

Abschlussbericht des UFZ-Teilprojekts zu BEniVer – Begleitforschung zur Energiewende im Verkehr

(Förderkennzeichen: 03EIV116F)

Authors: Danial Esmaeili Aliabadi 
Matthias Jordan 

Partner	DLR-TT-STB, DLR-FK, DLR-FW, DBFZ, UFZ
UFZ-Mitarbeiter	Daniela Thrän, Danial Esmaeili Aliabadi, Matthias Jordan, und Markus Millinger

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor*innen.

Inhalt

Liste der Abkürzungen	4
1 Hintergrund und Zielsetzung	5
2 Aufgaben	6
3 Bedingungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde	8
4 Planung und Ablauf des Projekts	9
5 Wissenschaftlicher und technischer Stand der Technik	10
6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	10
7 Eingehende Darstellung	11
7.1 Annahmen	11
7.2 Methodologie	11
7.3 Konvergenz	12
7.4 Ergebnisse	14
8 Notwendigkeit und Angemessenheit der durchgeführten Arbeiten	20
9 Verwertbarkeit der Ergebnisse	21
10 Fortschritte an anderen Stellen	21
11 Veröffentlichte oder eingereichte Publikationen	21
12 Arbeiten, die nicht zu einer Lösung geführt haben	21
13 Präsentationsmöglichkeiten für potenzielle Nutzer	22
14 Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung	22
A Beitrag zur Finanzierungspolitik	22
B Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	23
C Fortschreibung des Nutzungsplans	23
D Berichtsblatt	24

Liste der Abbildungen

1	Der implementierte Informationsfluss zwischen Modellen und Datensätzen.	7
2	Die Verteilung der alternativen Kraftstoffe in verschiedenen Verkehrssektoren in petajoules unter dem Basisszenario bei Optimierung der Gesamtsystemkosten unter 99,5% THG-Minderungsniveau. Die gestrichelten Linien veranschaulichen den Energiebedarf der einzelnen Teilsektoren unter Berücksichtigung der Verbesserung der Energieeffizienz. PtL: Power-to-Liquid, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, LCH4: verflüssigtes Methan (einschließlich Biomethan), BtL: Umwandlung von Biomasse in Flüssigkeiten mittels Fischer-Tropsch, PBtL: Power-to-Hydrogen + BtL, LignoMeOH: Methanol aus Lignozellulose, LignoEtOH: Ethanol aus Lignozellulose, HVO: Hydrobehandeltes Pflanzenöl, FAME: Fettsäuremethylester, StarchEtOH: Ethanol auf Stärkebasis, and BeetEtOH: Ethanol aus Zuckerrüben. Der gelbe Bereich steht für fossiles Kerosin in der Luftfahrt und fossilen Diesel in anderen Bereichen.	14
3	Die Entwicklung der Treibhausgasquoten für die Szenarien Base, SYN und DEL von 2020 bis 2050.	15
4	Die Produktionskosten der einzelnen Technologien zur Herstellung von Bioethanol und Biodiesel in den Jahren 2020, 2030, 2040 und 2050 in verschiedenen Szenarien.	16
5	Die Verteilung alternativer Kraftstoffe in verschiedenen Verkehrssektoren in Petajoule (PJ) unter dem SYN-Szenario bei Optimierung der Gesamtsystemkosten unter 99,5% THG-Minderungsniveau. Die gestrichelten Linien veranschaulichen den Energiebedarf der einzelnen Teilsektoren unter Berücksichtigung von Energieeffizienzsteigerungen. PtL: Power-to-Liquid, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, LCH4: verflüssigtes Methan (einschließlich Biomethan), BtL: Umwandlung von Biomasse in Kraftstoff mittels Fischer-Tropsch, PBtL: Power-to-Hydrogen + BtL, LignoMeOH: Methanol aus Lignozellulose, LignoEtOH: Ethanol aus Lignozellulose, HVO: Hydrobehandeltes Pflanzenöl, FAME: Fettsäuremethylester, StarchEtOH: Ethanol auf Stärkebasis, and BeetEtOH: Ethanol aus Zuckerrüben. Der gelbe Bereich steht für fossiles Kerosin in der Luftfahrt und fossilen Diesel in anderen Bereichen.	17

6	Die Verteilung der alternativen Kraftstoffe in den verschiedenen Verkehrssektoren in Petajoule (PJ) unter dem DEL-Szenario bei Optimierung der Gesamtsystemkosten unter einem THG-Minderungsgrad von 99,5%. Die gestrichelten Linien veranschaulichen den Energiebedarf der einzelnen Teilsektoren unter Berücksichtigung der Verbesserung der Energieeffizienz. PtL: Power-to-Liquid, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, LCH4: verflüssigtes Methan (einschließlich Biomethan), BtL: Umwandlung von Biomasse in Kraftstoffe mittels Fischer-Tropsch, PBtL: Power-to-Hydrogen + BtL, LignoMeOH: Methanol aus Lignozellulose, LignoEtOH: Ethanol aus Lignozellulose, HVO: Hydrobehandeltes Pflanzenöl, FAME: Fettsäuremethylester, StarchEtOH: Ethanol auf Stärkebasis, and BeetEtOH: Ethanol aus Zuckerrüben. Der gelbe Bereich steht für fossiles Kerosin in der Luftfahrt und fossilen Diesel in anderen Bereichen.	18
7	Der Verbrauch von Rohstoffen (heimische Energiepflanzen und Reststoffe) und Strom in Deutschland unter verschiedenen Szenarien.	19
8	Unterschiede zwischen den Szenarien im Vergleich zum Basis-szenario in Bezug auf Kosten und THG-Vermeidung.	20

Liste der Tabellen

1	UFZ-bezogene Aufgaben und Meilensteine in BEniVer	9
2	Die Verfügbarkeit von Reststoffen für 2020, 2030 und 2050 und deren Preisspanne.	12
3	Die Konvergenz von MAE und RMSE in verschiedenen Szenarien.	13

Abkürzungen

BENOPT BioEnergy Optimization Model

BESS Batterie-Energiespeichersysteme

BEVs Batterieelektrische Fahrzeuge

BMWi Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

BMWK Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

DEL Direktelektrifizierung

EEM Europäische Energiemärkte

ERE Überschuss an erneuerbarer Elektrizität

EVs Elektrofahrzeuge

GJ gigajoule

HDVs schwere Nutzfahrzeuge

LCA Lebenszyklus-Analyse

LDVs leichte Nutzfahrzeuge

MAE Mean Absolute Error

PtX Power-to-X

PVs Fotovoltaikanlagen

REMix Renewable Energy Mix

RMSE Root Mean Square Error

SAF nachhaltiger Flugkraftstoff

SYN SYNthetischer Kraftstoff

1 Hintergrund und Zielsetzung

Die Dekarbonisierung des Verkehrssektors in Deutschland ist aufgrund seiner wichtigen Rolle bei der Abschwächung des Klimawandels von größter Bedeutung. Der Transportsektor ist ein Hauptverursacher von Treibhausgasemissionen, wobei Straßenfahrzeuge die Hauptverursacher sind. Durch die Umstellung auf umweltfreundlichere und nachhaltigere Alternativen kann Deutschland seinen Kohlenstoff-Fußabdruck erheblich verringern und auf das Erreichen seiner Klimaziele hinarbeiten. Es ist jedoch wichtig zu erkennen, dass es keine Patentlösung für die Dekarbonisierung des Verkehrssektors gibt. Jede Technologie hat ihre Vorteile und Grenzen, und es ist ein ganzheitlicher Ansatz erforderlich, um die komplexen Herausforderungen zu bewältigen.

Ziel dieses Teilprojekts ist es, den Wettbewerb zwischen strombasierten Kraftstoffen (E-Fuels) und Biokraftstoffen bei der Erreichung der Energie- und Treibhausgasminderungsziele im deutschen Verkehrssektor zu untersuchen. Um dies zu erreichen, haben wir das bestehende BioEnergy Optimization Model (BENOPT) um relevante E-Kraftstoff-Optionen erweitert und damit vier Fragen beantwortet: Welche Kraftstoffpfade werden in welchen Sektoren, wann und in welchem Umfang relevant?

Parallel zum Modell Renewable Energy Mix (REMIX) untersuchen wir mit BENOPT den Wettbewerb zwischen verschiedenen E-Fuels und Biokraftstoffen in deutschen Energie- und Stromsystemen. Obwohl sich beide Modelle in ihren Zielen überschneiden, gehen sie das Problem aus unterschiedlichen Blickwinkeln an. Das BENOPT-Modell betrachtet die technisch-ökonomischen und politischen Aspekte der Bioökonomie in einer Bottom-up-Methode, während REMIX sich auf die Infrastruktur konzentriert, die benötigt wird, um den Ausbau von intermittierenden erneuerbaren Energiequellen wie Wind und Sonne im Stromsektor zu unterstützen. Dazu gehört die Untersuchung der räumlichen und zeitlichen Verteilung der erneuerbaren Energiequellen, ihrer Integration in die bestehende Infrastruktur und ihres Gesamtpotenzials zur Erreichung der Energie- und Klimaziele.

Das BENOPT-Modell umfasst eine detaillierte Kosten- und Treibhausgasanalyse unter Verwendung einer Lebenszyklus-Analyse (LCA)-Ansatzes. Darüber hinaus werden technologische Lerneffekte exogen berücksichtigt, was die Investitions- und Betriebskosten im Laufe der Zeit reduziert. Unter Verwendung einer flexiblen zeitlichen Auflösung ¹ findet BENOPT die kosteneffizienteste langfristige Strategie, um die Energie- und THG-Reduktionsziele unter verschiedenen Szenarien zu erreichen. Die Bereitstellungs- und THG-Minderungskosten werden ermittelt und mit strombasierten Optionen verglichen. Umfangreiche Sensitivitätsanalysen überprüfen die Robustheit der Ergebnisse.

Insgesamt wurden im Rahmen des Projekts die folgenden Ziele erreicht:

- Erweiterung eines Bioenergie-Optimierungsmodells (z.B. BENOPTex) zur Einbeziehung von E-Kraftstoffen.

¹stündlich für den Strommarkt und jährlich für andere Märkte

- Die Erweiterung des Technologieportfolios um E-Fuel-Verfahren.
- Berechnung der Treibhausgasreduzierung im Laufe der Zeit für vier verschiedene Szenarien unter Berücksichtigung der neuesten politischen Entwicklungen.
- Analyse und Vergleich der Treibhausgasminderungskosten im Zeitverlauf für verschiedene Szenarien.
- Modellierung der optimalen Nutzung von E-Kraftstoffen und Biokraftstoffen auf der Grundlage der Energie- und Treibhausgasminderungskosten.

2 Aufgaben

Als Teil des BEniVer-Projekts spielte das UFZ eine aktive Rolle in den Arbeitspaketen (AP) 1.1 und 1.2, die darauf abzielten, Erkenntnisse für die Umstellung des deutschen Verkehrssektors auf nicht-fossile Brennstoffe zu gewinnen und dabei die neuesten Entwicklungen im Energie- und Stromsektor zu berücksichtigen. Die zugrundeliegenden Parameter der deutschen Energiesysteme wurden jedoch durch unvorhergesehene globale Umwälzungen wie die COVID-19-Pandemie und den Russland-Ukraine-Konflikt erheblich beeinträchtigt, was eine mehrfache Überarbeitung der Szenarien und Ergebnisse erforderlich machte. Um die Genauigkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurde beispielsweise das Referenzszenario mehr als 17 Mal synchronisiert, bis eine akzeptable Konsistenz erreicht war. Unsere Forschung konzentriert sich auf die Rolle von synthetischen Kraftstoffen und Biokraftstoffen bei der Erreichung der Kohlenstoffneutralität bis 2050. Um den neuesten politischen Entwicklungen Rechnung zu tragen, haben wir unser Optimierungsmodell erweitert, um die Auswirkungen der RED2 auf die Treibhausgasemissionen einzubeziehen. Die Einbeziehung der RED wird in den monatlichen Sitzungen von AP1 beschlossen und im Zwischenbericht am zweiten Februar 2022 berücksichtigt. Unser Optimierungsmodell berücksichtigt die Auswirkungen der RED endogen und liefert so ein umfassendes Verständnis ihrer Auswirkungen auf die Erreichung kohlenstoffneutraler Ziele [1].

