noch nicht im kommerziellen Maßstab etabliert. Die notwendige mittelfristige Forschungs- und Entwicklungsarbeit ist kostenintensiv und bedarf einer dauerhaften Förderung. Zudem sind stabile Rahmenbedingungen notwendig.

Parallele Entwicklung von lignozellulosebasierten, systemintegrierten KWK-Technologien und lignozellulosebasierten Bioraffinerien zur Kraftstoffherzeugung. Da zum heutigen Zeitpunkt eine Entscheidung für einen der beiden Technologiepfade nicht sinnvoll getroffen werden kann, sollten beide Konzepte weiterentwickelt werden. Hierzu gehören insbesondere bei den Bioraffinerien F&E-Anstrengungen, um die Technologien zu verbessern, Kosten zu senken sowie Industriebeteiligungen zur Markteinführung zu gewinnen, und kontinuierliche Emissionsreduktion. Gleichzeitig sollten klare Entscheidungspunkte für eine Priorisierung von Bioraffinerie-Konzepten mit CCS oder flexible KWK-Technologien definiert werden (zum Beispiel Markteinführung der Raffinerietechnologie und Etablierung von CCS). Insbesondere die Synthesegas-Bioraffinerie bietet die Möglichkeit der großskaligen CO₂-Abtrennung. Flexible KWK-Anlagen können mit relativ geringem Entwicklungsaufwand schon zeitnah substantiell zum Klimaschutz beitragen, während Bioraffinerien im besten Fall mittelfristig einsatzbereit wären. Selbst wenn zu einem späteren Zeitpunkt die Biomasse vorrangig für Bioraffinerien verwendet werden sollte, können KWK-Anlagen zum Erreichen der kurzfristigeren Klimaschutzziele einen wichtigen Beitrag leisten.

Konkretisierung einer nationalen Biomethanstrategie, die aus dem Biogasanlagenbestand erwächst und einen wichtigen Baustein der übergreifenden Bioenergiestrategie darstellt. Dabei sollten auch Möglichkeiten von BECCS-Biomethananlagen untersucht werden. Die Frage der Pfadabhängigkeiten stellt sich bei der Biomethanherzeugung weniger als bei der Verarbeitung von Lignozellulose. Denn die Technologie ist bereits am Markt etabliert, grundsätzliche Akzeptanzprobleme sind nicht zu erwarten, und das Biomethan ist flexibel in allen Sektoren einsetzbar.

5.4.3 Technologieumfeld gestalten

Ausbau der Wärmenetze. Der Ausbau der Wärmenetze ist unabhängig von der Bioenergienutzung für die Energiewende erforderlich. Er ist eine notwendige Voraussetzung, wenn die KWK-Transformationspfade weiterverfolgt werden sollen. Sollte zu einem späteren Zeitpunkt entschieden werden, die Biomasse vorrangig für Bioraffinerien einzusetzen, können die Wärmenetze aus einer Vielzahl anderer umweltfreundlicher Wärmequellen gespeist werden.

Soziale Folgen einer Umnutzung von Biomasse beachten. Entscheidet man sich für ein Umlenken von Biomasseströmen in zentralere Nutzungspfade (zum Beispiel Bioraffinerien), so wird den bisherigen Nutzern Biomasse entzogen. Den Betroffenen sollten akzeptable Alternativen für die Energieversorgung geboten werden.

Beseitigung von rechtlichen Hemmnissen für die Transformation. Um das Zusammenspiel von Bioenergie und anderen erneuerbaren Energien zu verbessern, müssen bestehende rechtliche Hürden beseitigt werden. Dazu zählen die Regelungen des EEWärmeG, wonach ein einzelner erneuerbarer Energieträger zur Wärmebereitstellung gefordert wird und die Kombination verschiedener erneuerbarer Energien, die weitergehende Klimagasreduktionen ermöglichen könnten, nicht vorgesehen ist. Weiterhin bestehen im EEG aktuell zu geringe Anreize für die Etablierung von Vergasertechnologien, die kurzfristig flexibel Strom und Wärme erzeugen können.

5.4.4 Systemwissen schaffen

Aufbau einer Plattform zur Diskussion der Transformationspfade. Parallel zur Weiterentwicklung von Bioenergie-technologien müssen die damit verbundenen Auswirkungen auf die beteiligten Akteure in den Blick genommen werden. Bei der heute vorherrschenden Bioenergienutzung in vergleichsweise dezentralen Anlagen erfolgt die Biomassebereitstellung in der Regel regional; die Anlagen werden von regionalen Akteuren finanziert und betrieben. Die Akteure vor Ort, insbesondere in den Bereichen Land- und Forstwirtschaft, profitieren ökonomisch von der bisherigen Nutzung. Würde Bioenergie künftig eher zentral statt dezentral genutzt, hätte dies Auswirkungen auf die beteiligten Akteure und würde zu einer Umverteilung der ökonomischen Effekte führen. Bei der Auswahl der Teilnehmerinnen und Teilnehmer der nationalen Dialogplattform sollte sichergestellt werden, dass alle in den Handlungsbereichen (unter anderem Klimaschutz, Energiewirtschaft, Land- und Forstwirtschaft) relevanten und alle in ihrer Lebenswelt betroffenen Personengruppen vertreten sind. Dies umfasst beispielsweise Industrie- und Landwirtschaftsverbände, Verbraucherzentralen, Umweltverbände, Kommunalvertreterinnen und -vertreter sowie Vertreterinnen und -vertreter verschiedener zivilgesellschaftlicher Bereiche. Da die anstehenden Entscheidungen bei konsequenter Umsetzung signifikante Auswirkungen auf die Lebenswelt der Menschen haben können (zum Beispiel Konsumverhalten), sollte darauf geachtet werden, dass der Kreis der Teilnehmerinnen und Teilnehmer möglichst heterogen ist und daher verschiedene Bevölkerungsgruppen repräsentiert (zum Beispiel differenziert nach Alter, Geschlecht, Milieu).

Monitoringsystem entwickeln. Eine umfassende, standardisierte und regelmäßige Bewertung verschiedener Transformationspfade könnte die vielfältigen Einflussgrößen transparenter machen, ständiges Nachsteuern bei der Bioenergiepolitik vermindern und dadurch die Planungssicherheit für Entwickler, Anbieter und Betreiber von Bioenergie-technologien erhöhen. Bisher fehlt jedoch Systemwissen, um verschiedene Bioenergiepfade vollständig zu bewerten. Die Auswirkungen der Bioenergienutzung in der Landnutzung sind teilweise schwer zu erfassen beziehungsweise werden kontrovers diskutiert (das betrifft etwa die Themen Kohlenstoffschuld und indirekte Landnutzungsänderungen, siehe Abschnitt 2.2). Außerdem ist offen, wie die Bevölkerung und betroffene Akteure vor allem neue Technologien wie BECCS konkret bewerten. Eine verbesserte Kenntnis der Bewertungsaspekte ist für ein umfassendes Monitoring erforderlich. Das von der Arbeitsgruppe entwickelte und angewendete Bewertungsschema kann hierfür ein erster Impuls sein. Das Monitoringsystem könnte im Rahmen der Diskussionsplattform weiterentwickelt werden.

