

BEPASO

Bioökonomie als gesellschaftlicher Wandel, Modul 2 (1): BEPASO – Bioökonomie 2050: Potenziale, Zielkonflikte, Lösungsstrategien – TP UFZ

Endbericht zu FKZ:

031B0232E – Teilprojekt des UFZ

Autoren:

Musonda, Frazer; Millinger, Markus; Manske, David; Thrän, Daniela (UFZ)



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhalt

Inhalt	2
1. Zusammenfassung	6
1.1 <i>Motivation und Zielstellung</i>	6
1.2 <i>Methode</i>	6
1.3 <i>Ergebnisse</i>	7
2. Einleitung	8
2.1 <i>Hintergrund</i>	8
2.2 <i>Zielstellung</i>	8
3. Methodik	9
3.1 <i>Identifizierung von Biochemikalien</i>	9
3.2 <i>Modellierung</i>	10
3.2.1 <i>Modellbeschreibung</i>	11
3.2.2 <i>Zielfunktionen</i>	12
3.2.3 <i>Einschränkungen</i>	12
3.2.4 <i>Modellkopplung</i>	13
3.2.5 <i>Sensitivitätsanalyse</i>	14
4. Ergebnisse	15
5.1 <i>Sensitivitätsanalyse</i>	16
6. Schlussfolgerungen	17
A. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	19
B. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	19
C. Voraussichtlicher Nutzen, insb. Verwertbarkeit des Ergebnisses	19
D. Fortschritte bei anderen Stellen	19
E. Veröffentlichungen des Ergebnisses	20
Literaturverzeichnis	20

Teil I

i Aufgabenstellung

Die Kernfragen im Forschungsvorhaben sind:

- Welche gesellschaftlichen und politischen Prozesse müssen stattfinden, um den Übergang zu einer nachhaltigen Nutzung von Biomasse in Produktion und Konsum zu stimulieren?
- Was sind potentielle Elemente einer nachhaltigen „Bioökonomie 2050“ in Deutschland?
- Wird die globale Verfügbarkeit von Biomasse (Schwerpunkt Land- und Forstwirtschaft) den Transformationsprozess behindern? Wie wird sich der internationale Handel von Biomasse entwickeln? Welcher Beitrag zum Klimaschutz ist zu erwarten?
- Welchen Einfluss wird der Klimawandel auf die Biomasseproduktion, den Wasserhaushalt, die Wasserqualität und damit auf die „Bioökonomie 2050“ haben?
- Steht die zusätzliche Nachfrage nach Biomasse im Widerspruch zu anderen Zielen wie Klimaschutz und Biodiversität? Welche Lösungsstrategien ergeben sich?
- Wie beurteilen zentrale Stakeholder und die Bevölkerung die Zielkonflikte und welche Auswirkungen haben diese auf die Akzeptanzfähigkeit der Transformationsprozesse? Wie müssen Transformationsprozesse gestaltet werden, um gesellschaftlichen Anforderungen und Erwartungen gerecht zu werden?
- Welche Rolle kommt der Politik in der Gestaltung einer gesellschaftlich akzeptierten Transformation zur „Bioökonomie 2050“ zu?

ii Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Bearbeitung des Vorhabens erfolgte in einem Konsortium aus fünf wissenschaftlichen Einrichtungen, die Expertisen zu den im Projekt behandelten Fragestellungen aufweisen:

- Johann Heinrich von Thünen Institut, Bundesforschungsanstalt für Ländliche Räume, Wald und Fischerei (TI), Braunschweig (Koordination des Verbundprojektes)
- Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ), Leipzig
- Center for Environmental Systems Research (CESR), Universität Kassel, Kassel
- Nova-Institut (NOVA), Hürth
- Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Leipzig

Die Bearbeitung des Forschungsvorhabens erfolgte zwischen dem 01.12.2016 und 31.03.2020. Das für das UFZ zu Verfügung stehende Budget betrug 167.490,00 €

iii Planung und Ablauf des Vorhabens

AP3: Modellbasierte Abschätzung ökonomischer und ökologischer Folgen

Vor dem Hintergrund gesamtwirtschaftlicher Effekte (z. B. Wirtschaftswachstum und Einkommensentwicklung) und den Entwicklungen neuer Bioökonomiebereiche (Energie, Chemie) werden die ökonomischen Auswirkungen auf die Biomasse produzierenden Sektoren (z. B. Mengen und Preisentwicklungen auf den Agrar- und Holzmärkten) mit Modellen quantifiziert. Mit BENSIM/BENOPT werden dabei die Entwicklungen des Wettbewerbes zwischen den einzelnen Technologieoptionen dargestellt. Parallel dazu werden die Klimaeffekte abgeschätzt. Zur Abschätzung der globalen Landnutzungseffekte und Umweltwirkungen (z. B. Wasserqualität, Biodiversität, Gefahr von Bodendegradation) werden bio-physikalische Modellberechnungen durchgeführt. Die globale Bilanzierung der CO₂-Flüsse durch Landnutzungsänderungen zeigt dabei mögliche Verlagerungen von Kohlenstoffemissionen in andere Regionen auf. Zur Vorbereitung der jeweiligen Dialoge werden zeitnah aktualisierte Modellergebnisse an AP4 bzw. an die jeweiligen Szenario-Meetings an AP2 übermittelt.

- Task 3.1: Übersetzen der Szenarien aus AP2 in Modellparameter. Definition und Harmonisieren entscheidender Annahmen und Modellgrößen (z.T. aus AP1)
- Task 3.2: Definition und Einrichten der Schnittstellen zwischen den ökonomischen und biophysikalischen Modellen. Simulation konsistenter Szenarien und Ergebnisanalyse
- Task 3.3: Auswerten und Aufbereiten der Modellergebnisse, Bewerten der Szenarien hinsichtlich auftretender Zielkonflikte als Input für Analysen in AP2 und AP4
- Task 3.4: Anpassen und erneute Simulation nach Prüfen der gesellschaftlichen Akzeptanz in AP4 (iteratives Vorgehen)

Meilensteine

- M3.1: Ergänzen der in BEPASO eingesetzten Modelle zur umfassenden Abbildung der bio-basierten Sektoren und Branchen (Monat 18)
- M3.2: Erfolgreiche Kopplung der Modelle sowie Abstimmen und Harmonisieren von Annahmen für die Szenarien (Monat 24)
- M3.3: Berechnen von Szenario-Ergebnissen und Vorlage der Ergebnisse (Monat 28)
- M3.4: Sensitivitätsanalyse, Ergebnisauswertung und Dokumentation der Modellergebnisse (Monat 36)

Deliverables

- D3.1: Bericht für die Modellerweiterungen mit Beiträgen von BENSIM, LandSHIFT, MAGNET, GFPM (Monat 18)
- D3.2: Bericht für die Umsetzung der Modellkopplung mit Beiträgen von BENSIM, LandSHIFT, MAGNET, GFPM (Monat 25)
- D3.3: Darstellen der Modellergebnisse für Dialoge mit Bürgern und Stakeholdern (Monat 28)
- D3.4: Umfassende Berichte zu den Sensitivitätsanalysen, Ergebnisauswertung und Dokumentation der Modellergebnisse (Monat 36)

Verbindung zu anderen Arbeitspaketen

- AP1 liefert Informationen zur Prüfung und Aktualisierung der Datenbasis der Modelle
- AP2 liefert die Szenariendefinitionen
- AP4 Rückspiegelung der Modellergebnisse, Bewertung von Zielkonflikten und gesellschaftlicher Akzeptanz
- AP5: Die Modellergebnisse fließen in die Synthese und Ableitung der Rahmenbedingungen in AP5 mit ein

iv Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das Modell BENSIM simuliert den Wettbewerb ausgewählter Bioenergietechnologien zur energetischen Nutzung (Kraftstoff bzw. Strom / Wärme) eines gegebenen Primärenergieangebots von Biomasse in Deutschland bis zum Jahr 2050. BENSIM liefert Aussagen darüber, welche Bioenergietechnologien sich wann und unter welchen Bedingungen gegen andere Bioenergietechnologien durchsetzen.

Das BENSIM-Modell wurde im Rahmen des Vorhabens „Meilensteine 2030 – Elemente und Meilensteine für die Entwicklung einer tragfähigen nachhaltigen Bioenergiestrategie“ (FKZ-Nr. 03MAP230 und 03KB065) erprobt (Millinger et al. 2015, Thrän et al. 2015). Außerdem wurde im Projekt „Meilensteine 2030“ eine Kopplung mit den Modellen MAGNET, LandSHIFT und BENSIM vorgenommen (Thrän et al. 2015; Thrän et al. 2017; Ponitka et al. 2016; Thrän et al. 2016), worauf in diesem Projekt weiter aufgebaut wird..

Das BENSIM-Simulationsmodell wurde im Laufe des Projektes zu einem Optimierungsmodell (BENOPT) weiterentwickelt. Außerdem wurde im Modell der Detailgrad im Verkehrssektor erweitert (Millinger et al. 2017a; Millinger et al. 2018b; Millinger et al. 2019b; Millinger 2019c; Meisel et al. 2019; Meisel et al. 2020; Millinger 2018a; Millinger 2019a), sowie ein detailliertes Modell zur Analyse des Wärmesektors entwickelt (Daniela Thrän et al.; Jordan et al. 2019; Jordan et al. 2020). Desweiteren

wurden Analysen zum Stromsektor (Millinger et al. 2017b; Tafarte et al. 2020) und zur Sektorkopplung (Millinger et al. 2020), sowie sektorübergreifende Analysen durchgeführt (Thrän et al. 2019). Erkenntnisse aus den genannten Arbeiten wurden in diesem Vorhaben berücksichtigt.