In enger Zusammenarbeit mit den Partnern in AP 1.1 trägt das UFZ zur Gestaltung des Informationsflusses zwischen den Modellen und zur Formulierung von Parametern für verschiedene Szenarien bei, um den Energiebedarf der verschiedenen Verkehrsträger abzuschätzen. Die aus AP 1.1 generierten Inputs wurden in BENOPTex integriert [2]. Darüber hinaus haben wir mit Partnern in AP 1.2 zusammengearbeitet, um einen iterativen Kopplungsansatz zu entwickeln und zu implementieren, durch den Energiesystem- und Strommarktmodelle integriert werden. Das REMix ist ein Strommarktmodell, das genutzt wurde, um die Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom und Wasserstoff für die Erzeugung synthetischer Kraftstoffe in Deutschland bis 2050 unter verschiedenen Szenarien zu bewerten. Durch die Harmonisierung der Parameter zwischen den Modellen und Datenbanken Vector21, 4DRace, REMix

und BENOPTex wurde ein nahtloser Informationsaustausch durchgeführt, der eine umfassende Analyse der verschiedenen Szenarien ermöglicht. Unser Ansatz ermöglichte auch eine genauere Abschätzung der Auswirkungen verschiedener energiepolitischer Maßnahmen und Marktbedingungen auf den Übergang des deutschen Verkehrssektors zu nicht-fossilen Kraftstoffen, indem die Ergebnisse von Simulations- und Bilanzierungsmodellen einbezogen wurden, die das Verhalten der Verbraucher und die Perspektiven der Hersteller berücksichtigen.

Zur Modellierung von Energieszenarien für den Personen- und Güterverkehr im Straßen- und Luftverkehr wurden, wie in AP 1.1 beschrieben, Daten von Vector 21 und 4D-Race erhoben. In Zusammenarbeit mit Experten des DBFZ werden das theoretische Biomassepotenzial und das mobilisierbare technische Potenzial für zukünftige Jahre berechnet.

Abbildung 2 zeigt das entwickelte Kopplungsverfahren, mit dem die Erkenntnisse aus verschiedenen Quellen integriert werden, um die Perspektiven der heterogenen Akteure abzubilden. Das Soft-Coupling-Verfahren ist in [3] ausführlich erläutert worden.

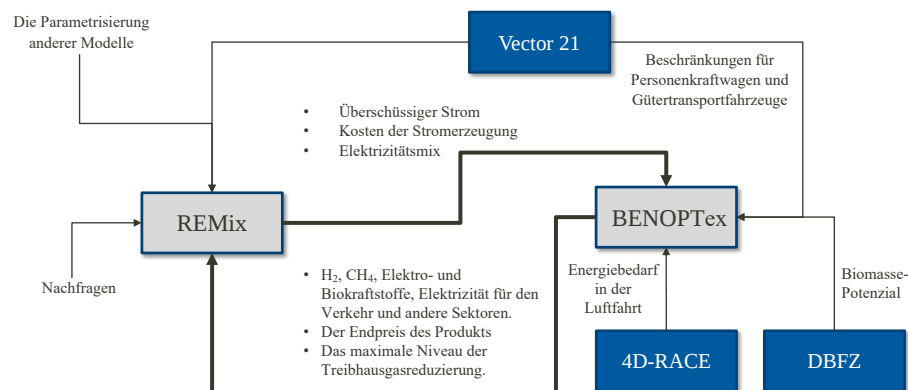


Figure 1: Der implementierte Informationsfluss zwischen Modellen und Datensätzen.

Unsere Kopplungsstrategie beinhaltet ein iteratives Verfahren, bei dem BENOPTex die verfügbaren Biomasserest- und Abfallstoffe und Energiepflanzen verschiedenen Technologien zuordnet, und zwar in Übereinstimmung mit den Endnutzungsanforderungen, die durch Top-down- und Simulationsmodelle vorgegeben werden. Dieser iterative Ansatz ermöglicht es uns, die Bioenergie-Allokation zu optimieren und sicherzustellen, dass die Nachfrage der verschiedenen Endverbraucher befriedigt wird, während gleichzeitig die Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom mit REMix berücksichtigt wird. Um die mehrfache Ausführung des BENOPTex-Modells innerhalb einer Schleife mit REMix für verschiedene Szenarien zu erleichtern, haben wir das Modell optimiert, um eine höhere Leistung und kürzere Laufzeiten zu erreichen (berichtet am 28. September 2021)

[4]. Im Rahmen unserer Optimierungsbemühungen haben wir die Effizienz des Modellcodes verbessert und neue Prozessorarchitekturen genutzt. Dieser iterative Prozess wird so lange fortgesetzt, bis die Lösungen des BENOPTex-Modells und von REMix zu einem Gleichgewicht konvergieren, d. h. wenn die Veränderung der sektoralen Brennstoffproduktion zwischen zwei aufeinanderfolgenden Iterationen nicht mehr als 10% von 2020 bis 2050 beträgt. Dieses Kriterium dient als notwendige Abbruchbedingung, die sicherstellt, dass die Modellergebnisse stabil und zuverlässig sind. Die neueste Version des Modells wurde auf GitHub und GitLab unter einer Creative-Commons-Lizenz hinterlegt.

3 Bedingungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde

Wir haben mit BENOPTex ein fortschrittliches Optimierungsmodell entwickelt, das die gesamte Bioenergieversorgungskette vom Anbau der Energiepflanzen bis zur Verwertung der biogenen Reststoffe durch Demand-Service-Technologien einbezieht. Das Modell wurde auf Deutschland zugeschnitten und verwendet einen räumlich begrenzten, einknotenigen Rahmen. BENOPTex ist in der Lage, flexible zeitliche Auflösungen zu verwenden, mit stündlicher Auflösung für Strom und jährlicher Auflösung für potenzielle Biomasse. Das Modell nutzt theoretische und technische Biomassepotenzialdaten, die von unseren Kollegen am DBFZ zur Verfügung gestellt werden, als Input, bestimmt aber auch endogen den Anbau von Energiepflanzen auf der Grundlage techno-ökonomischer Parameter und der Flächenverfügbarkeit. Diese Parameter werden aus einschlägigen Literaturquellen abgeleitet. Die Informationen zur Nachfrageseite werden ebenfalls von den DLR-TT-STB, DLR-FK und DLR-FW Teams bezogen.

Das BENOPTex-Modell besteht aus zwei Hauptkomponenten: einem Front-End, das für die Erstellung von Szenarien zuständig ist, und einem Back-End, das das Optimierungsmodell löst. Zur Implementierung des Modells haben wir uns für MATLAB als Front-End und GAMS als Back-End entschieden, wobei CPLEX als Solver eingesetzt wird. MATLAB ist aufgrund seiner leistungsstarken Berechnungsmöglichkeiten und seiner benutzerfreundlichen Oberfläche eine ausgezeichnete Wahl für das Front-End. Darüber hinaus haben wir über eine gemeinsame Lizenz des UFZ Zugang zu MATLAB, so dass wir diese Ressource ohne zusätzliche Kosten nutzen können. GAMS in der Gemeinschaft der Energiesystemmodellierer als Standardwerkzeug weithin anerkannt und eignet sich ideal für die Backend-Optimierungskomponente des BENOPTex-Modells. Allerdings ist GAMS keine kostenlose Programmiersprache, und es muss eine Lizenz erworben werden. Daher haben wir speziell für dieses Projekt eine GAMS-Lizenz erworben, um sicherzustellen, dass das Modell effizient und genau implementiert werden kann.

Die Entwicklung von Backend und Frontend wird von Danial Esmaeili Ali-

abadi und Matthias Jordan zwischen 2021 und 2023 und Markus Millinger und Matthias Jordan zwischen 2019 und 2020 durchgeführt. Karl-Friedrich Cyffka vom DBFZ unterstützt uns bei der Erfassung des Biomassepotenzials. Die Kopplung der Modelle REMix und BENOPT wurde von Danial Esmaeili Aliabadi vom UFZ und Niklas Wulff vom DLR-TT durchgeführt. Die Kollegen vom DLR-FK (Özcan Deniz, Ines Oesterle und Samuel Hasselwander) stellten uns drei Iterationen der Vector21-Ergebnisse zur Verfügung, wobei die letzte vom 29.04.2022 ist. Der Energiebedarf des Luftfahrtsektors in Deutschland wurde uns von einem Kollegen des DLR-FW (Wolfgang Grimme) am 11.10.2021 übermittelt.

Die Entscheidungen und Diskussionen werden während unserer monatlichen Treffen, die jeweils am ersten Donnerstag des Monats stattfanden, im Confluence-Wiki-System dokumentiert.

4 Planung und Ablauf des Projekts

Im Projekt BENiVer wurde das Arbeitspaket 1 vom DLR-TT-STB koordiniert. Als Partner in diesem AP wurden die für das UFZ relevanten Meilensteine festgelegt:

- **M1:** Das entwickelte Modell ist an die Anforderungen im Projekt angepasst und funktioniert. Dies wird durch einen Probelauf mit vorläufigen Prozessdaten bestätigt (12/2020).
- **M2:** Mindestens fünf relevante E-Fuels-Prozesse wurden in das entwickelte Modell aufgenommen (03/2021). M2 wird erreicht, indem mehrere E-Fuels-Prozesse in das BENOPT-Modell integriert werden, wie in [5] berichtet.
- **M3:** Integration der THG-Daten für mindestens zehn der Biokraftstoff- und E-Kraftstoffprozesse in das Modell (06/2021). Einzelheiten zu den Prozessen finden Sie auf der BENOPTex Webseite² und in veröffentlichten Studien.
- **M4:** Die Modellierung und Analyse der Wettbewerbsfähigkeit der Prozesse im Zeitverlauf wurde für mindestens zwei Szenarien durchgeführt (11/2021).

Table 1: UFZ-bezogene Aufgaben und Meilensteine in BENiVer

	2019				2020				2021				2022				2023	
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2
Entwicklung von Modellen																		
Modellverlängerung (E-Kraftstoffe)																		
Modellierung von RED- und Treibhausgaszielen																		
Modellierung/Analyse																		

²URL: <https://www.ufz.de/index.php?en=37180>

Die frühe Planung wurde durch zwei kritische Jahre beeinflusst: 2020 und 2022. Als Reaktion auf die Auswirkungen der COVID-19-Pandemie auf die Energienachfrage beschlossen wir, die zugrunde liegenden Modelle im Jahr 2021 mit aktualisierten Szenarien erneut zu erstellen. Diese Entscheidung wurde nach mehreren Diskussionen während unserer monatlichen Treffen getroffen. Dies führte jedoch zu Verzögerungen bei den Modellierungs- und Sensitivitätsanalyseaufgaben (d. h. den Aufgaben M3 und M4), was sich im Projektzeitplan widerspiegelt. Der anhaltende Krieg zwischen Russland und der Ukraine war das zweite wichtige Ereignis, das sich auf das Projekt auswirkte, insbesondere auf die Erwartungen von REMix hinsichtlich der Verfügbarkeit von Erdgas als Energievektor, der Braunkohle und Steinkohle ersetzen soll. Der Druck auf die Lebensmittelversorgungskette wirkte sich auch auf die Verfügbarkeit von Biokraftstoffen der ersten Generation in den BENOPTex-Modellparametern aus, da die deutsche Regierung die Landnutzung für die Lebensmittelproduktion priorisierte.