Verschiedene Biomasseszenarien vergleichen. Zum einen sollte in Energieszenarien die ganze Bandbreite der Bioenergieoptionen berücksichtigt werden, sowohl mit als auch ohne BECCS. Damit würde der optimale Beitrag unter Beachtung verschiedener Aspekte sichtbar gemacht.¹⁷⁰ Darüber hinaus sollten integrierte Modelle von Energie- und Landnutzungssystemen weiterentwickelt werden. Damit könnten auch alternative Verwendungsmöglichkeiten von Land und Biomasse (zum Beispiel Aufforstung, Biokohle) mit Bioenergie verglichen werden. Dies ist unter anderem auch für den Vergleich verschiedener Technologien zur CO₂-Abscheidung relevant. Um eine hohe Aussagekraft und Vergleichbarkeit verschiedener Szenarienansätze zu erreichen,

¹⁷⁰ Millinger/Thran 2018.

könnten die Eingangsparameter und Annahmen für die Szenarien im Rahmen der Diskussionsplattform entwickelt werden. Modelle und Ergebnisse sollten für die gesellschaftliche Diskussion transparent offengelegt und verständlich dargestellt werden.¹⁷¹

5.4.5 CO₂-Abscheidung ermöglichen

Bioenergieeinsatz in der Industrie als mögliche BECCS-Anwendung. Aktuelle Energieszenarien zeigen die Prozesswärmeerzeugung in der Industrie als ein wichtiges Anwendungsgebiet der zukünftigen Bioenergienutzung. Auch der Einsatz von CCS wird derzeit vor allem für den Bereich der Industrie erwogen.¹⁷² Wenn hier die Erprobung positiv verläuft, könnte dies auch den ersten Anwendungsbereich für BECCS bilden. Jedoch sollten die Anlagenkonzepte für BECCS in der Industrie dafür näher untersucht werden, unter anderem durch Prozesssimulationen zur Abschätzung der Effizienz und Kostenschätzung. Dabei sind auch die Implikationen verschiedener Einsatzstoffe (unter anderem der Chlorgehalt) für die CO₂-Abscheidung zu untersuchen.

*Aufbau einer Infrastruktur für CO₂-Transport und -Lagerung.*¹⁷³ Sofern die CCS-Technologie für Industrieemissionen und BECCS eingesetzt werden soll, um die Klimaschutzziele für 2050 zu erreichen, müsste zeitnah mit dem Aufbau der Infrastruktur für Transport und Speicherung begonnen werden. Dabei sollte auch geprüft werden, inwieweit eine Abscheidung aus kleinen Anlagen (etwa den hier betrachteten Biomethananlagen) volkswirtschaftlich sinnvoll und logistisch praktikabel sein kann. Auch Direct Air Capture – eine der wenigen CO₂-Entnahmetechnologien, die nicht um Anbauflächen für Biomasse konkurrieren – erfordert diese Infrastruktur.

Einbettung von BECCS in eine konsistente Klimaschutzpolitik. Die Erprobung und Etablierung von BECCS muss daher in politisch überzeugende Maßnahmenpakete und verbindliche Ziele für Emissionsminderungen eingebettet sein. Der Einsatz von BECCS darf keinesfalls zu einem Nachlassen bei der Vermeidung von Emissionen führen. Nur eine Kombination aus stringenten Maßnahmen zur Reduktion von Emissionen mit CO₂-Entnahmetechnologien kann die Einhaltung der Klimaziele gewährleisten und Klimaschäden minimieren. Bei begrenzter CCS-Kapazität sollen diejenigen CCS-Technologien vorrangig genutzt werden, die CO₂ aus Bioenergie und Direct Air Capture sowie gegebenenfalls unvermeidbaren Emissionen aus der Industrie einspeichern.

171 Anforderungen an Energieszenarien für die Politikberatung werden in acatech/Leopoldina/Akademienunion 2015-1 diskutiert.

172 Zum Beispiel BMWI 2017-2, PCG/Prognos 2018 (95%-Szenario) und acatech 2018.

173 Detaillierte Überlegungen zum Aufbau einer CCS-Infrastruktur sind in acatech 2018 zu finden.

6 Fazit

Bioenergie deckt heute etwa zehn Prozent des Endenergiebedarfs in Deutschland und trägt damit mehr zur Energieversorgung bei als alle anderen erneuerbaren Energien zusammen. Damit Bioenergie auch in Zukunft helfen kann, das Energiesystem klimafreundlich zu gestalten, müssen **zwei Bedingungen** erfüllt sein: erstens muss die **Biomasse aus nachhaltigen Quellen** stammen. Zweitens muss sie so genutzt werden, dass sie im Gesamtsystem einer **sicheren und bezahlbaren Energieversorgung** einen effektiven Beitrag leistet.

Wichtige Kriterien für eine **nachhaltige Bereitstellung von Biomasse** sind die dabei verursachten **Treibhausgasemissionen** sowie ökologische Auswirkungen auf **Artenvielfalt, Boden- und Gewässerqualität**. Zudem muss abgewogen werden, mit welchen Anteilen Biomasse für die **Nahrungsmittelproduktion, die stoffliche Nutzung und die Gewinnung von Bioenergie** eingesetzt werden soll.

Durch die wachsende Weltbevölkerung wird der weltweite Bedarf an Biomasse für die Nahrungs- und Futtermittelproduktion weiter steigen. Auch bei der Herstellung von Materialien und Produkten wird zukünftig im Rahmen der Bioökonomiestrategien verstärkt Biomasse als klimafreundliche Alternative zu fossilen Rohstoffen eingesetzt. Damit wird sich die **Konkurrenz um Landflächen** verschärfen. Eine Bioenergiepolitik, die starke Anreize für die energetische Nutzung von Biomasse setzt, muss daher sicherstellen, dass die gesteigerte Nachfrage nach Bioenergie **keine negativen sozialen und ökologischen Folgen** hat. Große Schwierigkeiten bei der Bewertung stellen die **indirekten, marktbasieren Rückwirkungen auf die globale Landnutzung** dar. Die indirekten Landnutzungsänderungen lassen sich nur reduzieren, wenn Nachhaltigkeitsanforderungen für alle Landnutzungsformen und weltweit etabliert werden. Solange Nachhaltigkeitskriterien nur für Bioenergie gelten, nicht aber für andere land- und forstwirtschaftliche Produkte, können bei der Nutzung von **Waldholz und Agrarbiomasse** in vielen Fällen schädliche soziale und ökologische Auswirkungen nicht ausgeschlossen werden. Eine Ausnahme stellt der Anbau auf degradierten Acker- oder Weideflächen dar, deren Potenziale allerdings umstritten sind.

Der Fokus bei der Erschließung zusätzlicher Bioenergiepotenziale sollte daher zunächst auf **Rest- und Abfallstoffen** liegen. Werden ungenutzte Potenziale aus Waldrestholz, Getreidestroh und tierischen Exkrementen energetisch verwendet, könnten – unter der Voraussetzung, dass die Energieeffizienzziele bis 2050 erreicht werden – Rest- und Abfallstoffe künftig etwa 13 bis 17 Prozent des Primärenergiebedarfs in Deutschland decken. Dafür werden allerdings Bioenergietechnologien benötigt, die Lignozellulose verarbeiten können.

Wird Biomasse in Zukunft verstärkt zur Herstellung von Produkten genutzt, stehen am Ende der Produktlebensdauer damit auch wachsende Ressourcen an Altholz

und anderen biogenen Reststoffen für die energetische Nutzung zur Verfügung. Ein **schadstoffarmes, recyclingfreundliches Design von biobasierten Materialien** kann diese sogenannte **Kaskadennutzung** erleichtern.

Durch die **Schnittstellen zur Land- und Forstwirtschaft sowie zur Entsorgungswirtschaft** stellt Bioenergie im Vergleich zu anderen Energiequellen einen Sonderfall dar. Bisher wird die energetische Biomassenutzung in Deutschland größtenteils durch energiewirtschaftliche Anreizsysteme reguliert. Damit werden die Auswirkungen außerhalb des Energiesystems aber nicht ausreichend berücksichtigt. Langfristig wünschenswert wäre daher eine Bioenergiepolitik, die Energiesystem, Treibhausgas- und Kohlenstoffbilanz, Entsorgungsstrategien und Landnutzung als ein integriertes System zusammen denkt. Dies erfordert eine Zusammenarbeit der vielen für Teilbereiche zuständigen politischen Ressorts und eine **Koordinierung der unterschiedlichen Finanzierungs- und Lenkungsmechanismen**.

