Projektbericht | Dezember 2024

Einflüsse von Hintergrundprozessen auf Ökobilanzen von Zukunftstechnologien

iNEW2.0 – Teilbericht 1
zu AP 9.2.1 (Ökobilanzierung)

Ole Zelt

Alexander Jülich

Peter Viebahn

Wuppertal Institut

Autoren:

Alexander Jülich, Ole Zelt, PD Dr. Peter Viebahn

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Döppersberg 19
42103 Wuppertal

www.wupperinst.org

Bitte de Bericht folgendermaßen zitieren:

Zelt, O.; Jülich, A.; Viebahn, P. (2024): Einflüsse von Hintergrundprozessen auf Ökobilanzen von Zukunftstechnologien. iNEW2.0: Teilbericht 1 des Wuppertal Instituts an das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Wuppertal.

Dieses Werk steht unter der Lizenz „Creative Commons Attribution 4.0 International“ (CC BY 4.0).
Der Lizenztext ist abrufbar unter: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Danksagung

Dieser Bericht ist innerhalb des Forschungsvorhabens **iNEW2.0 – Inkubator Nachhaltige Elektrochemische Wertschöpfungsketten** entstanden. Er wird ergänzt durch weitere publizierte Berichte. Die Autoren danken dem Fördermittelgeber und seinem Projektträger.

Disclaimer

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 03SF0627C durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren.

Projektlaufzeit: Juli 2021 – Juni 2024

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Impressum

Herausgeberin:
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Döppersberg 19
42103 Wuppertal
www.wupperinst.org

Ansprechperson:
PD Dr. Peter Viebahn (Leiter AP 9.2)
Abteilung Zukünftige Energie- und Industriesysteme
peter.viebahn@wupperinst.org
Tel. +49 202 2492-306
Fax +49 202 2492-108

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis **4**

Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen **5**

Tabellenverzeichnis **6**

1 Einleitung **7**

1.1 Prospektive Ökobilanzen zur Bewertung neuer innovativer Prozesse 7
1.2 Ursprüngliche Zielsetzung und vorgenommene Anpassung in iNEW2.0 8

2 Methodische Grundlagen der Ökobilanzierung **9**

2.1 Konventionelle Ökobilanz 9
2.2 Prospektive Ökobilanz 10

2.2.1 Herausforderungen bei der Durchführung prospektiver LCAs 10
2.2.2 Notwendigkeit einer modifizierten Hintergrund-Datenbank 11

3 Modelle und Tools zur Durchführung prospektiver Ökobilanzen **13**

3.1 Brightway 13
3.2 Premise 14

3.2.1 Überblick premise 14
3.2.2 Szenarien in premise 14

3.3 Limitationen und Hindernisse 15

4 Bedeutung prospektiver Ökobilanzen für iNEW2.0 **18**

4.1 Relevanz prospektiver LCA für iNEW2.0-Technologien 18
4.2 Effekte der Anpassung von Hintergrundsystemen anhand von Literaturbeispielen 19
4.3 Zusammenfassende Bedeutung für iNEW2.0 21

5 Anhang **23**

6 Literaturverzeichnis **24**

Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen

Abkürzungen

AP	Arbeitspaket
Äq.	Äquivalent
BECCS	Bioenergy and Carbon Capture and Storage
BMBF	Bundesministeriums für Bildung und Forschung
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CCS	Carbon Capture and Storage
DAC	Direct Air Capture
GWP	Global Warming Potential
IAM	Integrated Assessment Model
iNEW2.0	Inkubator Nachhaltige Elektrochemische Wertschöpfungsketten 2.0
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
NDC	Nationally Determined Contributions
NPi	No Policy
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
PkBudgt	Peak Budget
pLCA	Prospective Life Cycle Assessment
pLCI	Prospective Life Cycle Inventory
premise	PRospective EnvironMental Impact asSEssment
PSI	Paul-Scherrer-Institut
PtA	Power-to-Ammonia
PtM	Power-to-Methanol
PtX	Power-to-X
PV	Photovoltaik
RCP	Representative Concentration Pathway
SSP	Shared Socioeconomic Pathway
THG	Treibhausgas
TRL	Technology Readiness Level
UBA	Umweltbundesamt

Einheiten und Symbole

%	Prozent
° C	Grad Celsius
€	Euro
CH_4	Methan
CO_2	Kohlenstoffdioxid
g	Gramm
G	Strahlungsantrieb
Gt	Gigatonne
H_2	Wasserstoff
H_2O	Wasser
kg	Kilogramm
m^2	Quadratmeter
N_2	Stickstoff
NH_3	Ammoniak
t	Tonne
W	Watt

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Vor- und Nachteile des Brightway-Frameworks gegenüber klassischer LCA-Software ---------- 13

Tabelle 3-2: Wesentliche Merkmale der Szenarien in *premise* ---------- 15

Tabelle 5-1: Klassifizierung des Technology Readiness Level nach Viebahn et al. (2018) ------- 23

1 Einleitung

1.1 Prospektive Ökobilanzen zur Bewertung neuer innovativer Prozesse

Die ökologische Nachhaltigkeit von PtX-Wertschöpfungsketten besteht nicht a priori, sondern sollte für jede neue PtX-Technologie, an deren Ende synthetische Kraftstoffe und Chemikalien stehen, nachgewiesen werden. Obwohl auch konventionelle Herstellungsprozesse energieintensiv sind und auf nicht-erneuerbaren Ressourcen basieren, benötigen neuartige Industrieprozesse unter Verwendung von erneuerbar erzeugtem Strom und auf Basis von abgetrenntem CO_2 oft deutlich mehr Energie und nicht-energetische Ressourcen. Ein ökologischer Vergleich der gesamten Prozesskette (cradle-to-grave) der konventionellen und neuen Verfahren, der über eine einfache CO_2-Bilanz hinausgeht und viele andere Umweltwirkungen (z. B. Versauerung, Ressourcenverbrauch, Toxizität etc.) berücksichtigt, ist dabei zwingend erforderlich. Es ist daher von eminenter Bedeutung, dass Prozessentwickler*innen bereits frühzeitig Feedback über mögliche Restriktionen (z. B. Ressourcenengpässe kritischer Materialien, Hotspots bzgl. Energie- und Materialverbrauch bzw. Emissionen) erhalten, um noch während der Prozessentwicklung Alternativen entwickeln zu können. Eine zentrale methodische Herausforderung bei der Bewertung neuer, innovativer Prozesse und Anlagen ist es, zukünftige Veränderungen in der Energie- und Materialbereitstellung von vornherein zu berücksichtigen. Dies spielt insbesondere für solche Prozesse eine Rolle, die erst mittelfristig marktreif werden – also auch für die in iNEW2.0 untersuchten neuen elektrochemischen Prozesse.

Bei der Ökobilanzierung von Technologien und Prozessen werden zukünftige Veränderungen („Prospektiv“) in der Regel jedoch nur durch die Veränderung von sogenannten „Vordergrundprozessen“ berücksichtigt. Dies können z. B. höhere Wirkungsgrade, vermehrter Einsatz von Sekundärmaterialien oder ein angenommener Brennstoffwechsel sein. Im Gegensatz dazu wird in der klassischen Ökobilanz der Veränderung von „Hintergrundprozessen“ deutlich weniger Beachtung geschenkt und auf statische Inventar-Datenbanken zurückgegriffen. Diese bilden jedoch nur den heutigen Stand der Technik bzw. einen deutlich veralteten Stand ab, der lediglich extrapoliert wurde. Dies hat zur Folge, dass auch auf erneuerbaren Energien basierende Prozesse wie die Stromerzeugung aus PV oder Windenergie oder die Elektromobilität noch nennenswerte THG-Emissionen aufweisen können. Diese stammen jedoch nicht aus dem Vordergrundprozess, sondern basieren darauf, dass für die Produktion von Anlagen oder Infrastrukturen je nach Wirtschaftssystem noch mehr oder weniger fossile Energien eingesetzt werden (so ist beispielsweise der Strommix in China oder Indien aufgrund der großen Anzahl von Kohlekraftwerken noch sehr CO_2-intensiv (Ember, 2024)).

