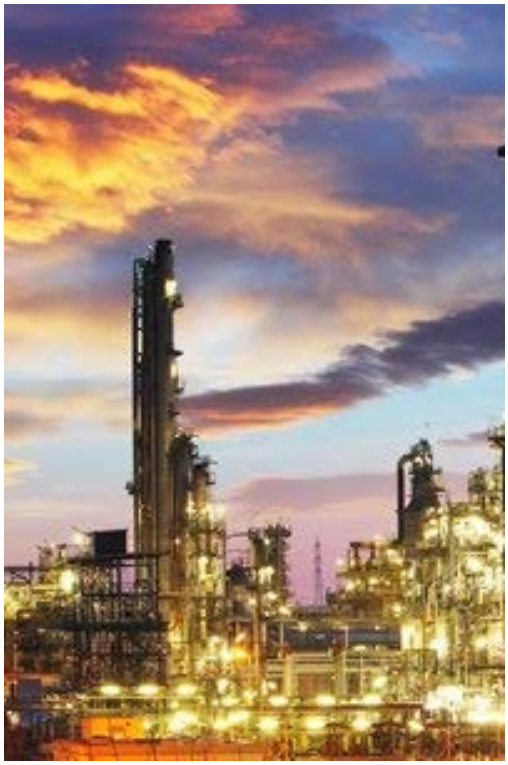
INSTITUT FÜR ENERGIE- UND UMWELTFORSCHUNG HEIDELBERG

LCAst – Prospektive Ökobilanzen auf Basis der ecoinvent-Datenbank



ifeu paper 03/2023

Axel Liebich (ifeu), Johannes Müller (ecoinvent), Daniel Münter (ifeu), Clemens Wingenbach (ifeu), Regine Vogt (ifeu)

Heidelberg, November 2023

Dieses ifeu paper möchte Zwischenergebnisse und vorläufige Ergebnisse von Projektarbeiten, die am ifeu durchgeführt werden, der Öffentlichkeit zugänglich machen und damit den wissenschaftlichen Diskurs fördern. Der Inhalt wird von den Autoren und Autorinnen verantwortet und spiegelt deren Meinung wider. Die Autoren und Autorinnen begrüßen Rückmeldungen zu den Inhalten.

Kontakt: axel.liebich@ifeu.de

Zitierweise: Liebich, A., Müller, J., Münter, D., Wingenbach, C., Vogt, R. (2023): LCAst – Prospektive Ökobilanzen auf Basis der ecoinvent-Datenbank. ifeu paper 03/2023. Heidelberg

Die Autoren und Autorin danken dem Umweltbundesamt, das es ermöglichte, hier methodische Anpassung aus Projekten darzustellen, für die noch kein Endbericht veröffentlicht wurde.

Bildnachweis Titelbild
Wind turbine energy generaters on wind farm, Peter Adams_stock.adobe.com_292330684
Oil and gas industry - refinery at twilight – factory, TTstudio_stock.adobe.com_83493480

Inhalt

Abbildungsverzeichnis **4**

Tabellenverzeichnis **5**

Abkürzungsverzeichnis **6**

1 Motivation und Herausforderung **8**

2 Methodische Grundlagen **10**

2.1 Ökobilanzen 10

2.2 Digitale Werkzeuge der (prospektiven) Ökobilanz 11

2.3 Die ecoinvent-Datenbank 12

2.4 Transformationsszenarien 12

3 Vereinfachte Anpassung des Hintergrundsystems **15**

3.1 Motivation 15

3.2 Annahmen zur Technologieentwicklung 15

3.3 Erzeugen und Anpassen der reduzierten Matrix 16

3.4 Wirkungskategorien 17

3.5 Berechnung und Auswertung 17

3.6 Erkenntnisse und Einschränkungen 22

4 Umfassende Anpassung in Zusammenarbeit mit ecoinvent **23**

4.1 Motivation 23

4.2 Szenariorahmen 23

4.3 Annahmen zur Technologieentwicklung 24

4.4 Übertragung auf die ecoinvent-Matrix 26

4.5 Wirkungskategorien 27

4.6 Berechnung der Sachbilanzergebnisse (LCI) und Validierung 28

4.7 Auswertung 30

4.8 Detailliertere Auswertung auf der Basis von Brightway 30

4.9 Erkenntnisse und Einschränkungen 31

5 LCAst: Flexible Modellierung von Zukunftsszenarien **33**

Literaturverzeichnis **35**

Inhalt

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Der Rahmen einer Ökobilanz nach ISO 14040 und 14044 10

Abbildung 2: Treibhauswirkung der Bereitstellung von synthetischem Fischer-Tropsch-Kraftstoff in den Jahren 2015-2050 (Wind offshore, AEL, DAC) je MJ (Heizwert) 18

Abbildung 3: Ursachen der Treibhauswirkung von Offshore-Windstrom 2050 in SYSEET 19

Abbildung 4: Quellen der verbliebenen CO_2-Emissionen der Erzeugung von Offshore-Windstrom in SYSEET 19

Abbildung 5: Quellen der verbliebenen CO2-Emissionen der Herstellung von Stahl in SYSEET 20

Abbildung 6: Rechnerische Entlastung bzw. Belastung 2050 im Vergleich zu fossilen Energieträgern, normiert auf die Situation 2016 für rein strombasierte Fischer-Tropsch-Energieträger (Volllaststunden Syntheseanlage) 21

Abbildung 7: Ergebnisse aller Ecoinvent-Datensätze des Szenarios GreenSupreme 2050 im Vergleich zu 2020 für CO_2, fossil (dunkelgrün) und GWP 100 (hellgrün) 29

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verhältnis der Ergebnisse für 2050 im relativen Vergleich zu 2020 für alle Datensätze in ecoinvent und das Szenario GreenSupreme 29

Abkürzungsverzeichnis

AEL	Alkalische Elektrolyse
CO_2	Kohlendioxid
CO_2eq	Kohlendioxidäquivalente
CSP	Concentrated Solar Power – Solarthermisches Kraftwerk
DRI	Direct Reduced Iron – direkt reduziertes Eisen
EE	Erneuerbare Energie(n)
EU ohne DE	Europa ohne Deutschland
FT	Fischer-Tropsch(-Synthese)
GdK	UBA-Studie „Grenzen des Konsums“
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GWP	Global Warming Potential – Treibhauspotenzial
H_2	Wasserstoff
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KRA	Kumulierter Rohstoffaufwand
LCA	Life Cycle Assessment – Ökobilanz
LCI	Life Cycle Inventory – Sachbilanz
LCIA	Life Cycle Impact Assessment – Wirkungsabschätzung
LHV	Lower Heating Value – Heizwert
MJ	Megajoule
NE	Nicht-Eisen
PtG	Power to gas – Strom zu Gas
PtL	Power to liquid – Strom zu Flüssigkeit
PtX	Power to X – Strom zu X
PV	Photovoltaik

REFINE	UBA-Studie „Betrachtung von Rohstoffaufwendungen und Umweltwirkungen für die Energiewende in einem ressourcenschonenden und treibhausgasneutralen Deutschland.“
RESCUE	UBA Studie „Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität“
SNG	Engl. Synthetic Natural Gas – synthetisches Erdgas (aus Methanisierung, PtG)
SYSEET	UBA Studie „Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien“
THG	Treibhausgas(e)
THGND	UBA-Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland“
UBA	Umweltbundesamt
WEA	Windenergieanlagen
WP	Wärmepumpe
Welt ohne EU (RoW)	Welt ohne Europa (rest of world – Rest der Welt)

1 Motivation und Herausforderung

Der Klimawandel und seine Folgen sind eine der größten globalen Herausforderungen unserer Zeit. Es bedarf daher ambitionierter und umfangreicher Maßnahmen, um die globale Erwärmung zu begrenzen. Die Bundesrepublik Deutschland hat sich bereits 2010 auf eine Minderung der Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80 bis 95 % gegenüber 1990 festgelegt. Im Abkommen von Paris haben sich im Jahr 2015 dann die Vertragsparteien der Klimarahmenkonvention auf ein gemeinsames Vorgehen verständigt, die Erderwärmung deutlich unter 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu halten sowie Anstrengungen zu unternehmen, um den Temperaturanstieg auf 1,5°C zu begrenzen. Das Ziel ist klar, aber über die Wege dorthin wird gesellschaftlich gerungen – in Deutschland, der Europäischen Union und weltweit.

Die Maßnahmen, die notwendig sind, um eine Treibhausgasneutralität zu erreichen, werden alle Sektoren der Wirtschaft sowie private Haushalte und öffentliche Institutionen verändern. Es ist deshalb essenziell, auf diesem Weg möglichst vorausschauende Entscheidungen zu treffen, die Wirksamkeit von Maßnahmen abzuschätzen und mögliche unerwünschte Zielkonflikte frühzeitig zu identifizieren. Innerhalb nationaler und internationaler Forschungsprojekte wurden in der vergangenen Dekade Szenarien entworfen, um mögliche Transformationspfade detailliert zu beschreiben. Diese Transformationsszenarien zielen meist auf die Treibhausgasneutralität in einer definierten Region (z. B. Deutschland oder der EU), können aber bislang unerwünschte Konsequenzen nur unzureichend abschätzen.

- Kommt es zu einer Verlagerung von Treibhausgasemissionen in andere Weltregionen?
- Führt eine Reduktion des Treibhauspotenzials möglicherweise zu einer Verschlechterung in anderen Umweltbereichen (z. B. der Versauerung von Böden oder der Überdüngung von Gewässern)?
- Werden kritische Ressourcen (Wasser, Rohstoffe, Ökosysteme) stärker belastet?

Grundsätzlich gibt es für die Umweltbewertung von Prozessen, Dienstleistungen und Produkten ein etabliertes Werkzeug: die Ökobilanz, die auf Englisch ‚Life Cycle Assessment' (LCA) genannt wird. Diese Methode wird nicht nur dafür verwendet bestehende Produktionsprozesse zu analysieren, sondern auch um deren geplante Veränderungen abzuschätzen und zu bewerten. Um sie auf großskalige Transformationsprozesse anzuwenden, muss die Ökobilanzmethode aber weiterentwickelt werden.

Ein Grund dafür ist, dass das sogenannte Hintergrundsystem und seine Veränderung viel wichtiger als in „klassischen" Ökobilanzen werden. In vielen Untersuchungen für Produkte, die heute in hohen Stückzahlen produziert werden, wird z. B. die Herstellung der Investitionsgüter (Anlagen, Infrastruktur) nicht in den Systemraum einbezogen, da sie üblicherweise nur einen marginalen Einfluss auf das Ergebnis hat. In solchen Untersuchungen dominiert in der Regel der Einsatz von fossilen Energieträgern und Rohstoffen das Ergebnis. Werden jedoch Anlagen betrachtet, die einen geringen Durchsatz im Vergleich zum Materialeinsatz beim Bau der Anlage haben oder die der Energiegewinnung aus regenerativen Quellen dienen, so ist davon auszugehen, dass die Herstellung der Investitionsgüter einen großen Anteil an den Umweltwirkungen des entsprechenden Produktes hat. Die Transformation zu einem defossilisierten Wirtschaftssystem wird genau diese Entwicklung vorantreiben. In der

ökobilanziellen Analyse von Transformationsszenarien wird dieses Hintergrundsystem sogar Gegenstand der Untersuchung selbst. So kann bewertet werden, wie sich Veränderungen in einem vernetzten Wirtschaftssystem gegenseitig beeinflussen und in ihrer Gesamtheit die Umweltwirkungen gegenüber dem Status Quo beeinflussen.

In der Nachhaltigkeitsforschung hat sich für diese zukunftsgerichteten Ökobilanzstudien – sowohl für Produktökobilanzen[1] in einem zukünftigen Wirtschaftssystem als auch für Untersuchungen der Transformationsszenarien selbst – der Begriff ‚Prospektive Ökobilanz' etabliert. Die Forschungsaktivitäten am ifeu auf diesem Gebiet und die daraus entstehenden rechnergestützten Analysemethoden – insbesondere unter Einbindung der Ökobilanzdatenbank ecoinvent – laufen unter der Bezeichnung „LCAst" – ein Kofferwort, das die Begriffe „LCA" (Ökobilanz) und „Cast" (Wurf, Vorhersage) verbindet. Dieses Methodenpapier beschreibt die bisherige Entwicklung am ifeu und gibt einen Ausblick auf Potenziale und Anwendungsmöglichkeiten.