Seitens der Verbundpartner bestehen keine Schutzrechte, die berücksichtigt werden müssten.

v Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Arbeitsteilung zwischen den Projektpartnern ist in den Arbeitspaketen (APs) geregelt.

Das UFZ war für die Weiterentwicklung und die Modellierung von BENSIM/BENOPT, sowie für die Modellkopplung von BENSIM/BENOPT, MAGNET, LandSHIFT und GFPM im AP 3 verantwortlich. Das UFZ hatte darüber hinaus eine unterstützende Rolle in den anderen APs, insbesondere bei der Diskussion und Quantifizierung der Szenarien (Tabelle 1). Externe Partner waren nicht am Projekt beteiligt.

Tabelle 1: Beteiligung des UFZ in den Arbeitspaketen

AP #	PM	Beteiligung des UFZ
AP 1	1 PM	Unterstützen bei der Darstellung des Status Quo der Bioökonomie
AP 2	1 PM	Unterstützen bei der Entwicklung von Szenarien
AP 3	32 PM	Ergänzen & Anpassen des BENSIM-Modells; Modellkopplung
AP 4	1 PM	Unterstützen bei holzbasierten Themen
AP 5	1 PM	Unterstützen bei der Zusammenfassung der Ergebnisse

Teil II – inhaltlicher Projektbericht

1. Zusammenfassung

1.1 Motivation und Zielstellung

Das Forschungsvorhaben zielte darauf ab, verschiedene Szenarien eines Wandels unserer gegenwärtigen Wirtschaftsweise hin zu einer nachhaltigeren „Bioökonomie 2050“ und gesellschaftlich akzeptierte Transformationsprozesse zu beschreiben. Dazu wurden, ausgehend von der derzeitigen Land- und Ressourcennutzung und der Verfügbarkeit von Biomasse (v. a. aus Land- und Forstwirtschaft) sowie deren Verwendungen, mögliche Pfade für die Transformation einer fossil-basierten Wirtschaftsweise zu einer bio-basierten Ökonomie entwickelt. Die steigende Nachfrage nach biogenen Ressourcen sowie die Effekte (z. B. Mengen-, Preis- und Handelseffekte, Veränderung des CO₂-Austoßes, Veränderungen im Landschaftsbild, Arbeitsmarkteffekte), die diese Anpassungsprozesse mit sich bringen, flossen in die Analysen mit ein. Die Potenziale der Bioökonomie sowie mögliche Grenzen und Konfliktfelder wurden dabei deutlich gemacht. Maßnahmen, diese Konflikte zu entschärfen (z. B. durch Ertrags- und Effizienzsteigerung, Kaskadennutzung, Nutzung von Rest- und Abfallstoffen), wurden analysiert und auf ihre gesellschaftliche Akzeptanz hin bewertet. Die mit Hilfe von Modellanalysen identifizierten Zielkonflikte wurden in einem mehrstufigen Prozess mit den Stakeholdern und der Bevölkerung rückgekoppelt, um Lösungsstrategien sowie Handlungsoptionen zu identifizieren.

Die Kernfragen des Forschungsvorhabens waren:

- Welche gesellschaftlichen und politischen Prozesse müssen stattfinden, um den Übergang zu einer nachhaltigen Nutzung von Biomasse in Produktion und Konsum zu stimulieren?
- Was sind potentielle Elemente einer nachhaltigen „Bioökonomie 2050“ in Deutschland?
- Wird die globale Verfügbarkeit von Biomasse (Schwerpunkt Land- und Forstwirtschaft) den Transformationsprozess behindern? Wie wird sich der internationale Handel von Biomasse entwickeln? Welcher Beitrag zum Klimaschutz ist zu erwarten?
- Welchen Einfluss wird der Klimawandel auf die Biomasseproduktion, den Wasserhaushalt, die Wasserqualität und damit auf die „Bioökonomie 2050“ haben?
- Steht die zusätzliche Nachfrage nach Biomasse im Widerspruch zu anderen Zielen wie Klimaschutz und Biodiversität? Welche Lösungsstrategien ergeben sich?
- Wie beurteilen zentrale Stakeholder und die Bevölkerung die Zielkonflikte und welche Auswirkungen haben diese auf die Akzeptanzfähigkeit der Transformationsprozesse? Wie müssen Transformationsprozesse gestaltet werden, um gesellschaftlichen Anforderungen und Erwartungen gerecht zu werden?
- Welche Rolle kommt der Politik in der Gestaltung einer gesellschaftlich akzeptierten Transformation zur „Bioökonomie 2050“ zu?

1.2 Methode

Für die Analysen wurden in einem ersten Schritt Biochemikalien identifiziert, die das technische Potenzial haben, fossile Pendanten zu substituieren und deren Substitutionspotenzial (Produktionsmengen) signifikant ist. In einem zweiten Schritt wurde die optimale Allokation der verfügbaren Biomasseressourcen auf die identifizierten Biochemikalien zusätzlich zur Bioenergie und zu den Biokraftstoffen modelliert. Für die Modellierung wurde eine Modellkopplung von BENSIM/BENOPT mit den Modellen MAGNET, LandSHIFT und GFPM vorgenommen.

1.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse aus der Modellierung mit BENSIM/BENOPT zeigen, dass in den verschiedenen Bioökonomieszzenarien 25–56 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten im Jahr 2050 eingespart werden können. Im Vergleich zu den THG-Emissionen im Jahr 1990 entspricht dies einer Einsparung von 2,5–5,6 % für die Sektoren Energie, Gebäude, Verkehr und Industrie.

Die Treibhausgaseinsparungen werden dabei am effektivsten durch gasförmige Produkte erreicht: Biogas, Biomethan (gereinigtes Biogas) und synthetisches Erdgas (d.h. Biomethan von der Biomassevergasung) erwiesen sich dabei als wirtschaftlich und ökologisch effektive Optionen für den Einsatz von Biomasse in den Strom-, Wärme- und Verkehrssektoren. Als einziger Biokraftstoff, der chemisch äquivalent zu seiner fossilen Referenz ist, kann Biomethan problemlos in die bereits bestehende Erdgasnetzinfrastruktur in Deutschland eingespeist werden. Daher sollte im Verkehrssektor übergangsweise zur Unterstützung des Aufbaus eines nachhaltigen Mobilitätssystem, der Schwerpunkt auf der Förderung der Nachfrage von Biomethan (gasförmig oder verflüssigt) in den Sektoren gelegt werden, die nicht leicht zu elektrifizieren sind, wie z.B. der Schwerlastverkehr und Schiffsanwendungen.

Die Nutzung von holzartiger Biomasse erwies sich im Strom- und Wärmebereich im Hinblick auf die Erfüllung der Klimaziele am günstigsten, da eine starke Konkurrenz um die vergärbaren und ölhaltigen Rohstoffe im Verkehr und in der Chemie zu erwarten ist.

2. Einleitung

2.1 Hintergrund

Der Bioökonomie wird großes Potenzial bei der Umgestaltung des gegenwärtigen Wirtschaftssystems zu einer nachhaltigeren Wirtschaft zugesprochen. Die Umgestaltung beinhaltet die Loslösung aus der Abhängigkeit von den endlichen fossilen Rohstoffen hin zu einer Ökonomie, die erneuerbare bio-basierte Rohstoffe zur Grundlage hat (Thrän und Moesenfechtel 2020). Die Bioökonomie hat bereits jetzt in verschiedenen Wirtschaftsbereichen eine hohe Relevanz. Allerdings ist der Gedanke eines nachhaltigen bioökonomischen Wirtschaftens in der Ökonomie noch nicht weit verbreitet. Zahlreiche Innovationen im Bereich der bio-basierten Produkt- und Verfahrensentwicklung bilden hier die Grundlage einer solchen Umorientierung.

Während eine bio-basierte Wirtschaft in ihren Anfängen in nur geringem Umfang Ressourcen beansprucht, steigt der Bedarf mit der breiten Markteinführung. Die Zunahme von Nutzungskonflikten ist zu erwarten. Bei den Produkten aus der Land- oder Forstwirtschaft ist dies vor allem das Konkurrieren um Fläche und Rohstoffe, aber auch um Wasser oder Düngemittel. In der Folge wird die Nahrungsmittelproduktion teurer, möglicherweise verschärft sich dadurch auch die Problematik der Ernährungssicherung. Eine Intensivierung der Nutzung der land- und forstwirtschaftlichen Fläche steht möglicherweise im Widerspruch zu ökologischen Zielen oder dem Freizeit- und Erholungswert von Landschaften. Es sind aber auch andere Zielkonflikte denkbar, wie die grundsätzliche Befürwortung der Bioökonomie einerseits und die fehlende Akzeptanz bestimmter bio-basierter Verfahren oder Produkte andererseits. So ist davon auszugehen, dass aufgrund begrenzt verfügbarer erneuerbarer Ressourcen eine Prioritätensetzung bezüglich der Einsatzbereiche erforderlich wird (Thrän und Moesenfechtel 2020).