5 Wissenschaftlicher und technischer Stand der Technik

Die systematische Bewertung von E-Treibstoffen ist ein relativ neues Forschungsgebiet [6]. Während sich die meisten Studien auf die Kosten [7, 8], die THG-Emissionen [9] und technische Vergleiche mit fossilen Kraftstoffen [10] konzentrierten, gab es nur wenige Untersuchungen über den Wettbewerb und die Synergien zwischen E-Kraftstoffen und Biokraftstoffoptionen für alle Verkehrsträger unter Berücksichtigung der RED-Politik [11].

Leider mangelt es vielen bestehenden Modellen an den für Bottom-up-Modelle erforderlichen technologischen Details, was zu einem begrenzten Verständnis von Biokraftstoffen führt, da sie oft mit einem breiten Pinselstrich behandelt werden [12]. Bei diesem Ansatz werden wesentliche Informationen über die Art des Kraftstoffs und die verwendeten Rohstoffe nicht erfasst. Durch die Kombination von E-Kraftstoffen und Biokraftstoffen können wir dieses Problem angehen und von dem verfügbaren erneuerbaren CO₂ profitieren, das zur Herstellung von E-Kraftstoffen verwendet werden kann.

Um diese Lücke zu schließen, entwickeln wir in diesem Arbeitspaket ein integriertes System von Modellen, die die Perspektiven heterogener Interessengruppen berücksichtigen. Der sich daraus ergebende Rahmen bietet eine ganzheitliche Sicht auf Technologiepfade, unter Berücksichtigung der von den politischen Entscheidungsträgern festgelegten Anreize und Sanktionen.

6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zur Durchführung der Aufgaben in diesem Teilprojekt nahmen die Partner Kontakt zu den relevanten Fahrzeugherstellern auf, um deren Sichtweise bezüglich

der Veränderung der Konstruktion zukünftiger Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor einzubeziehen.

7 Eingehende Darstellung

7.1 Annahmen

In BENOPTex werden zehn Energiepflanzen und 13 Gruppen von Reststoffen modelliert. Die Entscheidung des Landwirts, verschiedene Energiepflanzen anzubauen, ist eine endogene Entscheidung im Modell, die auf der Nachfrage nach Kraftstoff, Wärme oder Strom basiert. In Deutschland wird Weizen als die am meisten verbreitete Kultur betrachtet; daher wird der Endpreis anderer Energiepflanzen so berechnet, dass ihre Gewinnspannen mit der Gewinnspanne von Weizen als Benchmark gleichziehen [13]. Die Produktionskosten von Energiepflanzen setzen sich aus Direktkosten, Arbeitskosten, Brennstoffkosten, Maschinenkosten (fix und variabel) und Dienstleistungskosten zusammen, die bis 2050 mit einer Rate von 4% steigen. Die verfügbare Anbaufläche für Energiepflanzen wird für 2020 mit 2,399 Mio. ha angenommen, die bis 2050 aufgrund der Flächenkonkurrenz zwischen den verschiedenen Sektoren leicht auf 2,159 Mio. ha zurückgehen wird.

Andererseits besteht jeder Reststoff aus einer Teilmenge von 77 Resten. Die Daten zur Verfügbarkeit der einzelnen Reststoffe stammen aus der DBFZ-Ressourcendatenbank [14]. Es wird angenommen, dass die potenziellen Reststoffe für 2020 dem Mittelwert entsprechen, der 2015 für energetische Zwecke verwendet wurde. Wir gehen davon aus, dass im Jahr 2050 33% des mobilisierbaren Potenzials für energetische Zwecke zur Verfügung stehen werden. Die Reststoffpreise werden in Spannen angegeben, wie sie in Tabelle 2 dargestellt sind. Wie aus Tabelle 2 ersichtlich ist, ist der Mindestpreis für Altholz negativ, da die Erzeuger die Verbraucher für die Nutzung bezahlen müssen. Das in jedem Jahr verfügbare Biomassepotenzial wird in drei gleich große Kategorien mit unterschiedlichen Preisen (aus dieser Spanne) aufgeteilt, um verschiedene Qualitäten ähnlicher Rohstoffe zu unterscheiden. Darüber hinaus erlauben wir den Import von Energiepflanzen, Reststoffen und synthetischen Brennstoffen mit höheren Kosten aus anderen Ländern, um den Verbrauch inländischer Ressourcen gegenüber ausländischen zu bevorzugen und die negativen Auswirkungen der Energiekopplung abzumildern.

7.2 Methodologie

Das Optimierungsverfahren in BENOPTex besteht aus zwei Stufen. In der ersten Stufe maximiert die Software das Niveau der THG-Vermeidung und berücksichtigt dabei die von anderen Modellen und Datenbanken festgelegten Randbedingungen. Die daraus resultierende Lösung liefert ein Portfolio von Technologien, die die Treibhausgasemissionen minimieren. In der zweiten Phase löst GAMS das Modell noch einmal mit einer zweiten Zielfunktion, die diesmal

Table 2: Die Verfügbarkeit von Reststoffen für 2020, 2030 und 2050 und deren Preisspanne.

	Reststoff-Potenzial (PJ)			Reststoff-Preis (€/GJ)	
	2020	2030	2050	Minimum	Maximum
Scheitholz	150	150	150	11	16,8
Paludikulturen	0	23	166	0	2,7
Stroh	20	29,6	49	12,8	16,9
Gülle/Mist	26	33,4	48	0	0
Waldrestholz	126	134,2	151	4,2	7,3
Industrierestholz	21	21,7	23	3	3,4
Altspeisefette	0	1,3	4	16	16
Bioabfall aus Haushalten	13	13,7	15	0	0
Industrielle Abfälle	20	21,4	24	0	0
Schwarzlauge	16	16,0	16	0	0
Altholz	120	120,8	122	-0,6	2,7
Klärschlamm	5	5	5	0	0

auf die Minimierung der Gesamtsystemkosten abzielt. Der zweite Schritt lässt zwar eine suboptimale Lösung in Bezug auf die THG-Emissionen von 0,5% zu, ermöglicht es dem Modell aber, kostspielige Technologien, die nur einen minimalen Beitrag zur THG-Vermeidung leisten, zu identifizieren und zu ersetzen.

Unsere Aufgabe in diesem Projekt besteht darin, das Potenzial verschiedener Kraftstoffoptionen für verschiedene Verkehrsträger in Deutschland bis 2050 zu bewerten, wobei das technische Biomassepotenzial, der Überschuss an erneuerbarem Strom und die politischen Beschränkungen für die Kohlenstoffintensität alternativer Kraftstoffe berücksichtigt werden. Wie bekannt, machen fossiler Diesel, Benzin und Kerosin derzeit einen erheblichen Anteil des Kraftstoffverbrauchs im deutschen Verkehrssektor aus. Bei einer Extrapolation der RED II wird der Treibhausgas-Quotenmechanismus jedoch verlangen, dass der Straßen- und Schienenverkehrssektor zu 80 Prozent kohlenstoffneutral ist. Während Benzin-Pkw im V21-Szenario weiterhin erhältlich sein werden, haben die Hersteller kaum Anreize, die Motorenkonstruktion zu ändern, um höhere Beimischungsquoten von Ethanol und Methanol (10% für Ethanol und 5% für Methanol) zu ermöglichen, was bedeutet, dass diese Fahrzeuge weiterhin auf fossiles Benzin angewiesen sein werden. Wir stellen fest, dass Dieselmotoren bei Personenkraftwagen fast vollständig ersetzt wird, im Güter- und Seeverkehr jedoch weiterhin in großem Umfang eingesetzt wird.

7.3 Konvergenz

Um sicherzustellen, dass unsere Modelle konsistente und genaue Ergebnisse liefern, verwenden wir einen iterativen Kopplungsansatz. Bei diesem Ansatz wird die Ausgabe des einen Modells als Eingabe für das andere Modell verwendet und umgekehrt. In unserem Fall wird die Ausgabe des REMix-Modells

als Eingabe für das BENOPTex-Modell verwendet und umgekehrt. Zu den REMix-Ausgaben, die in BENOPTex als Inputs verwendet werden, gehören insbesondere die Verfügbarkeit von Überschussstrom, die für die Elektrolyse verwendete Strommenge, der Anteil jeder Technologie am Strommix und der Spotpreis für Strom.

Aus einem Mix an Technologien wird die Kohlenstoffintensität des Strommixes berechnet. Zusätzlich verwenden wir den Spot-Strompreis von REMix als Skalierungsfaktor, um vorherzusagen, wie sich der Technologiemix auf die zukünftigen Stromkosten in verschiedenen Sektoren auswirken kann, wobei wir verschiedene Steuern und Abgaben berücksichtigen. Wir beziehen auch stündliche Stromüberschüsse in das Modell ein, die von verschiedenen Technologien genutzt werden können. Darüber hinaus wird die von den Power-to-X (PtX)-Technologien verbrauchte Strommenge durch REMix bestimmt, insbesondere der in der Elektrolyse verwendete Strom. Um die Genauigkeit unserer Modelle zu messen, verwenden wir den Mean Absolute Error (MAE) und Root Mean Square Error (RMSE). Tabelle 3 zeigt die Änderungen zwischen aufeinanderfolgenden Iterationen in den Szenarien Base, SYNthetischer Kraftstoff (SYN) und Direktelektrifizierung (DEL). Das Basisszenario stellt den aktuellen Status quo dar, wobei keine wesentlichen Änderungen in der Politik oder in den Trends angenommen werden. Das SYN-Szenario sieht jedoch eine Zukunft vor, in der der Verbrauch von synthetischen Kraftstoffen im Straßenverkehr einen höheren Stellenwert einnimmt. Im Gegensatz dazu sieht das DEL-Szenario ein Szenario vor, in dem Straßenfahrzeuge direkt Strom verbrauchen. Außerdem spielen im Luftverkehr sowohl Wasserstoff als auch Elektrizität eine größere Rolle als im Basis- und SYN-Szenario.

Um die Konsistenz mit Vector 21 zu verbessern und den gesamten Energiebedarf im Verkehr zu erfassen, fügten wir in der zehnten Iteration des Basisszenarios fossile Brennstoffe zu BENOPTex hinzu, was MAE und RMSE zwischen R10 und R9 beeinflusste. Diese Abweichungen wurden jedoch in den nachfolgenden Iterationen verringert.

Table 3: Die Konvergenz von MAE und RMSE in verschiedenen Szenarien.

