

*Teilbericht 2* | November 2022

# Ökobilanzen für synthetisches Kerosin: Vergleich von Produktionsrouten in MENA und Deutschland



Bericht aus dem  
Teilprojekt A.I: SYN-Pfade

---

*Alexander Jülich  
Ole Zelt*

### **Autoren**

Alexander Jülich, Ole Zelt

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH

Döppersberg 19

42103 Wuppertal

[www.wupperinst.org](http://www.wupperinst.org)

### **Unter Mitarbeit von:**

Jacqueline Klingen (Wuppertal Institut)

### **Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:**

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). Wuppertal, Stuttgart, Köln, Saarbrücken.

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 **MENA-Fuels – Roadmaps zur Erzeugung nachhaltiger synthetischer Kraftstoffe im MENA-Raum zur Dekarbonisierung des Verkehrs in Deutschland** entstanden. Er wird ergänzt durch weitere publizierte Berichte. Die Herausgeber danken allen beteiligten Forschungsinstituten, dem Fördermittelgeber und seinem Projektträger sowie den projektexternen Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Industrie für die konstruktive Zusammenarbeit und die wertvollen Beiträge zur vorliegenden Publikation.

## Disclaimer

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter dem Förderkennzeichen 3EIV181A-C durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Das hier verwendete Kartenmaterial dient lediglich der Veranschaulichung. Es beinhaltet keine offizielle Stellungnahme der Bundesrepublik Deutschland zu etwaigen umstrittenen Rechtspositionen von Drittstaaten.

**Projektlaufzeit:** Dezember 2018 – Juni 2022

### Verbundpartner:

Wuppertal Institut (Koordination): PD Dr. Peter Viebahn  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: Jürgen Kern  
Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme: Juri Horst

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

---

## **Impressum**

### **Herausgeberin:**

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH  
Döppersberg 19  
42103 Wuppertal  
[www.wupperinst.org](http://www.wupperinst.org)

### **Ansprechperson:**

PD Dr. Peter Viebahn (Verbundkoordinator)  
Abteilung Zukünftige Energie- und Industriesysteme  
[peter.viebahn@wupperinst.org](mailto:peter.viebahn@wupperinst.org)  
Tel. +49 202 2492-306

### **Bildquellen:**

Titelseite: GettyImages  
Rückseite: eigene Darstellung

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen</b>	<b>6</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>8</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>8</b>
<b>1 Einleitung und Hintergrund</b>	<b>9</b>
<b>2 Ziel und Untersuchungsrahmen der Ökobilanz</b>	<b>10</b>
2.1 Methodisches Vorgehen der prospektiven Ökobilanz	10
2.2 Definitionen der Randbedingungen und des Untersuchungsrahmens	11
2.3 Betrachtete Module und Bereitstellungspfade	12
<b>3 Ergebnisse der Ökobilanzen</b>	<b>18</b>
3.1 Erderwärmungspotenzial	18
3.1.1 <i>Referenzroute</i>	18
3.1.2 <i>PtL-Routen</i>	19
3.2 Kumulierter Energieaufwand	20
3.3 Weitere Wirkungskategorien	21
3.4 Dominanzanalyse	22
<b>4 Fazit</b>	<b>24</b>
<b>5 Literaturverzeichnis</b>	<b>26</b>

## Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen

### Abkürzungen

AEL	Alkalische Elektrolyse
ALOP	Landwirtschaftliche Landbesetzung (Agricultural Land Occupation Potential)
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
DAC	Direct Air Capture
DIN	Deutsches Institut für Normung
FDP	Verbrauch fossiler Rohstoffe (Fossil Depletion Potential)
FEP	Frishwassereutrophierung (Freshwater Eutrophication Potential)
FT	Fischer-Tropsch
FU	Funktionelle Einheit (Functional Unit)
GWP	Erderwärmungspotenzial (Global Warming Potential)
HT	Hochtemperatur
HT-EL	Hochtemperatur-Elektrolyse
HT-KO	Hochtemperatur-Ko-Elektrolyse
IAM	Integrated Assessment Model
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KWS	Kohlenwasserstoffe
LCA	Life Cycle Assessment
LHV	Lower Heating Value
LPG	Flüssiggas (Liquified Petroleum Gas)
MDP	Verbrauch mineralischer Rohstoffe (Mineral Depletion Potential)
MENA	Middle East North Africa
MeOH	Methanol
MEP	Meereseutrophierung (Marine Eutrophication Potential)
MtK	Methanol-to-Kerosin
NT	Niedertemperatur
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
PSI	Paul Scherrer Institut
PtL	Power-to-Liquid
PtX	Power-to-X
PV	Photovoltaik
RCP	Representative Concentration Pathway
rWGS	Reverse Wassergas-Shift-Reaktion
SSP	Shared Socioeconomic Pathway
SWRO	Seawater Reverse Osmosis
Syncrude	Synthetisches Rohöl
Syngas	Synthesegas
TAP	Terrestrische Versauerung (Terrestrial Acidification Potential)
TB	Teilbericht
THG	Treibhausgase
TRL	Technology Readiness Level
VLS	Volllaststunden
WDP	Wasserverbrauch (Water Depletion Potential)
WEA	Windenergieanlage

## Einheiten und Symbole

%	Prozent
°C	Grad Celsius
a	annum
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CO <sub>2</sub> -Äq.	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
G	Strahlungsantrieb
h	Stunde
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
H <sub>2</sub> O	Wasser
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunden
kWp	Kilowatt peak
l	Liter
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
MJ	Megajoule
W	Watt

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1	Auswahl der betrachteten Kraftstoffbereitstellungspfade für das Jahr 2050-----	14
----------	--	----

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1	Auswahl der Technologiemodule und Produkte in MENA-Fuels -----	12
Abb. 2-2	Schematische Darstellung der Methanol-Route -----	13
Abb. 2-3	Schematische Darstellung der Fischer-Tropsch-Route -----	13
Abb. 3-1	Entwicklung des $GWP_{100}$ der fossilen Referenz über die Betrachtungsjahre -----	18
Abb. 3-2	$GWP_{100}$ der PtL-Pfade für das Jahr 2050 im Vergleich zur fossilen Referenz -----	19
Abb. 3-3	KEA der PtL-Pfade und der Referenz für das Jahr 2050 -----	21
Abb. 3-4	Normierte Umweltbelastungen für Pfad 1 für 2050 in verschiedenen Wirkungskategorien -----	21
Abb. 3-5	Dominanzanalyse der einzelnen Prozessschritte von Pfad 1 für das Jahr 2050 bei verschiedenen Wirkungskategorien -----	23

## 1 Einleitung und Hintergrund

Im Rahmen des Teilprojekts A.I wurden innerhalb einer Masterarbeit (Jülich, 2022) prospektive Ökobilanzen erstellt, welche die kriterienbasierte Bewertung der betrachteten Technologien in → *Teilbericht 3* ergänzen. Mithilfe dieser Ökobilanzen werden ausgewählte Bereitstellungspfade synthetischer Kraftstoffe aus einer ökologischen Perspektive analysiert. Exemplarisch wird dazu die Herstellung synthetischen Kerosins über die Fischer-Tropsch- und die Methanol-Route anhand von fünf Pfaden für die Jahre 2030 und 2050 untersucht und mit konventionellem Kerosin als Referenzkraftstoff verglichen. Die erstellten Ökobilanzen verfolgen einen „Well-to-Tank“-Ansatz und vergleichen anhand verschiedener Umweltwirkungen zwei unterschiedliche Optionen: (1) die Herstellung des Kerosins in der MENA-Region mit nachfolgendem Import nach Deutschland und (2) den Import von Wasserstoff nach Deutschland mit anschließender Synthese vor Ort. Die Anpassung von Hintergrundprozessen der betrachteten Pfade an zukünftige Entwicklungen erfolgt mithilfe des Open-Source-Tools *premise* durch Modifikation der *ecoinvent*-Datenbank.