Das Forschungsvorhaben zielte darauf ab, verschiedene Szenarien hin zu einer „Bioökonomie 2050“ und mögliche gesellschaftlich akzeptierte Transformationsprozesse zu beschreiben. Dazu wurden, ausgehend von der gegenwärtigen Land- und Ressourcennutzung und der Verfügbarkeit von Biomasse (v. a. aus Land- und Forstwirtschaft) sowie deren Verwendung, mögliche Pfade für die Transformation einer fossil-basierten Wirtschaftsweise zu einer bio-basierten Ökonomie entwickelt. Die steigende Nachfrage nach biogenen Ressourcen sowie die Effekte (z. B. Mengen-, Preis- und Handelseffekte, Veränderung des CO₂-Austoßes, Veränderungen im Landschaftsbild, Arbeitsmarkteffekte), die diese Anpassungsprozesse mit sich bringen, flossen in die Analysen mit ein. Dabei wurden die Potentiale der Bioökonomie sowie mögliche Grenzen und Konfliktfelder deutlich. Maßnahmen, diese Konflikte zu entschärfen (z. B. durch Ertrags- und Effizienzsteigerung, Kaskadennutzung, Nutzung von Rest- und Abfallstoffen), wurden analysiert und auf ihre gesellschaftliche Akzeptanz hin bewertet. Die mit Modellanalysen identifizierten Zielkonflikte wurden in einem mehrstufigen Prozess mit den Stakeholdern und der Bevölkerung rückgekoppelt um Lösungsstrategien sowie Handlungsoptionen zu identifizieren. Bei der Identifikation von Lösungsstrategien und Handlungsoptionen spielten Untersuchungen zur Wahrnehmung, Prioritätensetzung und Beurteilung von Zielkonflikten eine wichtige Rolle.

Ein wichtiges Anliegen des Projekts war die Klärung von (politischen) Verantwortlichkeiten, Handlungsoptionen und Steuerungselementen. Dabei war folgende Fragestellung relevant: Wer sind die Treiber einer gewünschten Entwicklung und welche Rolle kommt der Wirtschaft, den Verbrauchern, den Bürgern bzw. dem Staat zu?

2.2 Zielstellung

Um das Wissen über die optimale THG-Vermeidung und den kosteneffizienten Einsatz der verfügbaren begrenzten Biomasseressourcen in Deutschland zu erweitern und die potenziellen Kompromisse zwischen den beiden Zielen aufzuzeigen, wurden folgende Fragen seitens des UFZ erörtert:

- Wie können Biochemikalien mit hohem Potenzial identifiziert werden?
- Wie können die derzeit verfügbaren Biomassepotenziale kosteneffizient für die THG-Vermeidung genutzt werden?

3. Methodik

In einem ersten Schritt wurden Biochemikalien identifiziert, die das technische Potenzial haben, fossile Pendanten zu substituieren und deren Substitutionspotenzial (Produktionsmengen) signifikant ist (Musonda et al. 2020). In einem zweiten Schritt wurden die verfügbaren Biomasseressourcen auf die identifizierten Biochemikalien zusätzlich zu Bioenergie und Biokraftstoffen modelliert (Abbildung 1).

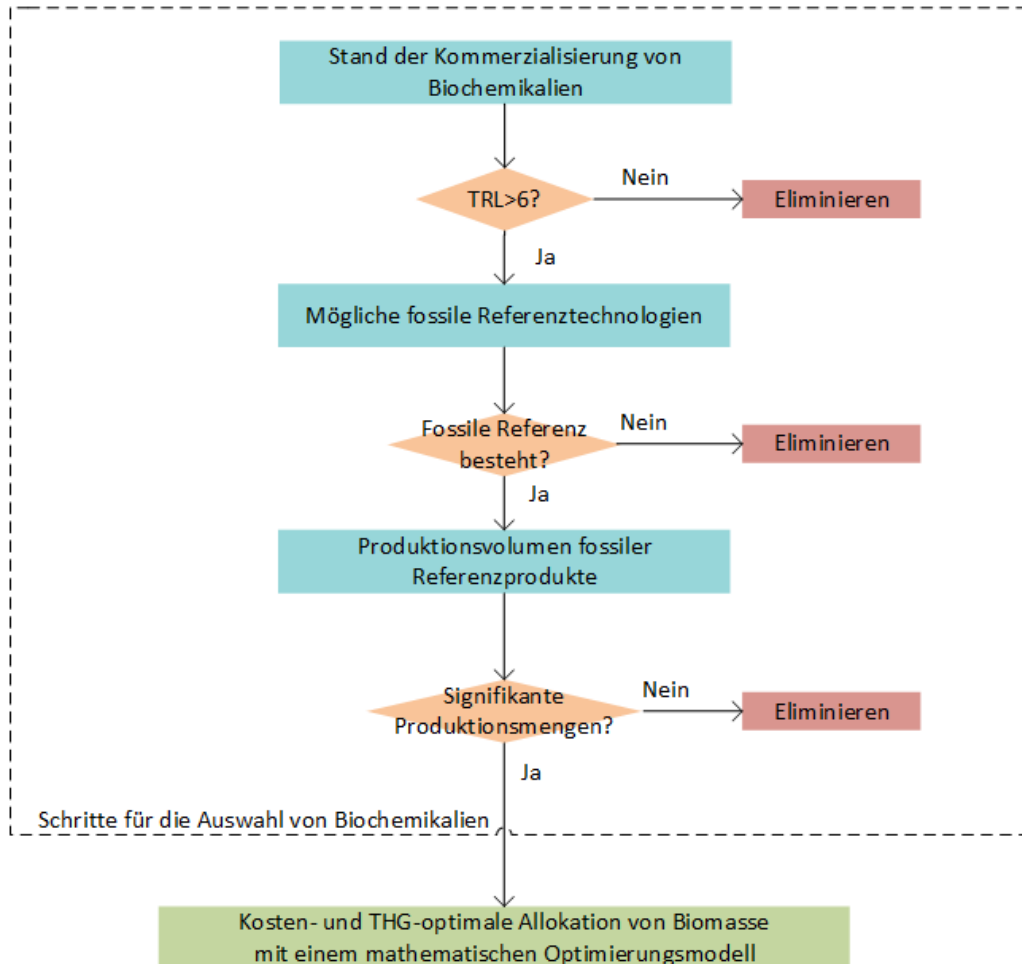


Abbildung 1 Methodische Prozessschritte für die Auswahl und Bewertung von Biochemikalien in Deutschland. In der Abbildung steht THG für Treibhausgas und TRL für Technology Readiness Level.

3.1 Identifizierung von Biochemikalien

Als Grundlage für die Auswahl der Biochemikalien wurden die Studienergebnisse der Direktion der Europäischen Kommission (E4tech et al. 2015) herangezogen. Das Auswahlkriterium wurde um Biochemikalien mit einem TRL 6–9 erweitert. Das bedeutet, dass sich diese Technologien entweder in der Demonstrationsphase befinden und mit hoher Wahrscheinlichkeit kommerziell relevant sein werden, oder dass sie bereits kommerziell verfügbar sind.

Im Anschluss wurde das Auswahlkriterium für diese Untergruppe von Biochemikalien erweitert, indem ihre Substitutionspotentiale auf den Fall Deutschlands bezogen wurden. Dazu wurden die Produktionsmengen ihrer fossilen Pendanten (VCI 2019) auf der Grundlage eines 7-Jahres-Durchschnitts, d.h. 2010–2017, berücksichtigt (Tabelle 2). Dabei waren die Daten zu den Preisen von Petrochemikalien nicht vollständig öffentlich zugänglich. Es wurden daher nur Preisdaten für Ethylen, Propylen, Benzol und Xylole ermittelt (Tabelle 2).

Tabelle 2 Durchschnittliche Produktionsmengen und Preise für die fossilen Referenzen zwischen 2010 und 2017 (VCI 2019). o,p repräsentieren die Isomere von Xylol 1,2-Dimethylbenzol und 1,4-Dimethylbenzol.

	Millionen Tonnen	€/ton
Ethylen	5,06	1076
Propylen	3,95	965
Buten und seine Isomere Buta-1,3-dien	2,3	
Methanol	1	
Benzol	1,9	819
Toluol	0,64	
Xylol ^{o,p}	0,55	877; 941
Essigsäure	0,05	
Ethylendichlorid	2,41	
Ethylenoxid	1	
Ethylenglykol	0,26	
Propylenoxid	0,82	
Propylenglykol	0,4	
Ammoniak	2,6	
Polyvinylchlorid	1,71	
Polystyrole	0,62	
Polypropylen	1,94	
Polyurethane	1,22	
Polyamide	1,06	

Bioethylen ist ein biochemischer Tropfen mit derselben Struktur und Eigenschaften wie Ethylen auf fossiler Basis und wurde als Ersatz für Ethylen auf fossiler Basis gewählt. Gemäß E4tech et al. (2015) können die Biokunststoffe PLA und PHA Polystyrol (PS) ersetzen. PLA und PHA wurden daher als Ersatz für PS gewählt. Bernsteinsäure kann als Vorläufer für die Herstellung von 1,4-Butandiol, Polyamiden, Polybutyratsuccinat und Polyurethanen verwendet werden. Basierend auf dem durchschnittlichen Produktionsvolumen für Polyurethane wurde Bernsteinsäure gewählt, die Adipinsäure auf fossiler Basis bei der Herstellung von Polyurethanen ersetzen kann. Die übrigen Biochemikalien aus Tabelle 2 verfügen entweder über fossile Referenzchemikalien mit minimalen Produktionsmengen oder haben keine fossilen Referenzchemikalien wie Sorbitol, das in der Lebensmittelindustrie Anwendung findet. Ein weitere Biochemikalie ist Furfural, das zwar als Lösungsmittel, Schmiermittel, Benzinzusatz und als Vorläufer für Polymere und Harze (Eseyin und Steele 2015) verwendet wird, für die aber aufgrund der vielen fossilen Äquivalente mit ähnlichen Anwendungen, eine spezifisch fossile Referenz schwierig zu bestimmen war. Aufgrund der Vielseitigkeit von Furfural und der Möglichkeit dieses aus lignozellulosehaltiger Biomasse zu gewinnen würde dieses relevant werden.