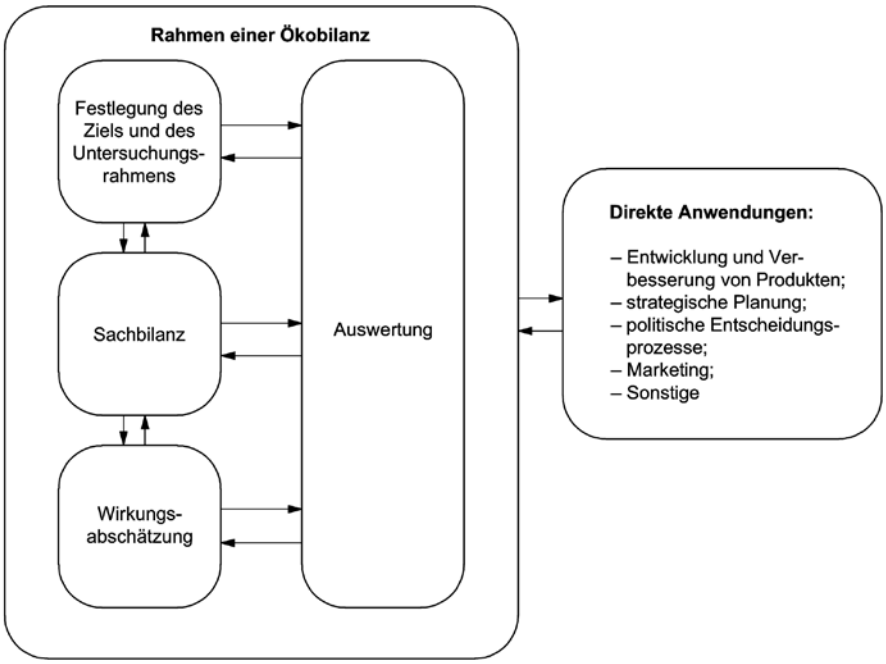
[1] Wie in internationalen Normen zu Ökobilanzen (z. B. ISO 14040) umfasst der Begriff „Produkt" auch hier-Dienstleistungen

2 Methodische Grundlagen

2.1 Ökobilanzen

Die Ökobilanz, auch bekannt als Lebenszyklusanalyse oder LCA (Life Cycle Assessment), ermöglicht die umfassende Bewertung der Umweltwirkungen eines Produkts oder einer Dienstleistung entlang des gesamten Lebenswegs – von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung. Dabei werden nicht nur die Herstellung des Produkts, sondern auch alle vor- und nachgelagerten Prozesse wie Rohstoffförderung, Transport, Nutzung und Entsorgung berücksichtigt. Diese Methode basiert auf einer detaillierten Energie- und Stoffstromanalyse, um die Umweltwirkungen fundiert zu ermitteln. Die Ökobilanzierung erfolgt gemäß den internationalen Standards ISO 14040 und 14044, die eine einheitliche Vorgehensweise gewährleisten (ISO 2006a; b). Durch die ganzheitliche Betrachtung des Lebenszyklus liefert die Ökobilanz wertvolle Erkenntnisse über die Umweltbelastungen und ermöglicht eine fundierte Entscheidungsfindung im Sinne der Nachhaltigkeit.

Abbildung 1: Der Rahmen einer Ökobilanz nach ISO 14040



Quelle: Deutsches Institut für Normung e. V.

Die Ökobilanz erfolgt als iterativer Prozess und durchläuft demnach mehrere Schleifen. Hierbei können Zwischenergebnisse zu Anpassungen und Erweiterungen der ursprünglichen Daten und Annahmen führen und somit einen höheren Detailgrad der Ergebnisse erzielen. Eine

Ökobilanz wird gemäß den ISO-Normen in vier grundlegenden Schritten bzw. Phasen durchgeführt, welche in Abbildung 1 dargestellt sind:

1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
2. Sachbilanz
3. Wirkungsabschätzung
4. Auswertung und Interpretation

Innerhalb des Untersuchungsrahmens werden die Grenzen des Systems festgelegt, einschließlich der berücksichtigten Prozesse sowie des zeitlichen und geografischen Bezugs. Die Sachbilanz dient der Quantifizierung der relevanten Ein- und Ausflüsse von Stoffen und Energie über den gesamten Lebenszyklus des Produkts innerhalb dieser Grenzen. Zudem werden die Abhängigkeiten zwischen den Ein- und Ausgängen der einzelnen Prozesse innerhalb des Systems quantifiziert. Die Auswertung der Sachbilanz erfolgt durch die Anwendung einer Wirkungsabschätzung, welche es ermöglicht, die relevanten Umweltwirkungen des Systems zu erfassen. Im Schritt der Auswertung und Interpretation werden die Ergebnisse der vorherigen Phasen zusammengeführt und reflektiert. Dabei wird überprüft, ob die festgelegten Ziele erreicht wurden und alle Aspekte des Untersuchungsrahmens berücksichtigt wurden. Die Interpretation der Ergebnisse beinhaltet die Darstellung von Schlussfolgerungen, Empfehlungen sowie die Erläuterung der Grenzen der Ergebnisse.

Prospektive Ökobilanzen – im Sinne von szenariobasierten Bewertungen möglicher zukünftiger Entwicklungen – sind noch ein relativ junges Forschungsgebiet innerhalb der Umweltwissenschaften, für das noch keine standardisierte Herangehensweise vorliegt (Bauer und Poganietz 2007; Pesonen et al. 2000).

2.2 Digitale Werkzeuge der (prospektiven) Ökobilanz

In der Ökobilanz-Analyse werden Systeme meist in Vordergrund- und Hintergrundsysteme unterteilt. Das Vordergrundsystem umfasst die spezifischen Prozesse, Materialflüsse und Aktivitäten, die direkt mit dem zu untersuchenden Produkt oder der Dienstleistung zusammenhängen. Es beinhaltet beispielsweise die Herstellungsphase, den Gebrauch und die Entsorgung des Produkts. Auf der anderen Seite repräsentiert ein Hintergrundsystem die allgemeinen und globalen Prozesse, die indirekt mit dem Vordergrundsystem zusammenhängen, wie beispielsweise die Energieerzeugung oder Rohstoffgewinnung. Zu weit verbreiteter Ökobilanz-Software, die es ermöglicht, detaillierte Modelle für Vordergrundsysteme zu erstellen und die so erstellten Prozessketten zu analysieren, Materialflüsse zu verfolgen und Umweltwirkungen zu bewerten, gehören die Programme Umberto (ipoint systems), SimaPro (PRé Sustainability B. V.), openLCA (GreenDelta) und GaBi (Sphera Solutions) (Peverali et al. 2021).

Alle Ökobilanz-Programme binden für die Modellierung des so genannten Hintergrundsystems Sachbilanz-Datenbanken (engl.: Life Cycle Inventory (LCI)) in die Modelle ein. Diese Datenbanken enthalten Informationen über Prozesse und Dienstleistungen, die im untersuchten Vordergrundsystem in Anspruch genommen werden, aber nicht von diesem beeinflusst werden. Dazu gehören häufig der Bau von Anlagen und Infrastruktur, die Nutzung von Strom aus dem öffentlichen Netz, die Vorkettenaufwendungen von Energieträgern, Rohstoffen und Vorerzeugnissen, sowie Transport- und Entsorgungsprozesse. Die umfangreichsten und etabliertesten LCI-Datenbanken sind ecoinvent (Kapitel2.3) und GaBi (sphera). Diese Datenbanken lassen sich zwar von Anwendenden in ihre Modelle einbinden,

aber nicht ohne weiteres verändern. Prozesse der ecoinvent-Datenbank lassen sich immerhin in einer nicht aggregierten Form verwenden und so einzelne Prozessketten des Hintergrundsystems anpassen. Beispielhaft ist dies in Kapitel 3.3 beschrieben. Eine vollständige Veränderung der Datenbank – inklusive aller Rückkopplungen – war lange den Spezialistinnen und Spezialisten der Datenbankbetreibenden vorbehalten. In den vergangenen Jahren hat sich aber aus der universitären Forschung heraus ein Open-Source-Ansatz etabliert, der es auch Endanwendenden erlaubt Hintergrunddatenbanken zu erstellen, zu verändern und umfassend auszuwerten (Kapitel 4.8 und 5).

2.3 Die ecoinvent-Datenbank

Um die Sachbilanz in einer Ökobilanz zu erstellen, sind möglichst hochwertige Daten zu den untersuchten Prozessen als auch für vorgelagerte Schritte (Rohstoffgewinnung, Stromerzeugung, etc.) und nachfolgende Aktivitäten (u. a. Entsorgung) notwendig. Die ecoinvent Organisation verfolgt die Mission solche Lebenszyklusanalysedaten transparent und einfach zur Verfügung zu stellen. Ecoinvent-Daten werden weltweit in Ökodesign-Anwendungen, Industrie und Wissenschaft verwendet. Entstanden als schweizerische Datenbank in den 1990er Jahren als Projekt an der ETH Zürich wurde die ecoinvent-Datenbank kontinuierlich weiterentwickelt. Mit der dritten Version (ecoinvent v3) wurde sie im Jahre 2013 zu einer globalen Datenbank erweitert und die ecoinvent Organisation gegründet, welche sich um die Publizierung, Wartung und Erweiterung der Datenbank kümmert. Die ecoinvent Organisation ist eine unabhängige, „not-for-profit“ Organisation mit fünf aktiven Mitgliedern: Agroscope, die eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), EPF Lausanne, ETH Zürich und Paul Scherrer Institut (PSI).

Mittlerweile in der Version 3.9 wird die Datenbank jährlich aktualisiert wobei jegliche Wirkungskategorien aufgrund der getätigten Anpassungen und Erweiterungen neu berechnet werden (Ecoinvent 2022; Wernet et al. 2016). Die Datenbank besteht heute aus über 19.000 Einzeldatensätzen. Diese beschreiben in der Regel einzelne technische Prozesse oder Marktmixe – mit den Input- und Outputflüssen zwischen ihnen und der Technosphäre (v. a. Zwischenprodukte und Abfälle) bzw. der Biosphäre (Rohstoffentnahme und Emissionen). Diese Prozesse werden nach der Logik unterschiedlicher Systemmodelle untereinander verknüpft und stellen ein vereinfachtes Abbild der weltweiten Produktionsverflechtungen dar. Strukturell ist die Datenbank als (erweiterte) quadratische Matrix der Prozesse aufgebaut, d. h. für jeden Prozess ist die Stärke der Verbindung mit jedem anderen Prozess hinterlegt. Veränderungen einzelner Prozesse in der Datenbank, können somit die Rückkopplungen auf vorgelagerte Prozessschritte in der Lieferkette haben.

2.4 Transformationsszenarien

Szenarien spielen eine entscheidende Rolle bei der Ausgestaltung des Wandels hin zu einer nachhaltigen und klimaneutralen Gesellschaft. Sie liefern eine kohärente Darstellung möglicher zukünftiger Entwicklungen des Systems, wobei sie das aktuelle Verständnis interner Zusammenhänge und Wechselwirkungen der Systemkomponenten sowie externer Einflussfaktoren berücksichtigen. Szenarien fungieren als Leitlinien für entscheidende technisch-strukturelle, energiepolitische, wirtschaftliche und soziale Entscheidungen, die den Transformationsprozess gezielt vorantreiben sollen. Sie bieten eine klare Orientierung und ermöglichen eine gezielte Umsetzung der notwendigen Veränderungen.

Ein besonderer Szenario-Typ sind normative Szenarien, die auch als Zielszenarien bezeichnet werden. Sie veranschaulichen aktiv mögliche Wege, um gesellschaftlich festgelegte Ziele zu erreichen. Sie zeigen auf, welche Maßnahmen ergriffen werden müssen und welche technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Konsequenzen der skizzierte Pfad hat. Im Folgenden werden zwei bedeutende Szenariofamilien vorgestellt, die das Ziel der Klimaneutralität Deutschlands bis 2050 bzw. 2045 anstreben.

RESCUE-Szenarien

Das Umweltbundesamt untersuchte im Projekt RESCUE die Zusammenhänge zwischen Klimaschutz und Ressourcennutzung. Dazu wurden sechs Szenarien erarbeitet, um Lösungen zu entwickeln, wie Rohstoffinanspruchnahme und Treibhausgasemissionen in Deutschland in Zukunft deutlich gesenkt werden können (Purr et al. 2019). Die Szenarien beschreiben Veränderungen in allen Bereichen der Gesellschaft – von Industrie, Handel und Dienstleistungen über Gebäude, Mobilität bis zur Strom- und Wärmeversorgung. Alle RESCUE-Szenarien erreichen eine Treibhausgasneutralität im Jahr 2050 (Reduktion der Treibhausgasemissionen von mind. 95 % gegenüber 1990). Die Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich der Transformationsgeschwindigkeit und der Struktur der eingesetzten Technologien. Auch die Annahmen zu gesellschaftlichen Veränderungen sind unterschiedlich.