Ein effizientes Instrument, um die Treibhausgasemissionen der Bioenergie über den gesamten Lebenszyklus zu regulieren, wäre ein **einheitlicher und ausreichend hoher CO₂-Preis**. Lachgas- sowie andere Treibhausgasemissionen beim Anbau von Energiepflanzen zu bepreisen ist unerlässlich, da diese einen großen Einfluss auf die Treibhausgasbilanz von Bioenergie haben. Idealerweise sollten langfristig alle Treibhausgase in allen Wirtschaftssektoren, also auch die der Nahrungs- und Futtermittelproduktion, bepreist werden. Gelänge es, weltweit einen CO₂-Preis für alle Treibhausgasemissionen zu etablieren, würde dies zu einer klimafreundlichen Land- und Energienutzung führen. Eine weitere Folge: Das Abholzen von Wäldern wäre ökonomisch weniger attraktiv. Das Risiko, dass die Bioenergienutzung zur Entwaldung und damit letztendlich zu einem Anstieg der Treibhausgasemissionen führt, würde dadurch sinken. Auf absehbare Zeit scheint ein globaler CO₂-Preis auf Treibhausgasemissionen im Rahmen eines internationalen Abkommens schwer umsetzbar. Eine steigende Zahl von Ländern und Regionen hat jedoch begonnen, Emissionshandelssysteme oder CO₂-Steuern einzuführen, die etwa 20 Prozent der weltweiten Treibhausgasemissionen erfassen.

Alternativ oder ergänzend zu einem CO₂-Preis sind weitere Instrumente denkbar. Diese sind kurzfristig einsetzbar und können die Zeit, bis ein umfassender CO₂-Preis etabliert werden kann, überbrücken.

Bei heimisch produzierter Biomasse können **gesetzliche Regelungen** auf nationaler oder auf EU-Ebene sicherstellen, dass Bioenergie nachhaltig erzeugt wird und in vorgegebenem Maße zur Emissionsminderung beiträgt. Für **Importe von Biomasse** oder von Bioenergieträgern sind jedoch komplexere Maßnahmen nötig.

Ein vielseitig einsetzbares Instrument ist die **Zertifizierung**. Bereits heute werden Biokraftstoffe, die in die EU importiert werden, bezüglich verschiedener Nachhaltigkeitskriterien zertifiziert. Nur wenn eine festgelegte Mindestgröße an Treibhausgaseinsparungen gegenüber fossilen Kraftstoffen nachgewiesen wird, können sie auf die Biokraftstoffquote angerechnet werden. Neben den Treibhausgasemissionen kann ein Zertifizierungssystem auch helfen, soziale und ökologische Nachhaltigkeitskriterien zu überprüfen. Wird ausschließlich die Biomasse zertifiziert, die zur Energiegewinnung eingesetzt wird, besteht jedoch weiterhin das Problem der indirekten

Landnutzungseffekte. Um dieses Problem zu lösen, müssten alle Importe von Biomasse – inklusive Nahrungs- und Futtermittel – den gleichen Kriterien unterliegen.

Über einen **Grenzsteuerausgleich** könnten die Treibhausgasemissionen von Importen besteuert werden. Aufgrund des europäischen Binnenmarktes müsste der Grenzsteuerausgleich von der Europäischen Union eingeführt werden. Eine weitere Alternative, um eine Gleichbehandlung von heimischer und importierter Biomasse sicherzustellen, ist die **Integration von in Importen enthaltenen Treibhausgasemissionen in das Europäische Emissionshandelssystem**. Importeure müssten in diesem Fall für die im Ausland bei der Bereitstellung der Biomasse angefallenen Treibhausgasemissionen Emissionsrechte erwerben. Das Ausmaß der „importierten“ THG-Emissionen könnte – wie auch beim Grenzsteuerausgleich – über eine Zertifizierung nachgewiesen werden.

Für die Regulierung von Treibhausgasemissionen besteht mit den beschriebenen Instrumenten eine Auswahl an weit entwickelten und zum Teil bereits erprobten Alternativen. **Ökosystemdienstleistungen** in konkrete Finanzierungs- und Anreizmodelle einzubeziehen, ist hingegen weitaus schwieriger. Besonders relevant für die Bioenergienutzung sind die Auswirkungen auf **Gewässerqualität, Nährstoffkreisläufe und Biodiversität**. Obwohl es theoretische Ansätze zur Bewertung der Ökosystemdienstleistungen gibt, besteht kaum praktische Erfahrung damit, diese in konkreten Politikinstrumenten umzusetzen. Um **eine ökologisch und volkswirtschaftlich sinnvolle Rohstoffbereitstellung anzureizen**, müssten Instrumente entwickelt werden, die die Auswirkungen der Bioenergienutzung in den Landnutzungssystemen umfassend berücksichtigen.

Die Art der Bioenergienutzung wird sich in den kommenden Jahrzehnten voraussichtlich stark wandeln. Zum einen wird die zunehmende Verarbeitung von Rest- und Abfallstoffen **technische Anpassungen** erfordern. Zum anderen sollten Brenn- und Kraftstoffe aus Biomasse als speicherbare, gut zu transportierende Energieträger möglichst in Bereichen genutzt werden, in denen Strom aus Windkraft und Photovoltaik nicht oder nur zu sehr hohen Kosten eingesetzt werden kann. Als **wichtigste zukünftige Einsatzbereiche** gelten derzeit die Bereitstellung von **industrieller Wärme und Kraftstoffen**. Brenn- und Kraftstoffe aus Biomasse können außerdem **Reservekraftwerke** in langen wind- und sonnenarmen Zeiten befeuern und **schwer dämmbare Gebäude** mit Wärme versorgen.

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 CCS (BECCS)** ist dafür eine mögliche Technologie. Eine andere Alternative besteht in der großflächigen Aufforstung von nicht genutzten Flächen. In den globalen Klimaschutzszenarien des Weltklimarats IPCC spielt BECCS eine große Rolle. Es eignen sich jedoch nicht alle Bioenergie-technologien gleich gut für eine CO₂-Abscheidung. Ob Bioenergie zukünftig mit oder ohne CCS eingesetzt werden soll, wird daher einen großen Einfluss auf die Weiterentwicklung der Bioenergienutzung haben.

Ob **CCS als Teil der Klimaschutzstrategie** akzeptiert wird, hat weitreichende Folgen für Energiesystem und Landnutzung. Entscheidet man sich dagegen, entfällt neben BECCS auch Direct Air Capture als eine CO₂-Entnahmetechnologie mit geringem Landbedarf. Da die Zeit drängt, muss dringend eine **gesellschaftliche Diskussion dazu geführt werden, ob und wofür CCS eingesetzt werden soll**. Entscheidet man sich für den Einsatz von CCS, müsste zeitnah eine **Infrastruktur für CO₂-Transport und -speicherung** aufgebaut werden. Als **Erprobungsfeld für BECCS** eignet sich die Prozesswärmeerzeugung mit Biomasse in der **Industrie**, die Herstellung von Biokraftstoffen oder Biomethananlagen. Bei Letzteren ist der Vorteil, dass das CO₂ ohnehin bereits abgeschieden wird, um die geforderte Gasqualität zu erreichen. Anstatt es wie bisher in die Atmosphäre zu entlassen, könnte es komprimiert und zu einer Lagerstätte transportiert werden. Allerdings fällt an einer Biomethananlage nur eine relativ geringe Menge an CO₂ an. Der logistische Aufwand und die Kosten für den Transport pro Tonne abgeschiedenes CO₂ wären daher voraussichtlich höher als bei großen Industrieanlagen oder Bioraffinerien.

Neben der Bedeutung von CCS setzen aber auch die Markteinführung von flüssigen Biokraftstoffen aus Lignozellulose und der Ausbau von KWK-Infrastrukturen entscheidende Randbedingungen, wo Biomasse künftig einen effizienten Beitrag zur sicheren und bezahlbaren Energieversorgung leisten wird.