Der vorliegende *Teilbericht 2* beschreibt zunächst die Methoden der konventionellen und der prospektiven Ökobilanz sowie das Tool *premise*. Auf Grundlage der Vorarbeiten aus → *Teilbericht 1* und 3 sowie der Ergebnisse der Nachfragemodellierung (vgl. → *Teilbericht 6*) werden darauf aufbauend exemplarische Kraftstoffpfade ausgewählt. Im Anschluss werden die ausgewählten Pfade näher definiert und die einzelnen Prozessmodule beschrieben. Anhand der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung wird anschließend untersucht, wie die Pfade untereinander und im Vergleich mit einer fossilen Referenz in Bezug auf verschiedene Umweltwirkungsindikatoren abschneiden. Außerdem erfolgt in einer Dominanzanalyse die Identifikation derjenigen Prozessschritte, die einen besonders relevanten Anteil an den Umweltwirkungen haben. Daraufhin erfolgen die Interpretation und Diskussion der Ergebnisse. Abschließend werden alle Erkenntnisse der durchgeführten Arbeiten zusammengefasst.

## 2 Ziel und Untersuchungsrahmen der Ökobilanz

Da es sich bei den in MENA-Fuels betrachteten Prozessen größtenteils um neuartige Technologien handelt, wurden zukunfts betrachtende Ökobilanzen erstellt. Für diese auch prospektiv genannten Ökobilanzen existiert bisher noch keine allgemeingültige Methodik zur Durchführung. Deshalb wird in Kapitel 2.1 zunächst auf die wichtigsten Elemente einer prospektiven Ökobilanz und auf das Tool *premise* eingegangen. Anschließend werden in Kapitel 2.2 die notwendigen Randbedingungen der Ökobilanz beschrieben und der Untersuchungsrahmen festgelegt. In Kapitel 2.3 erfolgt eine detaillierte Beschreibung der untersuchten Pfade und der einzelnen Prozessschritte.

### 2.1 Methodisches Vorgehen der prospektiven Ökobilanz

Die Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA) ist eine in den ISO-Normen 14041 (DIN, 2021a) und 14044 (DIN, 2021b) standardisierte Methodik, um potenzielle Umweltwirkungen eines Produktsystems oder einer Dienstleistung über den gesamten Lebenszyklus anhand von Input- und Outputströmen zu beurteilen. Für die hier durchgeführten Ökobilanzen wird nachfolgend die Definition einer prospektiven Ökobilanz nach Arvidsson et al. (2017) verwendet, da diese das Ziel einer zukunfts betrachtenden Ökobilanz am besten widerspiegelt. Demnach umfasst eine prospektive Ökobilanz die Modellierung einer Technologie in einem ausgereiften Zustand in der Zukunft, wobei sich die Technologie zum heutigen Zeitpunkt aber noch in einem kleinskaligen Entwicklungsstand befindet. Solche sich entwickelnde Technologien definieren Rotolo et al. (2015) als eine „schnell wachsende und neuartige Technologie“.

Für die Durchführung prospektiver Ökobilanzen ist es von maßgeblicher Bedeutung, das Hintergrundsystem dem selbst modellierten Vordergrundsystem zeitlich anzupassen. Gerade für Technologien, die sich noch in der Entwicklung befinden – wie etwa Power-to-X (PtX)-Technologien – haben Upstream-Prozesse große Auswirkungen auf die Ergebnisse der Ökobilanz (Thonemann et al., 2020). Insbesondere der Elektrizitätssektor spielt hierbei eine entscheidende Rolle und sollte für den betrachteten Zeitpunkt in der Zukunft repräsentativ abgebildet werden. Beispiele für die Modifikation des Elektrizitätssektors lassen sich in Beltran et al. (2018) und Cox et al. (2018) finden. Diese nutzen Szenarien des integrierten Bewertungsmodells (Integrated Assessment Modell, IAM) *IMAGE*, um das Hintergrundsystem systematisch zu modifizieren. Beide stellen ein „proof-of-concept“ dar und modifizieren den Elektrizitätssektor der ecoinvent-Hintergrunddatenbank (Wernet et al., 2016), indem jeder Prozess dieses Sektors anhand der Trajektorien von *IMAGE* angepasst wird. Diese Trajektorien projizieren gesellschaftliche, historische, wirtschaftliche, ökologische und technologische Entwicklungsverläufe auf die Datenbank. Auf dieser Grundlage wurde vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) und vom Paul Scherrer Institut (PSI) das Open-Source-Tool *premise* entwickelt, das neben der Modifizierung des Elektrizitätssektors weitere Teile der ecoinvent-Datenbank anpasst sowie die Möglichkeit bietet, andere IAM zu integrieren (Sacchi et al., 2022). Das Tool *premise* wurde auch in den hier beschriebenen Arbeiten zur Modifikation von Hintergrundprozessen der ecoinvent-Datenbank im Zeitverlauf genutzt.

Die in *premise* zur Verfügung stehenden IAM-Szenarien bauen auf sozioökonomischen Entwicklungspfaden (Shared Socioeconomic Pathway, SSP) auf, die zukünftige

gesellschaftliche, demographische und ökonomische Veränderungen auf globaler Ebene abbilden (Riahi et al., 2017). *Premise* bezieht sich jedoch nur auf den SSP2-Pfad, der ein „Middle-of-the-Road“-Szenario darstellt und historische Entwicklungsmuster im 21. Jahrhundert fortsetzt. Ein *premise*-Szenario besteht aus der Kombination des SSP2-Pfades mit einem wählbaren, repräsentativen Konzentrationspfad (Representative Concentration Pathway; RCP). Ein RCP beschreibt dabei den Verlauf der absoluten Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre (IPCC, 2014). Der ausgewählte RCP gibt einen bestimmten globalen Strahlungsantrieb  $G$  in  $W/m^2$  bis zum Jahr 2100 wieder. Unterscheiden lassen sich die RCP im Allgemeinen durch Politikenszenarien, die von ambitionierten Klimaschutzplänen geprägt sind, bis hin zu Szenarien, die die Vernachlässigung dieser annehmen. Die Erstellung 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 und Koning (2021)).