Im Rahmen der Arbeiten des ifeu zu prospektiven Ökobilanzen wurden im Besonderen drei RESCUE-Szenarien verwendet:

- Das Szenario **GreenEe1** geht von hohen technischen Innovationen, Integration effizienter Sektorkopplungstechniken und dem Heben von Energieeffizienzpotentialen aus. Insgesamt wird hier von steigenden Produktionskapazitäten und einer weiterhin auf Exporte orientierten Produktion in Deutschland ausgegangen. Die Ambitionen zur Treibhausgasminderung sowie zur Energie- und Materialeffizienzsteigerung liegen auf einem vergleichsweise moderaten Niveau.
- Im Szenario **GreenLate** werden die notwendigen Klimaschutzmaßnahmen im Vergleich zu GreenEe1 erst zu einem späteren Zeitpunkt intensiviert und sind bei der Energieeffizienz mit einem geringeren Ambitionsniveau verbunden.
- Im Szenario **GreenSupreme** wird ein schneller Transformationspfad in Verbindung mit den wirksamsten Annahmen aus den vorgenannten Szenarien aufgezeigt, um die kumulierten Treibhausgasemissionen und Rohstoffinanspruchnahme zu verringern.

Langfristszenarien

Die "Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland" untersuchen, welche techno-ökonomischen Auswirkungen alternative Pfade zur Dekarbonisierung des Energiesystems haben und wie Deutschland das Ziel der Treibhausgasneutralität erreichen kann (Sensfuss et al. 2021). Die Szenarien unterscheiden sich durch die jeweils stark ausgeprägte Nutzung der Hauptenergieträger Strom, Wasserstoff und synthetische Kohlenwasserstoffe.

Im Rahmen der Arbeiten des ifeu zu prospektiven Ökobilanzen wurde im Besonderen das Wasserstoffszenario (TN-H_2-G) herangezogen. Dieses Szenario modelliert eine sehr starke Nutzung von Wasserstoff im Energiesystem. Die Deckung der Energienachfrage wird dabei optimiert. In der Modellierung des Energieangebotes muss die Nachfrage nach Wasserstoff, ähnlich wie im Stromszenario (TN-Strom), durch Elektrolyse in Deutschland, Europa oder anderen Regionen der Welt bereitgestellt werden.

In den Langfristszenarien wächst die Wertschöpfung des Industriesektors bis zum Jahr 2050 um etwa 1 % pro Jahr. Es werden Fortschritte bei effizienter Materialverwendung entlang der Wertschöpfungsketten bis hinein in die Endverbrauchssektoren wie die Bauwirtschaft angenommen. Auch bei der Kreislaufwirtschaft werden in allen Szenarien substantielle Fortschritte beim Einsatz von Sekundärprodukten etwa in der Stahl- oder Kunststoffproduktion angesetzt. Auch für die Sektoren Verkehr, Gebäude, Gewerbe/Handel/Dienstleistungen (GHD), sowie die Strom- und Wärmebereitstellung sind die Veränderungen detailliert beschrieben und modelliert.

3 Vereinfachte Anpassung des Hintergrundsystems

3.1 Motivation

Im März 2017 startete das Projekt "Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien" (SYSEET) im Auftrag des Umweltbundesamtes (Liebich et al. 2020). Ziel war, systematisch und umfassend die Bereitstellung von gasförmigen und flüssigen Energieträgern, basierend auf regenerativem Strom und Biomasse, zu untersuchen. Grundlage für den Vergleich sollte die Methode der Ökobilanz sein, mit der alle relevanten Umweltwirkungen und der Ressourcenbedarf (Rohstoffe, Energie, Fläche) für die Stützjahre 2015, 2030 und 2050 bewertet werden sollten.

Insbesondere die Betrachtung der Bereitstellung im Jahr 2050 machte eine innovative Herangehensweise notwendig. Da sich sowohl die Europäische Union als auch die deutsche Bundesregierung zu einer drastischen Reduktion ihrer territorialen Treibhausgasemissionen verpflichtet hatten, war absehbar, dass sich die wirtschaftlichen Produktionsbedingungen im Jahr 2050 deutlich von denen im Jahr 2015 unterscheiden würden. Das Umweltbundesamt hatte mit der Studie "Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050" (THGND) bereits eine Szenarioanalyse vorgelegt, die beschrieb, wie eine 95-prozentige THG-Reduktion möglich sein könnte (UBA 2014). Mit dem Projekt "Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE" lief zudem seit Ende 2015 ein UBA-Forschungsvorhaben, das unterschiedliche Transformationspfade auf dem Weg zu Treibhausgasneutralität modellieren sollte (Purr et al. 2019).

Aufgrund ihrer Zielsetzung beschränkten sich THGND und RESCUE allerdings auf die Entwicklung der Treibhausgasemissionen und der Rohstoffinanspruchnahme. Andere Wirkungskategorien wurden nicht untersucht. Da in SYSEET aber eine umfassendere Bewertung der Umweltwirkungen gefordert war, galt es, die Methode der Ökobilanz auf eine szenariengebundene Zukunft anzuwenden.

3.2 Annahmen zur Technologieentwicklung

Um abzuschätzen, wie sich die Veränderungen im Hintergrundsystem auf die Umweltwirkungen in der Herstellung der in SYSEET betrachteten Produkte auswirken, wurden für die Berechnungen der Stützjahre 2030 und 2050 zahlreiche Prozesse angepasst. Daten für die Veränderungen wurden für den Transformationspfad „GreenEe1“ aus der parallellaufenden RESCUE-Studie entnommen (Kapitel 2.4).

Insbesondere wurden folgende Annahmen jeweils für die beiden Stützjahre 2030 und 2050 abgeleitet:

- Stromerzeugung: Anteil erneuerbarer Energien (inkl. der Rückverstromung von synthetischen Gasen (PtG)): 2030: 75 %, 2050: 100 %),
- Stahlherstellung: steigende Recyclingquoten, Umstellung auf Wasserstoff als Reduktionsmittel im DRI-Verfahren (direct reduced iron),
- Zementherstellung: Befeuerung mit Methan aus PtG-Herstellung (SNG), Anpassung des Klinkerfaktors, neuartige Bindemittel,
- Aluminium- und Kupferherstellung: steigende Recyclingquoten, Umstellung auf inerte Anoden,
- Herstellung von Kunststoffen: Vereinfachte Deckung des Rohstoff- und Prozesswärmebedarfs durch regenerativ erzeugtes Methan (PtG).

Für die wichtigsten Technologien und Prozesse des Vordergrundsystems wurden aktuelle Daten recherchiert:

- Anlagen zur Erzeugung erneuerbaren Stroms (Windenergieanlagen (WEA), Photovoltaik-Anlagen (PV) und Solarthermische Kraftwerke (CSP))
- Anlagen zur CO_2-Abscheidung
- Elektrolyseure,

Für die Energiesysteme und Produktionsprozesse innerhalb der EU sollte der gleiche Transformationspfad wie in Deutschland gelten, für den Rest der Welt eine Entwicklung mit zehn Jahren Zeitversatz.

3.3 Erzeugen und Anpassen der reduzierten Matrix

In der Ökobilanzsoftware Umberto 5.6 wurde zunächst das Vordergrundsystem aufgebaut. Dieses enthielt die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, die Wasserelektrolyse, CO_2-Abscheidung, Energieträgersynthese und -transport. Für die Infrastruktur der erneuerbaren Stromerzeugungsanlagen (PV, WEA, CSP) lagen dafür aktuelle Inventarlisten (Stahl, Beton, Nichteisen-Metalle, Glasfaser, Kunststoffe, Energieaufwendungen) aus anderen Projekten vor.

Um das Hintergrundsystem an das gewählte Zukunftsszenario anzupassen, wurden die Stromerzeugungsanlagen als Ausgangspunkt gewählt. Mit einem Python-Skript wurden die Vorketten aus der verlinkten ecoinvent-Datenbank Schritt für Schritt aufgebaut. Beispielsweise wurde die Nutzung des Bewehrungsstahls im Windkraftanlagenturm durch eine Kette vorgelagerter Prozesse in der Ökobilanzsoftware abgebildet: Marktanteile Produktionsländer, Transportaufwendungen, Einsatz von Recyclingstahl, Roheiseninput, Roheisenproduktion, etc. Die Art und Stärke der Verknüpfungen ergaben sich dabei direkt aus der ecoinvent-Datenbank. Um den Umfang des so aufgebauten Netzes zu beschränken, wurde ein Abschneidekriterium angewendet. So wurde ein reduziertes Abbild der ecoinvent-Matrix zur Herstellung der Stromerzeugungsanlagen aufgebaut, das dann im nächsten Schritt an die Szenarioannahmen des RESCUE-Transformationspfades „GreenEe1“ angepasst wurde. Im Beispiel des Bewehrungsstahls wurden etwa je nach Szenariojahr die Recyclingquoten und die Anteile der mit dem DRI-Verfahren erzeugten Stahlmengen erhöht.

Eine besondere Anpassung war für die im Hintergrund eingesetzten Strommixe erforderlich. Zum einen sollten sich die Anteile erneuerbarer Energien gemäß „GreenEe1“ über die Zeit erhöhen. Zum anderen sollten diese erneuerbaren Strommengen dann auch mit der

veränderten Infrastruktur erzeugt werden. Dieses Rekursionsproblem („Strom wird in der Herstellung von Stromerzeugungsanlagen eingesetzt, die einen Teil des Stroms erzeugen, der in ihrer eigenen Herstellung eingesetzt wird“) ist integraler Bestandteil der ecoinvent-Datenbank und lässt sich (vereinfacht) auch in Ökobilanzsoftware abbilden.

Der Ersatz von fossilem Erdgas und Rohöl durch ihre synthetischen PtX-Entsprechungen wurde ebenso rekursiv in das Modell eingebunden.

3.4 Wirkungskategorien

Entsprechend der Fragestellung wurde in SYSEET eine breite Palette von Wirkungskategorien und Indikatoren ausgewählt:

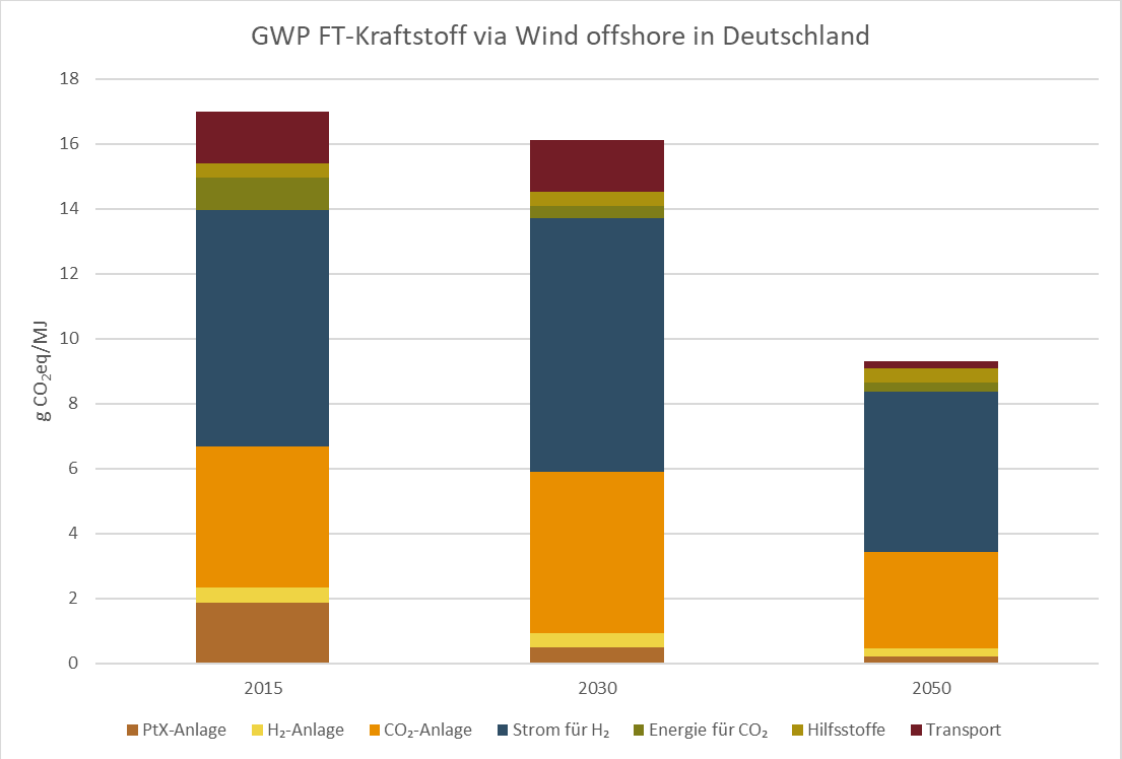
- Klimawandel: Global Warming Potential (GWP 100a) nach (IPCC 2013) in kg CO_2eq.
- Energiebedarf: Kumulierter Energieaufwand (KEA) in MJ (Heizwert, LHV).
- Versauerung: Acidification Potential (AP) nach (Hauschild und Wenzel 1998) in g SO_2eq.
- Sommersmog: Photochemical Ozone Creation Potential (POCP) nach ReCiPe (Goedkoop et al. 2009) in g C_2H_4eq.
- Eutrophierung: Eutrophication Potential (EP) nach (Heijungs et al. 1992) in g PO_4eq.
- Ozonabbau: Ozone Depletion Potential (ODP) nach (WMO 2014) in g CFC-11eq.
- Feinstaub: Particulate Matter < 10 µm (PM10) nach (De Leeuw 2002) und (WHO 2006) in g PM10eq.
- Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) nach (Giegrich et al. 2012) in kg.
- Naturraumbeanspruchung: Hemerobie-Konzept nach (Fehrenbach et al. 2015) in m^2a.
- Wasserverbrauch: Nettowasserverbrauch (Input abzgl. Output in das gleiche Wassereinzugsgebiet) in l H_2O.