Flüssige Biokraftstoffe aus Lignozellulose können sowohl mit als auch ohne CCS einen wertvollen Beitrag im Energiesystem leisten, weil sie zum Beispiel im Flug- und Schiffsverkehr Alternativen zu fossilen Kraftstoffen bieten. Statt kohlenstoffhaltiger Kraftstoffe lässt sich in Bioraffinerien auch Wasserstoff erzeugen – so könnten höhere negative Emissionen erreicht werden. Kraftstoffe aus Lignozellulose herzustellen, ist allerdings technisch sehr aufwendig und teuer. Um sie zur Markteinführung zu bringen, bedarf es weiterer **Entwicklung**. Verzichtet man auf diese Option, müssten im Flugverkehr und gegebenenfalls in weiteren Bereichen des Verkehrssektors in größerem Maße strombasierte Kraftstoffe zum Einsatz kommen; deren Herstellung ist ebenfalls aufwendig, teuer und forschungsintensiv.

Bisher wird Lignozellulose vor allem in kleinen Wärme- und Strom-Wärmeerzeugungssystemen (KWK) eingesetzt. Der Einsatz von Biomasse zur Kraftstoffherzeugung erfordert hingegen **Techniken**, die sich nur in größeren Anlagen wirtschaftlich realisieren lassen. Dies bedeutet zum Teil eine Abkehr von der heute praktizierten und gesellschaftlich bevorzugten **dezentralen Bioenergienutzung**. Durch die Einbindung von CCS würde der Trend industrieller Bioenergieproduktion verstärkt. Die Transformation der Bioenergienutzung erfordert daher **neue Beteiligte und Geschäftsmodelle** und bedeutet damit teilweise große Veränderungen für die Akteure vor Ort.

Der Beitrag von KWK-Systemen aus unterschiedlichen Energieträgern wird insbesondere zur Erreichung der Wärmewende diskutiert. Flexible Biomasse-KWK-Technologien sind technologisch weit entwickelt. Sowohl kleine, dezentrale Anlagen als auch größere Anlagen zur Versorgung von Industriebetrieben oder städtischen Gebieten könnten verstärkt zum Einsatz kommen – Letztere langfristig auch in Kombination mit CCS. Damit KWK maßgeblich dazu beitragen kann, die erneuerbare Stromversorgung zu stabilisieren und die Wärmewende voranzutreiben, müssten die notwendigen Investitionen in den **Ausbau der Wärmenetze** systematisch

unterstützt werden. Flexible KWK-Anlagen könnten zwar bereits kurzfristig substantiell zum Klimaschutz beitragen, allerdings stünden dann die Bioenergieträger nicht mehr für die Produktion flüssiger Kraftstoffe zur Verfügung.

Für die Nutzung feuchter Abfälle bietet die Aufbereitung von Biogas zu **Biomethan** eine Option, Bioenergie in verschiedenen Anwendungsbereichen einzusetzen. Die Technik ist marktreif und wird bereits heute angewendet. Biomethan kann im bestehenden Erdgasnetz transportiert und flexibel zur Strom- und Wärmeerzeugung sowie als Kraftstoff eingesetzt werden. Ein sukzessiver Übergang von der heutigen lokalen Biogasnutzung hin zur Biomethanerzeugung könnte durch entsprechende rechtlich-ökonomische Rahmenbedingungen in Gang gesetzt werden.

Die Akzeptanz von CCS, die Markteinführung von flüssigen Biokraftstoffen auf Basis von Lignozellulose und der Ausbau von Wärmenetzen für den Einsatz von KWK bilden damit **drei wichtige Wegweiser** zu unterschiedlichen Entwicklungspfaden für eine systemdienliche Transformation der Bioenergienutzung. Werden alle drei Optionen abgelehnt, wird sich die Nutzung insbesondere von Lignozellulose weniger stark verändern und weiterhin eher in kleineren Anlagen zur Wärme und KWK eingesetzt werden. Auch hier sind – zum Beispiel im Zusammenspiel mit Biokohle – CO₂-Abscheidungen möglich.

Eine umfassende **Bioenergiestrategie** sollte sicherstellen, dass Bioenergie kurz- wie langfristig die Energiewende und das Erreichen der Klimaschutzziele unterstützt, eingebettet ist in ein ausgewogenes System der Land- und Biomassenutzung und von der Gesellschaft unterstützt wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Energiebedarf in den Einsatzgebieten, in denen Bioenergie grundsätzlich attraktiv erscheint, in der Summe weitaus größer ist als die zu erwartenden Bioenergiepotenziale. **Verschiedene Anwendungsfelder werden daher um die Biomassepotenziale konkurrieren.** Für neue Anwendungen müssen teilweise die aktuellen Biomasseströme umgelenkt werden. Ziel einer nationalen Bioenergiestrategie sollte daher sein, rechtlich-ökonomische Rahmenbedingungen so zu setzen, dass die Biomasse vorrangig in diejenigen Anwendungsgebiete gelenkt wird, die bei Abwägung aller relevanten Kriterien am vorteilhaftesten sind. Wie beschrieben ist allerdings heute noch nicht vollständig absehbar, welche das sein werden.

Die **Unsicherheit über die zukünftigen Entwicklungspfade** in Kombination mit den **begrenzten Biomassepotenzialen** und dem **klimapolitischen Handlungsdruck** stellt eine große Herausforderung für Energiepolitik, Entwickler von Bioenergietechnologien und Biomassenutzer dar. Für die Politik stellt sich insbesondere die Frage, ob verschiedene Entwicklungspfade gleichermaßen unterstützt werden sollen, obwohl absehbar ist, dass letztendlich nicht für alle potenziellen Anwendungsfelder ausreichend Biomasse zur Verfügung stehen wird.

Um sowohl kurzfristig als auch langfristig einen größtmöglichen Beitrag der Bioenergie zu Energiesystem und Klimaschutz sicherzustellen, erscheint es notwendig, sowohl die **heute genutzten Bioenergietechnologien weiterzuentwickeln** als auch **perspektivische Technologien** mit potenziell hohem Nutzen für das Gesamtsystem – insbesondere Kraftstofferzeugung und BECCS – **zu erforschen und zu erproben.**

Kurz- bis mittelfristig kann die Treibhausgas- und Umweltbilanz insbesondere der Biogaserzeugung durch den zunehmenden Einsatz von Rest- und Abfallstoffen sowie naturschutznaher Anbaubiomasse (zum Beispiel Gräser) verbessert werden. Der Beitrag zum Energiesystem kann vor allem durch eine **Flexibilisierung** von Bioenergieanlagen (zum Beispiel durch Gas- oder Wärmespeicher), die eine **bedarfsgerechte Erzeugung von Strom und Wärme** ermöglichen, optimiert werden. Durch eine **effizientere Umwandlung der Biomasse in Nutzenergie** (zum Beispiel durch eine bessere Ausnutzung der erzeugten Wärme bei Biogasanlagen oder den Einsatz effizienter Holz-KWK statt reiner Wärmeerzeugung) könnten mit der gleichen Menge eingesetzter Biomasse mehr fossile Brennstoffe ersetzt und folglich ein größerer Beitrag zum Klimaschutz geleistet werden.

Langfristig muss nicht nur das gesamte Energiesystem, sondern auch der industrielle Sektor treibhausgasneutral gestaltet werden. Dafür sind fossile Rohstoffe nicht nur als Energiequelle, sondern auch als Kohlenstoffquelle zu ersetzen, wobei für Letzteres Biomasse und CO₂ infrage kommen. Für eine optimale Biomassenutzung in diesem Kontext sind Konzepte zu entwickeln, zu erproben und gesellschaftlich zu diskutieren, die über die inkrementelle Weiterentwicklung der derzeit etablierten Bioenergie-technologien hinausgehen. Eine Schlüsselrolle können hierbei **Bioraffinerien** spielen, die Kraftstoffe (insbesondere für den Flugverkehr) in Kombination mit anderen Produkten (zum Beispiel chemischen Grundstoffen) erzeugen und so dazu beitragen können, **Kohlenstoffkreisläufe zu schließen**. Eine weitere Schlüsselrolle könnte **BECCS** als eine Technologie spielen, die die Energiebereitstellung mit der CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre verbindet und so dazu beitragen kann, unvermeidbare Emissionen zum Beispiel aus der Landwirtschaft zu kompensieren. Eine weitere Erforschung und Erprobung dieser Technologien könnte den zukünftigen **Handlungsspielraum**, mit Biomasse wichtige Funktionen in Energiesystem und Klimaschutz zu erfüllen, wesentlich erweitern.