3.2 Modellierung

Aufbauend auf dem Optimierungsmodell BENOPT (Millinger 2019c) wurde ein mathematisches Optimierungsmodell (konzeptionelles Modell in Abbildung 2) entwickelt, mit dem die verfügbaren Biomasseressourcen zwischen den Jahren 2015 (das Basisjahr für die Modellierung in allen Modellen) und 2050 optimal auf die verschieden konkurrierenden Nutzungen verteilt werden können. In der aktuellen Modellversion wurde neben den Biokraftstoffoptionen auch andere Bioenergieanwendungen (d.h. Biomasseanwendungen in Strom und Wärme) berücksichtigt. Zusätzlich wurden auch

Biochemikalien mit einbezogen, sodass sich der Modellansatz von einer einseitigen Optimierung dahingehend verlagerte, das die konkurrierenden Präferenzen "optimale THG-Vermeidung" und "optimale Kosten" berücksichtigt werden konnten.

3.2.1 Modellbeschreibung

Das entwickelte Modell ist ein deterministisches Bottom-up-Optimierungsmodell, das den Biomasseanbau, die Konversionsprozesse und die sektoralen Anforderungen berücksichtigt. Zu den exogenen Daten (die aus einer Excel-Tabelle gelesen, mit MATLAB vorverarbeitet und dann zur Optimierung an GAMS geschickt werden) gehören detaillierte techno-ökonomische Daten für die betrachteten Bioprodukte, die Ressourcenverfügbarkeiten (d.h. land- und forstwirtschaftliche Biomassepotenziale aus MAGNET und LandSHIFT) und die sektorale Nachfrage nach den Bioprodukten (Abbildung 2).

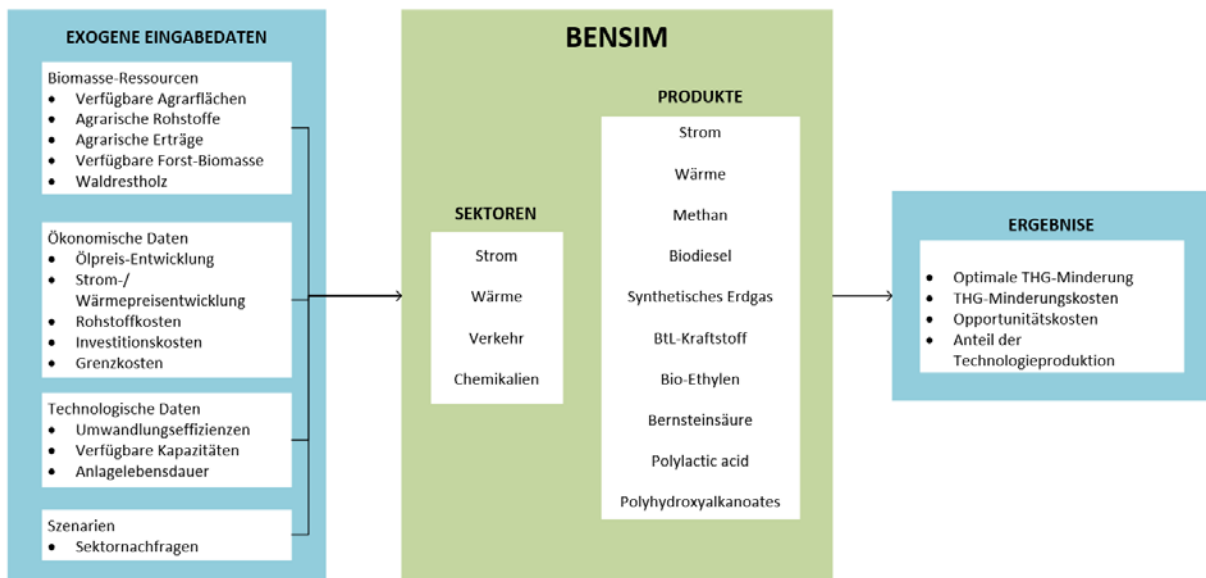


Abbildung 2 Gruppierte exogene Daten, berücksichtigte Sektoren, Produkte und erwartete Ergebnisse

Wie im Modellierungsrahmen in Abbildung 3 für die Produktion von Wärme, Strom, Biokraftstoffen und Biochemikalien dargestellt, wurde eine Cradle-to-Gate-Systemgrenze verwendet, bei der die Wertschöpfungsketten aus dem verfügbaren land- und forstwirtschaftlichen Biomassepotenzial, der Produktion von Biomasse und der letztendlichen Umwandlung in Produkte modelliert wurden.

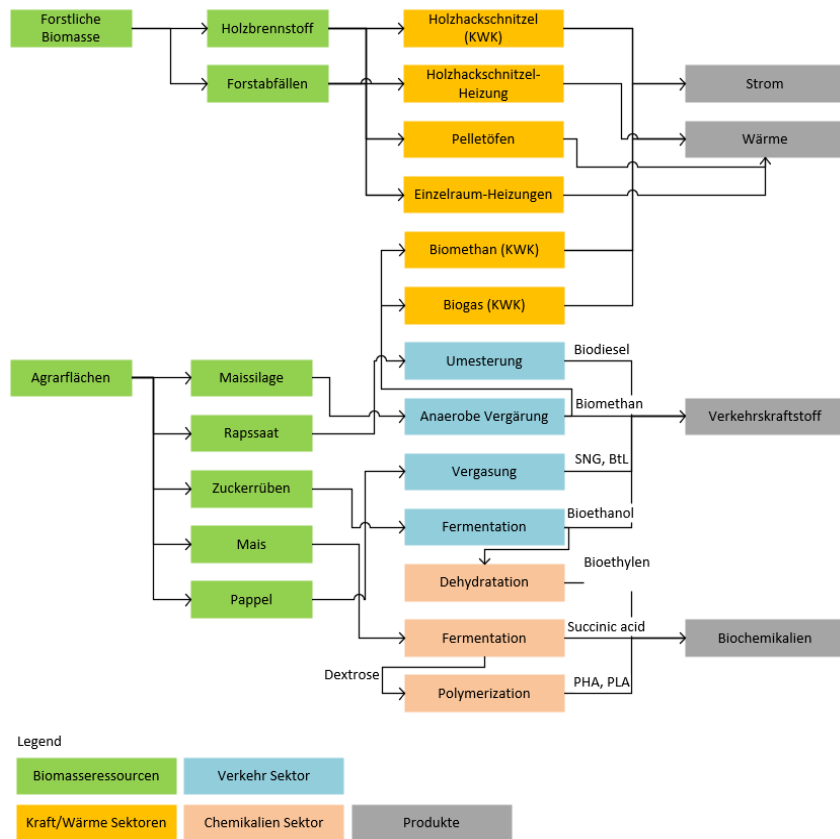


Abbildung 3 Vereinfachter Modellierungsrahmen. In der Abbildung steht KWK für Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, SNG für synthetisches Erdgas, PHA Polyhydroxyalkanoate, PLA Polymilchsäure

3.2.2 Zielfunktionen

Die Zielfunktion für den kostenoptimalen Einsatz von Biomasse δp war die Differenz des Marktpreises für die fossilen Referenzen $P_{sub,t}$ und der Gesamtproduktionskosten $TC_{i,t}$ für die Bioprodukte multipliziert mit der Produktion $\pi_{i,t}$, die für Bioenergieoptionen in Petajoule (PJ) und für Biochemikalien in Tonnen (t) vorlagen, aufsummiert über den Gesamtzeitraum und alle Technologieoptionen (Gleichung 1). Die Gesamtkosten umfassten die Grenzkosten (d.h. die Rohstoffkosten und die Betriebs- und Instandhaltungskosten abzüglich der Erträge aus den Nebenprodukten) und die Investitionskosten.

$$\delta p = \sum_{i,t} (P_{sub,t} - TC_{i,t}) * \pi_{i,t} \quad (1)$$

Die Zielfunktion zur THG-Vermeidung $\delta \varepsilon$ war die Differenz der Lebenszyklus-THG-Emissionen für die fossile Referenztechnologie $\varepsilon_{sub,t}$ und der Lebenszyklus-THG-Emissionen für das Bioprodukt $\varepsilon_{i,t}$ multipliziert mit der Bioproduktproduktion $\pi_{i,t}$, summiert über alle technologischen Optionen und die gesamte Zeitspanne (Gleichung 2). Die THG-Emissionen der Bioprodukte wurden aus der Summe der THG-Emissionen aus dem Anbau der Rohstoffe, dem Transport und den Emissionen der Nutzung nicht erneuerbarer Energien in den Umwandlungsschritten berechnet.

$$\delta \varepsilon = \sum_{i,t} (\varepsilon_{sub,t} - \varepsilon_{i,t}) * \pi_{i,t} \quad (2)$$

3.2.3 Einschränkungen

Die Produktion spezifischer Bioprodukte $\pi_{i,t}$, die kleiner oder gleich der Menge der verfügbaren Rohstoffe $m_{i,t}$ multipliziert mit dem Umwandlungswirkungsgrad η_i entsprach, sollte kleiner oder gleich den jährlich verfügbaren Kapazitäten $k_{i,t}$ sein, wobei die Summe davon kleiner oder gleich dem gesamten Substitutionspotenzial δ_t sein sollte. Die verfügbare Kapazität war gleich den Kapazitäten, die das Ende ihrer Lebensdauer erreicht hatten, subtrahiert von der Summe der Kapazität des Vorjahres $k_{i,t}$ und der neuen Kapazitäten $k^+_{i,t+1}$. Die Menge der verfügbaren Rohstoffe $m_{i,t}$ aus landwirtschaftlicher Fläche

geteilt durch die landwirtschaftlichen Erträge $Y_{i,t}$ muss immer kleiner oder gleich der verfügbaren landwirtschaftlichen Fläche sein. Für die Waldbiomasse sollte die verfügbare Biomasse, multipliziert mit den Heizwerten (d.h. für Holzhackschnitzel und Pellets), geringer sein als die Potenziale der Waldbiomasse.