3.5 Berechnung und Auswertung

Mit den für die Szenariojahre 2030 und 2050 angepassten Hintergrundsystemen wurden die Sachbilanzen für im Vordergrundsystem eingesetzte Energieträger (Strom, Wärme, Kraftstoffe) sowie für die Materialien zum Bau der Infrastruktur (Stromerzeugung, Synthese, CO_2-Abscheidung) berechnet und mit dem Vordergrundsystem in der Ökobilanzsoftware Umberto 5.6 verknüpft. Dann wurden die Sachbilanzen und Umweltwirkungen der Bereitstellung der synthetischen Energieträger für die Szenariojahre berechnet.

Abbildung 2 zeigt das Treibhauspotenzial (GWP) der Bereitstellung eines Megajoules synthetischen Fischer-Tropsch-Kraftstoffs (Benzin/Diesel) in SYSEET für die Jahre 2015, 2030 und 2050. Der Strom für die alkalische Elektrolyse wird aus Offshore-WEA in Deutschland bereitgestellt, das CO_2 aus der Umgebungsluft abgeschieden (DAC, engl.: Direct Air Capture). Zum Vergleich: Das Treibhauspotenzial fossilen Kraftstoffs liegt inklusive Verbrennung bei ca. 90 g CO_2eq/MJ.

Abbildung 2: Treibhauswirkung der Bereitstellung von synthetischem Fischer-Tropsch-Kraftstoff in den Jahren 2015-2050 (Wind offshore, AEL, DAC) je MJ (Heizwert)



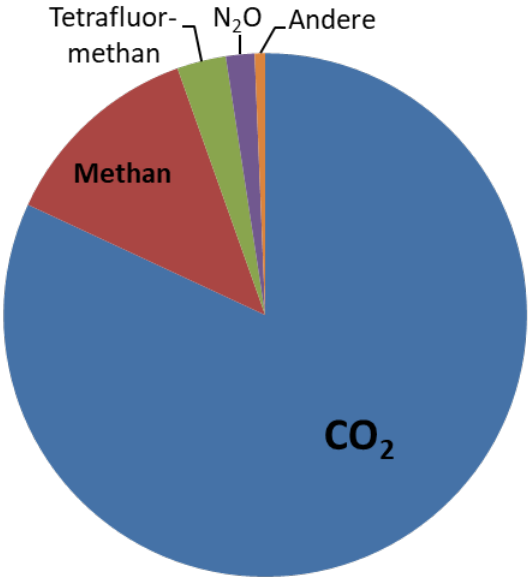
Anlagen: Infrastruktur und direkte Emissionen außer durch Erzeugung von Strom und Wärme
Quelle: ifeu, eigene Darstellung, Daten aus Liebich et al. (2020)

Die Senkung des Treibhauspotenzials im Laufe der Zeit ist zu einem Teil auf technische Fortschritte im Vordergrundsystem zurückzuführen: Die spezifische Kapazität der Windenergieanlagen und der Wirkungsgrad der Elektrolyse steigen und der Energiebedarf der CO_2-Abscheidung sinkt. Die Veränderung des Hintergrundsystems trägt aber auch erheblich bei. So sinkt der Beitrag der PtX-Anlage (Synthese) deutlich, obwohl hier keine spezifischen Änderungen der Material- und Energiebedarfe hinterlegt sind. Auch der sinkende Beitrag des Stroms aus den Offshore-WEA ist zu einem großen Teil auf das weitgehend defossilisierte Hintergrundsystem (Hauptsächlich Stahl und Beton) zurückzuführen.

Eine zentrale Erkenntnis in SYSEET war, dass trotz der modellierten Defossilisierung auch im Jahr 2050 noch wesentliche Emissionen mit der regenerativen Stromerzeugung und dem Bau der Industrieanlagen verbunden sind. Eine detaillierte Ursachenforschung war nicht mehr Teil des Projektes, wurde aber – soweit das in der Ökobilanzsoftware Umberto möglich war – im Nachgang vom ifeu exemplarisch untersucht. Diese Untersuchung zeigt, welches Potenzial in der Methode der prospektiven Ökobilanz liegt:

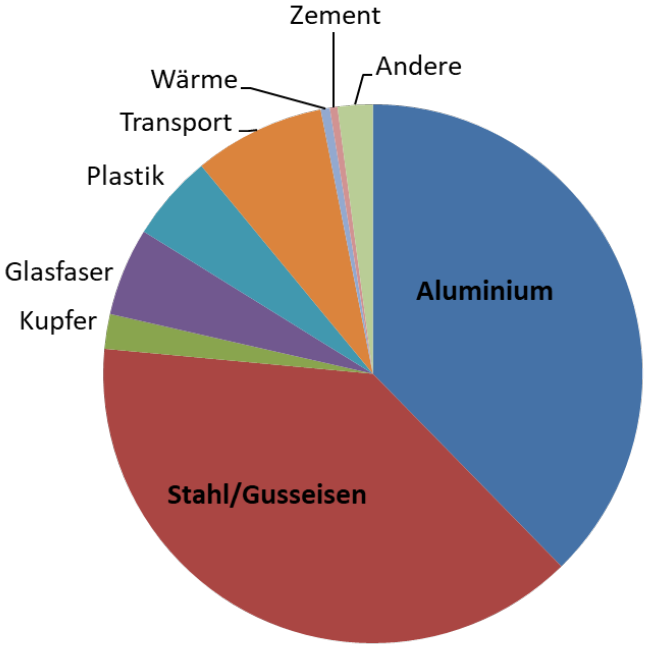
Abbildung 3 zeigt die Aufteilung der Emissionen, die in SYSEET zur Treibhauswirkung der Erzeugung von Offshore-Windstrom im Jahr 2050 (7,8 g CO_2eq/kWh) beitragen. CO_2 ist auch im Jahr 2050 in diesem Modell noch das dominierende Treibhausgas, mit deutlichem Abstand gefolgt von Methan. Abbildung 4 zeigt die Quellen der verbliebenen CO_2-Emissionen für die Erzeugung von Offshore-Windstrom in SYSEET für das Jahr 2050.

Abbildung 3: Ursachen der Treibhauswirkung von Offshore-Windstrom 2050 in SYSEET



Quelle: ifeu, eigene Darstellung, Daten aus Liebich et al. (2020)

Abbildung 4: Quellen der verbliebenen CO_2-Emissionen der Erzeugung von Offshore-Windstrom in SYSEET

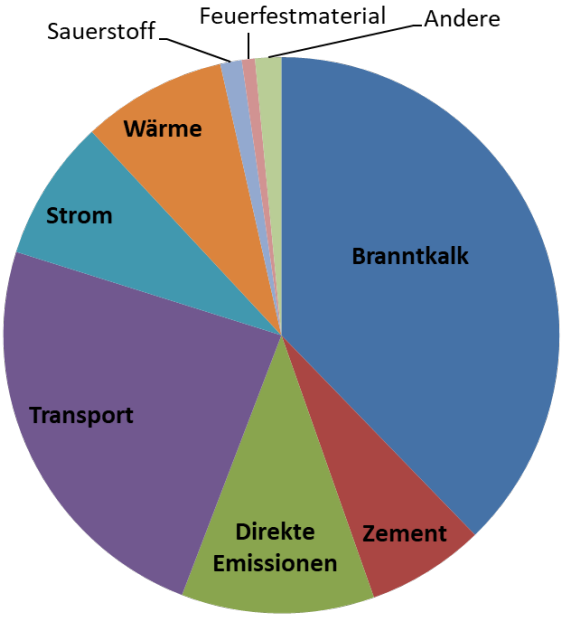


Quelle: ifeu, eigene Darstellung, Daten aus Liebich et al. (2020)

Trotz der im Modell für Deutschland umgestellten Produktionsverfahren tragen die Herstellung von Stahl und Aluminium am stärksten bei. Ein Grund dafür könnte der Einsatz von Stahl und Aluminium sein, die im außereuropäischen Ausland produziert werden. Für das Szenario GreenEe1 war in SYSEET angenommen worden, dass das außereuropäische Ausland mit zehn Jahren Verzögerung die Defossilisierung vollzieht.

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse der tiefergehenden Analyse der CO_2-Emissionen der Stahlherstellung für die Offshore-Windkraftanlagen (also des Anteils ‚Stahl/Gusseisen' in Abbildung 4).

Abbildung 5: Quellen der verbliebenen CO_2-Emissionen der Herstellung von Stahl in SYSEET



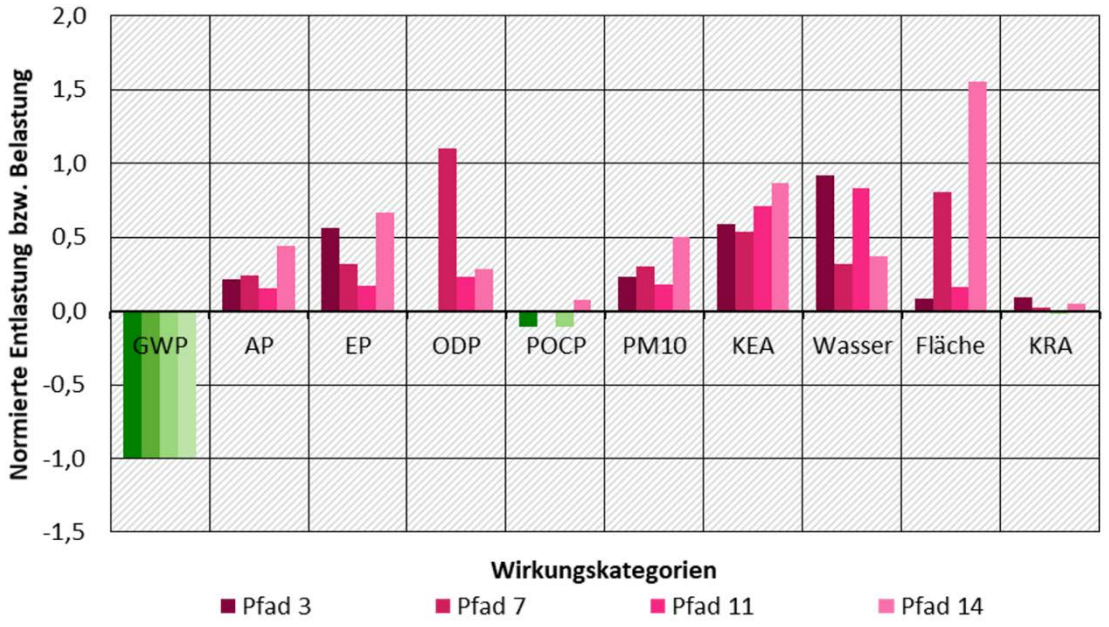
Quelle: ifeu, eigene Darstellung, Daten aus Liebich et al. (2020)

Die Beiträge ‚Direkte Emissionen', ‚Transport', ‚Strom' und 'Wärme' deuten eben auf die noch nicht vollständig defossilisierte Produktion außerhalb Deutschlands hin. Die Beiträge ‚Zement' und ‚Branntkalk' stellen aber prozessbedingte Emissionen dar, die auch in einer weitestgehend transformierten Welt noch bestehen. Zementklinker wird unter Freisetzung von CO_2 aus Kalkstein gebrannt.

Solche Analysen können also zu Erkenntnissen führen, an welchen Stellen weitere Potenziale für die Vermeidung von Treibhausgasen liegen. Die tiefgehende Beitragsanalyse war aber im Rahmen des in SYSEET erstellten Modells sehr zeitintensiv und deshalb nicht mit Blick auf das Gesamtsystem zu leisten.

Eine geweitete Perspektive war auf der Ebene der Gesamtwirkungen möglich. Abbildung 6 zeigt die rechnerische Entlastung bzw. Belastung 2050 für rein strombasierte Fischer-Tropsch-Energieträger im Vergleich zur fossilen Referenz, normiert auf die Situation 2016. Details zur Normierungsmethode und die Bereitstellungspfade finden sich in Liebich et al. (2020).