Für die Transformation hin zu klimaneutralen Wirtschaftssystemen bis zum Jahr 2045/2050 muss jedoch auch dieses Hintergrundsystem klimaneutral werden – für eine adäquate Abbildung in Ökobilanzen bedeutet dies, dass auch die Grundstoffe und andere Vorprozesse für das eigentliche Vordergrundsystem klimaneutral sein und entsprechend angepasst werden müssen. Dies betrifft z. B. den Einsatz von grünem Stahl und anderen Metallen als Ausgangsstoff für Materialien oder von grünem Zement in Gebäuden, ergänzt um die Veränderung des Strommixes. Bisher existieren jedoch nur wenige LCAs, in denen auch die Hintergrundprozesse (systematisch) fortgeschrieben

werden. Um abschätzen zu können, welche Klima- und Ressourcenwirkungen neue Technologien und Prozesse haben, müssen auch diese Hintergrundprozesse in die Zukunft fortgeschrieben werden (Beltran et al., 2018; Steubing et al., 2023)

1.2 Ursprüngliche Zielsetzung und vorgenommene Anpassung in iNEW2.0

Im Mittelpunkt der ökologischen Analyse in AP 9.2 sollten vor diesem Hintergrund exemplarisch zwei PtX-Technologien stehen, die in iNEW2.0 (weiter)entwickelt werden:

- **Power-to-Ammonia** (Nieder- und Hochtemperatur-N_2-Elektrolyse, AP 7) und
- **Power-to-Methanol** (Nieder- und Hochtemperatur-Methanol-Elektrosynthese, AP 4)

Da es sich bei den dafür in Betracht kommenden Prozessen um innovative Verfahren auf Basis neuartiger Materialien (z. B. für Elektrolyte, Katalysatoren, Interkonnektoren) und Systemarchitekturen handelt, war geplant, dass AP 9.2 als Ergänzung zu AP 9.1 methodische Elemente der prospektiven Ökobilanz und der Energiesystemanalyse einsetzt. Um Entwicklungsrisiken zu senken und die grundlegende Forschung auf aussichtsreiche Optionen zu konzentrieren, war die Zielsetzung, zukünftige Veränderungen in der Energie- und Materialbereitstellung von vornherein in der LCA zu inkludieren und weitergehende Aussagen insbesondere zum Ressourceneinsatz frühzeitig mit den technischen Entwickler*innen rückzukoppeln, so dass ggf. alternative Prozesse gewählt werden können.

Aufgrund des geringen Reifegrades der in iNEW2.0 untersuchten Technologien wurde von den ursprünglich geplanten prospektiven Ökobilanzen mit Fortschreibung auf 2045/2050 abgesehen, da die eigentlichen Produkt-Ökobilanzen des Vordergrundsystems nicht belastbar wären bzw. die Datenlage nicht für die Durchführung einer LCA ausreichen. Einerseits konnten von den technischen Entwickler*innen zum jetzigen Zeitpunkt noch keine Aussagen über den Material- und Energieverbrauch der iNEW2.0-Technologien in zukünftigen großskaligen und kommerziell einsetzbaren Systemen getroffen werden. Andererseits hätte dies angesichts der unsicheren Datenbasis zu den aktuellen Systemen die Unsicherheit der Ergebnisse weiter verstärkt. Dementsprechend wurde auch die Erstellung dynamischer Hintergrund-Ökobilanzen für die iNEW2.0-Technologien als nicht zielführend angenommen.

Stattdessen wird in diesem Bericht einerseits allgemein aufgezeigt, wie zukünftige Veränderungen von Hintergrundprozessen in Ökobilanzen integriert werden können und welche Berechnungswerkzeuge hierfür bereits existieren. Andererseits werden anhand von qualitativen Literaturbeispielen Analysen durchgeführt, um den Einfluss zukünftiger Hintergrundsysteme (z. B. erneuerbarer Strom oder grüne Rohstoffe wie Stahl oder Zement) auf die gesamte Ökobilanz zu diskutieren.

2 Methodische Grundlagen der Ökobilanzierung

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Unterschiede zwischen konventionellen und prospektiven Ökobilanzen aufgezeigt. Zunächst wird die allgemeine Methodik der konventionellen Ökobilanz dargestellt. Darauf aufbauend werden die prospektive Ökobilanz und ihre Besonderheiten definiert. Anschließend werden Werkzeuge zur systematischen Durchführung von prospektiven Ökobilanzen vorgestellt und die Herausforderungen und Grenzen einer prospektiven Ökobilanz diskutiert.

2.1 Konventionelle Ökobilanz

Die klassische Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA) ist eine in den ISO-Normen 14040 (DIN, 2021a) und 14044 (DIN, 2021b) standardisierte Methodik zur Bewertung der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems oder einer Dienstleistung über den gesamten Lebenszyklus auf der Basis von Input- und Outputströmen. Die Bewertung umfasst in der Regel alle Lebenszyklusschritte von der Rohstoffgewinnung über die Herstellung, Fertigung und Nutzung bis hin zur Entsorgung. Das zu untersuchende Produktsystem besteht aus mehreren Prozessmodulen, die die kleinste Einheit des Systems bilden und miteinander über Energie- und Stoffströme sowie Zwischenprodukte (Technosphäre) oder über Elementarflüsse (Biosphäre) mit der Umwelt verbunden sind. Das Produktsystem kann dabei in ein **Vordergrund-** und in ein **Hintergrundsystem** unterteilt werden. Das Vordergrundsystem umfasst alle Prozesse, die direkt beeinflussbar sind und eigenständig modelliert werden. Das Hintergrundsystem hingegen umfasst alle anderen Prozesse, die nicht direkt beeinflusst werden können und in der Regel mit Hilfe von Inventar-Datenbanken dargestellt werden (Jülich & Zelt, 2022). Solche Inventar-Datenbanken (engl.: Life Cycle Inventory (LCI) sind lizenzpflichtig und enthalten mehrere Tausend Prozesse. Im (deutschen) Markt sind Vorallem die Datenbanken *ecoinvent* (Wernet et al., 2016) und *GaBi* (Sphera, 2021) etabliert.

Unabhängig von der gewählten Systemgrenze und dem zu untersuchenden Produktsystem durchläuft aber jede Ökobilanz vier Phasen:

1| Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen
2| Erstellung der Sachbilanz (Life Cycle Inventory, LCI)
3| Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)
4| Auswertung und Interpretation

Die einzelnen Schritte werden dabei iterativ durchgeführt, so dass mit jeder Iteration die Zielsetzung und der Untersuchungsrahmen gegebenenfalls verfeinert und angepasst werden können. Dadurch gewinnt die Ökobilanz an Konsistenz und Robustheit und führt zu aussagekräftigen Ergebnissen. Auf eine detaillierte Beschreibung der Methodik wird an dieser Stelle mit Verweis auf die ISO-Normen verzichtet. Ein allgemeingültiger Ansatz zur Durchführung einer prospektiven Ökobilanz existiert in der wissenschaftlichen Literatur dagegen (noch) nicht. Bereits bei der Begriffsbestimmung teilt sich die Literatur beispielsweise bereits in drei Richtungen auf. So werden Ökobilanzen mit Zukunftsbezug als „prospective“, „ex-ante“ oder „anticipatory" bezeichnet (Cucurachi et al., 2018). Das ifeu – als eines der führenden deutschen Institute im Bereich der Ökobilanzierung – nennt ihre Arbeiten dazu beispielsweise

„LCAst“, eine Zusammensetzung aus LCA und „Cast“ (engl.: Vorhersage) und hat im Zuge mehrere Projekte ein Methodenpapier veröffentlicht (Liebich et al., 2023).

Für die ganzheitliche Bewertung von Technologien, die sich heute noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden, ist es daher nicht zielführend, LCAs durchzuführen, deren Grundlage Datenbanken mit “nur” aktuellem Datenbestand bilden. Vielmehr sollten diese Technologien zum Zeitpunkt ihrer großskaligen kommerziellen Verfügbarkeit bewertet werden, etwa 2040 oder 2050. Zu diesen Zeitpunkten ist es jedoch entscheidend, dass auch die Hintergrundprozesse an diesen Zeitraum angepasst werden.

2.2 Prospektive Ökobilanz

In diesem Kapitel wird die Definition der prospektiven Ökobilanz (kurz: pLCA) näher erläutert, da sie die Zielsetzung einer zukunftsorientierten Ökobilanz am besten widerspiegelt. Nach Arvidsson et al. (2017) beschreibt eine pLCA die Bewertung einer Technologie, die sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium befindet, jedoch für eine zukünftige, weiterentwickelte Phase – etwa in großskaliger Produktion – modelliert wird. Rotolo et al. (2015) definieren solche Technologien als „schnell wachsende und neuartige Technologien“. Eine Ökobilanz kann daher als prospektiv angesehen werden, wenn folgende Aspekte erfüllt sind: Sie bewertet eine Technologie oder ein Produktsystem zu einem projizierten zukünftigen Zeitpunkt und berücksichtigt dabei einen fortgeschrittenen Entwicklungsstand, etwa anhand des Technology Readiness Levels (TRL). Eine vergleichende Ökobilanz ist dann prospektiv, wenn neue Technologien auf ein hohes TRL skaliert werden und alle zu vergleichenden Technologien in derselben zukünftigen Phase modelliert sind (Thonemann et al., 2020).