$$\pi_{i,t} = m_{i,t} * \eta_i \quad (3)$$

$$k_{i,t} \geq \pi_{i,t} \quad (4)$$

$$k_{i,t+1} \leq k_{i,t} + k_{i,t+1}^+ - k_{i,t-\ell_i}^+ \quad (5)$$

$$k_{i,t+1}^+ \leq r + k_{i,t} \quad (6)$$

$$\delta_t \geq \sum_i \pi_{i,t} \quad (7)$$

$$\Lambda_t \geq \sum_i m_{i,t} * (Y_{i,t})^{-1} \quad (8)$$

$$F_t \geq \sum_i m_{i,t} * C_{i,t} \quad (9)$$

$\pi_{i,t}$	Herstellung von Bioprodukten
$m_{i,t}$	Verfügbare Biomasse-Rohstoffe
η_i	Die Umwandlungswirkungsgrade
$k_{i,t}$	Kapazitäten des Vorjahres
$k_{i,t+1}$	Verfügbare Kapazität.
r	Kapazitätssteigerungsfaktor (1PJ für Bioenergie und 100000 t für Biochemikalien).
$k_{i,t+1}^+$	Neue Kapazitäten.
δ_t	Gesamtes oberes Substitutionspotenzial
$Y_{i,t}$	Landwirtschaftliche Rohstoffträge
t	Zeitraum für die Optimierung
i	Optionen für biochemische Technologien
Λ_t	Verfügbare landwirtschaftliche Fläche für den Anbau von Rohstoffen
F_t	Verfügbare forstwirtschaftliche Biomasse
$C_{i,t}$	Der Heizwert von Holzhackschnitzeln und Holzpellets

3.2.4 Modellkopplung

BENSIM/BENOPT steht am Ende der Modellkette MAGNET (Entwicklung des Weizenpreises), LandSHIFT (Verfügbare landwirtschaftliche Fläche) und GFPM (Menge und Preise von Holzbrennstoff) und nahm deren Berechnungsergebnisse entgegen (Abbildung 4).

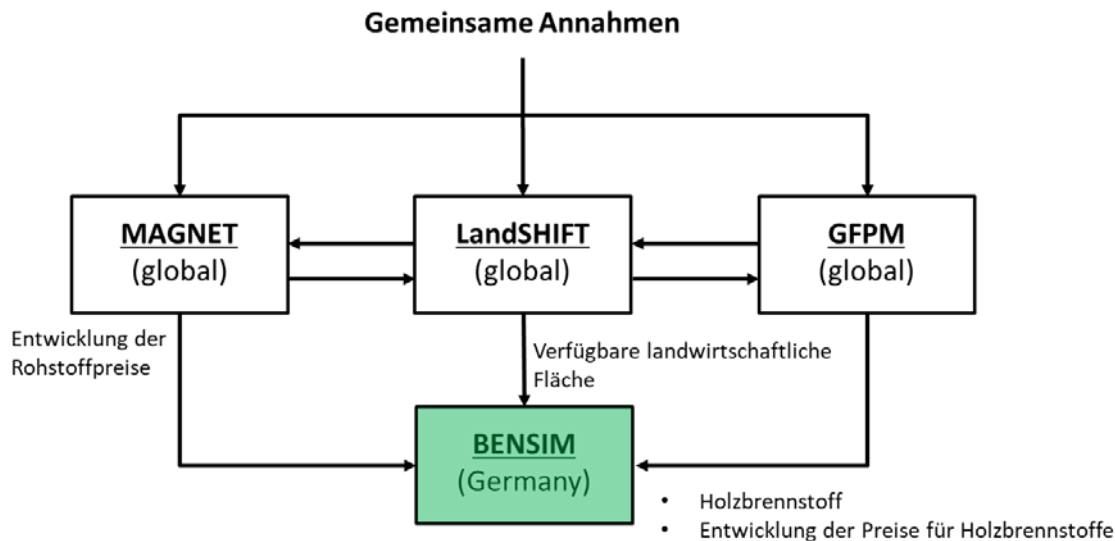


Abbildung 4 Datenfluss von den Modellen MAGNET, LandSHIFT und GFPM an BENSIM/BENOPT.

Eine zusätzliche Methode (Millinger und Thrän 2018) wurde eingesetzt, um aus den Entwicklungen in MAGNET Preise für Nawaros abzuleiten, die in MAGNET nicht enthalten sind. Als Basispreisentwicklung wurden dabei die Ergebnisse für Weizen aus MAGNET genutzt, aus welchen die Preisentwicklungen für die anderen in BENOPT enthaltenen landwirtschaftlichen Rohstoffe mit der genannten Methode abgeleitet wurden.

Für die Kopplung zwischen LandShift und BENSIM wurde eine Methode erarbeitet, die im Modellverbund schlüssig war. Es war geplant, dass Flächen für die energetische Biomassebereitstellung übermittelt werden. Dies erwies sich durch die Kopplung mit MAGNET aber als schwierig, da Informationen zur Nutzung der auf bestimmten Flächen angebauten Kulturen fehlten (Lebensmittel, Energie oder Chemikalien). Stattdessen wurde das heutige Verhältnis für Nawaro-Anbau an der landwirtschaftlichen Flächennutzung genutzt (2,42 Mio. Hektar oder 34 % der gesamten Anbaufläche wurde in Deutschland in 2015 für stoffliche und energetische Zwecke genutzt) und mit der in Zukunft genutzten Agrarfläche in Deutschland aus LandShift verknüpft.

Aus dem GFPM Modell wurden Daten zur Menge und zum Preis von Holzbrennstoffen an BENSIM/BENOPT für die Jahre 2015 bis 2050 in 5-Jahresschritten geliefert. Dabei wurde die Kategorie „Fuelwood“ genutzt und die Angaben in m³ ex-post für die Verwendung in BENSIM/BENOPT, mit folgenden Annahmen¹ umgerechnet: 37 % Nadelholz mit einer Energiedichte von 6.1 GJ/m³, und 63 % Laubholz mit 8 GJ/m³, mit dem gleichen Verhältnis zwischen Nadelholz und Laubholz aus 2013 angenommen für alle folgenden Jahre bis 2050.

3.2.5 Sensitivitätsanalyse

Die Wettbewerbsfähigkeit der fossilen Pendanten für den Verkehrssektor und den Wärmesektor war an die Preisentwicklung von Erdöl und Erdgas gebunden. Aus diesem Grund wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, wie sich die Preisentwicklung von Rohöl und Erdgas auf die Wettbewerbsfähigkeit von Wärmetechnologien, Biokraftstoffen und Biochemikalien auswirken könnte. Die Preisentwicklungen für Rohöl und Erdgas wurden auf der Grundlage der EIA (2019) ermittelt.

¹ <https://www.thuenen.de/de/wf/zahlen-fakten/produktion-und-verwendung/holzeinschlag-und-rohholzverwendung/>

4. Ergebnisse

Die Ergebnisse für die Treibhausgasvermeidung unter dem Gesichtspunkt der optimalen Kosten und der Treibhausgasvermeidung für die betrachteten Szenarien sind in Abbildung 5 dargestellt.

Im Szenario "Bioökonomie am Tropf" ist die Nutzung von Biogas zur Wärme- und Stromerzeugung aus kostenoptimaler Sicht derzeit nicht so wettbewerbsfähig wie die von Biomethan. In der Modellierung wurden Biogas-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen kurz nach 2030 stillgelegt, während Biomethan-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen zunehmend wettbewerbsfähig wurden. Der Grund dafür ist, dass Biogas-KWK-Anlagen in der Regel klein und dezentralisiert sind, während Biomethan-KWK-Anlagen groß und zentral gelegen sind, was letztlich zu niedrigeren Kosten führt. Einzelraumheizungen und Pelletöfen sind im Teilbereich der Hausheizung vorzuziehen. Im Verkehrssektor dominiert Bioethanol nur kurzfristig, während Biomethan aufgrund seiner hohen Umwandlungswirkungsgrade und des Wegfalls der Startkapazität für Bioethanol mittel- und langfristig kostengünstig wird. Einige Plattform-Biochemikalien und Biokunststoffe sind wettbewerbsfähige Optionen. Im chemischen Sektor ist die Plattformchemikalie Bernsteinsäure besonders konkurrenzfähig.

Der größte Unterschied bei den wettbewerbsfähigen Technologien zwischen kostenoptimalen und Treibhausgasvermeidungszielen liegt im Transport- und im Strom-/Wärmebereich. Unter dem Gesichtspunkt der optimalen Treibhausgasvermeidung sind Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) mit Holzhackschnitzeln und Biogas vorzuziehen. Im Verkehrssektor wird synthetisches Erdgas zunehmend eine Rolle bei der Vermeidung von Treibhausgasen spielen, was mittel- und langfristig die Produktion von Biomethan reduzieren wird.

Im Bioökonomie-Inseln-Szenario gleichen die Verteilungsmuster der Biomasse über alle Sektoren hinweg den Verteilungsmustern des Szenarios "Bioökonomie am Tropf". Aufgrund von ambitionierteren Klimazielen und einem Mangel an erneuerbaren Alternativen im Verkehrssektor im Vergleich zu der Wärme- und Strombereitstellung steigt die Nachfrage nach Biomasse im Verkehrssektor im Vergleich zum Szenario "Bioökonomie am Tropf" an. Dies führt zu einem höheren Bedarf an Biomasse im Verkehrssektor, so dass weniger Biomasse für Biogas-/Biomethan-KWK-Anlagen im Strom- und Wärmesektor zu Verfügung steht. Dadurch spielt der Brennstoff Holz im Wärmesektor eine zunehmende Rolle. Die eingesetzte Biomasse umfasst Maissilage, Maiskörner, Zuckerrüben und Holzbrennstoff. Die vermiedenen Klimagasemissionen sind in diesem Szenario insgesamt am höchsten.