Für die hier erstellten Ökobilanzen wird das Szenario *SSP2-PkBudg900* des IAM *REMIND* betrachtet. Dieses zielorientierte Szenario begrenzt die kumulative Freisetzung der globalen Treibhausgasemissionen nach dem Budgetansatz auf 900 Gigatonnen bis zum Jahr 2100. Es steht damit im Einklang mit dem im Pariser Abkommen definierten  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ -Ziel (IPCC, 2018; *Premise*, 2021).

## 2.2 Definitionen der Randbedingungen und des Untersuchungsrahmens

Die in diesem Bericht beschriebenen Ökobilanzen wurden auf Grundlage der nachfolgend aufgeführten Festlegungen durchgeführt:

- **Funktionelle Einheit:** Die funktionelle Einheit (Functional Unit, FU) wird auf 1 MJ Kerosin mit einer Dichte von  $0,8\text{ kg/l}$  und einem Heizwert von  $42,8\text{ MJ/kg}$  (LHV) festgelegt.
- **Geografischer Rahmen:** Der betrachtete geographische Rahmen ist die Herstellung synthetischen Kerosins in der MENA-Region und der anschließende Export nach Deutschland. Dabei wird Marokko stellvertretend als relevantes Lieferland in der MENA-Region angenommen. Die Bereitstellung des Kerosins erfolgt zu einem zentralen Endpunkt in der Mitte Deutschlands.
- **Zeitlicher Rahmen:** Das Jahr 2020 bildet als Referenzjahr das heutige Energiesystem sowie den aktuellen Stand der Technik ab. Das Jahr 2030 dient als mittelfristige Projektion und stellt erste Entwicklungen der Technologien sowie die zunehmende Defossilisierung des Energiesystems nach dem *REMIND* Szenario *SSP2-PkBudg900* dar. Zielpunkt der Betrachtungen ist das Jahr 2050, bis zu dem bereits eine weitgehende Defossilisierung umgesetzt ist und die betrachteten Technologien großskalig kommerziell verfügbar sind.
- **Systemgrenzen:** Als Systemgrenze wird ein „Well-to-tank“-Ansatz gewählt. Wie Pichlmaier et al. (2021) beschreiben, umfasst dieser die Rohstoffbereitstellung, Kraftstoffherzeugung sowie Kraftstoffverteilung. Unter der vereinfachenden Annahme, dass die synthetischen Kraftstoffe chemisch identisch mit ihren fossilen Pendanten sind, wird die Distribution, Lagerung und Nutzungsphase (Verbrennung) nicht betrachtet. Die mit der Verbrennung verbundenen THG-Emissionen werden jedoch für die Betrachtung des Erderwärmungspotenzials mit berücksichtigt.

- Wirkungskategorien und -indikatoren:** Zur Charakterisierung der Stoffflüsse bezüglich ihrer Umweltwirkungen wird in Anlehnung an Pichlmaier et al. (2021) die Wirkungsabschätzungsmethode *ReCiPe 2016 Midpoint (H)* (Huijbregts et al., 2016) gewählt. Zusätzlich wird der kumulierte Energieaufwand (KEA), angelehnt an VDI 4600, betrachtet (VDI, 2012). Die Wirkungskategorie „Klimawandel“ (Global Warming Potential;  $GWP_{100}$ ) wird abweichend mit der Wirkungsabschätzungsmethode *IPCC 2013* berechnet, da diese durch Modifikation innerhalb von *premise* die Berücksichtigung negativer  $CO_2$ -Emissionen ermöglicht sowie zusätzlich ein Erderwärmungspotenzial für Wasserstoff nach Warwick et al. (2022) implementiert. Diese haben aufgezeigt, dass die Wasserstoffkonzentration in der Atmosphäre durch Leckagen bei dessen Produktion, Speicherung und Transport ansteigt und zu drei atmosphärischen Implikationen führt: 1. erhöhte troposphärische Lebensdauer von Methan, 2. vermehrte Bildung von Ozon in der Troposphäre und 3. vermehrte Bildung von Wasserdampf in der Stratosphäre. Diese drei Implikationen sorgen wiederum für einen indirekten THG-Effekt, der jedoch dem Wasserstoff zugeschrieben wird. Laut der Autoren liegt das auf das  $GWP_{100}$  bezogene  $CO_2$ -Äquivalent für Wasserstoff damit bei  $11 \pm 5$  Einheiten.

### 2.3 Betrachtete Module und Bereitstellungspfade

Die Auswahl von Kraftstoffbereitstellungspfaden geschieht auf Grundlage der Vorarbeiten aus  $\rightarrow$  *Teilbericht 1* und  $\rightarrow$  *Teilbericht 3*. Die dort betrachteten Technologiemodule sind in Abb. 2-1 dargestellt. Des Weiteren werden Ergebnisse aus der Nachfragemodellierung ausgewertet und als zusätzliches Kriterium zur Eingrenzung der Technologien verwendet (vgl.  $\rightarrow$  *Teilbericht 6*, System D+MENA). Die untersuchten Prozesse sind modular in fünf Technologiebereiche unterteilt: Rohstoffe, Wasserspaltung, Synthese, Aufbereitung und Produkte. Der modulare Aufbau der Technologien bietet den Vorteil, dass sich Prozessschritte für die späteren Analysen einfach austauschen lassen und so mögliche Synergien innerhalb einer Prozesskette durch Wärme- oder Wasserintegration aufgezeigt werden können.

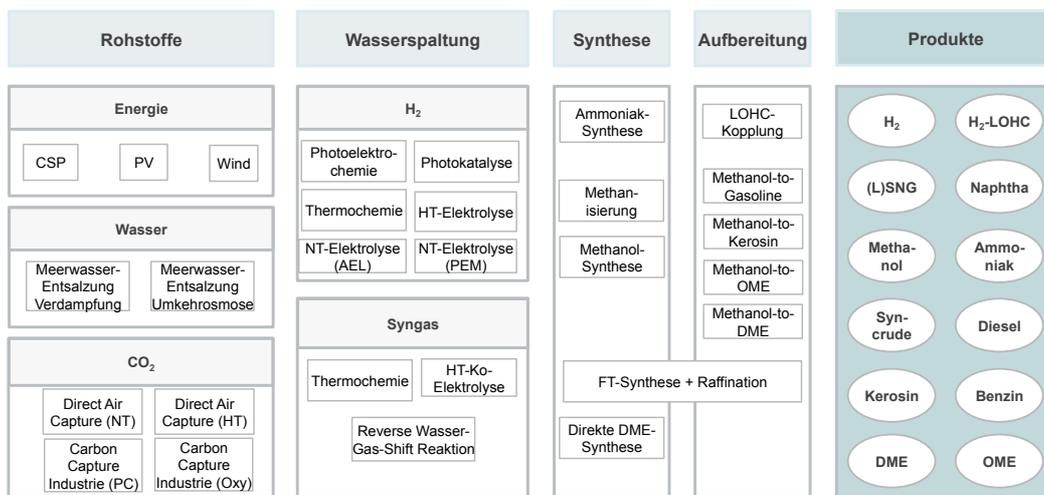


Abb. 2-1 Auswahl der Technologiemodule und Produkte in MENA-Fuels

Quelle: Zelt et al. (2020) (Teilbericht 3)

Für die Erstellung der Ökobilanzen wurden ausgewählte Module aus Abb. 2-1 zu fünf Bereitstellungspfaden kombiniert, welche die perspektivisch sinnvollsten Nutzungsmöglichkeiten für synthetische Kraftstoffe adressieren. Dies sind vor allem Anwendungen in Bereichen, die als schwer zu dekarbonisieren gelten (Schwerlasttransport, Flugverkehr etc.), da eine direkte Elektrifizierung dort nur schwer umsetzbar ist. Flüssige synthetische Kohlenwasserstoffe (KWS) spielen in diesen Bereichen eine besondere Rolle, da diese auf ähnliche Transportinfrastrukturen wie konventionelle flüssige Kraftstoffe zurückgreifen können. Verfahren zur Herstellung flüssiger synthetischer KWS werden – entsprechend des für ihre Herstellung (indirekt) eingesetzten Stroms – auch *Power-to-Liquid* (PtL) genannt.