	Basis-Szenario			SYN-Szenario			DEL-Szenario	
	MAE	RMSE		MAE	RMSE		MAE	RMSE
R9 - R8	159.49	246.31	R2-R1	16.05	52.90	R2-R1	21.08	50.39
R13-R12	11.56	28.28	R4-R3	10.70	28.63	R3-R2	0.31	1.19
R15-R14	2.98	10.85	R6-R5	13.87	60.41			
R17-R16	3.00	8.83	R7-R6	2.82	9.55			
R18-R17	2.07	6.79	R8-R7	1.01	3.33			

7.4 Ergebnisse

Um den von FuelEU geforderten nachhaltiger Flugkraftstoff (SAF)-Anteil von 63% zu erreichen, muss Deutschland synthetischen Kraftstoff aus anderen Ländern importieren, da die verfügbare Elektrizität direkt von Elektrofahrzeugen, Elektrozügen und Elektro-LKWs (Batterieelektrische Fahrzeuge (BEVs)) für den Schienen- und Straßenverkehr genutzt werden soll. Laut FuelEU sollten 28% des Kraftstoffs für den Luftverkehr synthetisch sein, während die restlichen 35% aus SAF bestehen sollten. Die Biomass-to-Liquid-Technologie ist eine vielversprechende Option für die Herstellung von SAF, mit Kosten von 54,47 Euro pro gigajoule (GJ) unter Verwendung von Pappel, was sie zur wirtschaftlichsten Technologie für die Herstellung von Diesel und Kerosin im Jahr 2050 macht.

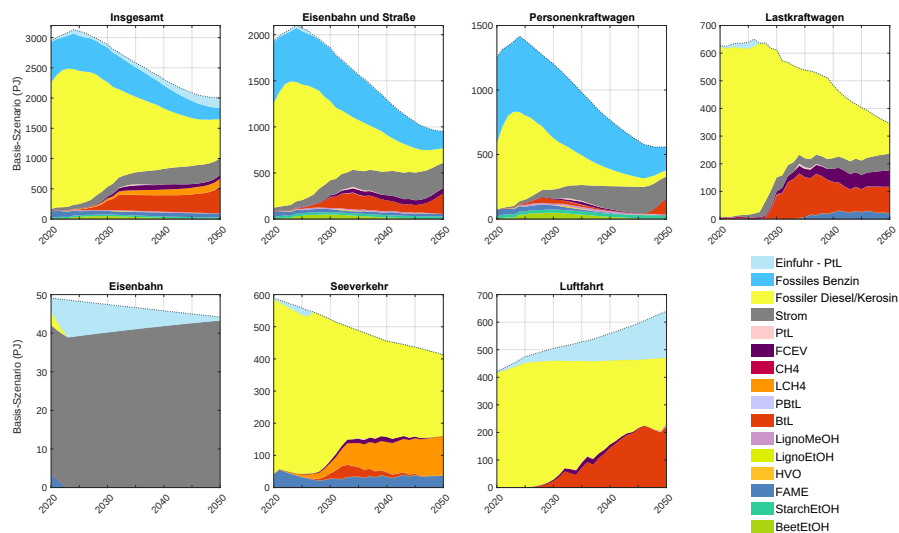


Figure 2: Die Verteilung der alternativen Kraftstoffe in verschiedenen Verkehrssektoren in petajoules unter dem Basisszenario bei Optimierung der Gesamtsystemkosten unter 99,5% THG-Minderungs niveau. Die gestrichelten Linien veranschaulichen den Energiebedarf der einzelnen Teilsektoren unter Berücksichtigung der Verbesserung der Energieeffizienz. PtL: Power-to-Liquid, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, LCH4: verflüssigtes Methan (einschließlich Biomethan), BtL: Umwandlung von Biomasse in Flüssigkeiten mittels Fischer-Tropsch, PBtL: Power-to-Hydrogen + BtL, LignoMeOH: Methanol aus Lignozellulose, LignoEtOH: Ethanol aus Lignozellulose, HVO: Hydrobehandeltes Pflanzenöl, FAME: Fettsäuremethylester, StarchEtOH: Ethanol auf Stärkebasis, and BeetEtOH: Ethanol aus Zuckerrüben. Der gelbe Bereich steht für fossiles Kerosin in der Luftfahrt und fossilen Diesel in anderen Bereichen.

Um die in der RED II festgelegte THG-Quote für den Straßen- und Schienenverkehr zu erfüllen, können wir unserer Analyse zufolge mit den in Abbildung

2 aufgeführten Technologien bis zum Jahr 2050 eine Emissionsreduzierung von mindestens 80% erreichen. Abbildung 3 veranschaulicht den Trend zur Erreichung dieses Ziels, wobei die gestrichelte graue Linie das von den politischen Entscheidungsträgern vorgegebene Ziel bis 2030 darstellt und die Extrapolation des Trends das erwartete Erreichen einer 80-prozentigen Reduzierung der THG-Emissionen bis 2050 im Schienen- und Straßenverkehr anzeigt. Wir haben die THG-Quote auf der Grundlage der in [15] dargestellten Formel berechnet. In dieser Formel haben wir angenommen, dass der Trend der THG-Quote ein nicht-abnehmender Trend ist, indem wir geeignete Beschränkungen hinzugefügt haben, die in [1] erwähnt werden. Der Trend, der 99,5% der maximalen THG-Vermeidung durch Kostenminimierung entspricht, ist in rot, schwarz und grün für die Szenarien Base, SYN und DEL dargestellt. In allen Szenarien nähern sich die soliden Trends zu Beginn und am Ende des Zeithorizonts dem gestrichelten grauen Trend an, was zwei technologische und verwaltungstechnische Hindernisse aufzeigt, die angegangen werden sollten. Erstens müssen die politischen Entscheidungsträger ihre Bemühungen verstärken, um sicherzustellen, dass die weit verbreitete Elektrifizierung von Personenkraftwagen so früh wie möglich gelingt. Die zweite Herausforderung ergibt sich, wenn die Politik strengere Treibhausgasquoten vorschreibt. Dies wird in vielen Bereichen noch große Anstrengungen zur Erforschung und Entwicklung neuer umweltfreundlicher Technologien für den gewerblichen Verkehr erfordern. Auch die derzeitige Vorgabe für die THG-Quote (für den Straßen- und Schienenverkehr) im Jahr 2030 kann verschärft werden ($< 30\%$), ohne dass dies spürbare Auswirkungen auf die Kosten der optimalen Strategie hat.

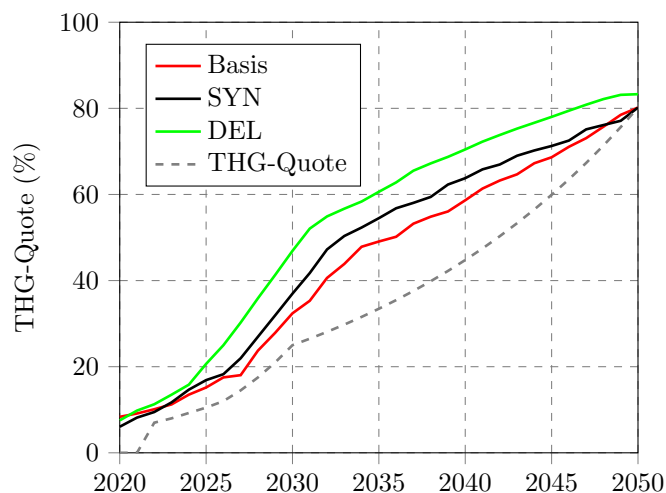


Figure 3: Die Entwicklung der Treibhausgasquoten für die Szenarien Base, SYN und DEL von 2020 bis 2050.

Wie in Abbildung 4 dargestellt, wird erwartet, dass die Kosten für Biodiesel

und Bioethanol in den kommenden Jahren steigen werden, vor allem aufgrund der Verdrängung herkömmlicher Biokraftstoffe und der Einführung fortschrittlicher Biokraftstofftechnologien, die teurer sind als herkömmliche. Infolgedessen sollten die Verbraucher in Zukunft mit höheren Preisen für diese Biokraftstoffe rechnen.

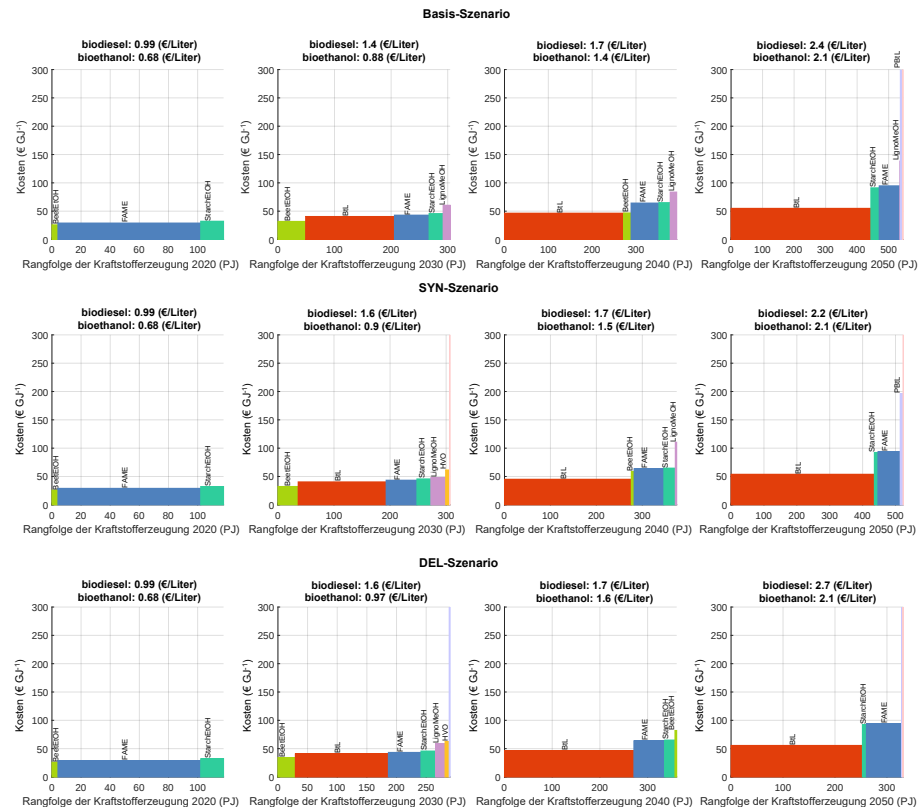


Figure 4: Die Produktionskosten der einzelnen Technologien zur Herstellung von Bioethanol und Biodiesel in den Jahren 2020, 2030, 2040 und 2050 in verschiedenen Szenarien.

Gemäß dem in Vector21 beschriebenen PtX-Szenario, das auch im SYN-Szenario umgesetzt wird, wird erwartet, dass leichte Nutzfahrzeuge (LDVs) weniger Benzin und mehr Strom verbrauchen (siehe Abbildung 5). Diese Verschiebung kann auf die höhere Effizienz von BEVs gegenüber Verbrennungsmotoren zurückgeführt werden. Außerdem wird die Gesamtmenge der für LDVs benötigten Elektrizität aufgrund der höheren Effizienz sinken. Für schwere Nutzfahrzeuge (HDVs) sieht das Szenario die Verwendung von Strom und Wasserstoff vor, um einen Teil des Dieselverbrauchs zu ersetzen. Angesichts des verbleibenden Energiebedarfs werden jedoch Biokraftstoffe zur Herstellung

von Biodiesel und synthetischen Kraftstoffen erforderlich sein. Im Luftfahrtsektor halten sich sowohl das Basis- als auch das SYN-Szenario an das progressive Szenario, das die Auswirkungen von COVID-19 nicht berücksichtigt.