Im Bioökonomie-Wende-Szenario führt die Nutzung anderer erneuerbarer Energien (d.h. Elektrofahrzeuge, Solar- und Windenergie) im Verkehrs- und Energiesektor zu einer geringeren Nachfrage nach Biomasse. Im Strom- und Wärmesektor sind Biomethan-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen und Pelletöfen kosteneffizient, während Biogas-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen und Hackschnitzelheizungen mehr zur THG-Reduktion beitragen können, aber zu höheren Kosten. Aufgrund der gestiegenen Nachfrage nach Biochemikalien spielen langfristig geringe Mengen an Bio-Ethylen und Polymilchsäure (PLA) eine Rolle. Die vermiedenen Treibhausgasemissionen aus der Nutzung von Biomasse sind in diesem Szenario insgesamt am niedrigsten, während die Gesamtklimabilanz am besten ist.

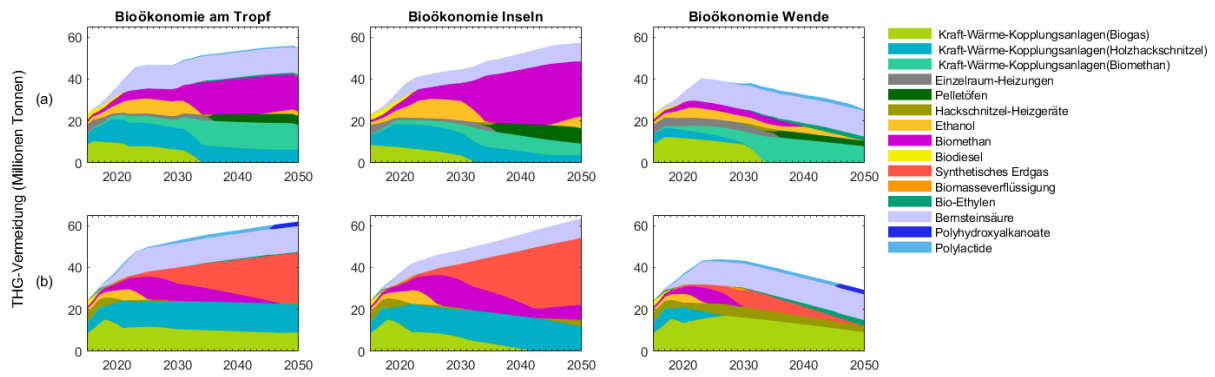


Abbildung 5 THG-Minderungen von 2015 bis 2050 für die betrachteten Technologien auf der Grundlage optimaler Kosten (a) und Treibhausgasvermeidung (b).

In Abbildung 6 werden die Ergebnisse für die Pareto-Fronten für die Ziele in den betrachteten Szenarien dargestellt. Es zeigt sich, dass Pareto-Lösungen mit niedrigeren Werten in der Gesamt-THG-Verringerung höhere Gesamtgewinne aufweisen. An den Punkten A1, B1 und C1 (d.h. unter Berücksichtigung des kostenoptimalen Ziels, wobei die Maximierung der THG-Reduzierung außer Acht gelassen wird) belaufen sich die durch den Einsatz von Biomasse erzielten Gesamtgewinne auf 386,5, 446 und 218 Milliarden €, die entsprechende THG-Reduzierung beträgt in diesen Fällen 1,63, 1,60 bzw. 1,13 Millionen Tonnen CO₂-Äq. Im Gegensatz dazu erhöht sich an den Punkten A2, B2 und C2 (d.h. die Maximierung der berücksichtigten THG-Reduktion unter Außerachtlassung des kostenoptimalen Ziels) die gesamte THG-Reduktion über den Optimierungszeitraum auf 1,80, 1,71 und 1,26 Millionen Tonnen CO₂-Äq. In diesem Fall beträgt der entsprechende Gesamtgewinn 313, 358 bzw. 180 Milliarden €

Ein Beispiel: Typische Kompromissentscheidungen zwischen den beiden widersprüchlichen Zielfunktionen würden von den Punkten A1, B1 und C1 bis zu den Punkten reichen, an denen die Gradienten für die Pareto-Fronten in Richtung des THG-Vermeidungswertes stark ansteigen (d.h. A2, B2 bzw. C2). Über diese Punkte hinaus gibt es einen geringen Anstieg der THG-Verringerung bei relativ höheren Opportunitätskosten.

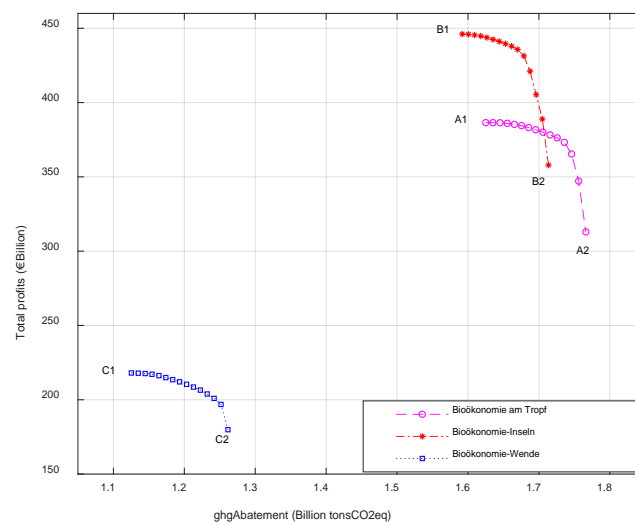


Abbildung 6 Die Pareto-Optimalitätskurven für die drei betrachteten Szenarien. A1, B1 und C1 stellen kostenoptimale Punkte für die Szenarien dar, während A2, B2 und C2 die Punkte der Treibhausgas (THG) Minderung darstellen.

5.1 Sensitivitätsanalyse

Die Dynamik der Gewinne pro Hektar für die Entwicklungspfade "hoch, Referenz und niedrig" des Ölpreises ist in Abbildung 7 dargestellt. Alle landbasierten Technologien sind auf dem Referenz- und

dem Hochpreispfad für Rohöl kostenbezogen wettbewerbsfähig. PLA und PHA sind bei der Entwicklung des Referenzrohölpreises nicht kostenwettbewerbsfähig, während sich alle Biochemikalien bei der Entwicklung des niedrigen Ölpreises als nicht wettbewerbsfähig erwiesen haben.

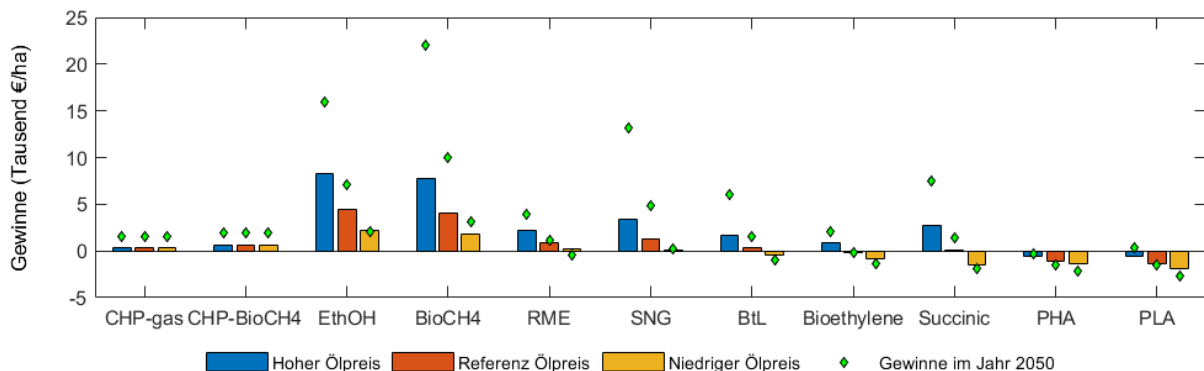


Abbildung 7 Entwicklung des Gewinns in Euro pro Hektar (€/ha) für biobasierte Technologien auf der Grundlage unterschiedlicher Preisentwicklungspfade für Erdöl und Erdgas. Bei den Technologien handelt es sich um solche mit Einsatzstoffen aus landwirtschaftlich genutzten Flächen. In der Abbildung steht CHP-gas für Blockheizkraftwerke mit Biogas, CHP-BioCH₄-Blockheizkraftwerke mit Biomethan, EthOH-Bioethanol, BioCH₄-Biomethan, RME-Biodiesel, SNG-Synthesegas, BtL-BtL kraftstoffe, PHA-Polyhydroxyalkanoate und PLA-Polymilchsäure.

Es wurde festgestellt, dass die Veränderung in der Entwicklung des Erdgaspreises gem. EIA keinen großen Einfluss auf die Kostenwettbewerbsfähigkeit der Wärme- und Stromtechnologien hat (Abbildung 8).

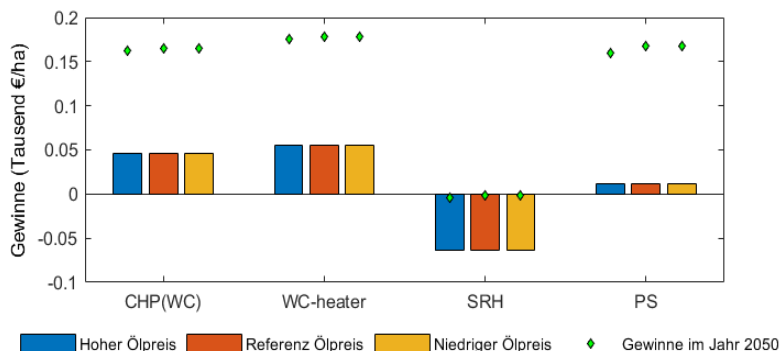


Abbildung 8 Der Gewinn in Euro pro Tonne Frischmasse (€/tFM) Entwicklungen für biobasierte Technologien mit Rohstoffen aus Waldbiomasse. In der Abbildung steht CHP (WC) für Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit Hackschnitzel, WC-IND Hackschnitzelheizungen für den industriellen Bereich, SRH Einzelraumheizungen, PS Pelletöfen

6. Schlussfolgerungen

In den verschiedenen Bioökonomiewelten wurden im Jahr 2050 25–56 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten eingespart. Im Hinblick auf die THG-Emissionswerte von 1990 entspricht dies einer Einsparung von 2,5–5,6 % für die Sektoren Energie, Gebäude, Verkehr und Industrie.