Wichtig ist, die **Begrenztheit der Biomassepotenziale klar zu kommunizieren** und für Anwendungsbereiche, für die letztendlich vielleicht keine oder nur wenig Biomasse zur Verfügung stehen wird, rechtzeitig **akzeptable Alternativen zu entwickeln**. Um dies zu unterstützen, sollten die Ziele und Auswirkungen der Bioenergiestrategie für alle beteiligten Akteure transparent gemacht werden.

Eine wichtige Voraussetzung für eine gute Bioenergiestrategie ist, mehr **Systemwissen** zu schaffen. Um **verschiedene Biomassescenarien** zu vergleichen, müssten Energieszenarien zukünftig auch BECCS-Technologien berücksichtigen. Darüber hinaus besteht Forschungsbedarf, um **integrierte Modelle von Energie- und Landnutzungssystemen** weiterzuentwickeln. Damit könnten auch alternative Verwendungsmöglichkeiten von Biomasse und alternative CO₂-Entnahmetechnologien (zum Beispiel Aufforstung) gegenübergestellt werden. Dafür müssen jedoch zunächst die **Potenziale und Risiken der verschiedenen CO₂-Entnahmetechnologien** weiter erforscht werden.

Um ständiges Nachsteuern bei der Bioenergiepolitik zu vermeiden und die Planungssicherheit für die beteiligten Akteure zu erhöhen, könnte ein systematisches **Monitoringsystem** aufgebaut werden. Ziel ist es, anhand geeigneter Indikatoren alle durch die Bioenergie erbrachten Systembeiträge zu bewerten. Das Bewertungssystem könnte auch auf verschiedene Entwicklungspfade angewendet werden, um eine

systemdienliche Entwicklung der Bioenergie zu unterstützen. Die Bewertung sollte regelmäßig an neue Erkenntnisse angepasst werden. Beispielsweise besteht bei den **Treibhausgasemissionen durch indirekte Effekte** (indirekte Landnutzungsänderungen, Dynamik der Kohlenstoffspeicherung in Vegetation und Boden) weiterer Forschungsbedarf.

Eine **Plattform zur Diskussion der Transformationspfade** könnte eine umfassende Bewertung der verschiedenen Entwicklungspfade aus verschiedenen Perspektiven sicherstellen. Teilnehmerinnen und Teilnehmer der nationalen Dialogplattform wären unter anderem Verbände der Energiewirtschaft, Land- und Forstwirtschaft, Umweltverbände, Verbraucherzentralen, Kommunalvertreterinnen und -vertreter sowie Vertreterinnen und -vertreter verschiedener zivilgesellschaftlicher Bereiche und der betroffenen Bevölkerungsgruppen. Die Ergebnisse könnten in das Monitoringsystem einfließen, um insbesondere für neue Technologien wie BECCS möglichst viele Bewertungsaspekte zu berücksichtigen.

Entscheidend ist, in der Diskussion den **klimapolitischen Handlungsdruck** immer im Blick zu behalten. Werden beispielsweise die Risiken von CO₂-Entnahmetechnologien diskutiert, sollte berücksichtigt werden, dass ein Verzicht auf derartige Technologien die Chancen schmälern kann, die Klimaschutzziele zu erreichen. Den Risiken neuer Klimaschutztechnologien stehen daher immer die Risiken des Klimawandels gegenüber.

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 2015-1

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften,
Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina,
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften
(Hrsg.): *Mit Energieszenarien gut beraten. Anforderungen an wissenschaftliche Politikberatung* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2017.

acatech/Leopoldina/Akademienunion 2015-2

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften,
Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina,
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften
(Hrsg.): *Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050. Stabilität im Zeitalter der erneuerbaren Energie* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2017.

acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017-1

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 2017-2

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften,
Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina,
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften
(Hrsg.): *Rohstoffe für die Energiewende: Wege zu einer sicheren und nachhaltigen Versorgung* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), München 2017.

acatech/Leopoldina/Akademienunion 2018

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften,
Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina,
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften
(Hrsg.): *Künstliche Photosynthese. Forschungsstand, wissenschaftlich-technische Herausforderungen und Perspektiven* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), München 2018.

Alexantratos/Bruinsma 2012

Alexantratos, N./Bruinsma, J.: *World agriculture towards 2030/2050: The 2012 revision*, ESA Working Paper, 12: 03, Rom 2012. URL: <http://www.fao.org/docrep/016/ap106e/ap106e.pdf> [Stand: 01.07.2018].

Ausfelder et al. 2017

Ausfelder, F./Drake, F.-D./Erlach, B./Fischedick, M./Henning, H.-M./Kost, C./Münch, W./Pittel, K./Rehtanz, C./Sauer, J./Schätzler, K./Stephanos, C./Themann, M./Umbach, E./Wagemann, K./Wagner, H.-J./Wagner, U.: *»Sektorkopplung« – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems* (Analyse aus der Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2017.

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: 07.08.2018].

Bais et al. 2015

Bais, S./Lauk, C./Kastner, T./Erb, K.: „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./Daioglou, 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“. In: *Climatic Change*, Springer-Verlag 2018. URL: <https://www.scilit.net/article/b716502cccc755056f891ec1df7209ae> [Stand: 07.08.2018].

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].

Benemann 2013

Benemann, J.: „Microalgae for Biofuels and Animal Feeds“. In: *Energies*, 6: 11, 2013, S. 5869–5886.

Biomasseverordnung 2016

Biomasseverordnung vom 21. Juni 2001 (BGBl. I S. 1234), die zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 13. Oktober 2016 (BGBl. I S. 2258) geändert worden ist.

Bioökonomierat 2012

Bioökonomierat: *Nachhaltige Nutzung von Bioenergie. Empfehlungen des BioÖkonomieRats*, Berlin 2012. URL: <http://biooekonomierat.de/fileadmin/templates/publikationen/empfehlungen/BioOEkonmieRat-Empfehlungen-Bioenergie.pdf> [Stand: 28.08.2018].

Bioökonomierat 2015

Bioökonomierat: *Bioenergiepolitik in Deutschland und gesellschaftliche Herausforderungen*. BÖRMEMO 04, 2015. URL: http://biooekonomierat.de/fileadmin/Publikationen/berichte/BOERMEMO_Bioenergie_final.pdf Stand: [28.08.2018].

BMWi 2017-1

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): *Energiedaten: Gesamtausgabe Berlin*, Mai 2017. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html> [Stand: 01.08.2018].

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: 07.08.2018].

Brosowski et al. 2015

Brosowski, A./Adler, P./Erdmann, G./Stinner, W./Thrän, D./Mantau, U./Blanke, C./Mahro, D./Hering, T./Reinhold, G.: *Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen. Status quo in Deutschland*, Schriftenreihe Wachsende Rohstoffe, Bd. 36., 2015.

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.

Bundesregierung 2012

Bundesregierung: *Roadmap Bioraffinerien im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe*, Mai 2012. URL: https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/RoadmapBioraffinerien.pdf?__blob=publicationFile [Stand: 13.08.2018].

Covington 1981

Covington, W.: „Changes in Forest Floor Organic Matter and Nutrient Content Following Clear Cutting in Northern Hardwoods“. In: *Ecology*, 62: 1, 1981, S. 41–48.

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.