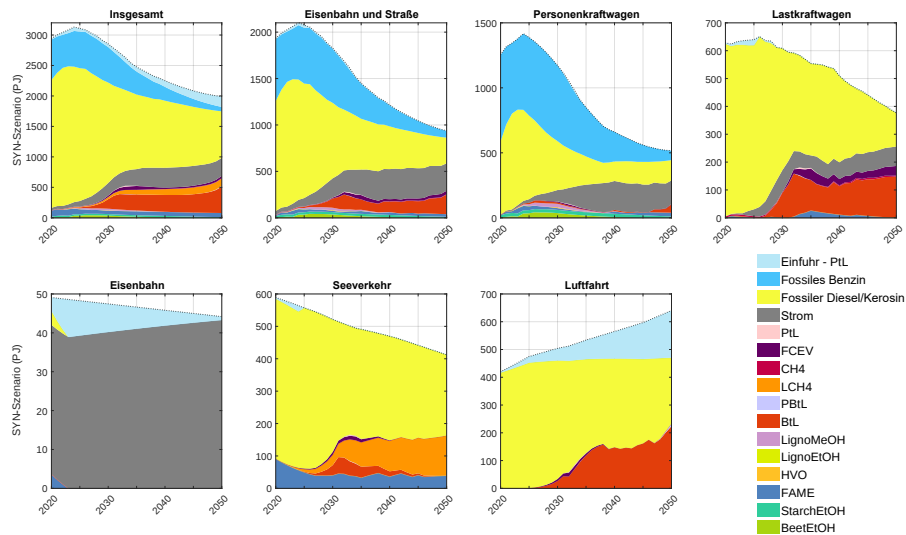


Figure 5: Die Verteilung alternativer Kraftstoffe in verschiedenen Verkehrssektoren in Petajoule (PJ) unter dem SYN-Szenario bei Optimierung der Gesamtsystemkosten unter 99,5% THG-Minderungslevel. Die gestrichelten Linien veranschaulichen den Energiebedarf der einzelnen Teilsektoren unter Berücksichtigung von Energieeffizienzsteigerungen. PtL: Power-to-Liquid, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, LCH₄: verflüssigtes Methan (einschließlich Biomethan), BtL: Umwandlung von Biomasse in Kraftstoff mittels Fischer-Tropsch, PBtL: Power-to-Hydrogen + BtL, LignoMeOH: Methanol aus Lignozellulose, LignoEtOH: Ethanol aus Lignozellulose, HVO: Hydrobehandeltes Pflanzenöl, FAME: Fettsäuremethylester, StarchEtOH: Ethanol auf Stärkebasis, and BeetEtOH: Ethanol aus Zuckerrüben. Der gelbe Bereich steht für fossiles Kerosin in der Luftfahrt und fossilen Diesel in anderen Bereichen.

In Abbildung 6 und in Anlehnung an Vector 21 ist ersichtlich, dass die direkte Elektrifizierung des Straßenverkehrs die anderen Szenarien übertrifft und damit die weitgehende Substitution von Benzin- und Dieselmotoren durch Strom in Personenkraftwagen ermöglicht. Eine große Herausforderung bei diesem Szenario ist jedoch die unzureichende Verfügbarkeit von Strom aus erneuerbaren Energien, die eine vollständige Substitution erschwert. Um dieses Problem anzugehen, sollten die politischen Entscheidungsträger zwei mögliche Lösungen in Erwägung ziehen: Investitionen in den Aufbau robuster Übertragungsleitungen, die mit den europäischen Nachbarländern verbunden sind, um zusätzlichen Strom zu importieren, oder verstärkte Anstrengungen im Inland, um die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien zu steigern.

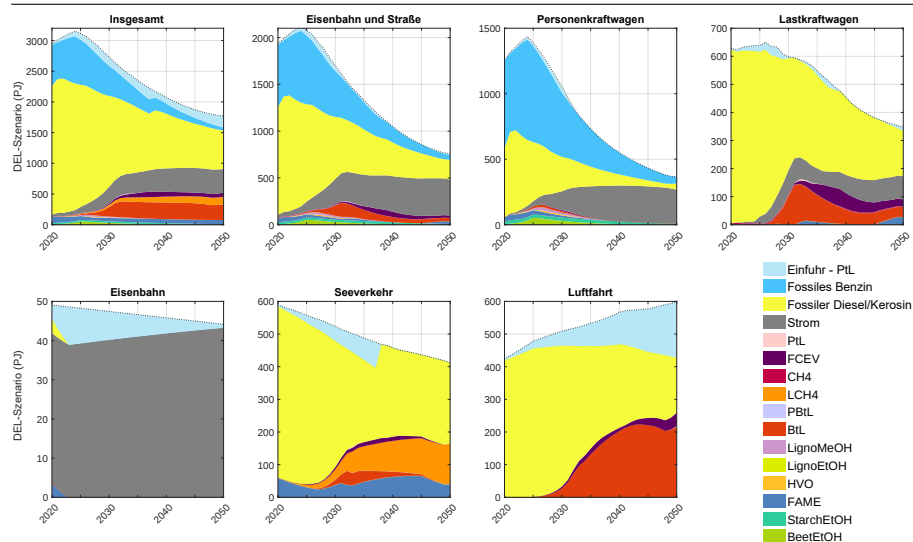


Figure 6: Die Verteilung der alternativen Kraftstoffe in den verschiedenen Verkehrssektoren in Petajoule (PJ) unter dem DEL-Szenario bei Optimierung der Gesamtsystemkosten unter einem THG-Minderungsgrad von 99,5%. Die gestrichelten Linien veranschaulichen den Energiebedarf der einzelnen Teilsektoren unter Berücksichtigung der Verbesserung der Energieeffizienz. PtL: Power-to-Liquid, FCEV: Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, LCH4: verflüssigtes Methan (einschließlich Biomethan), BtL: Umwandlung von Biomasse in Kraftstoffe mittels Fischer-Tropsch, PBtL: Power-to-Hydrogen + BtL, LignoMeOH: Methanol aus Lignozellulose, LignoEtOH: Ethanol aus Lignozellulose, HVO: Hydrobehandeltes Pflanzenöl, FAME: Fettsäuremethylester, StarchEtOH: Ethanol auf Stärkebasis, and BeetEtOH: Ethanol aus Zuckerrüben. Der gelbe Bereich steht für fossiles Kerosin in der Luftfahrt und fossilen Diesel in anderen Bereichen.

Abbildung 7 veranschaulicht die sich entwickelnden Verbrauchsmuster verschiedener inländischer Biomasserohstoffe und Stromquellen in Deutschland von 2020 bis 2050. Die in der Abbildung dargestellten Trends verdeutlichen signifikante Veränderungen bei der Nutzung verschiedener Rohstoffe für die Produktion von Biodiesel und Bioethanol sowie die Auswirkungen von begrenzten Überschuss an erneuerbarer Elektrizität (ERE). In allen Szenarien ist ein deutlicher Rückgang des Verbrauchs von Raps und Zuckerrüben zu erkennen, die traditionell für die Biodiesel- und Bioethanolproduktion verwendet werden. Dieser Rückgang ist auf die Auslaufpolitik der politischen Entscheidungsträger für konventionelle Biokraftstoffe zurückzuführen. Andererseits zeigt der kombinierte Verbrauch von Maissilage und Pappel eine steigende Tendenz, was auf eine zunehmende Nutzung dieser Rohstoffe in der Zukunft hindeutet. Pappel

wird hauptsächlich mit der BtL-Technologie zur Herstellung von Biodiesel und SAF für den Straßen- und Luftfahrtsektor verwendet. Maissilage hingegen wird zur Erzeugung von Biomethan und Wärme für die Industrie verwendet. Auch die Nutzung der Paludikultur nimmt in allen Szenarien zu.

Darüber hinaus zeigt die Abbildung den Einfluss der begrenzten ERE durch die Verwendung von gestapelten Balkendiagrammen. Der dunkelblaue Balken oben in den Diagrammen stellt die ERE dar, was den Überschuss an verfügbarem Strom aus erneuerbaren Energien bedeutet. Der darunter liegende hellblaue Balken stellt den Strommix dar, der Quellen wie importierten Strom und Strom aus Fotovoltaikanlagen (PVs) auf Dächern umfasst. Wie das DEL-Szenario zeigt, stellt der Übergang zur Direktelektrifizierung von Fahrzeugen eine erhebliche Herausforderung in Bezug auf die erhöhte Stromnachfrage und die damit verbundene Belastung der Übertragungsleitungen dar. Die Einführung von Elektrofahrzeuge (EVs) wird einen größeren Strommix erfordern, um den zusätzlichen Strombedarf zu decken.

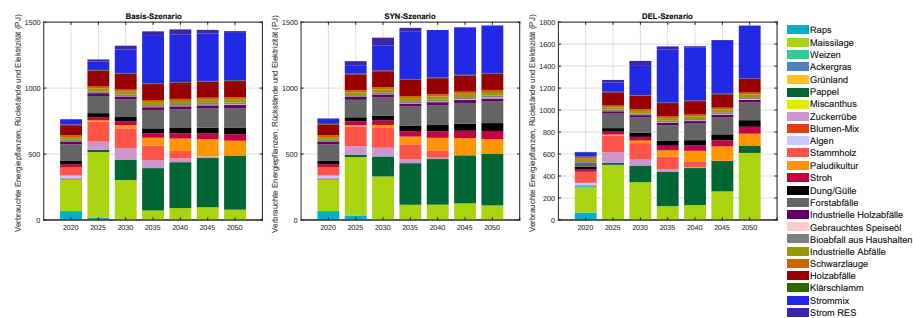


Figure 7: Der Verbrauch von Rohstoffen (heimische Energiepflanzen und Reststoffe) und Strom in Deutschland unter verschiedenen Szenarien.

Die Kosten und das Niveau der THG-Vermeidung für die verschiedenen Szenarien im Vergleich zum Basisszenario sind in Abbildung 8 dargestellt. Es ist offensichtlich, dass das SYN-Szenario eine kosteneffizientere Lösung bietet, die ein höheres Niveau der Treibhausgasreduzierung erreicht. Dieser Vorteil lässt sich auf die Verwendung einer breiten Palette von Technologien zurückführen, die die Anforderungen des Endverbrauchs effektiv erfüllen. Andererseits weist das DEL-Szenario zwar ein höheres Niveau der THG-Vermeidung auf, aber die starke Betonung der direkten Elektrifizierung treibt angesichts der begrenzten Verfügbarkeit von Strom für verschiedene Anwendungen die Gesamtsystemkosten erheblich in die Höhe.

Wir haben auch die Auswirkungen von Batterie-Energiespeichersysteme (BESS) auf die Treibhausgasemissionen und die Gesamtsystemkosten im Basis-szenario [16] analysiert. Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Berücksichtigung von BESS das Niveau der Treibhausgasreduzierung verbessern würde; die Minimierung der Gesamtsystemkosten unter Berücksichtigung suboptimaler

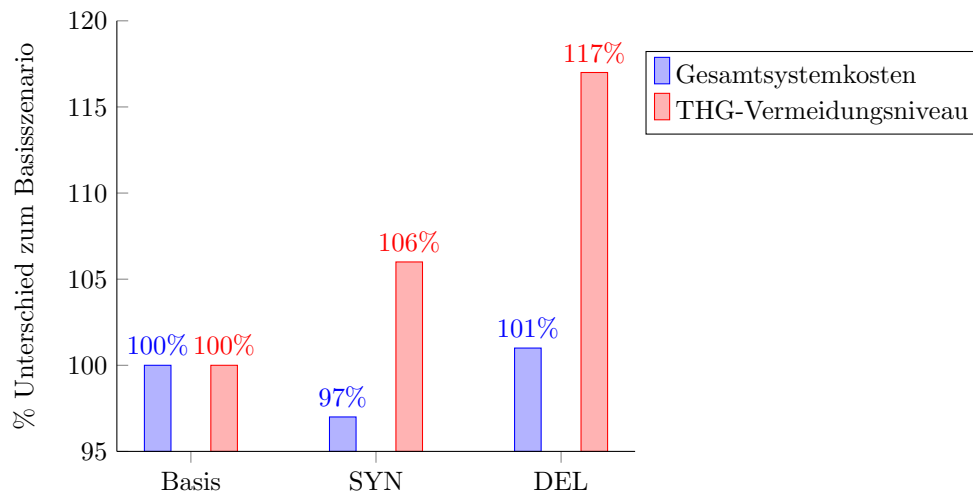


Figure 8: Unterschiede zwischen den Szenarien im Vergleich zum Basisszenario in Bezug auf Kosten und THG-Vermeidung.