Um den Entwicklungsstand der betrachteten Technologie präzise bewerten zu können, wird das TRL-Konzept herangezogen (Arvidsson et al., 2017; Gavankar et al., 2014; Thonemann et al., 2020). Eine beispielhafte TRL-Skala ist im Anhang in Tabelle 5-1 zu finden. Cucurachi et al. (2018) heben zudem hervor, dass neue Technologien für aussagekräftige Vergleiche nur mit skalierten Systemen auf einem vergleichbaren TRL verglichen werden sollten.

2.2.1 Herausforderungen bei der Durchführung prospektiver LCAs

Die Modellierung komplexer Systeme (z. B. Energie- und Industriesysteme), wie sie für prospektive Ökobilanzen erforderlich ist, stellt eine große Herausforderung für die Durchführung von pLCA dar. Um die Komplexität zu reduzieren, werden häufig vereinfachende Annahmen getroffen, die jedoch zur Vernachlässigung wichtiger Wechselwirkungen führen können. Darüber hinaus ist die Auswahl geeigneter Zukunftsszenarien von entscheidender Bedeutung für die Aussagekraft der Ergebnisse. Es ist daher abzuwägen, welche Szenarien realistisch sind und welche die relevanten Entwicklungen am besten abbilden. Insbesondere die Wahl des zeitlichen Horizonts der Analyse hat großen Einfluss auf die Ergebnisse (Bryant et al., 2024; Thonemann et al., 2020). Je weiter in die Zukunft projiziert wird, desto größer sind in der Regel die Unsicherheiten – allerdings damit auch die zu erwartenden Veränderungen des Systems (Cucurachi et al., 2018). Auch geographische Unterschiede können zu spezifischen Herausforderungen führen, da an unterschiedlichen Orten verschiedene Rahmenbedingungen herrschen können. Diese methodischen Herausforderungen sind jedoch

nicht die einzigen, die es zu beachten gilt. Bei der Durchführung einer prospektiven Ökobilanz können nach wissenschaftlichem Konsens drei Herausforderungen auftreten, denen besondere Aufmerksamkeit zu schenken ist (Hetherington et al., 2013; Thonemann et al., 2020):

Datenverfügbarkeit

Ein zentrales Problem bei der Erstellung prospektiver Ökobilanzen ist die begrenzte Datenverfügbarkeit und -qualität. Für noch nichtexistierende Technologien oder Prozesse fehlen oft detaillierte Informationen zu Energieverbrauch, Materialeinsatz oder Emissionen. Zudem sind die Rahmenbedingungen wie politische Entscheidungen, technologischer Fortschritt oder gesellschaftlicher Wandel ständigen Veränderungen unterworfen, was valide Abschätzungen zusätzlich erschwert.

Unsicherheiten in den Annahmen

Die Erstellung von prospektiven Ökobilanzen erfordert zahlreiche Annahmen über zukünftige Entwicklungen. Diese Annahmen sind jedoch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet – insbesondere je niedriger der TRL einer Technologie ist. So ist es beispielsweise schwierig, den genauen Verlauf des technologischen Fortschritts oder die zukünftige Entwicklung benötigter Infrastruktur vorherzusagen. Auch sozioökonomische Veränderungen wie steigender Wohlstand oder veränderte Konsumgewohnheiten können die Ergebnisse einer Ökobilanz stark beeinflussen. Ebenso weist die Interpretation der Ökobilanzergebnisse aufgrund der vielen Unsicherheiten oft eine große Bandbreite auf. Dies erschwert die Interpretation und die Ableitung eindeutiger Handlungsempfehlungen. Zudem ist die Vergleichbarkeit von prospektiven Ökobilanzen mit konventionellen Ökobilanzen oft schwierig, da sich die zugrunde liegenden Annahmen und Daten deutlich unterscheiden können.

Skalierung von Technologien

Die Skalierung von Technologien stellt eine besondere Herausforderung für prospektive Ökobilanzen dar. Wenn eine Technologie im kleinen Maßstab entwickelt und getestet wird, können die Ergebnisse der Ökobilanz sehr positiv erscheinen. Bei einer großflächigen Anwendung können jedoch ganz andere Effekte auftreten, die in kleineren Maßstäben noch keine Rolle spielen.

2.2.2 Notwendigkeit einer modifizierten Hintergrund-Datenbank

Während das zu untersuchende Vordergrundsystem für die Zukunft in der Regel nach bestimmten Lernkurven und Skalierungseffekten modelliert wird, greift das Hintergrundsystem auf Inventar-Datenbanken wie *ecoinvent* zurück und wird nicht selbst modelliert. Diese Datenbanken können zwar den heutigen Stand der Technik abbilden, der Regelfall ist jedoch, dass der Stand der Technik von vor fünf bis zehn Jahren abgebildet und für den heutigen Zeitpunkt extrapoliert wird. Allerdings können sie keine Abbildung eines zukünftigen Energie- oder Industriesystem liefern. Diese Tatsache ist insbesondere zu berücksichtigen, da sich die zukünftigen Energie- oder Industriesysteme durch ambitionierte Klimaziele sehr deutlich von den heutigen Systemen unterscheiden dürften – sowohl in Hinsicht auf die verwendeten Technologien selbst als auch auf die damit verbundenen Umweltwirkungen. Das in einer Ökobilanzierung von Zukunftstechnologien verwendete Hintergrundsystem sollte daher ein

möglichst adäquates Abbild der Zukunft darstellen. Ein Vergleich von neuen und etablierten Technologien findet so auf fairer Basis statt und trägt zu einem besseren Verständnis der Umweltwirkungen in der Zukunft bei (Arvidsson et al., 2017; Moni et al., 2019).

Für die Durchführung prospektiver Ökobilanzen ist es folglich von maßgeblicher Bedeutung, das **Hintergrundsystem** dem **Vordergrundsystem** zeitlich anzupassen. Gerade für Technologien, die sich noch in der Entwicklung befinden – wie etwa die iNEW2.0 (PtX)-Technologien – können die Upstream-Prozesse des Hintergrundsystems große Auswirkungen auf die Ergebnisse der Ökobilanz haben (Beltran et al., 2018; Steubing et al., 2023; Thonemann et al., 2020). Da die Transformation der Strom-, Wärme-, Verkehrs- und Industriesektoren hin zur Treibhausgas-Neutralität zum großen Teil auf der Umstellung zu Stromanwendungen basiert, spielt insbesondere der Elektrizitätssektor hierbei eine entscheidende Rolle und sollte für den betrachteten Zeitpunkt in der Zukunft repräsentativ abgebildet werden (Beltran et al., 2018). Durch Nutzung von Langfristszenarien, beispielsweise aus integrierten Bewertungsmodellen (Integrated Assessment Model, IAM), können Hintergrundsysteme systematisch modifiziert und entsprechend dieser Szenarien angepasst werden. Die Anpassung erfolgt dann anhand von Trajektorien der IAMs, die gesellschaftliche, historische, wirtschaftliche, ökologische und technologische Entwicklungsverläufe auf die Datenbank projizieren.

Die Durchführung konventioneller Ökobilanzen erfolgt jedoch in der Regel in etablierten Software-Tools, wie *Umberto*, *SimaPro* oder *OpenLCA*. Allerdings konzentrieren sich diese auf das Vordergrundsystem, während sie für das Hintergrundsystem auf statische Inventar-Datenbanken zurückgreifen. Eine vollständige Anpassung dieser Datenbank an zukünftige Entwicklungen dagegen ist im Allgemeinen nicht Gegenstand dieser Programme und nur mit erheblichen Aufwand und Ressourcenaufwand verbunden. In den vergangenen Jahren hat sich mit *Brightway* ein Open-Source-Framework etabliert, dass es ermöglicht auch diese Änderungen innerhalb der gleichen Softwarestruktur vorzunehmen (Liebich et al., 2023). Möglich macht diese die direkte Schnittstelle zu Python als Programmier-Umgebung und eine stetig wachsende Community, die viele Innovationen und dynamische Modifikationen verbindet. Auf dieser Grundlage wurde vom Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK) und vom Paul-Scherrer-Institut (PSI) das Open-Source-Tool *premise* entwickelt, das verschiedene Sektoren der *ecoinvent*-Datenbank anpasst (Sacchi et al., 2022) und so die systematische Modifikation von Hintergrundsystemen zulässt.

3 Modelle und Tools zur Durchführung prospektiver Ökobilanzen

Das folgende Kapitel gibt eine Übersicht über potentielle Modelle und Tools, die zur Durchführung einer prospektiven LCA verwendet werden können. Zunächst wird das Open-Source-Framework *Brightway* vorgestellt – und welche Rolle hierbei dem Add-on *premise* zukommt. Ergänzend werden Limitationen dargestellt, die sich aus der Nutzung dieses Frameworks ergeben.