Abbildung 6: Rechnerische Entlastung bzw. Belastung 2050 im Vergleich zu fossilen Energieträgern, normiert auf die Situation 2016 für rein strombasierte Fischer-Tropsch-Energieträger (Volllaststunden Syntheseanlage)



GWP: Treibhauspotenzial, AP: Versauerung, EP: Eutrophierung, ODP: Ozonabbau, POCP: Sommersmog, PM10: Feinstaub, KEA: Kumulierter Energieaufwand, Wasser: Wasserverbrauch, Fläche: Flächenbedarf, KRA: Kumulierter Rohstoffaufwand
Quelle: (Liebich et al. 2020)

Zentrale Erkenntnis: Im Gegensatz zum Klimawandel zeigen alle Bereitstellungspfade in den meisten anderen Wirkungskategorien eine deutlich höhere Umweltbelastung in Bezug zur fossilen Referenz. Wenn im Jahr 2050 große Mengen an synthetischen Energieträgern eingesetzt werden, kann sich daraus eine erhebliche zusätzliche Belastung ergeben, die in vielen Wirkungskategorien in einer ähnlichen Größenordnung liegt wie die Entlastung im GWP. Unsicherheiten und Einschränkungen dieser SYSEET-Ergebnisse werden im nächsten Abschnitt diskutiert.

3.6 Erkenntnisse und Einschränkungen

Wie schon im Fazit des Projektberichtes zusammengefasst, war die Aussagekraft der prospektiven Betrachtung in SYSEET in einigen Punkten eingeschränkt:

- Die Umweltwirkungen von Speichern für CO_2, Wasserstoff und Strom wurde nicht einbezogen.
- Die Daten zum Bau der Syntheseanlagen waren generische Datensätze aus der Ökobilanzdatenbank ecoinvent und bildeten allgemeine Anlagentypen ab (z. B. ‚Chemical Factory Organics'). Spezifische Anlagendaten würden die Genauigkeit der Ergebnisse erhöhen.
- Für die betrachteten Länder wurden nur Volllaststunden für durchschnittliche gute Standorte verwendet. Eine Differenzierung nach Bandbreiten wurde als wünschenswert angesehen.
- Die Transformation des Hintergrundsystems konnte nur für die Strombereitstellung, die wichtigsten Schlüsseltechnologien, Prozess und Materialien modelliert werden. Wie stark diese unvollständige Anpassung die Ergebnisse beeinflussten, konnte im Rahmen der Studie nicht quantifiziert werden.
- Eine weitere Unsicherheit in der Interpretation der Ergebnisse entstand dadurch, dass das zugrunde gelegte RESCUE-Szenario GreenEe1 unterstellt, dass die Welt außerhalb Europas eine um zehn Jahre verzögerte Transformation hin zur Treibhausgasneutralität vollzieht. Welchen Einfluss diese „fossile Verzögerung" im Detail auf die Umweltwirkungen der untersuchten Energieträger hat, blieb ebenfalls unklar.
- Eine räumliche Zuordnung der Umweltwirkungen (z. B. Deutschland, Europa, Rest der Welt) war mit dem vereinfachten in der Software Umberto angelegten Modell nicht möglich, obwohl prinzipiell solche Informationen Teil der ecoinvent-Prozesse sind.
- Schließlich ließ sich nicht ausschließen, dass einzelne Ergebnisse als Artefakte der Methode entstehen, auch wenn es dafür keine konkreten Indizien gab.

Für nachfolgende Untersuchungen wurden zentrale Forschungsfragen identifiziert. Insbesondere stellte sich die Frage, welche Umweltwirkungen in Transformationsszenarien für verschiedene Produkte und Dienstleistungen entstehen, wenn

- die Wirtschaft weltweit weitestgehend defossilisiert ist und wenn
- diese Transformation vollständig im Ökobilanzmodell des Hintergrundsystems abgebildet wird.

Außerdem war klar geworden, dass für eine umfassende Auswertung eine schnelle Variation von Inputdaten für Sensitivitätsrechnungen sowie eine multifaktorielle Filterung der Ergebnisse notwendig ist. Eine Modellierung in einer für Vordergrundmodelle konzipierten Software (Umberto, SimaPro, OpenLCA) erschien nicht dauerhaft tragfähig.

4 Umfassende Anpassung in Zusammenarbeit mit ecoinvent

4.1 Motivation

Die vom Umweltbundesamt initiierten Forschungsvorhaben waren auch nach SYSEET (Liebich et al. 2020) Treiber für die Weiterentwicklung der Methode der prospektiven Ökobilanz im ifeu. Hatte sich das Projekt RESCUE noch der Erarbeitung von Transformationsszenarien zu einem treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland gewidmet, soll das Projekt REFINE (Dittrich et al. 2024c; a) diesen Transformationsprozess vertieft für ausgewählte Schlüsseltechnologien untersuchen, ihn in einen globalen Kontext setzen und gleichzeitig auch Umweltwirkungen jenseits des Treibhauseffektes untersuchen. Mit verwandten Fragestellungen erhielt das ifeu in der Folge den Zuschlag für die Forschungsvorhaben UAAK (Biemann et al. 2023) und „Grenzen des Konsums“ (Dittrich et al. 2024b). In UAAK wird untersucht, wie die Ökobilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehr ausfällt. Das Projekt „Grenzen des Konsums“ erforscht welche Konsummuster zukünftig, in einer treibhausgasneutralen Welt, so nachhaltig sind, dass die planetaren Grenzen nicht überschritten werden.

Durch die Erfahrung aus SYSEET und RESCUE konnte das ifeu für die Erforschung der Umweltaspekte in diesen Projekten einen übergreifenden Ansatz anbieten:

- Die ecoinvent-Datenbank sollte an mehrere Szenarien angepasst werden, um eine Bandbreite an Entwicklungen abzudecken.
- Die Ergebnisse zu den Umweltwirkungen – und in REFINE auch zu den Rohstoffbedarfen sollte multidimensional also zeitlich, regional und sektoral, ausgewertet werden können.
- Eine enge Zusammenarbeit mit der ecoinvent Organisation sollte eine effiziente und schnelle Anpassung und Berechnung des Hintergrundsystems ermöglichen.

Das Projekt REFINE, das als erstes startete und sowohl personell als auch inhaltlich eng mit den Vorgängerprojekten SYSEET und RESCUE verbunden war, sollte die Grundlagen für dieses Vorgehen liefern.

4.2 Szenariorahmen

In REFINE wurden einige grundlegende Festlegungen getroffen: Es wurden GreenSupreme und GreenLate aus dem RESCUE-Projekt als Hauptszenarien ausgewählt. Vor dem Hintergrund der aktuellen politischen Entwicklungen zur Verschärfung der Treibhausgasminderungen und zur Entwicklung von grünem Wasserstoff wurde als weiteres Szenario das Wasserstoffszenario aus den BMWI-Langfristszenarien für Deutschland hinzugenommen (Kapitel 2.4).

Die drei verwendeten Szenarien sind jeweils für Deutschland konzipiert. Um auch Importe abzubilden und auch internationale Entwicklungen und Auswirkungen betrachten zu können, mussten auch Annahmen für Europa und die Welt getroffen werden.

Um die Entwicklung in der Europäischen Union ohne Deutschland und in der Welt ohne Europäische Union zu modellieren, wurden die 1,5°- und 2°-Szenarien von Teske et al. (2019) herangezogen. Diese Szenarien folgen einem Bottom-up/Top-Down Ansatz, ohne kostenoptimierende Zielfunktionen. Die Sektoren, für die Teske et al. (2019) Transformationspfade entwirft, beinhalten Energie, Verkehr, Gebäudewärme und Industrie. Die Szenarien umfassen die gesamte Welt, aufgeteilt in 14 Regionen.

4.3 Annahmen zur Technologieentwicklung

Wie schon in SYSEET musste in REFINE festgelegt werden, wie sich die in den Szenarien beschriebenen Technologieentwicklungen in den Datensätzen der ecoinvent-Datenbank niederschlagen sollten. Dafür war es notwendig für eine ganze Reihe von Wirtschaftsbereichen Prozesstechniken zu ändern oder anzupassen. Im Folgenden sind die wichtigsten Anpassungen in der ecoinvent-Datenbank beschrieben. Alle Detailannahmen und Eingangsdaten finden sich in (Dittrich et al. 2024c).

Schlüsseltechnologien

Einen speziellen Schwerpunkt bilden in REFINE ausgewählte Schlüsseltechnologien für die Energiewende. Es wurden abschließend 15 solcher Technologien ausgewählt, für die aktuelle Daten recherchiert wurden – spezifische Rohstoffbedarfe, technologische Parameter, technische Entwicklungstrends und -ziele, die aktuelle Bedeutung und Ausblick für 2030/2050 sowie qualitative Angaben zu Umweltwirkungen.

Folgende Schlüsseltechnologien waren in ecoinvent schon vorhanden und wurden im Rahmen von REFINE aktualisiert:

- Windenergieanlagen (Onshore-/Offshore-WEA)
- PV-Anlagen, Freifläche/Aufdach
- Li-Ionen-Akku (in 2050 als Li-S-Akku)
- Solarthermische Kraftwerke (CSP)
- Geothermie-Kraftwerke

Folgende Schlüsseltechnologien wurden neu hinzugefügt:

- Wärmepumpen
- Wasser-Elektrolyse (inkl. Herstellung Elektrolyseure) für H_2
- Methanisierung
- Methanolsynthese (direkt aus CO_2 und H_2)
- Fischer-Tropsch-Synthese, Power-to-Liquid (PtL) (v. a. Benzin und Diesel)
- Strombasierte Antriebssysteme (inkl. Oberleitungs-Infrastruktur für Lkw)
- Stromnetze

- Brennstoffzellen
- Energiespeicher
- CO_2-Bereitstellung (Direct Air Capture, Abscheidung aus Rauchgas mittels Aminwäsche)
- Meerwasserentsalzung

Allgemeines Hintergrundsystem

Neben den Schlüsseltechnologien wurden gezielt Prozesse im Hintergrundsystem identifiziert, die für die Energiewendeszenarien von hoher Bedeutung sind. Dazu gehören auch Dienstleistungsprozesse, die in engem Kontext zu den Schlüsseltechnologien stehen wie der Güterverkehr und die Abfallentsorgung. Insgesamt wurden vor allem Prozesse aus folgenden Bereichen angepasst:

- Strommixe
- Wärmeerzeugung
- Power-to-X (PtX) Energieträger
- Industrieprozesse
- Güterverkehr
- Abfallentsorgung

Aus den RESCUE-Szenarien GreenSupreme und GreenLate sowie aus dem H2-Szenario wurden für die Bezugsjahre 2030, 2040 und 2050 insbesondere Daten zu Energieverbräuchen und -mixen, Energie- und Materialeffizienz, Recyclinganteilen sowie zu neuen Technologien ausgewertet und aufbereitet.

Strommixe: Die Umstellung der Stromerzeugung auf erneuerbare Energien, ist zentraler Bestandteil der Energiewendeszenarien. Für Deutschland entsprechen die Annahmen zur Umstellung in den Stützjahren für GreenSupreme und GreenLate den Annahmen in RESCUE. Für das H2-Szenario wurden Angaben aus (Sensfuß et al. 2021) umgesetzt, auch für die Region EU ohne DE. Bei den beiden Green-Szenarien basieren die für EU ohne DE abgeleiteten Strommixe auf den Szenarien nach (Teske et al. 2019). Für die Welt ohne EU gilt das für alle drei Szenarien. Die resultierenden Strommixe sind in (Dittrich et al. 2024c) aufgeführt. Die neu ermittelten Strommixe wurden in der ecoinvent-Datenbank in ca. 170 Strommärkten eingesetzt. Dort ersetzen sie die nationalen Strommärkte.

Die Anpassung der **Wärmeerzeugung** betrifft hauptsächlich die Wärmebereitstellung in der Industrie. In GreenSupreme und GreenLate erfolgt eine Umstellung auf elektrische Beheizung, soweit technisch möglich und sinnvoll. Für Hochtemperaturanwendung wird PtG statt Erdgas verwendet. Im H2-Szenario wird für die industrielle Wärme in Öfen und Dampferzeugern überwiegend Wasserstoff verwendet. Der dort angegebene Energieträgermix wird separat für die Jahre aber gleichermaßen für alle Industriebranchen angenommen. Die Angaben zu Verbräuchen und Umstellung in verschiedenen Industriebranchen und die Eingangsdaten für den Energieträgermix für Industriewärme im H2-Szenario finden sich ebenfalls in (Dittrich et al. 2024c).