Die PtL-Verfahren werden in diesem Bericht durch zwei Routen vertreten:

- 1 | Methanol-Synthese und anschließende Aufbereitung in einem Methanol-to-X-Prozess
- 2 | Fischer-Tropsch-Synthese und anschließende Aufbereitung in einer Raffination

Der grundlegende schematische Aufbau der beiden Routen ist in den Prozessfließbildern Abb. 2-2 und Abb. 2-3 dargestellt:

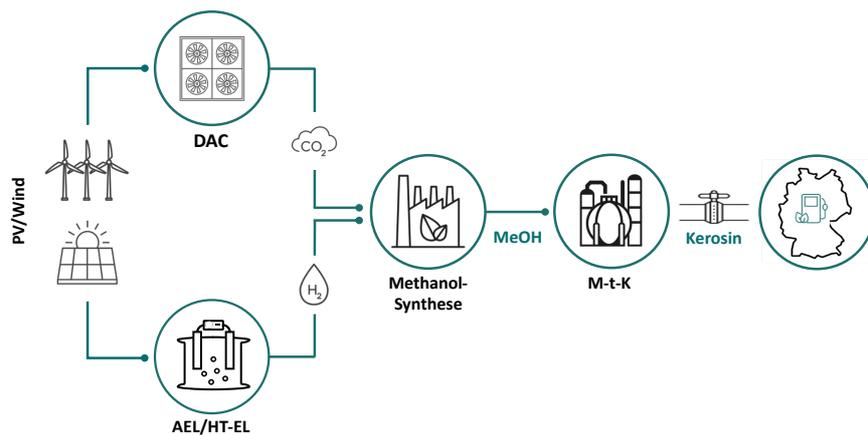


Abb. 2-2 Schematische Darstellung der Methanol-Route

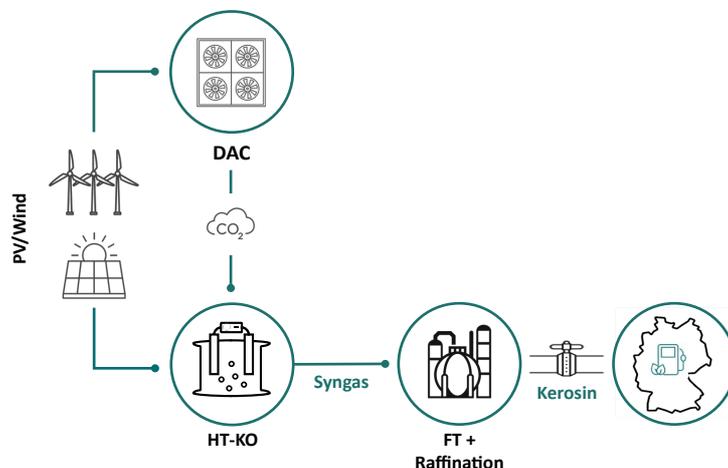


Abb. 2-3 Schematische Darstellung der Fischer-Tropsch-Route

Über beide Routen können durch weitere Aufbereitungsschritte verschiedene Produkte gewonnen werden (Diesel, Benzin, Kerosin und weitere KWS). Da sich im Individualverkehr jedoch die direkte Elektrifizierung (batterieelektrische Fahrzeuge) anbietet, werden synthetisches Benzin und Diesel von den Untersuchungen ausgeschlossen. In der Luftfahrt hingegen sind Flüssigkraftstoffe wie Kerosin nur schwer zu ersetzen. Einerseits eignen sich Batterien hier aufgrund des zu hohen Gewichts nicht, andererseits liefert Wasserstoff nicht die nötige volumetrische Energiedichte, um genügend Treibstoff mitführen zu können. Synthetisches Kerosin hingegen bietet eine Lösung, da es sich als Produkt kaum von fossilem Kerosin unterscheidet und konventionell getankt werden kann. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass synthetisches Kerosin maximal CO<sub>2</sub>-neutral, aber nicht klimaneutral sein kann, da der Flugverkehr bei Nutzung synthetischer Kraftstoffe weiterhin mit indirekten Klimawirkungen (z. B. bedingt durch Wasserdampf) verbunden ist.

Es wird im Weiteren vorrangig die Herstellung von synthetischem Kerosin in der MENA-Region sowie der anschließende Transport nach Deutschland betrachtet – sowie ergänzend auch Varianten mit Wasserstoffimport nach Deutschland und anschließender inländischer Synthese. Synthetisches Kerosin lässt sich sowohl über die FT- als auch die Methanol-Route produzieren. Die beiden Routen stehen deshalb in direkter Konkurrenz zueinander. Ein Vergleich in Bezug auf die zukünftig zu erwartenden Umweltwirkungen ist daher von besonderem Interesse. Für beide Routen gilt, dass sich diese aus verschiedenen Technologiemodulen eines Technologiebereichs zusammensetzen lassen und sich dadurch mehrere Bereitstellungspfade je Route ergeben. Ein vollständiger Kraftstoffbereitstellungspfad ergibt sich aus allen für die Produktion des jeweiligen Kraftstoffes benötigten Technologiemodulen. Die Auswahl der Kraftstoffbereitstellungspfade für die Ökobilanzierung ist in Tab. 2-1 aufgelistet.

**Tab. 2-1 Auswahl der betrachteten Kraftstoffbereitstellungspfade für das Jahr 2050**

Nr.	Pfadname	Standort	Strom	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Syngas	Synthese	Aufbereitung
1	AEL-MtK	MA	Wind/PV	AEL	DAC	-	MeOH	MtK
2	HTEL-MtK	MA	Wind/PV	HT-EL	DAC	-	MeOH	MtK
3	HTKO-FT	MA	Wind/PV	AEL	DAC	HT-KO	FT	Raffination
4	HTEL-MtK-Imp	DE-MA	Wind/PV	HT-EL (MA)	DAC (DE)	-	MeOH (DE)	MtK (DE)
5	AEL-MtK-Imp	DE-MA	Wind/PV	AEL (MA)	DAC (DE)	-	MeOH (DE)	MtK (DE)

MA = Marokko; DE = Deutschland; AEL = Alkalische Elektrolyse; HT-EL = Hochtemperatur-Elektrolyse; DAC = Direct Air Capture; HT-KO = Hochtemperatur-Ko-Elektrolyse; MeOH = Methanol-Synthese; FT = Fischer-Tropsch-Synthese; MtK = Methanol-to-Kerosin

Aus der Tabelle geht hervor, aus welchen Modulen die jeweiligen Pfade zusammengesetzt sind. Ein Teil der benötigten Module verfügt heute noch über einen niedrigen Technology Readiness Level (TRL) und ist noch nicht kommerziell verfügbar. Ausführliche Beschreibungen des Entwicklungsstandes der Technologiemodule finden sich in → *Teilbericht 3*. Die wichtigsten Eigenschaften und Annahmen zu den für die Ökobilanz benötigten Modulen werden nachfolgend zusammengefasst.