Die Treibhausgaseinsparungen werden dabei am effektivsten durch gasförmige Produkte erreicht: Biogas, Biomethan (gereinigtes Biogas) und synthetisches Erdgas (d.h. Biomethan von der Biomassevergasung) erwiesen sich als wirtschaftlich und ökologisch effektive Optionen für den Einsatz von Biomasse in den Strom-, Wärme- und Verkehrssektoren. Als einziger Biokraftstoff, der chemisch äquivalent zu seiner fossilen Referenz ist, kann Biomethan problemlos in die bereits bestehende Erdgasnetzinfrastruktur in Deutschland eingespeist werden. Im Verkehrssektor sollte daher übergangsweise zur Unterstützung des Aufbaus eines nachhaltigen Mobilitätssystems, der Schwerpunkt

auf der Förderung der Nachfrage von Biomethan (gasförmig oder verflüssigt) in den Sektoren gelegt werden, die nicht leicht zu elektrifizieren sind, wie z.B. Schwerlast- und Schiffsverkehr. Die Nutzung von holzartiger Biomasse erwies sich im Strom- und Wärmebereich im Hinblick auf die Erfüllung der Klimaziele am günstigsten, da eine starke Konkurrenz um die vergärbaren und ölhaltigen Rohstoffen im Verkehr und Chemie zu erwarten ist. Bernsteinsäure erwies sich in allen Szenarien als eine robuste Option in der chemischen Nutzung, sowohl kostenmäßig als auch als THG-Minderungsoption.

Teil II formaler Projektbericht

A. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind des Verwendungsnachweises des UFZ zu entnehmen. Dieser ist dem Zuwendungsgeber gesondert zugegangen.

B. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Dieses Forschungsvorhaben zielte darauf ab, verschiedene Szenarien eines Wandels unserer gegenwärtigen Wirtschaftsweise hin zu einer nachhaltigeren „Bioökonomie 2050“ und gesellschaftlich akzeptierte Transformationsprozesse zu beschreiben. Dazu werden, ausgehend von der gegenwärtigen Land- und Ressourcennutzung, der Verfügbarkeit von Biomasse (v. a. aus Land- und Forstwirtschaft) sowie deren Verwendung, gangbare Pfade für die Transformation einer fossilbasierten Wirtschaftsweise zu einer bio-basierten Ökonomie entwickelt. Die steigende Nachfrage nach biogenen Ressourcen sowie die Effekte (z. B. Mengen-, Preis- und Handelseffekte, Veränderung des CO₂-Austoßes, Veränderungen im Landschaftsbild, Arbeitsmarkteffekte), die diese Anpassungsprozesse mit sich bringen, fließen in die Analysen mit ein. Die Potenziale der Bioökonomie sowie mögliche Grenzen und Konfliktfelder werden deutlich gemacht. Maßnahmen, diese Konflikte zu entschärfen (z. B. durch Ertrags- und Effizienzsteigerung, Kaskadennutzung, Nutzung von Rest- und Abfallstoffen), werden analysiert und auf ihre gesellschaftliche Akzeptanz hin bewertet. Die mit Modellanalysen identifizierten Zielkonflikte werden in einem mehrstufigen Prozess mit den Stakeholdern und der Bevölkerung rückgekoppelt um Lösungsstrategien sowie Handlungsoptionen zu identifizieren.

C. Voraussichtlicher Nutzen, insb. Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die hier dargestellten und für dieses Forschungsprojekt weiterentwickelten Ansätze wurden in weiteren Arbeiten am UFZ genutzt und dort produzierte Ergebnisse bereits publiziert. Teile der hier vorgestellten Arbeit und ausgewählte Ansätze können voraussichtlich in weiteren Forschungsarbeiten berücksichtigt werden.

D. Fortschritte bei anderen Stellen

Systemanalysen zur optimalen Biomassenutzung für die Herstellung von Chemikalien haben in den letzten Jahren zugenommen, z.B. an der Uni Utrecht (Tsiropoulos et al. 2017) und an der OTH Regensburg (Bauer und Sterner 2020), sind aber weiterhin eine Nische. Im letzteren liegt der Schwerpunkt auf P2X, mit Biomasse als Komplement. Analysen der Sektorkopplung nehmen auch zu (Sternberg und Bardow 2015; Blanco et al. 2018; Drünert et al. 2019; Fasihi et al. 2016; Schemme et al. 2017; Millinger et al. 2020), wodurch eine mehr ganzheitliche Analyse von der erneuerbaren Chemieherstellung durchgeführt werden kann. Die Rolle von BECCS nimmt in integrierten Analysen zu (Bauer et al. 2018; Daioglou et al.). Holzbasierte Biochemikalien werden eine wichtige Zukunft zugesprochen, aufgrund der geringeren Nutzungskonkurrenzen (Matharu et al. 2016; Schipfer et al. 2017; Bomtempo et al. 2017; Ögmundarson et al. 2020; Lange et al. 2012). Sowohl Holzbasierte Biochemikalien als auch P2X und BECCS waren in diesem Vorhaben – und soweit bekannt auch nicht in vollem Umfang bei anderen Vorhaben - nicht enthalten und sollten in künftigen Arbeiten aufgegriffen werden und mit der weiteren Analyse von Chemikalien kombiniert werden.

E. Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die Arbeiten haben zu zwei Journal-Artikeln geführt, und zu einem Konferenzbeitrag:

- (Musonda et al. 2020): Musonda, Frazer; Millinger, Markus; Thrän, Daniela (2020): Greenhouse Gas Abatement Potentials and Economics of Selected Biochemicals in Germany. In: *Sustainability* 12 (6), S. 2230. DOI: 10.3390/su12062230.
- (Musonda et al. in review): Musonda, Frazer; Millinger, Markus; Thrän, Daniela (in review): Optimal biomass allocation to the German bioeconomy based on conflicting economic and environmental objectives.
- (Musonda et al. 2019): Musonda, F., Millinger, M., Thrän, D., (2019): The potential role of biochemicals for German climate targets: Assessments based on environmental and economic perspectives. In: Carvalho, M.d.G., Scarlat, N., Grassi, A., Helm, P., (eds.). 27th European Biomass Conference: Setting the course for a biobased economy. Proceedings of the International Conference held in Lisbon, Portugal, 27-30 May 2019. ETA-Florence Renewable Energies, Florence, p. 1418 – 1420.

Zudem wird das BENOPT-Modell in einer aktualisierten und konsolidierten Form open-source zur Verfügung gestellt. Während des Projektes wurden die Ergebnisse auf dem Abschlussworkshop (Berlin, 16.01.2020) präsentiert.

Literaturverzeichnis

Bauer, Franz; Sterner, Michael (2020): Power-to-X im Kontext der Energiewende und des Klimaschutzes in Deutschland. In: *Chemie Ingenieur Technik* 92 (1-2), S. 85-90. DOI: 10.1002/cite.201900167.

Bauer, Nico; Rose, Steven K.; Fujimori, Shinichiro; van Vuuren, Detlef P.; Weyant, John; Wise, Marshall et al. (2018): Global energy sector emission reductions and bioenergy use: overview of the bioenergy demand phase of the EMF-33 model comparison. In: *Climatic Change*. DOI: 10.1007/s10584-018-2226-y.

Blanco, Herib; Nijs, Wouter; Ruf, Johannes; Faaij, André (2018): Potential for hydrogen and Power-to-Liquid in a low-carbon EU energy system using cost optimization. In: *Applied Energy* 232, S. 617-639. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.09.216.

Bomtempo, José-Vitor; Chaves Alves, Flavia; Almeida Oroski, Fabio de (2017): Developing new platform chemicals. What is required for a new bio-based molecule to become a platform chemical in the bioeconomy? In: *Faraday discussions* 202, S. 213-225. DOI: 10.1039/c7fd00052a.

Daioglou, Vassilis; Rose, Steven K.; Bauer, Nico; Kitous, Alban; Muratori, Matteo; Sano, Fuminori et al.: Bioenergy technologies in long-run climate change mitigation: Results from the EMF-33 study. In Review, zuletzt geprüft am 07.02.2020.

Daniela Thrän; Nora Szarka; Henryk Haufe; Volker Lenz; Stefan Majer; Katja Oehmichen et al.: BioplanW: Systemlösungen Bioenergie im Wärmesektor im Kontext zukünftiger Entwicklungen - Schlussbericht. DBFZ Report Nr. 36. Leipzig: DBFZ, zuletzt geprüft am 07.06.2020.

Drünert, Sebastian; Neuling, Ulf; Timmerberg, Sebastian; Kaltschmitt, Martin (2019): Power-to-X (PtX) aus „Überschussstrom“ in Deutschland – Ökonomische Analyse. In: *Z Energiewirtschaft* 194, S. 511. DOI: 10.1007/s12398-019-00256-7.

E4tech; RE-CORD; WUR (2015): From the Sugar Platform to biofuels and biochemicals. Final report for the European Commission, contract No. ENER/C2/423-2012/SI2.673791, zuletzt geprüft am 09.01.2020.