THG-Lösungen schließt BESS jedoch aus den kostenoptimalen Lösungen aus. Um die Praxistauglichkeit dieser Technologie zu verbessern, müssen unbedingt alternative Geschäftsmodelle erforscht werden, wie etwa die Nutzung des Speicherpotenzials von Elektrofahrzeugen. Dies zeigt, dass BESS billiger werden sollten, um eine wichtige Rolle im zukünftigen deutschen Energiesystem zu spielen. Darüber hinaus zeigt unsere Analyse, dass der kombinierte Effekt der zunehmenden intermittierenden erneuerbaren Energiequellen und der steigenden Energieeffizienz mittelfristig einen Bedarf für den verstärkten Einsatz von BESS hervorrufen könnte. Wenn die Fluktuation der erneuerbaren Energien eine Stromspeicherung erfordert, nutzt unser Optimierungsmodell den gespeicherten Strom zur Erzeugung von Wasserstoff.

8 Notwendigkeit und Angemessenheit der durchgeführten Arbeiten

Die durchgeführten Arbeiten und die dafür aufgewendeten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der im Projektantrag detailliert dargestellten Planung entsprachen und alle im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich abgeschlossen wurden. Darüber hinaus mussten keine zusätzlichen Ressourcen für die Durchführung des Projekts aufgewendet werden.

9 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das Problem des Klimawandels hat viele Facetten, die viele Interessengruppen mit unterschiedlichen und oft widersprüchlichen Interessen und Erkenntnissen berühren; daher sollten Experten aus verschiedenen Disziplinen zusammenarbeiten, um techno-sozioökonomische Aspekte zu erfassen. Die für solide Entscheidungen erforderliche Vielfalt an Fachwissen lässt sich nicht durch die Verwendung eines einzigen Modells erreichen. Eigenständige Modelle können eine Teilmenge von Zielen optimieren, während sie anderen Zielen schaden. Daher kann die Integration von disziplinspezifischen Modellen, die technologische, soziale und institutionelle Dimensionen erfassen, eine ganzheitliche Sicht auf das Problem bieten.

In diesem Zusammenhang können wir mit dem von uns entwickelten Modellsystem komplexe Forschungsfragen im Zusammenhang mit dem Nachfrage- und Druck beantworten, der sich aus dem künftigen Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung aus Wind- und Sonnenenergie auf Land und biologische Vielfalt ergibt.

10 Fortschritte an anderen Stellen

Keine bekannt.

11 Veröffentlichte oder eingereichte Publikationen

Zahlreiche Konferenz- und Zeitschriftenbeiträge wurden veröffentlicht, in denen die entwickelte Methodik angewandt und die erzielten Ergebnisse vorgestellt wurden. Die Liste der veröffentlichten Arbeiten finden Sie im Referenzteil [2, 4, 5, 3]. Darüber hinaus haben wir vor kurzem einen Konferenzbeitrag für die internationale Konferenz Europäische Energiemärkte (EEM) eingereicht. Wir freuen uns, mitteilen zu können, dass der bei der EEM-Konferenz eingereichte Beitrag angenommen wurde und veröffentlicht werden wird [16]. Darüber hinaus wurde ein weiteres Manuskript bei der von Experten begutachteten Zeitschrift *Transportation Research Part D* eingereicht, das derzeit in der Begutachtung ist [1].

12 Arbeiten, die nicht zu einer Lösung geführt haben

Auch das Wasserstoffszenario haben wir mit einem ähnlichen Ansatz (d.h. Soft-Linking der Modelle REMix und BENOPTex) in Angriff genommen. Der Linking-Prozess für das Basis-, SYN- und DEL-Szenario hat jedoch einen erheblichen Teil unserer Kapazitäten in Anspruch genommen, so dass wir das

Wasserstoffszenario nicht erfolgreich abschließen konnten.

13 Präsentationsmöglichkeiten für potenzielle Nutzer

Abgesehen von den wissenschaftlichen Sitzungen hatten wir keinen direkten Kontakt zu den Interessengruppen. Die Ergebnisse unserer Arbeitsgruppe wurden jedoch auf der Roadmap-Sitzung den politischen Entscheidungsträgern vorgestellt und von den Interessengruppen diskutiert.

14 Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung

Das Projekt wurde größtenteils pünktlich abgeschlossen. Allerdings konnte ein Teil der Reisekosten und der Mittel für Veröffentlichungen nicht verbraucht werden. Das Reisebudget wurde aufgrund der Verlagerung auf Online-Sitzungen und -Konferenzen als Reaktion auf die COVID-19-Pandemie nicht vollständig ausgeschöpft. Die während dieses Zeitraums auferlegten Beschränkungen machten einen Übergang zu virtuellen Plattformen erforderlich, was zu einem geringeren Reisebedarf führte. Es ist wichtig anzumerken, dass die COVID-19-Bestimmungen in Deutschland erst vor kurzem aufgehoben wurden, was mehr persönliche Interaktionen und eine potenzielle künftige Verwendung der Reisegelder ermöglicht. Was das Budget für Veröffentlichungen betrifft, so haben wir uns verpflichtet, die verbleibenden Mittel für die Open-Access-Veröffentlichung der bei der Konferenz eingereichten Beiträge zu verwenden. Die Open-Access-Publikation gewährleistet einen breiteren Zugang zu unseren Forschungsergebnissen und erleichtert die Verbreitung von Wissen unter Forschern, Praktikern und der allgemeinen Öffentlichkeit. Darüber hinaus verfügen wir über nicht zugewiesene Personalmittel. Diese Mittel wurden im Rahmen des Projekts nicht in Anspruch genommen.

A Beitrag zur Finanzierungspolitik

Das Projekt wurde von Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), jetzt bekannt als Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), finanziert und hat unser Verständnis von alternativen Kraftstoffherstellungspfaden erheblich verbessert.

Wir haben eine umfassende Analyse verschiedener Szenarien vorgelegt, in denen mehrere Wege zur Herstellung alternativer Kraftstoffe formuliert werden. Die Konkurrenz und die Synergie zwischen diesen Pfaden werden unter Berücksichtigung der neuesten Entwicklungen in der politischen Arena erfasst. Die Ergebnisse dieses Teilprojekts sollen der Politik helfen, die erforderlichen Änderungen in der Regulierung oder notwendige Investitionen zu antizipieren, mit denen die vorgegebenen Ziele der Energiewende in Deutschland erfolgreich erreicht werden können.

Das Teilprojekt war das erste seiner Art, in dem die gesamte Bioenergieversorgungskette von Biomasse über erneuerbaren Strom bis hin zu Biokraftstoffen und alternativen Kraftstoffen modelliert wurde. Dies ermöglicht es den politischen Entscheidungsträgern, die theoretischen Grenzen der Technologien sowie der Ressourcen zu ermitteln.

B Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen ein begrenzender Faktor ist, der in Angriff genommen werden sollte. Wir können Strom aus erneuerbaren Energiequellen aus Nachbarländern importieren oder unsere Investitionen in Solar- und Windkraftanlagen erhöhen. Darüber hinaus wird der Import von synthetischem Kraftstoff, insbesondere für den Luftfahrtsektor, erforderlich sein, um die in FuelEU festgelegten Ziele zu erreichen. Ein weiteres wichtiges Ergebnis betrifft die Struktur des Kreditsystems für die Treibhausgasquote. Das Gutschriftensystem wird es den Automobilherstellern ermöglichen, Verbrennungsfahrzeuge zu produzieren, da die hergestellten BEVs mehrfach angerechnet werden. Diese Hypothese wird auch von unseren Kollegen gestützt, die diese Frage mit den Herstellern erörtert haben, die zögerten, ihre Motorenkonstruktionen für eine höhere Bioethanolbeimischung anzupassen; eine Änderung der Konstruktionen für eine höhere Bioethanolbeimischung kann jedoch den Bedarf an Strom verringern und das Technologieportfolio diversifizieren.

Der Verbrauch von Raps und Zuckerrüben, die üblicherweise zur Herstellung von Biodiesel bzw. Bioethanol verwendet werden, ist deutlich zurückgegangen. Dies ist auf die neue RED-Politik zurückzuführen, die konventionelle Biokraftstoffe einschränkt. Andererseits ist in allen Szenarien ein Anstieg des Verbrauchs von Pappel als Ausgangsmaterial für die BtL-Technologie zur Herstellung von Biodiesel und SAF für die Straßen- und Luftfahrtindustrie zu verzeichnen.

C Fortschreibung des Nutzungsplans

Bei diesem Teilprojekt geht es nicht um konkrete Erfindungen oder Patente. Stattdessen liegt der Schwerpunkt auf der Durchführung einer umfassenden Analyse und der Bereitstellung wertvoller Einblicke in die Produktion alternativer Kraftstoffe und die damit verbundene Bioenergie-Lieferkette. Durch die Modellierung verschiedener Szenarien und die Betrachtung der Konkurrenz und Synergie zwischen verschiedenen Wegen trägt diese Forschung zu einem besseren Verständnis der theoretischen Grenzen, der technologischen Möglichkeiten und des Ressourcenbedarfs im Bereich der alternativen Kraftstoffproduktion bei. Auch wenn das Teilprojekt keine konkreten Erfindungen oder Patente hervorbringt, dienen seine Ergebnisse als Wissensgrundlage, die politische Entscheidungsträger, Forscher und Interessengruppen bei der

Förderung der Energiewende und der Innovation im breiteren Kontext nachhaltiger Energiesysteme informieren kann.

Dieses Teilprojekt konzentriert sich nicht auf die Erforschung spezifischer wirtschaftlicher Perspektiven. Sein Hauptziel ist es vielmehr, eine umfassende Analyse verschiedener Szenarien und Wege für die Produktion alternativer Kraftstoffe innerhalb der Bioenergieversorgungskette zu erstellen. Die Forschung zielt darauf ab, die technisch-wirtschaftliche Durchführbarkeit, die regulatorischen Auswirkungen sowie den Ressourcenbedarf im Zusammenhang mit diesen Wegen zu verstehen und Wissen und Erkenntnisse zu generieren, die den politischen Entscheidungsträgern helfen, fundierte Entscheidungen zu treffen. Die Ergebnisse und Empfehlungen, die sich aus dieser Forschung ergeben, können als Grundlage für zukünftige wirtschaftliche Bewertungen und Investitionsstrategien dienen und dazu beitragen, eine nachhaltige und wirtschaftlich tragfähige Energiewende in Deutschland zu gestalten.