Für **PtX-Energieträger** wurden allgemeine Festlegungen bezüglich Herstellungsort, anzuwendender Strommix, Speicher und Transporten getroffen. Für GreenSupreme und GreenLate folgen die Festlegungen den Annahmen aus RESCUE. Wasserstoff wird inländisch bzw. in den jeweiligen Verbrauchsregionen hergestellt. Methan wird in GreenSupreme ebenfalls

regional produziert und in Late aus Nachbarregionen importiert. Für PtL werden Importe für Deutschland und die EU ohne Deutschland wie in RESCUE aus der MENA-Region (Proxy Marokko) angesetzt. Für die Verbrauchsregion Welt ohne EU kommen die gleichen Standort- und Transportbedingungen zum Tragen. Weitergehende Daten zu Mix und Volllaststunden der Stromerzeugung für die Wasserstoffherstellung im H2-Szenario sowie zu den Endenergieverbräuchen sind in (Dittrich et al. 2024c) aufgeführt.

Für die Prozesse der (Grundstoff-)**Industrie** wurden Effizienzsteigerungen angesetzt, Sekundärmaterialeinsatzquoten angepasst und die Wärmeerzeugung umgestellt. Für besonders energieintensive Branchen gibt es in den Szenarien Annahmen zu neuen Technologien (z. B. DRI, Celitement), prozessspezifischen Verbrauchsänderungen, die auf die ecoinvent-Prozesse übertragen wurden. Dies betrifft vor allem die Branchen Metallherstellung (Stahl, NE-Metalle), Zementherstellung und die Chemieindustrie. Die detaillierten Modifikationen in den Industriesektoren inklusive der Eingangsdaten (Sekundärmaterialeinsatzquoten, Endenergieverbräuche, Technologieübergänge) sind in (Dittrich et al. 2024c) aufgeführt.

Der **Güterverkehr** verursacht einen Teil der Umweltwirkungen bei der Bereitstellung der Schlüsseltechnologien, der Personenverkehr ist dagegen nicht relevant. Die wesentlichen Transportprozesse in der ecoinvent-Datenbank wurden entsprechend den Ausprägungen der Szenarien für den Straßengüterverkehr und den sonstigen Güterverkehr modifiziert.

Die **Abfallentsorgung** ist bei der Bereitstellung von Investitionsgütern in den ecoinvent Datensätzen bereits berücksichtigt. Die Verwertungs- bzw. Beseitigungsverfahren und -anteile wurden allgemein nicht verändert. In Anlehnung an die Annahmen in RESCUE wurde für die thermische Abfallbehandlung vereinfachend davon ausgegangen, dass in allen Szenarien der fossile Kohlenstoffanteil im Abfall bis 2050 auf Null sinkt.

4.4 Übertragung auf die ecoinvent-Matrix

Die Berechnung erfolgte auf Grundlage der Ökobilanzdatenbank ecoinvent in Version 3.7.1 (von Dezember 2020) in der Ausprägung Systemmodell ‚Cut-Off' (Kapitel 2.3).

Die in Kapitel 4.3 beschriebenen Anpassungen wurden in mehrere Parameterlisten, neue Datensätze und Spezifikationen zu Änderungen in der Modellierung der ecoinvent-Datenbank übersetzt. Um die neuen Prozessdaten in die Datenbank zu übertragen, wurden diese in das Datenformat ecospold1 gebracht und an ecoinvent übergeben. Diese Anpassungen wurden von ecoinvent in einer neu erstellten Berechnungsumgebung eingebunden, welche es erlaubt, Anpassungen an den Matrizen in einzelnen Modulen vorzunehmen. Damit können die Auswirkungen der Anpassungen, z. B. die Änderungen in den Strommixen, isoliert voneinander betrachtet werden.

Für die Integration der ecospold1 Datensätze wurde eine Übersetzungstabelle erstellt, welche die Elementar- und Materialflüsse den entsprechenden Flüssen in der ecoinvent v3 Nomenklatur zuweist. Weiterhin wurden Funktionen für die Anpassungen einzelner Sektoren geschrieben, welche Parameter entsprechend einlesen, verarbeiten und schlussendlich in die Matrizen übertragen und die gefragten Wirkungskategorien wurden neu berechnet.

Um Rohstoffbedarfe und -flüsse, insbesondere von Metallen, auswerten zu können, wurde die ecoinvent-Datenbank mit zusätzlichen Informationen ergänzt. Mit der unveränderten Matrix sind relevante rohstoffbezogene Ergebnisse nicht oder nur eingeschränkt auswertbar, da der Fokus auf einer Zuordnung von Umweltlasten nach einem konsistenten

Zuordnungsschema liegt. So wird der Metallbedarf aus Erzen für vergesellschaftete Metalle nicht physikalisch, sondern ökonomisch zugeordnet. In der weiteren Prozesskette der Metallherstellung wird aufgrund des gewählten Cut-Off-Systems für gekoppelte Systeme (hier Recycling) der Einsatz von Sekundärmaterial nicht als Metallbedarf ausgewiesen. Um diese Informationen nicht zu verlieren, wurden neue Informationsflüsse in der ecoinvent-Datenbank ergänzt. Diese beschreiben den Input von 21 Primär- und 42 Sekundärrohstoffen (z. B. für Platin: ‚Use of secondary materials platinum' und ‚Use of primary material, platinum'), die in der Sachbilanz ausgewiesen werden. Prinzipiell kann so für jedes untersuchte System der Gesamtbedarf an Primär- und Sekundärrohstoffen schnell ermittelt werden. In REFINE wurde diese Berechnung aber mit einer anderen Methode vorgenommen.

4.5 Wirkungskategorien

In REFINE wurden weitgehend die gleichen Wirkungskategorien wie schon in SYSEET betrachtet:

- Klimawandel
- Versauerung
- Eutrophierung – hier differenziert in terrestrisch und aquatisch
- Bodennahes Ozon (Sommersmog)
- Feinstaub
- (Stratosphärischer) Ozonabbau
- Landnutzung (Naturraumbeanspruchung),

sowie die Indikatoren:

- Kumulierter Rohstoffaufwand
- Kumulierter Energieaufwand
- Wasserverbrauch
- Flächennutzung: belegte Fläche in m^2a

Speziell für die Auswertung im Projekt „Grenzen des Konsums" (Dittrich et al. 2024b) wurden noch zusätzliche Indikatoren berechnet und ausgegeben:

- Kumulierte Stickstoffemissionen
- Kumulierte Phosphoremissionen
- Umwandlung bewaldeter Fläche in m^2a

Hier zeigt sich ein Vorteil des direkten Zugriffs auf die ecoinvent-Datenbank: Eigene Charakterisierungsfaktoren und Wirkungskategorien können definiert und die Auswertung so auf spezifische Fragestellungen zugeschnitten werden.

4.6 Berechnung der Sachbilanzergebnisse (LCI) und Validierung

Nachdem die Datensätze und ihre Verknüpfungen angepasst waren, wurden für jedes Szenario die Sachbilanzen (LCI) aller in der Datenbank, also der modifizierten Matrix, enthaltener Datensätze in Abhängigkeit voneinander neu berechnet. Diese umfasst jeweils alle bereits in ecoinvent v3.7.1 enthaltenen Datensätze sowie alle für das Szenario modifizierten und hinzugefügten Datensätze. Somit werden z. B. alle Datensätze, welche Netzstrom benötigen mit den neu zusammengesetzten Strommixen neu berechnet. Auf die Sachbilanzen wurden dann zum Schluss die vom ifeu definierten LCIA Methoden, nach Zuordnung zur ecoinvent Nomenklatur und Einbindung in der entsprechenden Matrix, angewendet.

Als Ergebnisse wurden Excel-Tabellen erstellt, welche die Sachbilanzen und LCIA-Ergebnisse auf verschiedene Weisen darstellen und die für weitere Analysen verwendet werden. Insgesamt wurden im Rahmen der Anpassung der ecoinvent LCA-Datenbank je Szenario und Bezugsjahr ca. 3.000 Datensätze ergänzt bzw. modifiziert und ca. 70.000 Parameter in Datensätzen geändert oder neu erzeugt. Hierbei gilt zu berücksichtigen, dass eine Änderung in der Stromerzeugung Auswirkungen auf nahezu alle Prozessschritte und Produkte hat, was die große Zahl der Änderungen erklärt. Ecoinvent hat für die technische Übertragung der Daten einige Prüfroutinen eingeführt, die systematische Fehler vermeiden helfen. Zudem werden die Veränderungen in der Datenbank protokolliert.

Validierung

Die Prüfung der Ergebnisse stellt dennoch eine große Herausforderung dar. Jede Neuberechnung erzeugt über 19.000 Ergebnis-Datensätze mit jeweils ca. 2.100 Elementarflüssen und 25 Indikatorergebnissen. Dieser großen Zahl an Ergebnissen stehen aber keine Referenz-Ergebnisse aus anderen Ökobilanz-Berechnungen gegenüber, da prospektive Ökobilanzen ein neues Feld der Nachhaltigkeitsforschung sind. Ein direkter Vergleich mit anderen Forschungsergebnissen ist deshalb nicht möglich. Stattdessen wurde eine Plausibilisierung der Ergebnisse anhand 60 Datensätzen durchgeführt, die den Gütern aus dem Vorhaben Grenzen des Konsums (Dittrich et al. 2024b) entsprechen. Der Vorteil der Nutzung dieser Güter zur Plausibilisierung bestand darin, dass sich die Produkte (darunter z. B. eine Waschmaschine, Baumwolle oder Holzwerkstoffe) selbst nicht änderten und daher Veränderungen ausschließlich auf die veränderten Hintergrundsysteme zurückzuführen sind.

Die Validierung konnte ausschließlich mit Blick auf die Treibhausgasemissionen und den kumulierten Energieaufwand (KEA) durchgeführt werden. Im GreenSupreme-Szenario ist aus den RESCUE-Ergebnissen bekannt, dass sich die CO_2-Emissionen aus fossilen Quellen um mindestens 95 % gegenüber 2020 reduzieren (mit Ausnahmen aus prozessbedingten Emissionen, z. B. für die Klinkerherstellung, die im Kalzinierungsprozess CO_2 aus Karbonaten freisetzt). Zudem ist der Einsatz von fossilen und nuklearen Energieträgern in diesem Szenario weltweit in 2050 ausgeschlossen, so dass die Indikatoren KEAfossil und KEAnuklear in 2050 Null betragen müsste.

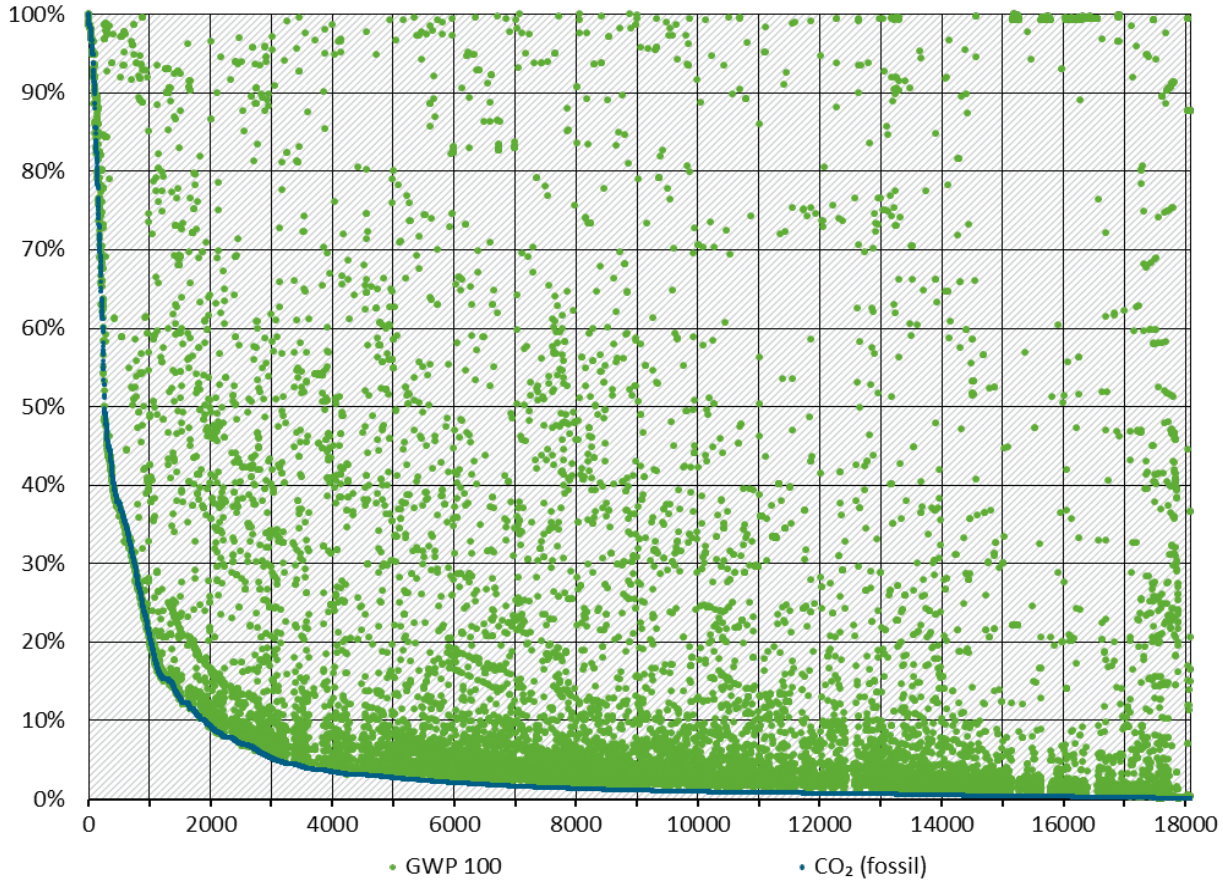
Die CO_2-Emissionen wurden für alle Datensätze in der LCI-Datenbank ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt. Darin enthalten sind auch fossile Prozesse, die in 2050 nicht mehr genutzt werden (z. B. Strom aus Kohlekraftwerken). Die Ergebnisse des Szenarios GreenSupreme 2050 haben wir mit denen von 2020 verglichen. Außer CO_2fossil wurden auch die Ergebnisse für GWP, KEAfossil und KEAnuklear ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Vergleiche 2050/2020 sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Verhältnis der Ergebnisse für 2050 im relativen Vergleich zu 2020 für alle Datensätze in ecoinvent und das Szenario Green-Supreme

	Mittelwert	Median
CO_2fossil	4,8 %	1,0 %
GWP	18 %	5,7 %
KEAfossil	4,8 %	0,25 %
KEAnuklear	1,6 %	0,029 %

Im Mittel liegen die fossilen CO_2-Emissionen eines Prozesses in der Datenbank für 2050 also bei 5 % der Emissionen von 2020. Betrachtet man den Median, so liegt das verbleibende fossile CO_2 sogar nur noch bei rund 1 %. Für den GWP ist die Abnahme nicht ganz so stark, während KEAfossil und KEAnuklear in der gleichen Größenordnung wie CO_2fossil liegen.