## Stromerzeugung

Für die Stromerzeugung werden nur Windenergieanlagen (WEA) an Land sowie Photovoltaikanlagen (PV) berücksichtigt. Die WEA werden aus dem ecoinvent-Prozess „*electricity production, wind, >3 MW turbine, onshore*“ unter Anpassung verschiedener Parameter erstellt. Nach Zelt et al. (2020) (→ *Teilbericht 3*) steigert sich deren Auslastungsfaktor von 40 % in 2020 auf 42 % in 2030 und auf 46 % in 2050. Somit ergeben sich mögliche Volllaststunden (VLS) von 3.504 h/a, 3.679 h/a und 4.030 h/a in der MENA-Region. Für PV-Anlagen wird davon ausgegangen, dass der Strom mit großen bodenmontierten Anlagen erzeugt wird (ecoinvent-Prozess: „*electricity production, photovoltaic, 570 kWp open ground installation, multi-Si*“). Um den in der MENA-Region vorherrschenden guten Solar-Bedingungen Rechnung zu tragen, werden die PV-Potenziale auf Grundlage des jährlichen kWh-Ertrages pro kWp angenommen. Für Marokko beträgt dieser im Durchschnitt 1.894 kWh/kWp (World Bank Group et al., 2022). Es wird vereinfachend angenommen, dass der Wert über den Betrachtungszeitraum konstant bleibt. Allerdings steigt die Umwandlungseffizienz der PV-Zellen von 17 % in 2020 auf 20 % in 2030 und auf 26 % in 2050 (Baumstark et al., 2021).

## Wärmebereitstellung

Für verschiedene Prozessschritte wird Wärme als Input benötigt. Eine Unterscheidung von unterschiedlichen Temperaturniveaus findet nicht statt. Für die Erzeugung von Wärme wird ausschließlich ein Elektrodenkessel eingesetzt. Dieser wird in der Ökobilanz nur als Umwandlung von Strom in Wärme mit einer Effizienz von 99 % abgebildet. Wie Müller et al. (2020) beschreiben, ist davon auszugehen, dass die Umweltwirkungen beim Bau des Elektrodenkessels vernachlässigbar sind.

## Wasseraufbereitung

In Deutschland kann der Wasserbedarf der Elektrolyse durch die Aufbereitung von Oberflächen- oder Grundwasser gedeckt werden. In der MENA-Region dagegen muss das Wasser aus Meerwasserentsalzungsanlagen gewonnen werden. Für die Ökobilanzen wird nur die Umkehrosmose (Seawater Reverse Osmosis; SWRO) betrachtet. Die Inventardaten beruhen auf Pichlmaier et al. (2021) und Liebich et al. (2020).

## Wasserstoffbereitstellung

Für die Wasserstoffbereitstellung werden zwei Optionen betrachtet: die alkalische Wasserstoffelektrolyse (AEL) und die Hochtemperatur-Elektrolyse (HT-EL). Die Inventardaten für beide Prozesse sind Pichlmaier et al. (2021) entnommen. Dort lassen sich auch Skalierungsfaktoren in Abhängigkeit der Leistung des Elektrolyseurs finden. Der Skalierungsfaktor wird mit 0,8 angegeben, d. h. bei Verdopplung der Leistung wird eine 1,8-fache Umweltbelastung angenommen.

## CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Bereitstellung

Als CO<sub>2</sub>-Quelle wird die Abscheidung aus der Luft berücksichtigt (Direct Air Capture, DAC). Die Inventardaten des DAC-Verfahrens sind aus Pichlmaier et al. (2021) entnommen und beruhen auf dem Niedertemperatur-Verfahren (NT-DAC) der

schweizerischen Firma Climeworks. Das Verfahren arbeitet im Wechsel zwischen Adsorption und Desorption. In der Adsorptionsphase wird Umgebungsluft in den Reaktor geleitet, das CO<sub>2</sub> an einem festen Sorbent gebunden und aus der Luft separiert. Die Luft wird anschließend wieder in die Atmosphäre geleitet. Die nötige Wärme wird mittels Wasserdampf zugeführt. Aktuelle Ökobilanzstudien zum NT-Verfahren lassen sich in Deutz und Bardow (2021), Madhu et al. (2021) und Terlouw et al. (2021) finden.

### **Methanol-Route**

Die Methanol-Route besteht aus zwei Kernprozessen. Aus den Ausgangsstoffen CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> wird zunächst Methanol synthetisiert und anschließend in einem zweiten Schritt zu Kerosin verarbeitet (Methanol-to-Kerosin, MtK). Rihko-Struckmann et al. (2010) stellen in ihrer techno-ökonomischen Bewertung ein Modell der CO<sub>2</sub>-basierten *Methanolsynthese* vor, die bei 220 °C und 50 bar abläuft. Das Modell beruht auf stöchiometrischen Annahmen und stellt so ein Best-Case-Szenario dar. In der Realität werden die benötigten Feedstock-Ströme allerdings aufgrund unvermeidlicher Verluste größer ausfallen (Bergins et al., 2016). Das Modell wird dennoch als Datengrundlage verwendet, da alle benötigten Energie- und Stoffströme detailliert beschrieben sind. Daten zum Bau der Anlage können allerdings aufgrund fehlender Informationen nur näherungsweise mit dem allgemeinen Anlagentypus „*chemical factory, organics*“ der ecoinvent-Datenbank abgeschätzt werden.

Im anschließenden *MtK-Prozess* entsteht in der Praxis neben Kerosin ein Produktspektrum an LPG, Benzin, und Diesel. Aufgrund der wenigen Informationen über mögliche Produktverteilungen in den einzelnen MtK-Teilprozessen und insbesondere in miteinander kombinierten Prozessen wird eine vereinfachte Produktzusammensetzung auf Basis des MtSynfuels-Prozesses des Unternehmens Lurgi (heute Air Liquide) definiert. Die massenbezogene Verteilung liegt für Benzin, Kerosin und Diesel bei 11:48:31 (Albrecht et al., 2013), die über die Jahre als konstant angenommen wird. Des Weiteren entsteht ein nicht vermeidbarer Anteil an gasförmigen Nebenprodukten, die jedoch überwiegend zusammen mit nicht umgesetztem Methanol zurückgeführt werden und die Ausbeute an flüssigen KWS erhöhen (Arndt et al., 2021).