DBFZ 2012

Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ): *DBFZ Report Nr. 13. Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen zur Bioenergiebereitstellung*, Leipzig 2012. URL: https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_13.pdf [Stand: 18.10.2018].

DBFZ 2015

Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ): *Stromerzeugung aus Biomasse*, 2015 (Vorhaben Iia Biomasse Zwischenbericht Mai 2015). URL: https://www.dbfz.de/fileadmin/eeg_monitoring/berichte/o1_Monitoring_ZB_Mai_2015 [Stand: 18.07.2018].

DBFZ 2016

Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ): *Monitoring Biokraftstoffsektor*, 3. Auflage, DBFZ Report Nr. 11. 2017. 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].

DGE 2015

Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V. (DGE): *Weniger Fleisch auf dem Teller schont das Klima. DGE unterstützt Forderungen des WWF nach verringertem Fleischverzehr*, Presseinformation DGE aktuell, 05/2015 vom 01.04.2015. URL: <https://www.dge.de/presse/pm/weniger-fleisch-auf-dem-teller-schont-das-klima/> [Stand: 18.07.2018].

Dehoust et al. 2010

Dehoust, G./Schüler, D./Vogt, R./Giegrich, J.: *Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz*, Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, März 2010. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3907.pdf> [Stand: 09.08.2018].

Dena 2017

Deutsche Energie-Agentur (Dena): *E-Fuels – the Potential of Electricity Based Fuels for Low Emission Transport in the EU*, 2017. URL: [https://shop.dena.de/sortiment/detail/?tx_zrwschop_pi1\[pid\]=562](https://shop.dena.de/sortiment/detail/?tx_zrwschop_pi1[pid]=562) [Stand: 18.07.2017].

Deutscher Bundestag 2018

Deutscher Bundestag: Drucksache 19/821 Antrag von Abgeordneten der FDP: *Klimaziele verantwortungsbewusst erreichen*, 2018. URL: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/008/1900821.pdf> [Stand: 07.08.2018].

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: 07.08.2018].

EBC 2012

European Biochar Certificate (EBC): *Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. Version 6.4E of 2nd June 2018* European Biochar Foundation, Arbaz, Switzerland 2012.

ECOFYS 2016

ECOFYS Netherlands B. V.: *Methodologies for the Identification and Certification of Low ILUC Risk Biofuels. Final Report*, im Auftrag der Europäischen Kommission, Utrecht 2016.

EEG 2017

Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 17. Dezember 2018 (BGBl. I S. 2549) geändert worden ist.

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. 2009

Erb, K.-H./Haberl, H./Krausmann, F./Lauk, C.: *Eating the Planet: Feeding and fuelling the world sustainably, fairly and humanely – a scoping study*. Report commissioned by 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. 2016

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

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*, 553: 10, 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.

Ernst & Young 2011

Ernst & Young: *Biofuels and indirect land use change. The case for mitigation*, im Auftrag von ePURE (European Renewable Ethanol Association), IUCN (International Union for Conservation of Nature), Neste Oil, PANGEA (Partners for Euro-African Green Energy), Riverstone Holdings, Shell, 2011.

EU 2009

Europäisches Parlament und Rat: Richtlinie 2009/28/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG (RL 2009/28/EG), Amtsblatt der Europäischen Union (Abl.) Nr. L 140/16 vom 05.06.2009.

EU Commission 2017

European Commission: *The Future of Food and Farming*, Brüssel 2017. URL: https://ec.europa.eu/agriculture/sites/agriculture/files/future-of-cap/future_of_food_and_farming_communication_en.pdf [Stand: 07.08.2018].

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/TEXT/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].

Europäischer Rechnungshof 2016

European Court of Auditors: *Is the Commission's system for performance measurement in relation to farmers' incomes well designed and based on sound data?* Special Report 2016 No. 1, Luxembourg. URL: https://eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR16_01/SR_FARMERS_EN.pdf [Stand: 07.08.2018].

FAO 2010

Food and Agricultural Organisation of the United Nations (FAO): *Global Forest Resources Assessment 2010*, Rom, Italien, 2010.

FAOSTAT 2012

FAOSTAT: „FAO Statistics“. In: *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Rom, Italien, 2012, S. 352.

Finkbeiner 2014

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

Fischedick/Grunwald 2017

Fischedick, M./Grunwald, A.: *Pfadabhängigkeiten in der Energiewende: Das Beispiel Mobilität* (Analyse aus der Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2017.

Forest Research 2018

Forest Research – The Research Agency of the Forestry Commission (Hrsg.): *Carbon impacts of biomass consumed in the EU. Supplementary analysis and interpretation for the European Climate Foundation*, 2018. URL: <https://europeanclimate.org/wp-content/uploads/2018/05/CIB-Summary-report-for-ECF-v10.5-May-20181.pdf> [Stand: 25.10.2018].

Fritsche/Eberle 2007

Fritsche, U./Eberle, U.: *Treibhausgasemissionen durch Erzeugung und Verarbeitung von Lebensmitteln*, 2007. URL: <https://www.oeko.de/oekodoc/328/2007-011-de.pdf> [Stand: 07.08.2018].

Fuss et al. 2018

Fuss, S./Lamb, W. F./Callaghan, M. W./Jérôme Hilaire, J./Creutzig, F./Amann, T./Beringer, T./de Oliveira Garcia, W./Hartmann, J./Khanna, T.: „Negative emissions – Part 2: Costs, potentials and side effects“. In: *Environmental Research Letters*, 13: 063002, 2018.

Geden 2017

Geden, O.: „Treibhausgasneutralität als Klimaziel priorisieren. Die EU und Deutschland sollten eine ehrgeizigere und zugleich pragmatischere Klimapolitik betreiben“. In: *SWP-Aktuell*, 2017/A 74, November 2017. URL: <https://www.swp-berlin.org/publikation/treibhausgasneutralitaet-als-klimaziel-priorisieren/> [Stand: 19.07.2018].

Global CCS Institute 2017

Global CCS Institute: *Global CCS Status Report 2017*. URL: <http://www.globalccsinstitute.com/status> [Stand: 01.08.2018].

Haberl et al. 2012

Haberl, H./Sprinz, D./Bonazountas, M.: „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].

Hararuk et al. 2017

Hararuk, O./Shaw, C./Kurz, W.: „Constraining the organic matter decay parameters in the CBM-CFS3 using Canadian National Forest Inventory data and a Bayesian inversion technique“. In: *Ecological Modelling*, 364, 2017, S. 1–12.

Hennig/Gawor 2012

Hennig, C./Gawor, M.: „Bioenergy production and use: Comparative analysis of the economic and environmental effects“. In: *Energy Conversion and Management*, 63, 2012, S. 130–137.

Hildebrand et al. 2018

Hildebrand, J./Rau, I./Schweizer-Ries, P.: „Beteiligung und Akzeptanz – ein ungleiches Paar“. In: Holstenkamp, L./Radtko, J. (Hrsg.): *Handbuch Energiewende und Partizipation*, Wiesbaden: Springer VS 2018, S. 195–209.

IEA 2017

International Energy Agency (IEA): *World Energy Outlook 2017*.

IIASA 2015

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

IPCC 2006

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*, 2006.

IPCC 2014

Weltklimarat (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: <http://www.ipcc.ch/report/sr15/> [Stand: 09.11.2018].

IZES et al. 2018-1

Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme (IZES) et al.: *Analyse der gesamtwirtschaftlichen Effekte von Biogasanlagen*, gefördert im „Energie- und Klimafonds“ der FNR e.V., unveröffentlicht, Stand März 2018.

IZES et al. 2018-2

Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme (IZES) et al.: *Naturschutzfachliche Optimierung der Rohstoffbereitstellung für Biomasseanlagen – Optimierung und Weiterentwicklung von Biomasse-Betriebskonzepten unter Berücksichtigung einer Substitution von Substraten durch Reststoffe und Materialien von Extensivgrünland und Landschaft*, gefördert durch BfN, unveröffentlicht, Stand April 2018.