EIA (2019): Annual Energy Outlook 2019 with projections to 2050. Washington D.C., zuletzt geprüft am 21.09.2020.

- Eseyin, Anthonia E.; Steele, Philip H. (2015): An overview of the applications of furfural and its derivatives. In: *IJAC* 3 (2), S. 42. DOI: 10.14419/ijac.v3i2.5048.
- Fasihi, Mahdi; Bogdanov, Dmitrii; Breyer, Christian (2016): Techno-Economic Assessment of Power-to-Liquids (PtL) Fuels Production and Global Trading Based on Hybrid PV-Wind Power Plants. In: *Energy Procedia* 99, S. 243–268. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.10.115.
- Jordan, Matthias; Lenz, Volker; Millinger, Markus; Oehmichen, Katja; Thrän, Daniela (2019): Future competitive bioenergy technologies in the German heat sector: Findings from an economic optimization approach. In: *Energy* 189, S. 116194. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116194.
- Jordan, Matthias; Millinger, Markus; Thrän, Daniela (2020): Robust bioenergy technologies for the German heat transition: A novel approach combining optimization modeling with Sobol' sensitivity analysis. In: *Applied Energy* 262, S. 114534. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114534.
- Lange, Jean-Paul; van der Heide, Evert; van Buijtenen, Jeroen; Price, Richard (2012): Furfural--a promising platform for lignocellulosic biofuels. In: *ChemSusChem* 5 (1), S. 150–166. DOI: 10.1002/cssc.201100648.
- Matharu, Avtar S.; Melo, Eduardo M. de; Houghton, Joseph A. (2016): Opportunity for high value-added chemicals from food supply chain wastes. In: *Bioresource Technology* 215, S. 123–130. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.03.039.
- Meisel, K.; Millinger, M.; Naumann, K.; Majer, S.; Müller-Langer, F.; Thrän, D. (2019): Untersuchungen zur Ausgestaltung der Biokraftstoffgesetzgebung in Deutschland - Arbeitspapier (04.07.2019), zuletzt geprüft am 18.02.2020.
- Meisel, Kathleen; Millinger, Markus; Naumann, Karin; Müller-Langer, Franziska; Majer, Stefan; Thrän, Daniela (2020): Future Renewable Fuel Mixes in Transport in Germany under RED II and Climate Protection Targets. In: *Energies* 13 (7), S. 1712. DOI: 10.3390/en13071712.
- Millinger, M. (2019a): BioENergy SIMulation Model. Version 3.0: Zenodo.
- Millinger, M.; Meisel, K.; Thrän, D. (2019b): Greenhouse gas abatement optimal deployment of biofuels from crops in Germany. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 69, S. 265–275. DOI: 10.1016/j.trd.2019.02.005.
- Millinger, Markus (2018a): Systems assessment of biofuels. Modelling of future cost and greenhouse gas abatement competitiveness between biofuels for transport on the case of Germany. PhD-Thesis. ISSN: 1860-0387. Leipzig: UFZ, zuletzt geprüft am 21.02.2019.
- Millinger, Markus (2019c): BioENergyOPTimisation model: Zenodo.
- Millinger, Markus; Meisel, Kathleen; Budzinski, Maik; Thrän, Daniela (2018b): Relative Greenhouse Gas Abatement Cost Competitiveness of Biofuels in Germany. In: *Energies* 11 (3), S. 615. DOI: 10.3390/en11030615.
- Millinger, Markus; Ponitka, Jens; Arendt, Oliver; Thrän, Daniela (2017a): Competitiveness of advanced and conventional biofuels. Results from least-cost modelling of biofuel competition in Germany. In: *Energy Policy* 107 (107), S. 394–402. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.05.013.
- Millinger, Markus; Tafarte, Philip; Dotzauer, Martin; Oehmichen, Katja; Kanngießer, Annedore; Meyer, Benedikt et al. (2017b): BalanceE - Synergien, Wechselwirkungen und Konkurrenzen beim Ausgleich fluktuierender erneuerbarer Energien im Stromsektor durch erneuerbare Optionen. Endbericht, zuletzt geprüft am 05.12.2017.
- Millinger, Markus; Tafarte, Philip; Jordan, Matthias; Hahn, Alena; Meisel, Kathleen; Thrän, Daniela (2020): Electrofuels from Excess Renewable Electricity at High Variable Renewable Shares: Cost, Greenhouse Gas Abatement, Carbon Use and Competition. DOI: 10.26434/chemrxiv.12287504.v1.
- Millinger, Markus; Thrän, Daniela (2018): Biomass price developments inhibit biofuel investments and research in Germany. The crucial future role of high yields. In: *Journal of Cleaner Production* 172, S. 1654–1663. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.175.

- Musonda, F.; Millinger, M.; Thrän, D. (in review): Optimal biomass allocation to the German bioeconomy based on conflicting economic and environmental objectives, zuletzt geprüft am 09.01.2020.
- Musonda, F.; Millinger, M.; Thrän, D. (2019): The potential role of biochemicals for German climate targets: Assessments based on environmental and economic perspectives. In: M.d.G. Carvalho, N. Scarlat, A. Grassi und P. Helm (Hg.): 27th European Biomass Conference: Setting the course for a biobased economy. Proceedings of the International Conference held in Lisbon, Portugal, 27-30 May 2019. ETA-Florence Renewable Energies. Florence, S. 1418–1420.
- Musonda, Frazer; Millinger, Markus; Thrän, Daniela (2020): Greenhouse Gas Abatement Potentials and Economics of Selected Biochemicals in Germany. In: *Sustainability* 12 (6), S. 2230. DOI: 10.3390/su12062230.
- Ögmundarson, Ólafur; Herrgård, Markus J.; Forster, Jochen; Hauschild, Michael Z.; Fantke, Peter (2020): Addressing environmental sustainability of biochemicals. In: *Nat Sustain* 3 (3), S. 167–174. DOI: 10.1038/s41893-019-0442-8.
- Ponitka, Jens; Arendt, Oliver; Lenz, Volker; Daniel-Gromke, Jaqueline; Stinner, Walter; Ortwein, Andreas et al. (2016): Focus on: Bioenergy-Technologies. Conversion pathways - towards biomass energy use in the 21st century. 2. Aufl. Leipzig: DBFZ, zuletzt geprüft am 26.01.2017.
- Schemme, Steffen; Samsun, Remzi Can; Peters, Ralf; Stolten, Detlef (2017): Power-to-fuel as a key to sustainable transport systems – An analysis of diesel fuels produced from CO₂ and renewable electricity. In: *Fuel* 205, S. 198–221. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.05.061.
- Schipfer, Fabian; Kranzl, Lukas; Leclère, David; Sylvain, Leduc; Forsell, Nicklas; Valin, Hugo (2017): Advanced biomaterials scenarios for the EU28 up to 2050 and their respective biomass demand. In: *Biomass and Bioenergy* 96, S. 19–27. DOI: 10.1016/j.biombioe.2016.11.002.
- Sternberg, André; Bardow, André (2015): Power-to-What? – Environmental assessment of energy storage systems. In: *Energy Environ. Sci.* 8 (2), S. 389–400. DOI: 10.1039/C4EE03051F.
- Tafarte, Philip; Kanngießner, Annedore; Dotzauer, Martin; Meyer, Benedikt; Grevé, Anna; Millinger, Markus (2020): Interaction of Electrical Energy Storage, Flexible Bioenergy Plants and System-friendly Renewables in Wind- or Solar PV-dominated Regions. In: *Energies* 13 (5), S. 1133. DOI: 10.3390/en13051133.
- Thrän, Daniela; Arendt, Oliver; Banse, Martin; Braun, Julian; Fritsche, Uwe; Gärtner, Sven et al. (2017): Strategy Elements for a Sustainable Bioenergy Policy Based on Scenarios and Systems Modeling. Germany as Example. In: *Chem. Eng. Technol.* 40 (2), S. 211–226. DOI: 10.1002/ceat.201600259.
- Thrän, Daniela; Arendt, Oliver; Ponitka, Jens; Braun, Julian; Millinger, Markus; Wolf, Verena et al. (2015): Meilensteine 2030 : Elemente für die Entwicklung einer tragfähigen und nachhaltigen Bioenergiestrategie. Endbericht zu FKZ 03KB065, FKZ 03MAP230. Leipzig.
- Thrän, Daniela; Lauer, Markus; Dotzauer, Martin; Kalcher, Jasmin; Oehmichen, Katja; Majer, Stefan et al. (2019): Technoökonomische Analyse und Transformationspfade des energetischen Biomassepotentials (TATBIO). Endbericht zu FKZ 03MAP362. Leipzig, zuletzt geprüft am 09.09.2019.
- Thrän, Daniela; Moesenfechtel, Urs (Hg.) (2020): Das System Bioökonomie. 1st ed. 2020: Springer.
- Thrän, Daniela; Schaldach, Rüdiger; Millinger, Markus; Wolf, Verena; Arendt, Oliver; Ponitka, Jens et al. (2016): The MILESTONES modeling framework: An integrated analysis of national bioenergy strategies and their global environmental impacts. In: *Environmental Modelling & Software* 86, S. 14–29. DOI: 10.1016/j.envsoft.2016.09.005.
- Tsiropoulos, Ioannis; Hoefnagels, Ric; van den Broek, Machteld; Patel, Martin K.; Faaij, Andre P. C. (2017): The role of bioenergy and biochemicals in CO₂ mitigation through the energy system - a scenario analysis for the Netherlands. In: *GCB Bioenergy* 9 (9), S. 1489–1509. DOI: 10.1111/gcbb.12447.

VCI (2019): Chemiewirtschaft in Zahlen 2019, zuletzt geprüft am 09.01.2020.