### **Fischer-Tropsch-Route**

In der Fischer-Tropsch-Route kann im Gegensatz zur Methanol-Route das CO<sub>2</sub> nicht direkt eingesetzt, sondern muss über einen zusätzlichen Schritt zunächst in ein Synthesegas (kurz: Syngas, Gemisch aus CO und H<sub>2</sub>) umgesetzt werden. Dieses Syngas kann aus den Edukten CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O simultan in einer Hochtemperatur-KO-Elektrolyse (HT-KO) erzeugt werden. Für die FT-Synthese wird üblicherweise Syngas mit einer molaren Zusammensetzung von etwa 2:1 (H<sub>2</sub>:CO) benötigt. Die HT-KO entspricht in ihrem Aufbau der HT-EL, kann aber neben Wasser gleichzeitig CO<sub>2</sub> spalten. Die hier verwendeten Daten für die HT-KO beruhen deshalb auf den HT-EL-Daten aus Pichlmaier et al. (2021) und werden mit Annahmen von Smolinka et al. (2018) und Zelt et al. (2020) (→ *Teilbericht 3*) für den KO-Elektrolyse-Betrieb angepasst.

Im Mittelpunkt der FT-Route steht jedoch die FT-Synthese. Das Syngas wird dem FT-Reaktor zugeführt, wobei in Anwesenheit eines metallischen Katalysators (typischerweise eisen- oder kobalthaltige Materialien) flüssige Kohlenwasserstoffketten unter-

schiedlicher Länge entstehen. Das flüssige Produkt ( $C_{4+}$ – $C_{20}$ ) wird als Syncrude bezeichnet. Die Kettenlängen können im weiteren Prozess mittels Hydrocracken eingestellt werden, wobei langkettige KWS in die gewünschte Länge gespalten werden. Für die Herstellung von Kerosin eignet sich vor allem die Niedertemperatur-Synthese, da deren Hauptproduktanteil im Bereich der Kerosin- und Dieselfraktion liegt. Da die Verfügbarkeit von Inventardaten für die FT-Synthese insbesondere in Verbindung mit einer HT-KO stark begrenzt ist, adaptieren von der Assen et al. (2016) Daten einer erdgasbetriebenen FT-Synthese, der eine reverse Wassergas-Shift-Reaktion (rWGS) vorausgeht, und passen diese für den Betrieb mit einer HT-KO-Elektrolyse an. Aufgrund fehlender alternativer Quellen werden diese adaptierten Daten auch für die hier durchgeführten Ökobilanzen verwendet.

### Transport

Es wird angenommen, dass der gesamte Import des Kerosins (Pfade 1, 2 und 3) und Wasserstoffs (Pfade 4 und 5) über Pipelines (On- und Offshore) erfolgt. Für den Kerosin-Transport wird vereinfachend der ecoinvent-Prozess *„transport, pipeline, petroleum“* angenommen. Für Wasserstoff-Pipelines wird auf die Arbeiten von Wulf et al. (2018) zurückgegriffen. Des Weiteren werden nur direkte Transportrouten zwischen Marokko als exemplarischem Lieferland der MENA-Region und Deutschland implementiert. Das Ende aller Pfade ist der hypothetische Mittelpunkt Deutschlands. An diesem fiktiven Zielort wird keine Speicherung der Produkte berücksichtigt. Startpunkt für alle Verbindungen ist der Küstenmittelpunkt. Die Entfernung von Marokko nach Deutschland wird mit 3.500 km angenommen, wovon 2.500 km onshore und 1.000 km offshore zu bewältigen sind.

### Fossile Referenz

Als Referenz-Prozess wird die Produktion von Kerosin in einer konventionellen Erdöl-Raffinerie gewählt (ecoinvent-Prozess: *„kerosene production, petroleum refinery operation“*). Der ecoinvent-Datensatz beschreibt den Betrieb einer repräsentativen, durchschnittlichen Erdölraffinerie in Europa. Da davon auszugehen ist, dass das technische Optimum bereits erreicht ist, werden für die Zukunft keine weiteren Verbesserungspotenziale angenommen.

### 3 Ergebnisse der Ökobilanzen

Nachfolgend werden mit Fokus auf das Zieljahr 2050 exemplarisch zentrale Ökobilanzergebnisse der betrachteten Bereitstellungspfade vorgestellt. In Kapitel 3.1–3.3 werden die Auswirkungen auf das Klima und der Energieaufwand als Leitindikatoren sowie weitere Wirkungssindikatoren im Überblick für die verschiedenen Pfade dargestellt. Des Weiteren werden die Umweltwirkungen der Pfade auf die fossile Referenz normiert, um die direkten Be- und Entlastungen durch die neuen Pfade beurteilen zu können. In Kapitel 3.4 erfolgt eine Dominanzanalyse, welche die Beiträge der einzelnen Prozessschritte der Pfade herausarbeitet. Dort wird außerdem analysiert, welche Materialien und Energieflüsse für die größten Beiträge verantwortlich sind. Die gesamten Ergebnisse der Ökobilanzen können Jülich (2022) entnommen werden.

#### 3.1 Erderwärmungspotenzial

Das Erderwärmungspotenzial ( $GWP_{100}$ ) dient als Leitindikator dafür, ob die neuen Technologien zu den Minderungszielen des Pariser Klimaschutzabkommens beitragen können. Es wird getrennt für die fossile Referenz und die PtL-Routen abgebildet.

##### 3.1.1 Referenzroute

Die Ergebnisse der Referenz dienen als Benchmark für den Vergleich mit den PtL-Pfaden. Abb. 3-1 zeigt die Entwicklung des  $GWP_{100}$  über die drei Betrachtungsjahre. Durch die Anpassung der Hintergrunddaten mittels *premise* sinkt das  $GWP_{100}$  des Referenzprozesses von 10,61 g  $CO_2$ -Äq./MJ auf 9,18 g  $CO_2$ -Äq./MJ Kerosin. Diese Minderung ist, obwohl keine Verbesserungspotenziale für den Raffination-Prozess selbst angenommen werden, durch Anpassungen der Erdölförderung (-26 %) in den modifizierten Hintergrunddaten zu erklären.

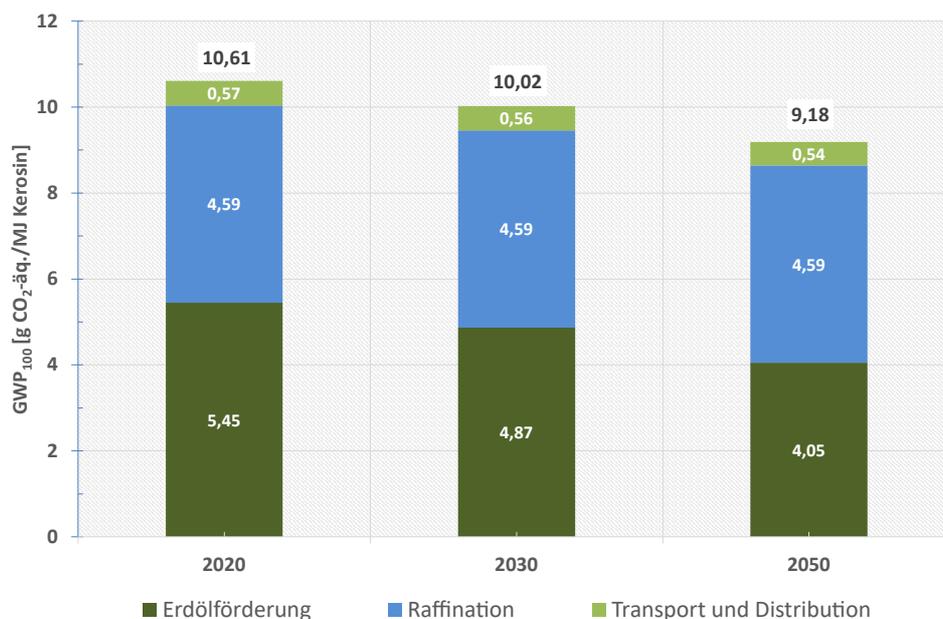


Abb. 3-1 Entwicklung des  $GWP_{100}$  der fossilen Referenz über die Betrachtungsjahre