Abbildung 7: Ergebnisse aller ecoinvent-Datensätze des Szenarios GreenSupreme 2050 im Vergleich zu 2020 für CO_2fossil (dunkelgrün) und GWP 100 (hellgrün)



Quelle: eigene Berechnung ifeu/ecoinvent

In Abbildung 7 zeigt sich noch einmal grafisch, dass sich die CO_2fossil-Ergebnisse (dunkelgrün, sortiert nach dem Anteil der verbleibenden CO_2-Emissionen in 2050 im Vergleich zu 2020) für die meisten Datensätze in ecoinvent in 2050 infolge der Anpassung um mehr als 95 % reduzieren. Auch liegen die dazugehörigen GWP-Ergebnisse (hellgrün) überwiegend nur leicht über den CO_2fossil-Ergebnissen; d. h. fossiles CO_2 ist auch 2050 das dominierende Treibhausgas in GreenSupreme. Das verbleibende fossile CO_2 in 2050 stammt aus Karbonaten, die z. B. beim Brennen von Kalk für die Zementherstellung freigesetzt werden. Weitere relevante Treibhausgase sind Methan und Lachgas. Prozesse, die in 2020 fossile Energieträger einsetzen, liegen auch noch in den Datenbanken für 2030, 2040 und 2050 vor, werden aber nicht mehr von anderen Prozessen in den defossilisierten Szenarien genutzt. Diese Relikte in der LCA-Datenbank sind aber in dieser Abbildung noch sichtbar – als Ergebnisse für CO_2fossil, die noch über 50 % im Vergleich zu 2020 aufweisen. Die Werte für KEAfossil und KEAnuklear in Tabelle 1 gehen ebenfalls auf diese Relikte zurück.

Weiterhin wurden für alle Datensätze 10 Indikatoren (Kapitel 4.5) ausgewertet und mit der 2020-Referenz verglichen, um statistische Auffälligkeiten zu lokalisieren. Insgesamt wurden 21 Iterationsschleifen durchgeführt, in denen Daten korrigiert, ergänzt und angepasst wurden bis zu dem Punkt, an dem keine Artefakte mehr zu erkennen waren.

4.7 Auswertung

Da der Endbericht für REFINE zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Methodenpapiers noch in der finalen Abstimmung mit dem Umweltbundesamt ist, können aus diesem Projekt hier noch keine Ergebnisse gezeigt werden. Gleiches gilt für die Endberichte der UBA-Projekte UAAK (Biemann et al. 2023) und „Grenzen des Konsums“ (Dittrich et al. 2024b), in denen jeweils das an das RESCUE Szenario GreenSupreme angepasste Hintergrundsystem zum Einsatz kam. Sobald diese Endberichte veröffentlicht sind, werden zentrale Ergebnisse in eine aktualisierte Version dieses Methodenberichtes integriert.

4.8 Detailliertere Auswertung auf der Basis von Brightway

Parallel zur Zusammenarbeit mit ecoinvent in REFINE beschäftigte und vernetzte sich das ifeu intensiv mit der Open-Source-LCA-Community in Europa, die sich ebenfalls mit prospektiven Ökobilanzen beschäftigt.

Als mächtiges Werkzeug stellte sich dabei das Python Framework Brightway2 mit dem Activity Browser als Nutzerschnittstelle heraus (Mutel 2017; Steubing et al. 2020). Brightway Version 2 wird seit 2012 als Open-Source-LCA-Framework auf Python-Basis entwickelt und hat mittlerweile vielfältige Anwendungen gefunden. Innovative LCA-Ansätze wurden mit Brightway möglich: dynamische LCA, regionalisierte LCA, die Verknüpfung von parametrisierten LCA mit Gebäudeenergiemodellen, Screenings und globale Sensitivitätstests mit großen LCA-Datenbanken und die Integration von LCA in Herstellungsprozessmodelle.

Der Activity Browser (AB) ist ebenfalls eine Open-Source-Software, die auf Brightway aufbaut. Er stellt eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) für Brightway bereit, um so als Produktivitätswerkzeug für viele Standard-LCA-Aufgaben zu dienen. Außerdem ist es mit dem Activity Browser möglich neue und fortgeschrittene Modellierungsansätze und damit verbundene Analysen durchzuführen.

Vereinfacht gesagt bietet Brightway die Möglichkeit, Ökobilanzdatenbanken anzulegen, zu importieren und zu bearbeiten. Da Brightway im Umfeld der ETH Zürich und der ecoinvent Organisation entstanden ist, bestand von Anfang an eine enge Verbindung zur ecoinvent-Datenbankstruktur. Der Activity Browser erlaubt es ecoinvent-Datenbanken, die mit einer regulären Lizenz herunterladbar sind, lokal in Brightway einzubinden und über eine grafische Oberfläche zu durchsuchen, Bewertungsmodelle anzuwenden und einzelne Einträge zu verändern. Die so veränderten Datenbanken lassen sich auch abspeichern und weiterverwenden. Anwendenden stehen damit jetzt ähnliche Möglichkeiten zur Bearbeitung offen, wie sie bislang nur Datenbankbetreibenden – hier der ecoinvent Organisation – zur Verfügung standen.

Insbesondere ist es auch möglich, die angepassten Datenbanken in Brightway und Activity Browser einzubinden, die im Zuge des REFINE-Projektes entstanden sind. Da am ifeu die Expertise zu diesem Vorgehen erst im Laufe des Jahres 2023 aufgebaut wurde, war aus zeitlichen und aus technischen Gründen eine Bereitstellung der im Rahmen von REFINE erzeugten veränderten Datenbanken nicht direkt durch ecoinvent möglich. Die Ergebnisse lagen dem ifeu aber in Excel als verknüpfte Datentabellen vor. Durch ‚Reverse Engineering' war es möglich die ursprüngliche Datenbankstruktur herzustellen und in Brightway einzubinden.

Die neuen Möglichkeiten zur Auswertung und Bearbeitung der angepassten Datenbank kamen gerade noch rechtzeitig, um in den laufenden Projekten angewendet zu werden:

- In UAAK war so eine Beitragsanalyse möglich, die Materialgruppen und Einzelmaterialien identifizierte, welche die relevanten Beiträge zu jeder der angewendeten Wirkungskategorien lieferte (Biemann et al. 2023).
- In REFINE war es möglich, die angepassten Datenbanken für die unterschiedlichen Szenariojahre zu verknüpfen, um so die Entwicklung zu modellieren, dass der kontinuierliche Zubau der Stromerzeugungsanlagen zu einem Anlagenbestand mit unterschiedlichen Altersklassen führt. Basierend darauf konnten absolute Umweltwirkungen der Energiewende berechnet werden (Dittrich et al. 2024c).
- In REFINE war es so ebenfalls viel einfacher die berechneten Umweltwirkungen nach Wirtschaftssektoren und Weltregionen auszuwerten.

Sobald Endberichte dieser Projekte veröffentlicht sind, werden diese Ergebnisse in eine aktualisierte Version dieses Methodenberichtes an dieser Stelle exemplarisch dokumentiert.

4.9 Erkenntnisse und Einschränkungen

Obwohl die Endberichte der Projekte REFINE (Dittrich et al. 2024c), UAAK (Biemann et al. 2023) und Grenzen des Konsums (Dittrich et al. 2024b) noch nicht veröffentlicht sind, lassen sich schon vorläufige Erkenntnisse aus dem methodischen Vorgehen ziehen und Einschränkungen benennen. Diese wurden zum Teil auch schon in (Dittrich et al. 2022) erörtert.

- Trotz der umfangreichen Anpassungen der ecoinvent-Datenbank konnten nicht alle Annahmen aus RESCUE eingearbeitet werden. Dies betrifft z. B. die Erhöhung von Sekundärrohstoffquoten für Technologie- und Edelmetalle außer Stahl, Aluminium, Kupfer, Zink und Blei. Auch erhöhte Scherbenanteile in der Glasindustrie, Altpapier in der Papier- und Kartonherstellung, Kunststoffgranulate aus Kunststoffabfällen, Altholz in der Produktion von Holzprodukten und zunehmende Nutzung von Bau- und Abbruchabfällen als Baustoffe wurden nicht berücksichtigt.

- Einige andere Annahmen aus RESCUE konnten ebenfalls nicht umgesetzt werden, z. B. Änderungen der verwendeten Materialien in Nichtwohngebäuden, Leichtbaumaterialien bei Verkehrsträgern und die Einführung treibhausgasemissionsfreier Produktions- und Kühlmittel.
- Annahmen zur Änderung der Wärmeversorgung konnten für die Industrie aber nicht für Gewerbe, Handel und Dienstleistungen übernommen werden.
- Annahmen, die in RESCUE hinsichtlich der Flächenauswahl getroffen wurde (z. B. PV-Anlagen auf Deponien oder entlang von Straßen) konnten nicht übernommen werden;

➔ Die Folge: Möglicherweise werden Umweltwirkungen, vor allem im Zieljahr 2050, etwas überschätzt. Die Validierung durch das Treibhauspotenzial (Kapitel 4.6) weist aber eine gute Übereinstimmung auf. Eine tiefergehende Analyse mit Hilfe des Brightway Frameworks (Kapitel 4.8) und ggf. eine erweiterte Anpassung der Datenbanken sollten Teil eines Folgeprojektes sein.

Außerdem ist generell zu beachten, dass die Datenqualität nicht in allen Technologiebereichen der ecoinvent-Datenbank und für jede Wirkungskategorie auf gleichem Niveau liegt. So ist etwa die Globalisierung und Regionalisierung der Daten, die von ecoinvent seit der Version 3.0 vorangetrieben wird, noch nicht für alle Technologien umgesetzt. So sind die Charakterisierungsfaktoren etwa für die Naturraumbeanspruchung oder für die Wasserknappheit (die in REFINE nicht untersucht wurde) noch nicht durchgehend regionalisiert.

Nicht ungewöhnlich, sondern im iterativen Vorgehen im Rahmen einer Ökobilanz (Kapitel 2.1) sogar angelegt, war es, dass in den ersten Ergebnissen Auffälligkeiten enthalten waren, die zu weiteren Anpassungen der Datenbank führten. Generell ist zu überlegen, welche Fragen in Zukunft vorrangig an die Transformationsszenarien gestellt werden sollen und welche Anpassungen dafür sinnvoll und notwendig sind. Dies wird im folgenden Kapitel 5 andiskutiert.

5 LCAst: Flexible Modellierung von Zukunftsszenarien

Generell bringt die Methode der prospektiven Ökobilanz neue Herausforderungen für Ökobilanzdatenbanken wie ecoinvent mit sich. Solche Datenbanken sind bis jetzt dazu ausgelegt, den Ist-Zustand der weltweiten technologischen und wirtschaftlichen Verknüpfungen abzubilden. Die Anpassungen im Rahmen von REFINE sind aber schon ein großer Schritt vorwärts, eine zukünftige globale Wirtschaftswelt zu modellieren. Im Rahmen der unter dem Titel ‚LCAst' im ifeu koordinierten Forschungsarbeiten zu prospektiven Ökobilanzen wird die Entwicklung der Methode weiter vorangetrieben.