3.1 Brightway

Brightway ist ein auf Python basierendes Open-Source-Framework, das eine hohe Flexibilität bei der Modellierung von Ökobilanzen bietet (Mutel, 2017). Im Vergleich zu klassischen Ökobilanzprogrammen wie *OpenLCA*, *Umberto* oder *Simapro*, bei denen die Modellierung eher starr und datengetrieben erfolgt, bietet *Brightway* durch seine Programmierbarkeit und die Integration mit verschiedenen Datenquellen und Modellen deutlich mehr Freiheiten. Das Tool wird hauptsächlich in Python-Entwicklungsumgebungen wie *Jupyter Notebooks* oder *Spyder* eingesetzt, kann aber auch mit dem Activity-Browser, einer grafischen Benutzeroberfläche, verwendet werden (Steubing et al., 2020). Der Activity-Browser ermöglicht die visuelle Erstellung und Bearbeitung von Modellen, während die Entwicklungsumgebung volle Flexibilität bei der Programmierung bietet. Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über zentrale Vor- und Nachteile, die sich aus der Nutzung des Brightway-Frameworks gegenüber klassischer Ökobilanz-Software ergeben.

Tabelle 3-1: Vor- und Nachteile des Brightway-Frameworks gegenüber klassischer LCA-Software

Vorteile	Nachteile
Kostenlos (nur Lizenzen für Datenbanken)	Programmierkenntnisse erforderlich
Brightway baut direkt auf Python-Code auf: ▪ Ansatz bietet großes Potential zur Implementation von Zukunftsszenarien ▪ Viele Innovationen und dynamische Entwicklungen möglich	Fehleranfällig da: ▪ Nicht direkt ersichtlich, ob Code fehlerhaft oder falsch ▪ Nach Updates können Fehler auftreten, die erst später erkannt werden und verzögert behoben werden ▪ Es passiert schnell, dass man Prozesse ändert ohne es zu merken (keine Warnsymbole oder ähnliches)
Systematische Modifizierung von Hintergrunddatenbanken über Code möglich und individuell anpassbar	Teilweise ist gleichzeitig das Arbeiten in Entwicklungsumgebung, Activity-Browser und Excel notwendig.
Möglichkeit viele Prozesse auf einmal zu ändern, ohne es für jeden einzelnen Prozess machen zu müssen	Activity-Browser bietet nur eingeschränkte Auswertungsmöglichkeiten und keinen graphischen Überblick über Produktsystem
Möglichkeit sich individuelle Auswertungen zu erstellen, der auf spezifische Bedürfnisse zugeschnitten ist	Kein out-of-the-Box Code
Austausch von Datensätzen einfach und unkompliziert	Dokumentation teilweise veraltet oder nicht nachvollziehbar

Ein großer Vorteil von Brightway ist die Fähigkeit, verschiedene Inventar-Datenbanken und Produktsysteme einfach zu importieren und zu exportieren. So können beispielsweise Daten aus *ecoinvent*, einer der umfassendsten und am weitesten verbreiteten Ökobilanzdatenbanken, problemlos integriert werden. Diese Flexibilität ist besonders wichtig für die Erstellung von prospektiven Ökobilanzen, da sie die Integration von Zukunftsszenarien und neuen Technologien ermöglicht. Ein weiterer Vorteil

von Brightway ist, dass es kostenlos und als Open-Source-Framework individuell an die jeweiligen Bedürfnisse einer LCA angepasst werden kann. Während der Zugang zu Datenbanken wie *ecoinvent* zwar lizenzpflichtig ist, bleibt die Software selbst frei verfügbar. Allerdings erfordert die Nutzung des Tools Programmierkenntnisse und ein gewisses Maß an technischem Verständnis, um Fehler zu vermeiden und die Modelle korrekt zu erstellen. Zudem bietet die Benutzeroberfläche des Activity-Browsers im Gegensatz zu etablierter LCA-Software nur eingeschränkte Auswertungsmöglichkeiten und die Dokumentation ist teilweise unvollständig oder veraltet.

3.2 Premise

3.2.1 Überblick premise

Premise (PRospective EnvironMental Impact asSEssment) ist ein Add-On innerhalb des Brightway-Frameworks, das speziell auf die Integration von Zukunftsszenarien ausgerichtet ist (Sacchi et al., 2022). Es ermöglicht die systematische Modifikation der *ecoinvent*-Datenbank mit Hilfe von IAMs, die zur Projektion zukünftiger Entwicklungen und Politikszenarien verwendet werden. Die primäre Anwendung von *premise* liegt daher in der Generierung von prospektiven Inventar-Datenbanksätzen (bzw. Hintergrundsystemen) basierend auf der *ecoinvent*-Datenbank. Bisher können die Nutzer*innen auf die IAMs *REMIND*, *IMAGE* und *TIAM* zurückgreifen, die jeweils unterschiedliche sozioökonomische Entwicklungspfade (Shared Socioeconomic Pathways; SSP) und Klimaszenarien (Representative Concentration Pathways; RCP) berücksichtigen, um zukünftige Entwicklungen in Sektoren wie Stromerzeugung, Stahlproduktion oder Verkehr zu simulieren. Durch die Anwendung dieser Szenarien auf die *ecoinvent*-Datenbank können verschiedene Inventar-Datenbanksätze generiert werden, die die spezifischen Entwicklungen der Szenarien widerspiegeln. Darüber hinaus ist es aber auch möglich, eigene Szenarien über eine Schnittstelle zu integrieren und so eigene Datenbanken mit anwendungsspezifischen Anpassungen zu erstellen (Boyce et al., 2024; Harpprecht et al., 2021; Van Der Meide et al., 2022). Boyce et al. (2024) stellen z. B. eigene Szenarien für den globalen Ammoniakmarkt auf – aufgrund der Relevanz für die iNEW2.0-Technologie für Ammoniak wird die Studie daher auch in Kapitel 4 aufgegriffen und näher beschrieben.

Ein wesentliches Merkmal von *premise* ist zudem die Möglichkeit der zusätzlichen Integration von Inventaren für Zukunftstechnologien wie Wasserstoff, Carbon Capture and Storage (CCS) oder Direct Air Capture (DAC) in die bestehenden Inventar-Datenbanken. Dies ermöglicht die Modellierung von Ökobilanzen, die den technologischen Fortschritt und die politischen Ziele berücksichtigen, um Szenarien für die Zukunft zu entwickeln. So können beispielsweise ganze Wirtschaftszweige von fossilen auf grüne Produktionsprozesse umgestellt werden – und das systematisch und ganzheitlich über alle Prozesse innerhalb der Datenbank.

3.2.2 Szenarien in premise

Szenarien – beispielsweise Klimaschutz- oder Transformationsszenarien – bilden die Basis für die systematische Anpassung von Hintergrundsystemen in *premise*. Die in *premise* zur Verfügung stehenden IAM-Szenarien bauen auf SSPs auf, die gesellschaftliche, demographische und ökonomische Veränderungen auf globaler Ebene abbilden (Riahi et al., 2017). *Premise* bezieht sich jedoch überwiegend auf den SSP2-Pfad, der

ein „Middle-of-the-Road"-Szenario darstellt und historische Entwicklungsmuster im 21. Jahrhundert fortsetzt – es stehen aber auch weitere SSP je nach IAM zur Verfügung. Ein *premise*-Szenario besteht weiterhin aus der Kombination eines SSP mit einem wählbaren RCP, der den Verlauf der absoluten Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre beschreibt und einen bestimmten globalen Strahlungsantrieb *G* in W/m² bis zum Jahr 2100 wieder gibt (IPCC, 2014). Unterscheiden lassen sich die RCP im Allgemeinen durch Politikszenarien, die von ambitionierten Klimaschutzplänen geprägt sind, bis hin zu Szenarien, die die Vernachlässigung dieser annehmen. Die Modellierung der SSP, der Aufbau der IAM sowie verschiedene Kombinationsmöglichkeiten von SSP und RCP (Rogelj et al., 2018) sind bereits in der Literatur ausführlich dokumentiert (z. B. in O'Neill et al. (2017), Stehfest (2014) und Steubing & Koning (2021)). Eine Beschreibung der verschiedenen premise-Szenarien mit ihren Besonderheiten kann zudem mit Hilfe eines Szenario-Explorers (aufrufbar unter: https://premisedash-6f5a0259c487.herokuapp.com/) erkundet werden. Tabelle 3-2 zeigt die wesentlichen Merkmale der zur Verfügung stehenden *premise*-Szenarien:

Tabelle 3-2: Wesentliche Merkmale der Szenarien in *premise*

SSP[a]	RCP	IAM	Bedeutung
SSP1, SSp2, SSP5	Base	IMAGE, TIAM, REMIND	Szenario, in dem die Emissionen weiterhin mit der gleichen Rate wie in der Vergangenheit steigen
SSP1, SSP2, SSP5	RCP	IMAGE, TIAM	Strenges Klimaschutzszenario mit dem Ziel, die globale Erwärmung auf 1,5°C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, mit einem Strahlungsantrieb von 1,9 W/m^2 bis 2100.
SSP1, SSP2, SSP5	NDC	REMIND	National festgelegte Beiträge (Nationally Determined Contributions; NDC), bei denen die einzelnen Länder im Einklang mit dem Pariser Abkommen Emissionsreduktionsziele festlegen, um die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C zu begrenzen.
SSP1, SSP2, SSP5	NPi	REMIND	Szenario „Keine Politik": Darstellung der künftigen Emissionen, wenn keine klimapolitischen Maßnahmen oder Maßnahmen zur Abschwächung des Klimawandels durchgeführt würden, die über die heute bestehenden hinausgehen.
SSP1, SSP2, SSP5	PkBudg	REMIND	Szenario in dem die kumulativen Emissionen auf ein festgelegtes Budget (Peak Budget in Gt CO_2) begrenzt werden

[a] SSP1 steht nur in IMAGE und REMIND zur Verfügung; SSP5 steht nur in REMIND zur Verfügung
SSP = Shared Socioeconomic Pathway
RCP = Representative Concentration Pathway

Im deutschen Kontext könnten, wie in Liebich et al. (2023) dargestellt, beispielweise auch die RESCUE-Szenarien des UBA (Purr et al., 2019) oder die BMWK Langfristszenarien (Fraunhofer ISI & Consentec GmbH, 2021) genutzt werden, um die deutschen Klimaneutralitätsziele bzw. nationale Entwicklungen in *ecoinvent* als prospektive Datenbanksätze abzubilden.

3.3 Limitationen und Hindernisse

Brightway bietet eine flexible und leistungsstarke Plattform zur Modellierung von Ökobilanzen, allerdings gibt auch spezifische Limitationen und Hindernisse, die sowohl *Brightway* selbst als auch das Add-on *premise* betreffen. Diese Einschränkungen sollten bei der Verwendung des Frameworks berücksichtigt werden, insbesondere,

um die Wechselwirkungen besser verstehen zu können und die Aussagekraft der Ergebnisse zu erhöhen.

Eine der zentralen Herausforderungen von Brightway besteht in der steilen „Lernkurve“, da die Anwendung fundierte Kenntnisse in Python und in den Grundlagen der LCA erfordert, während die fehlende grafische Benutzeroberfläche insbesondere für Einsteiger eine Hürde darstellen kann. Darüber hinaus ist die Dokumentation zwar umfangreich, jedoch teilweise fragmentiert, was ein hohes Maß an Eigeninitiative voraussetzt, um spezifische Anwendungsfälle zu verstehen. Der Support basiert hauptsächlich auf Community-Aktivitäten, was dazu führen kann, dass Probleme nicht immer zeitnah gelöst werden. Hinzu kommt, dass die Verarbeitung großer Datenbanken oder komplexer Modellierungen erhebliche Rechenleistung erfordert, was insbesondere für die gleichzeitige und vergleichende Betrachtung mehrere Produktsysteme eine Herausforderung darstellen kann. Ein weiteres Problem besteht in den eingeschränkten Auswertungsmöglichkeiten des Activity-Browsers, der nur begrenzte Optionen zur detaillierten Analyse einzelner Lebenszyklusphasen bietet. Dies kann insbesondere bei differenzierten Betrachtungen, wie etwa einer Hot-Spot-Analyse, hinderlich sein.

Mit der Anwendung von *premise* sind ebenfalls spezifische Einschränkungen verbunden. Ein wichtiger Aspekt ist hier die Abhängigkeit von bestehenden Hintergrunddatenbanken wie ecoinvent, denn die Qualität und Vollständigkeit der Ausgangsdaten beeinflusst direkt die Ergebnisse der prospektiven Szenarien. Zudem können regionale Unterschiede und fehlende Datensätze zu Unsicherheiten führen, die die Analyse erschweren. Zusätzlich sind die Annahmen der IAM-Szenarien nicht immer flexibel anpassbar bzw. nicht passgenau für das untersuchte Vordergrundsystem, was LCA-Ergebnisse verfälschen kann – beispielsweise, wenn sich Annahmen in den IAM-Szenarien mit dem modellierten Vordergrundsystem widersprechen. Zwar ist dies in *premise* theoretisch anpassbar, doch die Modifikation der Szenarien und Modelle erfordert erheblichen Aufwand, insbesondere für Nutzer ohne tiefgehende Kenntnisse in den zugrunde liegenden Modellen. Eine weitere Herausforderung liegt im Umgang mit Unsicherheitsparametern. Bei Modifikationen der Datenbank gehen diese teilweise verloren, was Monte-Carlo-Simulationen verhindert und die Quantifizierung von Unsicherheiten erschwert (Cucurachi et al., 2021; Sacchi et al., 2022). Dies hat zur Folge, dass eine umfassende Unsicherheitsanalyse oft nicht möglich ist.

Auch die Grenzen der in *premise* verwendeten IAMs stellen eine erhebliche Einschränkung dar. Diese Modelle haben oft eine geringe räumliche Auflösung. Beispielsweise repräsentiert REMIND nur 13 Regionen und IMAGE nur 22 Regionen weltweit (Steubing et al., 2023), was detaillierte regionale Differenzierungen erschwert. Zudem sind einige Sektoren, wie die Stahlproduktion, nur rudimentär modelliert oder Daten zu innovativen Technologien fehlen (Jülich & Zelt, 2022). Die Erstellung prospektiver Datenbanken birgt außerdem inhärente Unsicherheiten, da sie stark von Annahmen über zukünftige Entwicklungen abhängt. Diese Unsicherheiten müssen bei der Interpretation der Ergebnisse stets berücksichtigt werden (Cucurachi et al., 2021).

Trotz dieser Limitationen und Herausforderungen bietet die Nutzung von *Brightway* und *premise* vielseitige Möglichkeiten zur Durchführung anspruchsvoller LCA-Analysen – insbesondere für prospektive Ökobilanzen. Es ist jedoch essenziell, sich der bestehenden Limitationen bewusst zu sein, um diese proaktiv adressieren zu können.

Eine gezielte Weiterentwicklung der Dokumentation, die Verbesserung der Benutzerfreundlichkeit und die Stärkung der Datenbasis könnten dazu beitragen, die identifizierten Hindernisse zu mindern und die Anwendung dieser Werkzeuge weiter zu optimieren.

4 Bedeutung prospektiver Ökobilanzen für iNEW2.0

Ziel des Projekts iNEW2.0 ist es, neuartige elektrochemische Technologien bzw. Wertschöpfungsketten zu entwickeln, die als Low-Carbon-Alternativen zu konventionellen Produktionsmethoden dienen können. Die iNEW2.0-Technologien **Power-to-Ammonia** und **Power-to-Methanol** sind jedoch derzeit noch in einem frühen Entwicklungsstadium und weisen lediglich ein Technology Readiness Level (TRL) von <=2 auf. Das bedeutet, dass sie sich noch in der Grundlagenforschung befinden und noch nicht für einen kommerziellen, großskaligen Einsatz bereit sind. Eine Fortschreibung und Bewertung dieser Technologien für die Zukunft ist deshalb aktuell kaum möglich, da dementsprechend zentrale Parameter und Kenngrößen noch weitgehend unbekannt sind – etwa der zukünftige Bedarf an Rohstoffen, Energie und Feedstocks. Es ist deshalb aus heutiger Perspektive schwer einzuschätzen, welche konkrete Bedeutung die Berücksichtigung prospektiver Hintergrund-Inventardaten auf die Analyseergebnisse von Ökobilanzen für diese Technologien haben könnte.

Alternativ wird daher (vergleichbar mit dem Vorgehen im Teilbericht 2) exemplarisch anhand bestehender Literatur zu Vorketten und Hintergrundprozessen abgeschätzt, wie sich die Anwendung prospektiver LCAs auf die Bewertung der grünen Referenztechnologien für die Bereitstellung von Ammoniak und Methanol auswirken könnte. Die grünen Referenztechnologien für die iNEW2.0-Technologien sind heute schon weiterentwickelt und können daher hinsichtlich ihrer technischen Parameter besser eingeschätzt werden. Als Referenztechnologien dienen hierbei für die Ammoniak-Produktion das grüne Haber-Bosch-Verfahren und für die Methanol-Produktion die grüne CO_2-basierte Methanolsynthese (vgl. → **Teilbericht 2**).