Wir treiben unsere Forschung aktiv voran, indem wir die von uns entwickelten Instrumente und Methoden an mehreren Fronten einsetzen. Eine wichtige Richtung unserer Untersuchung ist die Bewertung der Auswirkungen eines großflächigen Einsatzes von Solar- und Windparks auf die verfügbaren Flächen und die biologische Vielfalt. Um dies zu erreichen, integrieren wir die Ergebnisse des REMix-Tools, das Daten über die Kapazität der in verschiedenen Regionen Deutschlands installierten EE-Anlagen liefert. Diese Informationen zur EE-Kapazität werden dann in das im Rahmen des MultipleEE-Projekts entwickelte Modell eingespeist, so dass wir die optimale Platzierung dieser Anlagen bestimmen können. Um die von den Windturbinen an diesen spezifischen Standorten erzeugte Elektrizität abzuschätzen, verwenden wir ein Simulationstool, das als ReSTEP-Modell bekannt ist. In dieses Modell fließen historische Klimadaten ein, um die Stromerzeugung der Turbinen zu simulieren. Durch die Berücksichtigung vergangener Klimamuster können wir die potenzielle Stromerzeugung durch Windparks genauer prognostizieren. Schließlich wird die von diesen erneuerbaren Quellen erzeugte Elektrizität in das BENOPTex-Modell integriert. Durch den Einsatz dieser miteinander verknüpften Modelle und Simulationswerkzeuge können wir wertvolle Erkenntnisse über die Machbarkeit, Effizienz und Umweltauswirkungen des Einsatzes von Solar- und Windparks gewinnen.

D **Berichtsblatt**

Document Control Sheet / Berichtsblatt

1. ISBN or ISSN -	2. type of document Report
3. title Final report of the UFZ subproject for BEniVer – Accompanying research on energy transition in transport	
4. author(s) EsmaeiliAliabadi, Danial; Jordan, Matthias	5. end of project 31 May 2023
	6. publication date Planned
	7. form of publication Web, ISI-Article planned
8. performing organization(s) Department of Bioenergy, Helmholtz Centre for Environmental Research, Leipzig, Germany	9. originator's report no. -
	10. reference no. 03EIV116F
	11. no. of pages 31
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. no. of references 16
	14. no. of tables 3
	15. no. of figures 8
16. supplementary notes -	
17. presented at (title, place, date) -	
18. abstract Decarbonizing the transport sector in Germany is of utmost importance due to its significant role in mitigating climate change. Transportation is a major contributor to greenhouse gas emissions, with road vehicles being the primary culprits. By transitioning to cleaner and more sustainable alternatives, Germany can significantly reduce its carbon footprint and work towards achieving its climate goals. However, it is crucial to recognize that there is no silver bullet solution to decarbonizing the transport sector. Each technology has its advantages and limitations, and a holistic approach is needed to address the complex challenges involved. The objective of this sub-project is to explore the competition between electricity-based fuels (e-fuels) and biofuels in meeting energy and GHG reduction targets within the German transportation sector. To accomplish this, we have extended the existing BENOPT to include relevant e-fuel options, thereby addressing four wh-questions of which fuel paths become relevant in which sectors, by when, and to what extent. Running in parallel with the REMix model, we investigate the competition between different e-fuels and biofuels in German energy and power systems using the BENOPT. Although both models overlap in objectives, they approach the problem from different angles. The BENOPT model considers the techno-economic and political aspects of the bio-economy in a bottom-up manner, whereas REMix is focused on the infrastructure needed to support the expansion of intermittent renewable energy sources such as wind and solar in the power sector. This includes examining the spatiotemporal distribution of renewable energy sources, their integration with existing infrastructure, and their overall potential to meet energy and climate goals. The BENOPT model incorporates a detailed cost and GHG analysis using an LCA approach. Furthermore, technological learning effects are considered exogenously, which reduces the investment and operation costs over time. Employing a flexible temporal resolution, BENOPT finds the most cost-efficient long-term strategy in order to meet the energy and GHG reduction targets under multiple scenarios. Deployment and GHG mitigation costs are determined and compared to electricity-based options. Extensive sensitivity analyses check the robustness of the results. All in all, the following objectives have been achieved in the project:	

- Extension of a bioenergy optimization model (i.e., BENOPTex) to include e-fuels. - The extension of the technology portfolio to include e-fuel processes. - Calculating the GHG reduction over time for four different scenarios, given the latest developments in policy. - Analysis and comparison of GHG mitigation costs over time for four different scenarios. - Modeling the optimal use of e-fuels and biofuels, based on energy and GHG mitigation costs.	
19. keywords Soft-coupling, bioenergy, synthetic fuel, renewable energy, Germany, transportation, optimization models	
20. publisher -	21. price -

1. ISBN or ISSN: -	2. Berichtsart: Bericht		
3. title: Abschlussbericht des UFZ-Teilprojekts zu BEniVer - Begleitforschung zur Energiewende im Verkehr			
4. Autoren: EsmaeiliAliabadi, Danial; Jordan, Matthias		5. Abschlussdatum des Vorhabens: Mai 2023	
		6. Veröffentlichungsdatum: Geplant	
		7. Form der Publikation: Web, ISI-Artikel geplant	
8. Durchführende Institutionen: Department Bioenergie, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ, Leipzig, Deutschland		9. Ber. Nr. Durchführende Institution: -	
		10. Förderkennzeichen: 03EIV116F	
		11. Seitenzahl: 33	
12. Fördernde Institution: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn		13. Literaturangaben: 16	
		14. Tabellen: 3	
		15. Abbildungen: 8	
16. Zusätzliche Angaben: -			
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -			
18. Kurzfassung Die Dekarbonisierung des Verkehrssektors in Deutschland ist aufgrund seiner wichtigen Rolle bei der Abschwächung des Klimawandels von größter Bedeutung. Der Transportsektor ist ein Hauptverursacher von Treibhausgasemissionen, wobei Straßenfahrzeuge die Hauptverursacher sind. Durch die Umstellung auf umweltfreundlichere und nachhaltigere Alternativen kann Deutschland seinen Kohlenstoff-Fußabdruck erheblich verringern und auf das Erreichen seiner Klimaziele hinarbeiten. Es ist jedoch wichtig zu erkennen, dass es keine Patentlösung für die Dekarbonisierung des Verkehrssektors gibt. Jede Technologie hat ihre Vorteile und Grenzen, und es ist ein ganzheitlicher Ansatz erforderlich, um die komplexen Herausforderungen zu bewältigen. Ziel dieses Teilprojekts ist es, den Wettbewerb zwischen strombasierten Kraftstoffen (E-Fuels) und Biokraftstoffen bei der Erreichung der Energie- und Treibhausgasminderungsziele im deutschen Verkehrssektor zu untersuchen. Um dies zu erreichen, haben wir das bestehende			

BioEnergy Optimization Model (BENOPT) um relevante E-Kraftstoff-Optionen erweitert und damit vier Fragen beantwortet: Welche Kraftstoffpfade werden in welchen Sektoren, wann und in welchem Umfang relevant?

Parallel zum Modell Renewable Energy Mix (REMIX) untersuchen wir mit BENOPT den Wettbewerb zwischen verschiedenen E-Fuels und Biokraftstoffen in deutschen Energie- und Stromsystemen. Obwohl sich beide Modelle in ihren Zielen überschneiden, gehen sie das Problem aus unterschiedlichen Blickwinkeln an. Das BENOPT-Modell betrachtet die technisch-ökonomischen und politischen Aspekte der Bioökonomie in einer Bottom-up-Methode, während REMIX sich auf die Infrastruktur konzentriert, die benötigt wird, um den Ausbau von intermittierenden erneuerbaren Energiequellen wie Wind und Sonne im Stromsektor zu unterstützen. Dazu gehört die Untersuchung der räumlichen und zeitlichen Verteilung der erneuerbaren Energiequellen, ihrer Integration in die bestehende Infrastruktur und ihres Gesamtpotenzials zur Erreichung der Energie- und Klimaziele.

Das BENOPT-Modell umfasst eine detaillierte Kosten- und Treibhausgasanalyse unter Verwendung eines Lebenszyklus-Analyse (LCA)-Ansatzes. Darüber hinaus werden technologische Lerneffekte exogen berücksichtigt, was die Investitions- und Betriebskosten im Laufe der Zeit reduziert. Unter Verwendung einer flexiblen zeitlichen Auflösung findet BENOPT die kosteneffizienteste langfristige Strategie, um die Energie- und THG-Reduktionsziele unter verschiedenen Szenarien zu erreichen. Die Bereitstellungs- und THG-Minderungskosten werden ermittelt und mit strombasierten Optionen verglichen. Umfangreiche Sensitivitätsanalysen überprüfen die Robustheit der Ergebnisse.

Insgesamt wurden im Rahmen des Projekts die folgenden Ziele erreicht:

- Erweiterung eines Bioenergie-Optimierungsmodells (z.B. BENOPTex) zur Einbeziehung von E-Kraftstoffen.
 - Die Erweiterung des Technologieportfolios um E-Fuel-Verfahren.
 - Berechnung der Treibhausgasreduzierung im Laufe der Zeit für vier verschiedene Szenarien unter Berücksichtigung der neuesten politischen Entwicklungen.
- Analyse und Vergleich der Treibhausgasminderungskosten im Zeitverlauf für verschiedene Szenarien.
- Modellierung der optimalen Nutzung von E-Kraftstoffen und Biokraftstoffen auf der Grundlage der Energie- und Treibhausgasminderungskosten.

19. Schlagwörter

Soft-Coupling, Bioenergie, synthetische Kraftstoffe, erneuerbare Energien, Deutschland, Verkehr, Optimierungsmodelle

20. Verlag

-

21. Preis

-

1. ISBN or ISSN

978-3-031-24961-7

2. type of document (e.g. report, publication)

publication

3. title

Soft-coupling energy and power system models to analyze pathways toward a de-fossilized German transport sector

4. author(s) (family name, first name(s))

EsmaeiliAliabadi, Danial; Wulff, Niklas; Jordan, Matthias; Cyffka, Karl-Friedrich; Millinger, Markus

5. end of project

May 2023

6. publication date

15 Jun 2023

7. form of publication

Conference paper

8. performing organization(s) (name, address)

- Department of Bioenergy, Helmholtz Centre for

9. originator's report no.