Mit den neuen digitalen Werkzeugen (Kapitel 4.8) zur Veränderung und Auswertung der Datenbanken eröffnen sich weitere Möglichkeiten einen zukünftigen Zustand zu modellieren:

- Weitere technologische Parameter – etwa die fehlenden RESCUE-Annahmen oder ganz neue Technologieentwicklungen – können ergänzt werden. Vor einer Anpassung lässt sich durch Brightway und den Activity Browser mittlerweile schneller abschätzen, ob diese zu relevanten Änderungen der Ergebnisse führen werden.
- Durch die Nutzung von Brightway lassen sich bereits getroffene Annahmen einfach auf neue Datenbankversionen übertragen.
- Auch veränderte Handelsbeziehungen und regionale Produktionsmuster der Zukunft lassen sich in der Datenbank hinterlegen. Dort werden diese auch heute regelhaft über Marktmixe abgebildet und lassen sich verändern.
- Auch ist es denkbar, mögliche Veränderungen in der Verfügbarkeit von Ressourcen in die Parameter der Datenbank einfließen zu lassen, etwa dass
  - die Konkurrenz um Vorzugsflächen für die Erzeugung erneuerbarer Energien zu erhöhten Materialaufwendungen etwa für Anschlussleitungen und Fundamente führen,
  - die Ausbeutung von Erzlagerstätten weltweit zu einer Verschlechterung des Verhältnisses von werthaltigem Erz zu Abraum führen kann.
- Nicht zuletzt ist es auch denkbar, zukünftige Auswirkungen des Klimawandels auf die Wirtschaft in die Modelle und damit die Datenbank einfließen zu lassen, etwa
  - Niedrigstände in Flüssen, die die Aufwendungen für den Güterverkehr verändern, oder
  - erhöhte Reparaturaufwände für Gebäude, Bauten und Infrastrukturen in Folge von Extremwetterereignissen.

Bei all diesen Optionen steht und fällt die Qualität der Anpassungen natürlich auch mit der Qualität der Annahmen und bildet eben immer nur die Konsequenzen unter genau diesen Rahmenbedingungen ab.

Sensitivitätsrechnungen und Szenariofamilien

In der weiteren Entwicklung der Methode der prospektiven Ökobilanz sollte es auch darum gehen, einen Rahmen zu etablieren, in dem flexibel auf unterschiedliche Forschungsfragen eingegangen werden kann. Dazu können gehören:

- spezifische Fragstellungen zum Einfluss von Teilbereichen des Hintergrundsystems (Strommixe, Veränderung einzelner Prozessketten). Dies entspricht etwa Sensitivitätsrechnungen in klassischen Ökobilanzen,
- eine möglichst weitgehende Anpassung des Hintergrundsystems an ein spezifisches Szenario, etwa das RESCUE-Szenario GreenSupreme
- den Vergleich innerhalb einer Szenariofamilie (z. B. RESCUE) oder unterschiedlicher Szenarioansätze (z. B. RESCUE vs. Langfristszenarien). Diesen Ansatz unterstützt auch das Open-Source-Projekt PREMISE, das sich zum Ziel gesetzt hat, anhand von zentralen Transformationsparametern (Stromerzeugung, Zement- und Stahlproduktion, Güter- und Personenverkehr sowie Versorgung mit konventionellen und alternativen Kraftstoffen) schnell neue Szenariodatenbanken auf Basis von ecoinvent zu erstellen und in Ökobilanzprogrammen verfügbar zu machen (Sacchi et al. 2022; Steubing und de Koning 2021).

Ausblick: Referenzszenarien und -datenbanken

Als etwas fernerer Ausblick soll noch die Möglichkeit aufgezeigt werden, prospektive Ökobilanzen und Szenario-Datenbanken als ökobilanzielle und regulatorische Referenzen zu etablieren. Zum einen kranken Studien, die sich mit den Umweltwirkungen von Technologieentwicklungen beschäftigen, heute oft noch daran, dass der gewählte Modellierungsrahmen nur spezifisch für diese Studien gilt. Dies erschwert den Vergleich von Ergebnissen aus unterschiedlichen Forschungsprojekten. Ein standardisiertes Referenzszenario oder eine solche Szenariofamilie, etwa auf Basis der Langfristszenarien oder zukünftiger UBA-Szenarien, die mit einer öffentlichen Verfügbarkeit der zugehörigen Szenariodatenbanken verbunden ist, könnte dieses Problem lindern. Wenn Technologieentwicklungen möglichst immer auch mit dem Referenzszenario im Hintergrundsystem gerechnet würden, wäre eine Vergleichbarkeit gegeben.

Literaturverzeichnis

Bauer, C.; Poganietz, W.-R. (2007): Prospektive Lebenszyklusanalyse oder die Zukunft in der Ökobilanz. In: *TATuP-Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis*. Vol. 16, No. 3, S. 17–23.

Biemann, K.; Helms, H.; Münter, D.; Liebich, A.; Pelzeter, J.; Kämper, C. (2023): Analyse der Umweltbilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehr. *noch unveröffentlicht, voraussichtliche Veröffentlichung 2023*.

De Leeuw, F. A. A. M. (2002): A set of emission indicators for long-range transboundary air pollution. In: *Environmental Science & Policy*. Vol. 5, S. 135–145.

Dittrich, M.; Ewers, B.; Limberger, S.; Petri, F.; Vogt, R.; Doppelmayr, A.; Müller, J.; Loibl, A.; Marscheider-Weidemann, F.; Rostek, L.; Brauer, C.; Schoer, K.; Liebich, A.; Münter, D.; Rosental, M.; Fröhlich, T.; Ludmann, S. (2024a): REFINE (Rohstoffe): Betrachtung von Rohstoffaufwendungen und Umweltwirkungen für die Energiewende in einem ressourcenschonenden und treibhausgasneutralen Deutschland. Teilbericht Rohstoffe. *noch unveröffentlicht, voraussichtliche Veröffentlichung 2024*.

Dittrich, M.; Liebich, A.; Ewers, B.; Biemann, K.; Loibl, A.; Marscheider-Weidemann, F.; Müller, J.; Rostek, L.; Brauer, C.; Brunner, F.; Schoer, K. (2022): REFINE: Zwischenbericht zum AP3. *unveröffentlicht*.

Dittrich, M.; Liebich, A.; Müller, J.; Schoer, K.; Brischke, L.-A.; Limberger, S.; Ewers, B.; Doppelmayr, A.; Münter, D.; Leuser, L.; Keppner, B. (2024b): Die Grenzen des Konsums: Nachhaltiger Konsum unter der Berücksichtigung von Planetaren Grenzen und globalen Wachstumsdynamiken. Umweltbundesamt (UBA). *noch unveröffentlicht, voraussichtliche Veröffentlichung 2024*.

Dittrich, M.; Liebich, A.; Vogt, R.; Münter, D.; Wingenbach, C.; Ludmann, S.; Rosental, M.; Fröhlich, T.; Petri, F.; Ewers, B.; Doppelmayr, A.; Limberger, S.; Müller, J.; Loibl, A.; Marscheider-Weidemann, F.; Rostek, L.; Brauer, C.; Schoer, K. (2024c): REFINE (Umwelt): Betrachtung von Rohstoffaufwendungen und Umweltwirkungen für die Energiewende in einem ressourcenschonenden und treibhausgasneutralen Deutschland. Teilbericht Umweltwirkungen. *noch unveröffentlicht, voraussichtliche Veröffentlichung 2024*.

Ecoinvent (2022): ecoinvent v3.9. In: *ecoinvent*. https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/data-releases/ecoinvent-v3-9/. (16.10.2022).

Fehrenbach, H.; Grahl, B.; Giegrich, J.; Busch, M. (2015): Hemeroby as an impact category indicator for the integration of land use into life cycle (impact) assessment. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Springer. Vol. 20, No. 11, S. 1511–1527.

Giegrich, J.; Liebich, A.; Lauwigi, C.; Reinhardt, J. (2012): Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion. UBA Texte *Forschungsbericht*, Institut für Energie und Umweltforschung (ifeu), Dessau-

Roßlau. S. 248. *https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/indikatoren-kennzahlen-fuer-den-rohstoffverbrauch* (27.09.2023).

Goedkoop, M.; Heijungs, R.; Huijbregts, M.; De Schryver, A.; Struijs, J.; Van Zelm, R. (2009): ReCiPe 2008. In: *A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level*. Vol. 1, S. 1–126.

Hauschild, M. Z.; Wenzel, H. (1998): Scientific background. Environmental Assessment of products Chapman & Hall, London.

Heijungs, R.; Guinée, J. B.; Huppes, G.; Lankreijer, R. M.; de Haes, H. A. U.; Wegener Sleeswijk, A.; Ansems, A. M. M.; Eggels, P. G.; van Duin, R.; Goede, H. P. de (1992): Environmental Life Cycle Assessment of products. Guide and Backgrounds.

Hengstler, J.; Russ, M.; Stoffregen, A.; Hendrich, A.; Held, D. M.; Briem, A.-K. (2021): Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen. S. 392.

IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. S. 1535. *https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf* (27.09.2023).

ISO (2006a): International Standard ISO 14040: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework. International Standardisation Organisation, Geneva.

ISO (2006b): International Standard ISO 14044: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. International Standardisation Organisation, Geneva.

Liebich, A.; Fröhlich, T.; Münter, D.; Fehrenbach, H.; Giegrich, J.; Koeppen, S.; Dünnebeil, F.; Knoerr, W.; Biemann, K.; Simon, S.; Maier, S.; Albrecht, F.; Pregger, T.; Schillngs, C.; Moser, M.; Reißner, R.; Hosseiny, S.; Jungmaier, G.; Beermann, M.; Frieden, D.; Bird, N. (2020): Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien (SYSEET). TEXTE | 68/2020 *https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_2020_68_systemvergleich_speicherbarer_energietraeger_aus_erneuerbaren_energien.pdf* (06.04.2021).

Mutel, C. (2017): Brightway: An open source framework for Life Cycle Assessment. In: *Journal of Open Source Software*. Vol. 2, No. 12, S. 236. DOI: *10.21105/joss.00236*.

Pesonen, H.-L.; Ekvall, T.; Fleischer, G.; Huppes, G.; Jahn, C.; Klos, Z. S.; Rebitzer, G.; Sonnemann, G. W.; Tintinelli, A.; Weidema, B. P.; Wenzel, H. (2000): Framework for scenario development in LCA. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 5, No. 1, S. 21–30. DOI: *10.1007/BF02978555*.

Peverali, F.; Ullrich, A.; Bertheau, C.; Gronau, N. (2021): Betriebliche Umweltinformationssysteme. In: *ERP Management*. Vol. 17, S. 55–58.

Purr, K.; Günther, J.; Lehmann, H.; Nuss, P. (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität - RESCUE Studie. Climate Change Umweltbundesamt (UBA), Dessau. S. 444. *https://www.umweltbundesamt.de/rescue* (13.10.2020).

Sacchi, R.; Terlouw, T.; Siala, K.; Dirnaichner, A.; Bauer, C.; Cox, B.; Mutel, C.; Daioglou, V.; Luderer, G. (2022): PRospective EnvironMental Impact asSEment (premise): A streamlined approach to producing databases for prospective life cycle assessment using integrated assessment models. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 160, S. 112311. DOI: *10.1016/j.rser.2022.112311*.

Sensfuss, F.; Bernath, C.; Deac, G. (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3. Kurzbericht: 3 Hauptszenarien. S. 30.

Steubing, B.; de Koning, D. (2021): Making the use of scenarios in LCA easier: the superstructure approach. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 26, No. 11, S. 2248–2262. DOI: *10.1007/s11367-021-01974-2*.

Steubing, B.; de Koning, D.; Haas, A.; Mutel, C. L. (2020): The Activity Browser — An open source LCA software building on top of the brightway framework. In: *Software Impacts*. Vol. 3, S. 100012. DOI: *10.1016/j.simpa.2019.100012*.

Teske, S.; Giurco, D.; Morris, T.; Nagrath, K.; Mey, F.; Briggs, C.; Dominish, E.; Florin, N.; Watari, T.; Mclellan, B.; Pregger, T.; Naegler, T.; Simon, S.; Pagenkopf, J.; Van den Adel, B.; Deniz, Ö.; Schmid, S.; Meinshausen, M.; Dooley, K. (2019): Achieving the Paris Climate Agreement Goals.

UBA (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau. *https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/07_2014_climate_change_dt.pdf*.

Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E.; Weidema, B. (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 21, No. 9, S. 1218–1230.

WHO (2006): Health risk of particulate matter from long-range transboundary air pollution. World Health Organization (WHO).

WMO (2014): Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014. World Meteorological Organization (WMO), Geneva.