4.1 Relevanz prospektiver LCA für iNEW2.0-Technologien

Ökobilanzen sind entscheidend für die Beurteilung der Umweltwirkung neuartiger Technologien wie die iNEW2.0-Technologien **Power-to-Ammonia** und **Power-to-Methanol**. Sie ermöglichen es, potenzielle Umweltwirkungen frühzeitig zu identifizieren und die Technologien schon in der Forschungs- und Entwicklungsphase auf ihre Nachhaltigkeit hin zu überprüfen. Prospektive LCAs für die iNEW2.0-Technologien könnten beispielsweise dabei helfen, Wechselwirkungen mit den Energie- und Feedstockströmen (wie Strom, Wasserstoff und Stickstoff) besser zu verstehen und frühzeitig Probleme in der Entwicklung zu identifizieren. Denn wie aus der Benchmarking-Analyse aus → **Teilbericht 2** hervorgeht, wird der Energieverbrauch für die Ammoniakproduktion zu über 90 % durch den Strombedarf für die Wasserstoffelektrolyse bestimmt. Diese frühzeitige Bewertung ermöglicht es, technologische Ansätze zu optimieren und unnötige Umweltauswirkungen zu vermeiden, bevor die Technologie auf den Markt kommt. Ein wichtiger Aspekt der prospektiven LCA für die iNEW2.0-Technologien ist daher die Frage, ob und wie bestehende Ansätze aus anderen Sektoren auf die neue Technologie übertragen werden können.

Teilbericht 2 beschreibt für die grüne Referenztechnologien der iNEW2.0-Technologie für Ammoniak, dass das grüne Haber-Bosch-Verfahren als wesentliche Feedstocks nur Wasserstoff und Stickstoff benötigt, die beide jeweils mithilfe von Strom erzeugt werden. Dies hat zur Folge, dass der Energieverbrauch der grünen NH_3-Produktion zu über 90 % auf den Strombedarf der H_2-Elektrolyse entfällt. Betrachtet man nur die Ammoniakproduktion ohne weitere Verarbeitungsschritte (z. B. zu Urea), so wird im

Prozess auch kein Kohlenstoff eingesetzt, da es sich bei Ammoniak (NH_3) um eine kohlenstofffreie Chemikalie handelt. Die Ammoniakproduktion selbst ist dementsprechend mit keinen direkten CO_2-Emissionen (oder anderen THG-Emissionen) verbunden. Wenn auch die benötigte Hilfsenergie entsprechend durch erneuerbaren Strom bereitgestellt wird, sind wie bei vielen anderen zukünftigen Prozessen die einzigen Emissionen mit der Stromerzeugung (Scope-2-Emissionen) verbunden. Diese entstehen beispielsweise bei der Herstellung des Betons für Fundamente oder des Stahls für die Türme von Windenergieanlagen. Diese Scope-2-Emissionen (bzw. Scope-3) hängen wiederum stark vom zugrunde liegenden Hintergrundsystem ab, das sich in Zukunft jedoch stark verändern wird. Es ist also davon auszugehen, dass diese Vorkettenemissionen in einem zukünftig klimaneutralen Energiesystem auch gegen Null gehen. Solange dies jedoch nicht der Fall ist, spielen Scope-2 und Scope-3 aufgrund der Abwesenheit von direkten Prozessemissionen in der Ammoniakproduktion eine besondere Rolle – auch wenn diese relativ gering sein dürften.

Für Methanol wird in Teilbericht 2 als Referenztechnologie die CO_2-basierte Methanolsynthese betrachtet. Das Methanol wird in dieser über CO_2 aus DAC und separat bereitgestelltes H_2 aus Elektrolyse in einem Methanolreaktor synthetisiert. Aus den Ergebnissen des Benchmarkings wird deutlich, dass auch dieses Verfahren hinsichtlich der Vorketten vom Strombedarf der Feedstock-Bereitstellung dominiert wird: Bezogen auf den Gesamtenergiebedarf des Prozesses von 14,1 MWh/t Methanol („Low-Case“ in Teilbericht 2) müssen allein für die Elektrolyse 10,4 MWh/t MeOH (74 %) und 2,1 MWh/t Methanol für die DAC-Anlage (15 %) an elektrischer Energie aufgebracht werden. Auch für die weitere Technologieentwicklung bis 2050 ist zu erwarten, dass sich diese prozentualen Anteile in vergleichbarer Größenordnung bewegen werden und damit die außerordentliche Bedeutung der Stromerzeugung für die CO_2-basierte Methanolsynthese dauerhaft bestehen bleiben wird (vgl. Teilbericht 2, Kapitel 4.3.2).

Teilbericht 2 verdeutlicht demnach, dass die Klimawirkung der grünen Referenztechnologien in hohem Maße von der Strombereitstellung beeinflusst wird. Der Grünstrombezug von Zukunftstechnologien wird in Ökobilanzen wiederum üblicherweise mithilfe statischer Inventardaten für Photovoltaik- und Windkraftanlagen abgebildet. Dies erfolgt auf Grundlage von Datenbanken, die zum Zeitpunkt der Analyse oft bereits mehrere Jahre alt sind und deren Datenbestand sich wiederum auf einen Erhebungszeitpunkt bezieht, der noch weiter zurückliegt (vgl. Kapitel 2.2.2). Umweltwirkungen der Vorkette werden demnach in klassischen Ökobilanzen oft unzureichend berücksichtigt und tendenziell überschätzt. Aktuelle Analysen der THG-Intensität der erneuerbaren Stromerzeugung zeigen allerdings, dass hier in der Realität erhebliche Reduktionen innerhalb vergleichsweise kurzer Zeiträume möglich sind.

4.2 Effekte der Anpassung von Hintergrundsystemen anhand von Literaturbeispielen

Um die Effekte der Anpassung von Hintergrundsystemen auf Ökobilanzen von Zukunftstechnologien wie auch eine eigenständige Durchführung einer LCA in iNEW2.0 darstellen zu können, sind im folgenden exemplarische Literaturstudien genannt, in denen dies vorgenommen wurde.

So stellen beispielsweise Stucki et al. (2024) am Beispiel der Produktion von Solarstrom mit einer Schweizer 3-kW-Schrägdach-Anlage dar, dass sich dessen THG-Emissionen seit 1996 bis 2024 von 121 auf 36 g CO_2-Äq./kWh_{el} und damit um mehr als 70 % reduziert haben. Berücksichtigt wurden hierbei Lebenszyklus-Emissionen aus Herstellung, Transport, Installation und Entsorgung. Entscheidend für die THG-Bilanz des Solarstroms ist dabei die Art der Bereitstellung der elektrischen und thermischen Energie für die Fertigung der Anlagenkomponenten. Werden entsprechende Reduktionen im Zeitverlauf in statischen Ökobilanz-Betrachtungen nicht berücksichtigt, führt dies zu einer erheblichen Überschätzung der Vorketten-Emissionen von Zukunftstechnologien.

Ergänzend zur zuvor beschriebenen historischen Entwicklung analysiert die DVGW-Studie "Roadmap Gas 2050" (Leiblein et al., 2023), welche Auswirkungen unterschiedliche Bereitstellungspfade auf die zukünftige THG-Intensität elektrolytischer Wasserstoffproduktion haben könnten. Die Roadmap kommt zu dem Schluss, dass die ökologische Bewertung der Elektrolyse aufgrund ihres hohen Strombedarfs unmittelbar vom Carbon-Footprint des verwendeten Stroms abhängig ist. Sie berücksichtigt Varianten der Strombereitstellung aus Windkraft in Deutschland (Onshore und Offshore) sowie aus Photovoltaik in der MENA-Region (inkl. Transport nach Deutschland). Dabei zeigt sich für das Jahr 2020 eine Bandbreite der THG-Intensität des Wasserstoffs von 11 g CO_2-Äq./kWh H_2 (Wind Offshore, DE) bis 93 g CO_2-Äq./kWh H_2 (PV, MENA), die bis zum Jahr 2045 auf 4 – 30 g CO_2-Äq./kWh H_2 reduziert werden kann. Die großen Bandbreiten und Veränderungen im Zeitverlauf verdeutlichen, wie stark die Klimawirkung von strombasierten Zukunftstechnologien – zu denen auch die iNEW2.0-Technologien gehören – von der Auswahl und Fortschreibung von Hintergrundprozessen für die Strombereitstellung abhängig ist.