-

Environmental Research, Leipzig, Germany • Department of Energy Systems Analysis, Institute of Engineering Thermodynamics, German Aerospace Center, Stuttgart, Germany • Department of Bioenergy Systems, Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH, Leipzig, Germany • Department of Space, Earth and Environment, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden	10. reference no. 03EIV116F
	11. no. of pages 8
	12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn
13. no. of references 18	
14. no. of tables 0	
15. no. of figures 3	
16. supplementary notes The payment is for the whole conference which includes the publication fee.	
17. presented at (title, place, date) OR 2022: International Conference on Operations Research, Karlsruhe, 9 Sep 2022	
18. abstract The transport sector is a major consumer of energy worldwide. Unfortunately, there is no silver bullet to de-fossilize the transport sector due to its intricacy; therefore, many concepts and technologies should be combined to have a noteworthy impact on this hard-to-abate sector. As such, the required diverse set of expertise for making correct decisions cannot be achieved by merely utilizing one model. In this study, we connect multiple datasets and models that employ various methodologies with different purposes to exhibit a pathway to a green transport sector. The extended bioenergy optimization (BENOPTex) and renewable energy mix (REMIX) models are coupled iteratively to produce coherent results while considering different sets of constraints. The combined effects of bioenergy and synthetic fuel -- using renewable electricity -- on the German transport sector are investigated via a scenario. Two demand models are also used to capture the specificities of the energy demands of the mainly behavior-driven road transportation as well as technology-driven aviation sector. The outcome of the resulted soft-coupled model respects biomass availability, regulatory circumstances, techno-economic properties, and power sector expansion for the production of synthetic fuels.	
19. keywords Soft-coupling, bioenergy, renewable energy, transportation, optimization models	
20. publisher Springer Nature	21. price 460 EUR

1. ISBN or ISSN 2352-7110	2. type of document (e.g. report, publication) publication
3. title A model for cost- and greenhouse gas optimal material and energy allocation of biomass and hydrogen	
4. author(s) (family name, first name(s)) Millinger, Markus; Tafarte, Philip; Jordan, Matthias; Musonda, Frazer; Chan, Katrina; Meisel, Kathleen; EsmaeiliAliabadi, Danial	5. end of project May 2023
	6. publication date 1 Dec 2022
	7. form of publication Journal paper
8. performing organization(s) (name, address) • Department of Bioenergy, Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ, Permoserstraße 15, 04318 Leipzig, Germany	9. originator's report no.
	10. reference no. 03EIV116F

• Department of Space Earth and Environment, Chalmers University of Technology, 412 96, Göteborg, Sweden • Department of Economics, Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ, Permoserstraße 15, 04318 Leipzig, Germany • Faculty of Economics and Management Science, Institute for Infrastructure and Resources Management, University of Leipzig, Ritterstraße 12, 04109 Leipzig, Germany • Department of Bioenergy Systems, Deutsches Biomasseforschungszentrum Gemeinnützige GmbH—DBFZ, Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig, Germany		11. no. of pages 6
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn		13. no. of references 31
		14. no. of tables 0
		15. no. of figures 5
16. supplementary notes The online appendix includes 5 tables		
17. presented at (title, place, date) -		
18. abstract BENOPT, an optimal material and energy allocation model is presented, which is used to assess cost-optimal and/or greenhouse gas abatement optimal allocation of renewable energy carriers across power, heat and transport sectors. A high level of detail on the processes from source to end service enables detailed life-cycle greenhouse gas and cost assessments. Pareto analyses can be performed, as well as thorough sensitivity analyses. The model is designed to analyse optimal biomass and hydrogen usage, as a complement to integrated assessment and power system models.		
19. keywords Biomass; Power-to-x; Energy system; LCA; Sector coupling; Industrial ecology; Systems perspective		
20. publisher Elsevier		21. price -

1. ISBN or ISSN 2398-4902	2. type of document (e.g. report, publication) publication	
3. title Electrofuels from excess renewable electricity at high variable renewable shares: cost, greenhouse gas abatement, carbon use and competition		
4. author(s) (family name, first name(s)) Millinger, Markus; Tafarte, Philip; Jordan, Matthias; Hahn Alena; Meisel, Kathleen; Thrän, Daniela		5. end of project May 2023
		6. publication date 7 Jan 2021
		7. form of publication Journal paper
8. performing organization(s) (name, address) • Department of Bioenergy, Helmholtz Centre for		9. originator's report no.

Environmental Research - UFZ, Permoserstraße 15, 04318 Leipzig, Germany • Department of Economics, Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ, Permoserstraße 15, 04318 Leipzig, Germany • Research Group MultiPLEE, Faculty of Economics and Management Science, Institute for Infrastructure and Resources Management, University of Leipzig, Ritterstraße 12, 04109 Leipzig, Germany • University Leipzig, Institute for Infrastructure and Resources Management, Grimmaische Str. 12, 04109 Leipzig, Germany • Department of Bioenergy Systems, Deutsches Biomasseforschungszentrum Gemeinnützige GmbH—DBFZ, Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig, Germany	10. reference no. 03EIV116F
	11. no. of pages 16
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. no. of references 114
	14. no. of tables 4
	15. no. of figures 11
16. supplementary notes -	
17. presented at (title, place, date) -	
18. abstract Increasing shares of variable renewable electricity (VRE) generation are necessary for achieving high renewable shares in all energy sectors. This results in increased excess renewable electricity (ERE) at times when supply exceeds demand. ERE can be utilized as a low-emission energy source for sector coupling through hydrogen production via electrolysis, which can be used directly or combined with a carbon source to produce electrofuels. Such fuels are crucial for the transport sector, where renewable alternatives are scarce. However, while ERE increases with raising VRE shares, carbon emissions decrease and may become a limited resource with several usage options, including carbon storage (CCS). Here we perform a model based analysis for the German case until 2050, with a general analysis for regions with a high VRE reliance. Results indicate that ERE-based electrofuels could achieve a greenhouse gas (GHG) abatement of 74 MtCO ₂ eq yearly (46% of current German transport emissions) by displacing fossil fuels, at high fuel-cell electric vehicle (FCEV) shares, at a cost of 250–320 € per tCO ₂ eq. The capital expenditure of electrolyzers was found not to be crucial for the cost, despite low capacity factors due to variable ERE patterns. Carbon will likely become a limiting factor when aiming for stringent climate targets and renewable electricity-based hydrocarbon electrofuels replacing fossil fuels achieve up to 70% more GHG abatement than CCS. Given (1) an unsaturated demand for renewable hydrocarbon fuels, (2) a saturated renewable hydrogen demand and (3) unused ERE capacities which would otherwise be curtailed, we find that carbon is better used for renewable fuel production than being stored in terms of overall GHG abatement.	
19. keywords -	
20. publisher Royal Society of Chemistry	21. price 1600 GBP
1. ISBN or ISSN Planned	2. type of document (e.g. report, publication) publication

3. title Future renewable energy targets in the EU: Impacts on the German transport	
4. author(s) (family name, first name(s)) EsmaeiliAliabadi, Danial; Chan, Katrina; Wulff, Niklas; Meisel, Kathleen; Jordan, Matthias; Oesterle, Ines; Pregger, Thomas; Thrän, Daniela	5. end of project May 2023
	6. publication date -
	7. form of publication Journal paper
8. performing organization(s) (name, address) - Department of Bioenergy, Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ, Permoserstraße 15, 04318 Leipzig, Germany - Department of Energy Systems Analysis, Institute of Engineering Thermodynamics, German Aerospace Center, Stuttgart, Germany - Department of Bioenergy Systems, Deutsches Biomasseforschungszentrum Gemeinnützige GmbH—DBFZ, Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig, Germany	9. originator's report no.
	10. reference no. 03EIV116F
	11. no. of pages 40
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. no. of references 42
	14. no. of tables 2
	15. no. of figures 14
16. supplementary notes Submitted to "Transportation Research Part D" on 29 th March 2023	
17. presented at (title, place, date) -	
18. abstract The transport sector is at the center of discussions on accelerating the energy transition due to its still increasing contribution to greenhouse gas emissions worldwide; therefore, the EU has set binding targets for the use of renewable energy in transport through the Renewable Energy Directive. To analyze the economic impact of these targets, we developed an optimization model that considers bio- and electricity-based fuel options, various transport sectors, and future policy requirements. Our study of the German transport sector found that imported alternative fuels play a key role in reducing fossil fuel usage. We also identify two technological and managerial obstacles: policymakers must set boundaries for the rapid electrification of vehicles in the near future; and in the distant future, more attention is needed in research for new technologies in commercial transport. Although our findings are tailored to Germany, the employed approach can be transferred to other models and countries.	
19. keywords Renewable energy directive; German transport sector; biofuel; synthetic fuel; optimization; energy system models	
20. publisher Elsevier	21. price Planned - 3100 USD excl. tax

Literaturverzeichnis

- [1] Danial Esmacili Aliabadi, Katrina Chan, Niklas Wulff, Kathleen Meisel, Matthias Jordan, Ines Österle, Thomas Pregger, and Daniela Thrän. Future renewable energy targets in the EU: Impacts on the German transport. Available at SSRN 4418865, 2023.
- [2] Markus Millinger, Philip Tafarte, Matthias Jordan, Frazer Musonda, Katrina Chan, Kathleen Meisel, and Danial Esmacili Aliabadi. A model for cost-and greenhouse gas optimal material and energy allocation of biomass and hydrogen. *SoftwareX*, 20:101264, 2022.
- [3] Danial Esmacili Aliabadi, Niklas Wulff, Matthias Jordan, Karl-Friedrich Cyffka, and Markus Millinger. Soft-coupling energy and power system models to analyze pathways toward a de-fossilized German transport sector. In *Operations Research Proceedings 2022*, Lecture Notes in Operations Research. Springer, 2023.
- [4] Danial Esmacili Aliabadi, Katrina Chan, Matthias Jordan, Markus Millinger, and Daniela Thrän. Abandoning the residual load duration curve and overcoming the computational challenge. In *2022 Open Source Modelling and Simulation of Energy Systems (OSMSES)*, pages 1–6. IEEE, 2022.
- [5] Markus Millinger, Philip Tafarte, Matthias Jordan, Alena Hahn, Kathleen Meisel, and Daniela Thrän. Electrofuels from excess renewable electricity at high variable renewable shares: cost, greenhouse gas abatement, carbon use and competition. *Sustainable Energy & Fuels*, 5(3):828–843, 2021.
- [6] Michael Sterner. *Bioenergy and Renewable Power Methane in Integrated 100% Renewable Energy Systems. Limiting Global Warming by Transforming Energy Systems: Limiting Global Warming by Transforming Energy Systems*, volume 14. kassel university press GmbH, 2009.
- [7] Selma Brynolf, Maria Taljegard, Maria Grahn, and Julia Hansson. Electrofuels for the transport sector: A review of production costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81:1887–1905, 2018.
- [8] Friedemann G Albrecht, Daniel H König, Nadine Baucks, and Ralph-Uwe Dietrich. A standardized methodology for the techno-economic evaluation of alternative fuels—a case study. *Fuel*, 194:511–526, 2017.
- [9] Michael Sterner and Uwe Fritsche. Greenhouse gas balances and mitigation costs of 70 modern Germany-focused and 4 traditional biomass pathways including land-use change effects. *Biomass and Bioenergy*, 35(12):4797–4814, 2011.

-
- [10] Steffen Schemme, Remzi Can Samsun, Ralf Peters, and Detlef Stolten. Power-to-fuel as a key to sustainable transport systems—an analysis of diesel fuels produced from CO₂ and renewable electricity. Fuel, 205:198–221, 2017.
 - [11] Selma Brynolf, Julia Hansson, James E Anderson, Iva Ridjan Skov, Timothy J Wallington, Maria Grahn, Andrei David Korberg, Elin Malmgren, and Maria Josefin Taljegard. Review of electrofuel feasibility-prospects for road, ocean, and air transport. Progress in Energy, 2022.
 - [12] Nora Szarka, Marcus Eichhorn, Ronny Kittler, Alberto Bezama, and Daniela Thrän. Interpreting long-term energy scenarios and the role of bioenergy in Germany. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 68:1222–1233, 2017.
 - [13] Markus Millinger and Daniela Thrän. Biomass price developments inhibit biofuel investments and research in germany: The crucial future role of high yields. Journal of Cleaner Production, 172:1654–1663, 2018.
 - [14] DBFZ. DBFZ Ressourcendatenbank, 2023. URL: webapp.dbfz.de, Access 14.01.2023.
 - [15] Karin Naumann, F Müller-Langer, K Meisel, S Majer, J Schröder, and U Schmieder. Further development of the german greenhouse gas reduction quota. Background Paper, 2021.
 - [16] D. Esmaeili Aliabadi, M. Jordan, and D. Thrän. The complementary role of utility-scale battery energy storage systems and bioenergy in future German transportation, 2023.