Kabasci et al. 2011

Kabasci, S./Ehrenstein, U./Strauch, S./Schweizer-Ries, P./Hildebrand, J.: *Imageanalyse und Imagewandel der Biogastechnologie unter Einbeziehung sozialwissenschaftlicher und technologischer Aspekte*. Projektabschlussbericht für das BMU, 2011.

Kahl/Simmel 2017

Kahl, H./Simmel, L.: *Europa- und verfassungsrechtliche Spielräume einer CO₂-Bepreisung in Deutschland*, Stiftung Umweltenergie recht (Hrsg.) Würzburger Studien zum Umweltenergie recht Nr. 6, Oktober 2017. URL: http://stiftung-umweltenergie recht.de/wp-content/uploads/2017/10/stiftung_umweltenergie recht_wuestudien_06_co2_bepreisung.pdf [Stand: 07.08.2018].

Klepper/Thrän 2019

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

Kranert et al. 2012

Kranert, M./Hafner, G./Barabossz, J./Schneider, F./Schuller, H./Leverenz, D./Kölbig, A./Lebersorger, S./Scherhauser, S.: *Ermittlung der weggeworfenen Lebensmittel m e n g e n und Vorschläge zur Verminderung der Wegwerfrate bei Lebensmitteln in Deutschland*, 2012. URL: https://www.zugutfuertietonne.de/fileadmin/_migrated/content_uploads/Studie_Lebensmittelabfalle_Kurzfassung_02.pdf [Stand: 18.07.2018].

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.

Korpel 1995

Korpel, S.: *Der Urwälder der Westkarpaten*, Stuttgart/Jena/New York: Gustav Fischer Verlag 1995.

Kortsch et al. 2015

Kortsch, T./Hildebrand, J./Schweizer-Ries, P.: „Acceptance of biomass plants – Results of a longitudinal study in the bioenergy-region Altmark“. In: *Renewable Energy*, 83, 2015, S. 690–697.

Krausmann et al. 2008

Krausmann, F./Erb, K.-H./Gingrich, S.: „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.

Kummu et al. 2012

Kummu M./de Moel, H./Porkka, M./Siebert, S.: „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.

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.

Leopoldina 2013

Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften: *Bioenergie – Möglichkeiten und Grenzen* (Stellungnahme zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), Halle/Saale 2013.

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), September 2011. URL: https://www.foeeurope.org/sites/default/files/publications/europe_global_land_demand_oct111.pdf [Stand: 21.09.2018].

Lutz/Bergmann 2017

Lutz, L. M./Bergmann, M.: „Transdisziplinarität: Forschungsansatz für die Energiewende“. In: Holstenkamp, L./Radtko, J. (Hrsg.): *Handbuch Energiewende und Partizipation*. Wiesbaden: Springer VS 2017, S. 43–56.

Majer et al. 2018

Majer, S./Wurster, S./Moosmann, D./Ladu, L./Sumfleth, B./Thrän, D.: „Gaps and Research Demand for Sustainability Certification and Standardisation in a Sustainable Bio-Based Economy in the EU“. In: *Sustainability*, 10, 2018.

Meyer-Ohlendorf/Relih-Larsen 2017

Meyer-Ohlendorf, N./Relih-Larsen, A.: *EU climate policies: friend, foe or bystander to forest restoration and carbon sinks? EU Climate Governance for restoring degraded forests*. Discussion Paper, Ecologic Institute, 12 October 2017.

Millinger/Thrän 2018

Millinger, M./Thrän, D.: „Biomass Price Development Inhibit Biofuel Investments and Research in Germany – the Crucial Future Role of High Yields“. In: *Journal of Cleaner Production*, 172, 2018, S. 1654–1663.

Mueller et al. 2012

Mueller, N./Gerber, J./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. 2014

Mueller-Langer, F./Majer S./O’Keeffe S.: „Benchmarking biofuels – a comparison of technical, economic and environmental indicators“. In: *Energy, Sustainability and Society*, 4: 20, 2014.

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.

Muller et al. 2017

Muller, A./Schader, C./El-Hage Scialabba, N./Brüggemann, J./Isensee, A./Erb, K.-H./Smith, P./Klocke, P./Leiber, F./Stolze, M./Niggli, U.: „Strategies for feeding the world the world more sustainably with organic agriculture“. In: *Nature Communications*, 8: 1290, 2017.

Naudts et al. 2016

Naudts, K./Chen, Y./McGrath, J./Ryder, J./Valade, A./Otto, J./Luyssaert, S.: „Europe’s forest management did not mitigate climate warming“. In: *Science*, 351, 2016, S. 597–600.

Neumann 2017

Neumann, H.: „Energiepflanzen sind greening-fähig“. In: *Topagrar Online*, 21.10.2017. URL: <https://www.topagrar.com/news/Energie-Energenews-Energiepflanzen-sind-greening-faehig-8785454.html> [Stand: 09.08.2018].

Norsker et al. 2011

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

OECD/IEA 2017

Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD)/International Energy Agency (IEA): *Technology Roadmap: Delivering Sustainable Bioenergy*, 2017. URL: <https://webstore.iea.org/technology-roadmap-delivering-sustainable-bioenergy> [Stand: 25.07.2018].

Ohlhorst 2009

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

Pe’er et al. 2016

Pe’er, G./Zinngrebe, Y./Hauck, J./Schindler, S./Dittrich, A./Zingg, S./Tschardt, T./Oppermann, R./Sutcliffe, L. M. E./Sirami, C./Schmidt, J./Hoyer, C./Schleyer, C./Lakner, S.: „Adding Some Green to the Greening: Improving the EU’s Ecological Focus Areas for Biodiversity and Farmers“. In: *Conservation Letters*, 2016. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/conl.12333> [Stand: 07.08.2017].

Pingoud 2018

Pingoud, K./Ekholm, T./Sievänen, R./Huuskonen, S./Hynnen J.: „Trade-Offs between Forest Carbon Stocks and Harvests in a Steady State – A Multi-Criteria Analysis“. In: *Journal of Environmental Management*, 210, 2018, S. 96–103.

Plevin et al. 2010

Plevin, R. J./O’Hare, M./Jones, A. D./Torn, M. S./Gibbs, H. K.: „Greenhouse Gas Emissions from Biofuels- Indirect Land Use Change are Uncertain but May Be Much Greater than Previously Estimated“. In: *Environmental & Technology*, 44: 21, 2010, S. 8015–8021. URL: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es101946t> [Stand: 18.07.2018].

Plevin et al. 2014

Plevin, J./Delucchi, A./Creutzig, F.: „Using Attributional Life Cycle Assessment to Estimate Climate-Change Mitigation Benefits Misleads Policy Makers“. In: *Journal of Industrial Ecology*, 18: 1, 2014, S. 73–83. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jiec.12074> [Stand: 18.07.2018].

REN21 2016

Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (RNE21): *Renewables 2016 Global Status Report*. In: REN21 Secretariat, Paris 2016. URL: <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/> [Stand: 01.08.2018].

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.

Rodi 2017

Rodi, M.: „Kohleausstieg – Bewertung der Instrumentendebatte aus juristischer und rechtspolitischer Sicht“. In: *EnWZ*, 6, 2017. URL: <https://www.ikem.de/kohleausstieg-bewertung-der-instrumentendebatte-aus-juristischer-und-rechtspolitischer-sicht/> [Stand: 07.08.2018].

Rönsch 2019

Rönsch, C.: *Entwicklung einer Methode zur Verwendung der Daten des Schornsteinfegerhandwerks für die energiewirtschaftliche Berichterstattung*, Universität Leipzig, im Erscheinen 2019.

RSB 2018

Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB): *UPM Biofuels gains the world's first RSB low indirect land use change (ILUC) risk certification for its feedstocks*, 25. April 2018. URL: <https://rsb.org/2018/04/25/upm-biofuels-gains-the-worlds-first-rsb-low-indirect-land-use-change-iluc-risk-certification-for-its-feedstocks/> [Stand: 24.08.2018].