Die Bedeutung prospektiver Lebenszyklusanalysen und entsprechender Inventardatenbanken wird auch in aktuellen Publikationen zu methodischen Aspekten der Ökobilanzierung hervorgehoben. So betonen etwa Steubing et al. (2023), dass prospektive Lebenszyklusinventar-Datenbanken (pLCI) entscheidend sind, um die Umweltauswirkungen zukünftiger Technologien zu bewerten und eine sinnvolle umweltbezogene Entscheidungsfindung zu unterstützen. Der Artikel konzentriert sich auf die allgemeinen Herausforderungen und Anforderungen, die bei der Entwicklung und Nutzung von pLCI-Datenbanken berücksichtigt werden müssen. Diese sind aber auch übertragbar auf die zukünftige Bewertung, etwa von PtA- oder PtM-Prozessen. So wird etwa eine verbesserte technologische und sektorale Abdeckung insbesondere der Energie- und Rohstoffversorgung durch pLCI hervorgehoben, die auch für die zukünftige strombasierte Ammoniak- und Methanolproduktion von Bedeutung ist. Außerdem wird als Priorität identifiziert, dass entsprechende Datenbanken besser in gängige LCA-Software integriert werden müssen, als dies aktuell der Fall ist. Würden diese und weitere in Steubing et al. (2023) genannten Herausforderungen zeitnah adressiert, stünde die entsprechende Methodik zukünftig auch für die Erstellung von pLCA für die iNEW2.0-Technologien im Kontext zukünftiger Energiesysteme zur Verfügung.

Boyce et al. (2024) nutzen erstmals prospektive Ökobilanzen, um die Umweltwirkungen verschiedener Ammoniak-Technologien szenariengestützt im Zeitverlauf bis 2050 zu bewerten. Berücksichtigt werden sieben verschiedene Bereitstellungspfade für Ammoniak, darunter auch die Erzeugung auf Basis von H_2-Elektrolyse (AEL und PEM).

Für verschiedene Weltregionen wird dabei angenommen, dass die elektrolysebasierte Ammoniakerzeugung nicht auf Grünstrom, sondern als konservative Annahme auf dem jeweils aktuellen Netzstrommix der Region basiert (*gelbes* Ammoniak). Die Analyse zeigt, dass sich in einem Szenario mit 1,5-Grad-kompatibler Entwicklung der Stromsysteme das GWP_{100} von gelbem Ammoniak im Zeitverlauf in allen Weltregionen erheblich reduziert. Während z. B. für Westeuropa für 2020 noch ein GWP_{100} von etwa 3 kg CO_2-Äq./kg Ammoniak ermittelt wird, werden bis zum Jahr 2035 Nullemissionen und bis 2050 (durch den Einsatz von BECCS in der Stromerzeugung) sogar leichte Negativemissionen erreicht. Auch für andere Weltregionen (China, Russland, USA) kann von einem höheren Ausgangsniveau von 6 bis 9 kg CO_2-Äq./kg Ammoniak in 2020 ausgehend ein GWP_{100} <2 kg CO_2-Äq./kg Ammoniak bis 2050 erreicht werden (Boyce et al., 2024; Abb. 3). Gelbes Ammoniak erreicht damit in den späteren Szenariojahren das niedrigste GWP_{100} aller Ammoniak-Technologien und wird damit als Schlüsseltechnologie der Dekarbonisierung betrachtet. Boyce et al. (2024) bestätigen damit die hier zuvor getroffene Aussage, dass die Hintergrund-Stromsysteme für die ökobilanzielle Betrachtung von elektrolysebasiertem Ammoniak von zentraler Bedeutung sind. Die Autoren schätzen, dass LCA-Studien zu Ammoniak, die auf heutigen (nicht prospektiven) Daten aus der Datenbank *ecoinvent* (Version 3.8) basieren, die Klimawirkung zukünftiger Ammoniakproduktion in 2050 um bis zu 70 % überschätzen könnten. Allerdings liegt der Fokus in Boyce et al. (2024) auf der Anpassung des zukünftigen Strommixes. Inwieweit zusätzlich auch Hintergrundprozesse der Strombereitstellung selbst, also z. B. die Dekarbonisierung der Metall- und Zementmärkte, berücksichtigt sind, geht aus dem Artikel nicht eindeutig hervor. In Übereinstimmung mit unserer Einordnung in Kapitel 3 ist davon auszugehen, dass hier zusätzlicher Bedarf für die Entwicklung weiterer prospektiver Lebenszyklusinventare besteht.

4.3 Zusammenfassende Bedeutung für iNEW2.0

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die Relevanz der Anpassung von Hintergrundprozessen für Zukunftstechnologien, wie sie in iNEW2.0 untersucht werden, aufgezeigt. Zusammenfassend lassen sich daraus folgende Erkenntnisse für iNEW2.0 ableiten.

Obwohl für die iNEW2.0-Technologien aufgrund ihres niedrigen TRL heute noch keine pLCA erstellt werden können, sind die vorangestellten Überlegungen allerdings prinzipiell auch auf diese Technologien übertragbar: So entfällt zwar etwa im Power-to-Ammonia-Verfahren im Vergleich zum grünen Haber-Bosch-Prozess die elektrolytische Herstellung von Wasserstoff, stattdessen wird das Ammoniak aber direkt aus Stickstoff und Wasser elektrochemisch synthetisiert, was ebenfalls mit einem erheblichen Stromverbrauch verbunden sein wird. Auch für zukünftige Power-to-Ammonia-Verfahren wird daher die ökobilanzielle Bewertung insbesondere von einer passgenauen Abbildung der Hintergrundprozesse der Stromerzeugung abhängig sein. Dies gilt in vergleichbarer Weise auch für zukünftige Methanol-Elektrosynthese: Analog zu Ammoniak entfällt zwar auch hier die stromintensive elektrolytische Gewinnung von H_2 als Prozessschritt, stattdessen werden aber in einem einstufigen elektrochemischen Verfahren Wasser und CO_2 direkt zu Methanol synthetisiert. Auch die THG-Intensität dieses Prozesses wird demnach insbesondere von den Vorketten der Strombereitstellung abhängig sein.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass zentrale Umweltwirkungen (wie etwa die CO_2-Intensität bzw. das GWP) für Zukunftstechnologien der industriellen Transformation im Wesentlichen nicht auf deren Nutzung[1], sondern auf die Vorketten der Anlagen- und Energiebereitstellung entfallen. Dies trifft auch auf die iNEW2.0-Technologien Power-to-Ammonia und Power-to-Methanol zu. Zur ökobilanziellen Bewertung dieser Technologien ist es daher entscheidend, die entsprechenden Hintergrundprozesse entlang der Wertschöpfungskette adäquat abzubilden und entsprechend der erwarteten zukünftigen technischen Entwicklung fortzuschreiben und diese Fortschreibungen in ökobilanzielle Bewertungen einfließen zu lassen. Entsprechende Ansätze stehen hierfür beispielsweise mit dem *Brightway*-Framework in Kombination mit *premise* zur Verfügung. Um realistische, prospektive Ökobilanzen für Zukunftstechnologien zu erstellen, sind jedoch Weiterentwicklungen dieser Tools erforderlich.

Sobald die iNEW2.0-Technologien also einen gewissen Entwicklungsstand erreicht haben und valide Vordergrund-Datensätze für die Durchführung erster Ökobilanzen vorliegen, sollten auch repräsentative Hintergrunddaten mit den geeigneten Werkzeugen erstellt werden. Aufgrund der Unsicherheiten, die sich im frühen Entwicklungsstadiums nicht vermeiden lassen, wäre es zudem wichtig, eine iterative Überprüfung der LCA-Ergebnisse in den Entwicklungsprozess zu integrieren. Dies bedeutet, dass die LCA-Modelle regelmäßig mit neuen Erkenntnissen aus Forschung und Entwicklung abgeglichen und angepasst werden müssen. Die Berücksichtigung von Rückkopplungsschleifen stellt somit sicher, dass sich die Ökobilanzen kontinuierlich an die tatsächlichen Gegebenheiten und Veränderungen im Entwicklungsprozess anpassen, um möglichst genaue und aussagekräftige Umweltbewertungen zu liefern – und ggf. Hot-Spots von Umweltwirkungen frühzeitig identifiziert werden und noch verhindert werden können.

[1] Dies gilt allerdings nicht für alle Umweltwirkungskategorien – beispielsweise sind die Folgen einer Überdüngung nutzungsbedingt.

5 Anhang

Das international verwendete Konzept des Technology Readiness Levels (TRL) unterteilt die verschiedenen Forschungs- und Entwicklungsschritte von der Erfindung bis zum Markt. Tabelle 5-1 zeigt eine beispielhafte Klassifizierung, wie sie im BMWK-Projekt "Technologien für die Energiewende" verwendet wurde (Viebahn et al., 2018). Sie basiert auf den Arbeiten der High-Level-Group der EU-Kommission (auch eingeflossen in das EU-Programm Horizon 2020) sowie deren Übersetzung und Anpassung durch den Projektträger Jülich.

Tabelle 5-1: Klassifizierung des Technology Readiness Level nach Viebahn et al. (2018)

Grobklassifizierung	TRL	Feinklassifizierung
Grundlagenforschung	**1**	Grundlegende Prinzipien beobachtet und beschrieben, potentielle Anwendungen denkbar
Technologieentwicklung	**2**	Beschreibung eines Technologiekonzepts und/oder einer Anwendung
	3	Grundsätzlicher Funktionsnachweis einzelner Elemente einer Anwendung/Technologie
	4	Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor
Demonstration	**5**	Funktionsnachweis in anwendungsrelevanter Umgebung
	6	Verifikation mittels Demonstrators in anwendungsrelevanter Umgebung
	7	Prototypentest in Betriebsumgebung
	8	Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit in Betriebsumgebung
Kommerzialisierung	**9**	Erfolgreicher kommerzieller Systemeinsatz

6 Literaturverzeichnis

Arvidsson, R., Tillman, A.-M., Sandén, B. A., Janssen, M., Nordölf, A., Kushnir, D., & Molander, S. (2017). Environmental Assessment of Emerging Technologies: Recommendations for Prospective LCA. *Journal of Industrial Ecology*, *22*(6), 1286–1294. https://doi.org/10.1111/jiec.12690

Beltran, A. M., Cox, B., Mutel, C., Vuuren, D. P., Vivanco, D. F., Deetman, S., Edelenbosch, O. Y., Guinée, J., & Tukker, A. (2018). When the Background Matters: Using Scenarios from Integrated Assessment Models in Prospective Life Cycle Assessment. *Journal of Industrial Ecology*, *24*(1), 64–79. https://doi.org/10.1111/jiec.12825

Boyce, J., Sacchi, R., Goetheer, E., & Steubing, B. (2024). A prospective life cycle assessment of global ammonia decarbonisation scenarios. *Heliyon*, *10*(6), e27547. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27547

Bryant, H. N., Stevenson, D. S., Heal, M. R., & Abraham, N. L. (2024). Impacts of hydrogen on tropospheric ozone and methane and their modulation by atmospheric NOx. *Frontiers in Energy Research*, *12*. https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1415593

Cucurachi, S., Blanco Rocha, C. F., Steubing, B. R. P., & Heijungs, R. (2021). Implementation of uncertainty analysis and moment-independent global sensitivity analysis for full-scale life cycle assessment models. *Journal of Industrial Ecology*. https://doi.org/10.1111/jiec.13194

Cucurachi, S., van der Giesen, C., & Guinée, J. (2018). Ex-ante LCA of Emerging Technologies. *Procedia CIRP*, *69*, 463–468. https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.005

DIN. (2021a). *DIN EN ISO 14040:2021-02. Umweltmanagement—Ökobilanz—Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020).*

DIN. (2021b). *DIN EN ISO 14044:2021-02. Umweltmanagement—Ökobilanz—Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020).*

Ember. (2024). *Entwicklung der CO_2-Emissionsintensität der Stromerzeugung nach Ländern in den Jahren von 2000 bis 2023 (in Gramm CO_2 pro kWh).* Statista GmbH. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1493670/umfrage/co2-emissionsintensitaet-der-stromerzeugung-nach-laendern/

Fraunhofer ISI & Consentec GmbH. (2021). *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland—Kurzbericht: 3 Hauptszenarien*. https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS_Kurzbericht_final_v5.pdf

Gavankar, S., Suh, S., & Keller, A. A. (2014). The Role of Scale and Technology Maturity in Life Cycle Assessment of Emerging Technologies: A Case Study on Carbon Nanotubes. *Journal of Industrial Ecology*, *19*(1), 51–60. https://doi.org/10.1111/jiec.12175

Harpprecht, C., van Oers, L., Northey, S. A., Yang, Y., & Steubing, B. (2021). Environmental impacts of key metals' supply and low-carbon technologies are likely to decrease in the future. *Journal of Industrial Ecology*, *25*(6), 1543–1559. https://doi.org/10.1111/jiec.13181

Hetherington, A. C., Borrion, A. L., Griffiths, O. G., & McManus, M. C. (2013). Use of LCA as a development tool within early research: Challenges and issues across different sectors.

The International Journal of Life Cycle Assessment, *19*(1), 130–143. https://doi.org/10.1007/s11367-013-0627-8

Jülich, A., & Zelt, O. (2022). *Ökobilanzen für synthetisches Kerosin—Vergleich von Produktionsrouten in MENA und Deutschland. MENA-Fuels: Teilbericht 2 des Wuppertal Instituts an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).*

Leiblein, J., Bär, K., Mörs, F., Graf, F., Kühn, M., Müller, S., Bäuerle, M., & Benthin, J. (2023). *Roadmap Gas 2050 Deliverable D1.1: „Bewertung von alternativen Verfahren zur Bereitstellung von grünem und blauem H2"* [Abschlussbericht]. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. - Technisch-wissenschaftlicher Verein. https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g201824-abschlussbericht-d1.1-rmg2050-h2-Bereitstellung.pdf

Liebich, A., Müller, J., Münter, D., Wingenbach, C., & Vogt, R. (2023). *LCAst – Prospektive Ökobilanzen auf Basis der ecoinvent-Datenbank* (No. 03/2023; ifeu paper). Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu). https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/ifeu_paper/ifeu_paper_3_2023_LCAst.pdf

Moni, S. M., Mahmud, R., High, K., & Carbajales-Dale, M. (2019). Life cycle assessment of emerging technologies: A review. *Journal of Industrial Ecology*, *24*(1), 52–63. https://doi.org/10.1111/jiec.12965

Mutel, C. (2017). Brightway: An open source framework for Life Cycle Assessment. *Journal of Open Source Software*, *2*(12), 236. https://doi.org/10.21105/joss.00236

O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., van Ruijven, B. J., van Vuuren, D. P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., & Solecki, W. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, *42*, 169–180. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004

Purr, K., Günther, J., Lehmann, H., & Nuss, P. (2019). *Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität: RESCUE - Studie* (No. 36/2019; Climate Change). Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet_auflage2_juni-2021.pdf

Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., … Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, *42*, 153–168. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009

Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K. V., Luderer, G., Emmerling, J., Gernaat, D., Fujimori, S., Strefler, J., Hasegawa, T., Marangoni, G., Krey, V., Kriegler, E., Riahi, K., van Vuuren, D. P., Doelman, J., Drouet, L., Edmonds, J., Fricko, O., Harmsen, M., … Tavoni, M. (2018). Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 °C. *Nature Climate Change*, *8*(4), 325–332. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0091-3

Rotolo, D., Hicks, D., & Martin, B. R. (2015). What is an emerging technology? *Research Policy*, *44*(10), 1827–1843. https://doi.org/10.1016/j.respol.2015.06.006

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. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *160*, 112311. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112311

Sphera. (2021). *Ökobilanz-Datenbanken GaBi*. Sphera. http://www.gabi-software.com/databases/gabi-databases/

Stehfest, E. (2014). *Integrated assessment of global environmental change with IMAGE 3.0: Model description and policy applications*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.

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. *Software Impacts*, *3*, 100012. https://doi.org/10.1016/j.simpa.2019.100012

Steubing, B., & Koning, D. de. (2021). Making the use of scenarios in LCA easier: The superstructure approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *26*(11), 2248–2262. https://doi.org/10.1007/s11367-021-01974-2

Steubing, B., Mendoza Beltran, A., & Sacchi, R. (2023). Conditions for the broad application of prospective life cycle inventory databases. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *28*(9), 1092–1103. https://doi.org/10.1007/s11367-023-02192-8

Stucki, M., Götz, M., & Frischknecht, R. (2024). *Treib-haus-gas-emissionen von Solarstrom. Ökobilanz gloabler Lieferketten. 8/2024*. https://www.bulletin.ch/de/news-detail/treibhausgasemissionen-von-solarstrom.html

Thonemann, N., Schulte, A., & Maga, D. (2020). How to Conduct Prospective Life Cycle Assessment for Emerging Technologies? A Systematic Review and Methodological Guidance. *Sustainability*, *12*(3), 1192. https://doi.org/10.3390/su12031192

Van Der Meide, M., Harpprecht, C., Northey, S., Yang, Y., & Steubing, B. (2022). Effects of the energy transition on environmental impacts of cobalt supply: A prospective life cycle assessment study on future supply of cobalt. *Journal of Industrial Ecology*, *26*(5), 1631–1645. https://doi.org/10.1111/jiec.13258

Viebahn, P., Kobiela, G., Zelt, O., Wietschel, M., Hirzel, S., Horst, J., & Hildebrand, J. (2018). *Technologien für die Energiewende. Teilbericht 1 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)*. Wuppertal Institut, Fraunhofer ISI, IZES.

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *21*(9), 1218–1230. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8