Ruser et al. 2017

Ruser, R./Fuß, R./Andres, M./Hegewald, H./Kesenheimer, K./Köbke, S./Räbiger, T./Suarez Quinones, T./Augustin, J./Christen, O./Dittert, K./Kage, H./Lewandowski, I./Prochnow, A./Stichnothe, H./Fless, H.: „Nitrous oxide emissions from winter oilseed rape cultivation“. In: *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 249, 2017, S. 57–69.

Sims et al. 2006

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

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.

Smith et al. 2014

Smith, P./Ahammad, H./Clark, H./Dong, H./Elsiddig, E. A./Haberl, H./Harper, R./Hourse, J./Jafari, M./Masera, O./Mbow, C./Ravindranath, N. H./Rice, R. 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.

Schütte et al. 2011

Schütte, A./Irrgang, J./Schweizer-Ries, P.: *Sozial- und verhaltenswissenschaftliche Aspekte der Kraftstofferzeugung und -nutzung aus Biomasse – Akzeptanz von Biokraftstoffen*, Projektschlussbericht BMU, 2011.

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, 2009.

Schulze et al. 2015

Schulze, E.-D./Aas, G./Grimm, G./Gossner, M. M./Walentowski, H./Ammer, C./Kühn, I./Bouriaud, O./von Gadow, K.: „A review on plant diversity and forest management of European beech forests“. In: *European Journal of Forest*, 135: 1, 2015, S. 51–61.

Schulze et al. 2019

Schulze, E. D./Stupak, I./Hessemöller, D.: „The climate mitigation potential of managed versus unmanaged spruce and beech forest in central Europe“. In: Pires J. C. M./Gonçalves A. (Hrsg.): *Bioenergy with carbon Capture and Storage: nature and technology can help*, Wiley 2018, im Erscheinen, voraussichtlich März 2019.

Humboldt-Viadrina Governance-Platform 2018

Humboldt-Viadrina Governance-Plattform: *Bioenergiepotenziale richtig bewerten und nutzen, Nebenwirkungen eindämmen. Wie kann eine langfristige Bioenergiestrategie gestaltet sein?*, Bericht ETR/02-2018 zum Trialog am 23.02.2018. URL: https://www.governance-platform.org/wp-content/uploads/2018/10/HVGP_ETR_sb8-Bericht-Bioenergiestrategie_final.pdf [Stand: 12.11.2018].

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. 5169–5179.

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*, 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.: *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/Pfeiffer 2015

Thrän, D./Pfeiffer, D.: *Meilensteine 2030. Elemente Und Meilensteine Für Die Entwicklung Einer Tragfähigen Und Nachhaltigen Bioenergiestrategie*, Vol. 18. Schriftenreihe des Förderprogramms „Energetische Biomassennutzung“, Leipzig: DBFZ 2015.

UBA 2014

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.): *Ökologische Innovationspolitik – Mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzungen von Biomasse*, 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: 01.08.2018].

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 2016-1

Umweltbundesamt (UBA): *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.

UBA 2016-2

Umweltbundesamt (UBA): Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050 (Texte 72/2016), Dessau-Roßlau 2016. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaschutzbeitrag-des-verkehrsbis-2050> [Stand: 27.09.2017].

UBA 2017

Umweltbundesamt (UBA): *Klimaschutz im Stromsektor 2030 – Vergleich von Instrumenten zur Emissionsminderung* (Stand Februar 2018), 2017. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/2017-01-11_cc_02-2017_strommarkt_endbericht.pdf [Stand: 07.08.10.2018].

UBA 2018

Umweltbundesamt (UBA): Primärenergieverbrauch. 16. Februar 2018. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergieverbrauch#textpart-2>. [Stand: 08.08.2018].

UFZ 2015

Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ): *Biodiversität und Wald*, 2015. URL: <https://www.ufz.de/index.php?de=36065> [Stand: 18.07.2018].

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: 07.08.2018].

van Vuuren et al. 2018

van Vuuren, D./Stehfest, E./Gernaat, D./van den Berg, M./Bijl, D. L./Sytze de Boer, H./Daioglou, V./Doelman, J. C./Edelenbosch, O. Y./Harmsen, M./Hof, A. F./van Sluisveld, M. A. E.: „Alternative pathways to the 1.5 °C target reduce the need for negative emission technologies“. In: *Nature Climate Change*, 8, 2018, S. 391–397.

WBA 2017

World Bioenergy Association (WBA): *Global Bioenergy Statistics 2017*. URL: https://worldbioenergy.org/uploads/WBA%20GABS%202017_hq.pdf [Stand: 07.08.2018].

Weiser et al. 2014

Weiser, C./Zeller, V./Reinicke, F./Wagner, B./Majer, S./Vetter, A./Thran, 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./Verweij, P. A./van Vuuren, D./van Meijl, H./Faaij, A.: „Indirect land use change: review of existing models and strategies for mitigation“. In: *Biofuels*, 3: 1, 2016, S. 87–100.

Wirsenius 2003

Wirsenius, N.: „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*. Präsentation bei der BIS-Tagung Januar 2012. Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung der Universität Göttingen 24.01.2012, 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: 03.08.2018].

Wüste et al. 2011

Wüste, A./Schmuck, P./Eigner-Thiel, S./Ruppert, H./Karpenstein-Machan, M./Sauer, B.: „Gesellschaftliche Akzeptanz von kommunalen Bioenergieprojekten im ländlichen Raum am Beispiel potenzieller Bioenergiedörfer im Landkreis Göttingen“. In: *Umweltpsychologie*, 15:2, S. 135–51, 2011.

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.

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	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
----------------------	--

Wissenschaftliche Referentinnen

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

Gutachterinnen und Gutachter

Prof. Dr. Anita Angels	Universität Hamburg
Prof. Dr. Martin Junginger	Universität Utrecht
Prof. Dr. Iris Lewandowski	Universität Hohenheim
Heino von Meyer	OECD
Prof. Dr. Kurt Wagemann	Dechema

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	ehemals 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 Expertenkommission 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

Finanzierung

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

Die Stellungnahme wurde im November 2018 vom Kuratorium des Akademienprojekts verabschiedet.

Die Akademien danken allen Autorinnen und Autoren sowie Gutachterinnen und Gutachtern für ihre Beiträge. Die Inhalte der Stellungnahme liegen in alleiniger Verantwortung der Akademien.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Deutsche Akademie der Naturforscher
Leopoldina e. V.
Nationale Akademie der Wissenschaften

acatech – Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften e. V.

Union der deutschen Akademien
der Wissenschaften e. V.

Jägerberg 1
06108 Halle (Saale)
Tel.: 0345 47239-600
Fax: 0345 47239-919
E-Mail: leopoldina@leopoldina.org

Karolinenplatz 4
80333 München
Tel.: 089 520309-0
Fax: 089 520309-9
E-Mail: info@acatech.de

Geschwister-Scholl-Straße 2
55131 Mainz
Tel.: 06131 218528-10
Fax: 06131 218528-11
E-Mail: info@akademienunion.de

Berliner Büro:
Reinhardtstraße 14
10117 Berlin

Hauptstadtbüro:
Pariser Platz 4a
10117 Berlin

Berliner Büro:
Jägerstraße 22/23
10117 Berlin

Die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften unterstützen Politik und Gesellschaft unabhängig und wissenschaftsbasiert bei der Beantwortung von Zukunftsfragen zu aktuellen Themen. Die Akademiemitglieder und weitere Experten sind hervorragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem In- und Ausland. In interdisziplinären Arbeitsgruppen erarbeiten sie Stellungnahmen, die nach externer Begutachtung vom Ständigen Ausschuss der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina verabschiedet und anschließend in der *Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung* veröffentlicht werden.

Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung

ISBN: 978-3-8047-3917-8