Zusätzlich zu den Emissionen der Herstellungsphase kommt es zu weiteren Emissionen während der Nutzungsphase bzw. der Verbrennung des Kerosins. Bei der Verbrennung von Kerosin entstehen etwa 3,14 kg CO<sub>2</sub>/kg Kerosin. Das entspricht bei einem Heizwert von 42,8 MJ/kg etwa 73,4 g CO<sub>2</sub>-Äq./MJ. Unter der Annahme, dass synthetisches und fossiles Kerosin chemisch identisch sind, wird die gleiche Menge an CO<sub>2</sub> ebenfalls bei der Verbrennung des synthetischen Kerosins emittiert. Insgesamt ergeben sich für die fossile Referenz also 84 g CO<sub>2</sub>-Äq./MJ Kerosin 2020, 83,4 g CO<sub>2</sub>-Äq./MJ für 2030 und 82,6 g CO<sub>2</sub>-Äq./MJ 2050.

### 3.1.2 PtL-Routen

Um eine mögliche Verbesserung der Klimawirkungen durch die PtL-Pfade zu identifizieren, wird in Abb. 3-2 die fossile Referenz mit den ausgewählten PtL-Pfaden aus Kapitel 2.3 verglichen. Die Abbildung stellt das GWP<sub>100</sub> der fossilen Referenz (erster Balken und waagerechter Strich) im Vergleich zu den PtL-Pfaden für das Betrachtungsjahr 2050 dar – jeweils unterteilt in Herstellung, aus der Atmosphäre aufgenommenes CO<sub>2</sub> und während der Verbrennung emittiertes CO<sub>2</sub>.



Abb. 3-2 GWP<sub>100</sub> der PtL-Pfade für das Jahr 2050 im Vergleich zur fossilen Referenz

Neben den Pfaden **1**, **2** und **3**, die den Import von Kerosin darstellen, werden auch die Pfade **4** und **5** abgebildet, die auf dem Import von H<sub>2</sub> und anschließender Synthese in Deutschland beruhen. Durch die Aufnahme von atmosphärischem CO<sub>2</sub> in den PtL-Routen ergeben sich, trotz höherer CO<sub>2</sub>-Emissionen während der Herstellungsphase, bilanziell deutlich geringere Belastungen gegenüber der Referenz. Für die Methanol-Pfade (**1**, **2**, **4** und **5**) liegen diese negativen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei -77,2 g CO<sub>2</sub>-Äq./MJ Kerosin und für den FT-Pfad (**3**) bei -75,6 g CO<sub>2</sub>-Äq./MJ Kerosin.

Die geringsten Netto-Emissionen weist Pfad **3** (*HTKO-FT*) mit 5,9 g CO<sub>2</sub>-Äq./MJ Kerosin auf, die höchste Belastung Pfad **5** (*AEL-MtK-IMP*) mit 35,5 g CO<sub>2</sub>-Äq./MJ. Dies entspricht einer Minderung von 84 % bzw. 57 % gegenüber der Referenz. Die deutlich höheren Nettoemissionen bei den Pfaden mit H<sub>2</sub>-Import (Pfad **4** und **5**) sind einerseits

durch Transportverluste und damit verbundene Wasserstoffemissionen mit entsprechender Klimawirkung zu erklären, andererseits müssen diese Verluste durch eine erhöhte Wasserstoffproduktion wieder ausgeglichen werden. Durch die Aufnahme des atmosphärischen CO<sub>2</sub> sinken die Netto-Emissionen aber deutlich unter den Referenzwert von 82,5 g CO<sub>2</sub>-Äq./MJ Kerosin. Insgesamt ergeben sich netto aber keine negativen Emissionen für die Bereitstellung des synthetischen Kerosins. Allerdings zeigt Abb. 3-2 auch, dass die Emissionen während der Herstellung für die PtL-Pfade deutlich höher ausfallen können als für die Referenz. So führt die Herstellung bei Pfad **1** und **2** zu fast doppelt so hohen Emissionen wie die Referenz mit 9,2 g CO<sub>2</sub>-Äq./MJ Kerosin. Noch deutlicher fällt die Erhöhung bei den H<sub>2</sub>-Importpfaden **4** und **5** aus. Hier kommt es zu einer Vervielfachung der Emissionen gegenüber der Referenz. Lediglich der FT-Pfad (**3**) schneidet besser ab und führt mit 8,1 g CO<sub>2</sub>-Äq./MJ Kerosin zu einer Minderung des GWP<sub>100</sub> von etwa 10 % gegenüber der Referenz.

Wird nur die Herstellung und der Transport ohne die Verbrennung betrachtet, reicht das GWP<sub>100</sub> der Methanol-Route von -59,8 g CO<sub>2</sub>-Äq./MJ Kerosin (Pfad **1**) bis -60 g CO<sub>2</sub>-Äq./MJ Kerosin (Pfad **2**). Über die FT-Route kann ein negatives GWP<sub>100</sub> von -67,5 g CO<sub>2</sub>-Äq./MJ für den Pfad **3** erreicht werden. Für die H<sub>2</sub>-Importpfade **4** und **5** ergeben sich durch die höheren Emissionen der Herstellungsphase nur etwa die Hälfte an negativen Emissionen (-38,1 bzw. -37,8 g CO<sub>2</sub>-Äq./MJ Kerosin).

### 3.2 Kumulierter Energieaufwand

Über den kumulierten Energieaufwand (KEA) kann des Weiteren dargestellt werden, wie viel Energie über den gesamten Herstellungsprozess benötigt wird. Der KEA stellt somit den Primärenergieverbrauch für die Bereitstellung des synthetischen Kerosins dar. So ermöglicht er eine energetische Beurteilung und einen Vergleich zwischen den Pfaden und der Referenz. Der KEA lässt sich weiter in einen fossilen und einen erneuerbaren Anteil unterteilen. In Abb. 3-3 ist der KEA des Jahres 2050 für alle PtL-Pfade im Vergleich zur Referenz dargestellt.

Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen der Referenz und den PtL-Pfaden zu erkennen. Während für die Referenz fast ausschließlich fossile Energie eingesetzt wird, werden bei den PtL-Pfaden fast ausschließlich erneuerbare Energien eingesetzt. Der Anteil erneuerbarer Energien ist für die fossile Referenz vernachlässigbar klein und liegt bei etwa 1 %. Für die PtL-Pfade liegt der Anteil erneuerbarer Energien dagegen bei etwa 95 %. Außerdem wird deutlich, dass für die Bereitstellung von 1 MJ synthetischen Kerosins mindestens doppelt so viel Primärenergie (2,56–3,29 MJ/MJ Kerosin) notwendig ist wie bei der fossilen Referenz (1,24 MJ/MJ Kerosin). Am geringsten liegt der Verbrauch bei Pfad **1** mit 2,56 MJ/MJ Kerosin, am höchsten bei Pfad **5** mit 3,29 MJ/MJ Kerosin. Diesen Werten lässt sich entnehmen, dass teils deutlich weniger als die Hälfte der eingesetzten Energie in den Endprodukten der PtL-Routen gespeichert ist. Gleichzeitig sinkt allerdings der Verbrauch an fossiler Primärenergie stark. So liegt die Verringerung gegenüber der Referenz bei 87 % bei Pfad **5** und bis zu 92 % bei Pfad **3**.

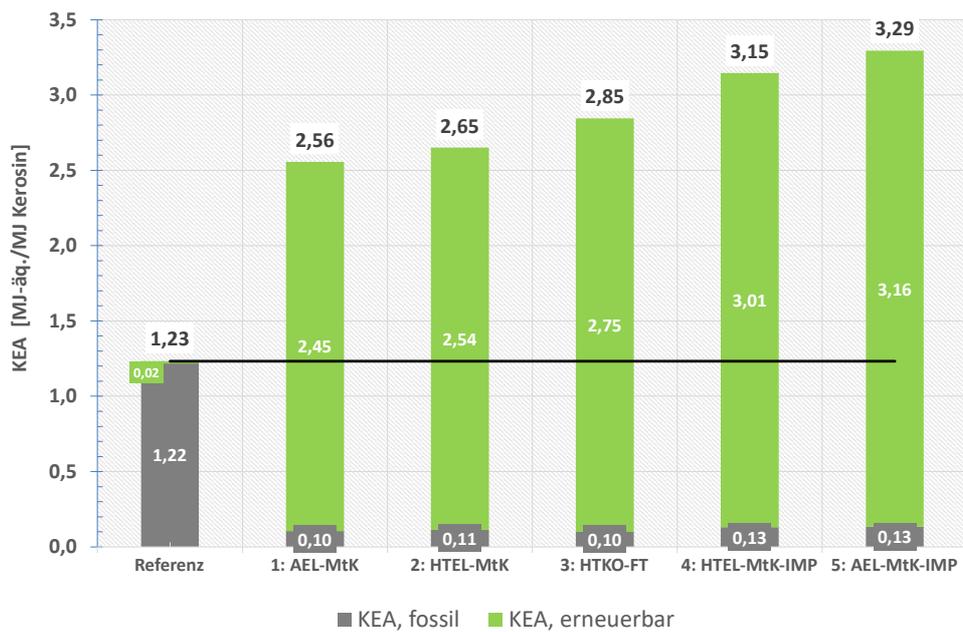


Abb. 3-3 KEA der PtL-Pfade und der Referenz für das Jahr 2050

### 3.3 Weitere Wirkungskategorien

Im Gegensatz zum  $GWP_{100}$  zeigen alle Pfade in den meisten anderen Wirkungskategorien eine deutliche Erhöhung der Umweltbelastung im Vergleich zur fossilen Referenz. In Abb. 3-4 sind exemplarisch für das Jahr 2050 die Umweltbelastungen für Pfad 1 (AEL-MtK), normiert auf die fossile Referenz, dargestellt.

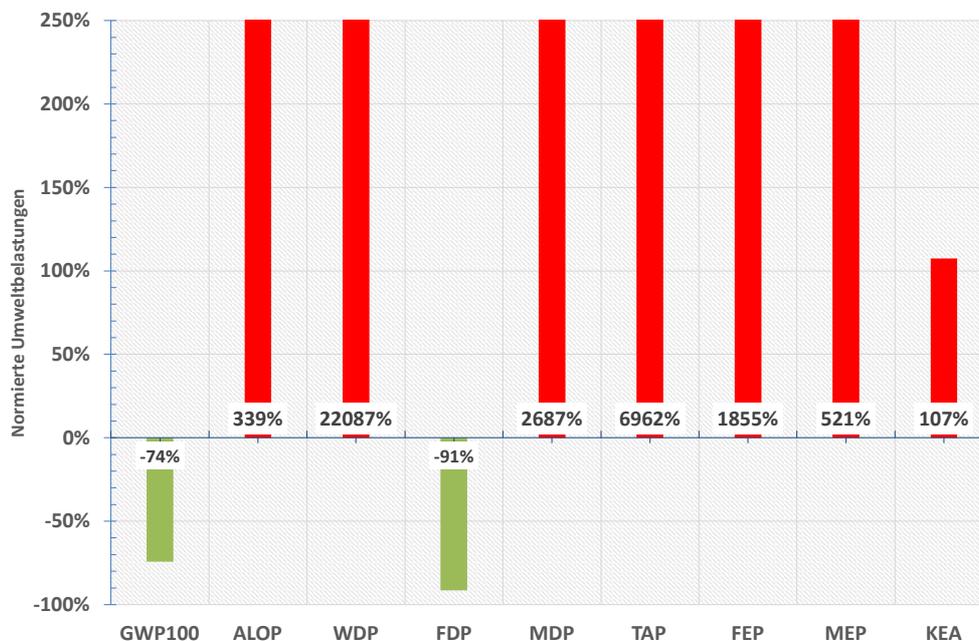


Abb. 3-4 Normierte Umweltbelastungen für Pfad 1 für 2050 in verschiedenen Wirkungskategorien

Es ist zu erkennen, dass Pfad **1** nur in den Wirkungskategorien  $GWP_{100}$  und FDP (Verbrauch fossiler Rohstoffe) die Umwelt im Vergleich zu Referenz entlasten kann. Für das  $GWP_{100}$  ergibt sich mit Berücksichtigung der Verbrennung eine Minderung von 74 % gegenüber der Referenz. Für den Indikator FDP ergeben sich Minderungen von 91 % gegenüber der Referenz. In den anderen Wirkungskategorien kann synthetisches Kerosin jedoch zu einer deutlichen Mehrbelastung der Umwelt führen. Besonders auffällig ist der hohe Mehrverbrauch an Wasser (WDP) und die terrestrische Versauerung (TAP) durch die PtL-Pfade, die bei 22.087 % bzw. bei 6.962 % liegen und damit im Vergleich zur fossilen Referenz mehr als das 2.000-fache (WDP) bzw. 600-fache (TAP) ausmachen. Auch in den Wirkungskategorien Landwirtschaftliche Landbesetzung (Agricultural Land Occupation Potential, ALOP) und Verbrauch mineralischer Rohstoffe (MDP) sowie Frischwasser- bzw. Meereseutrophierung (Freshwater Eutrophication Potential, FEP bzw. Marine Eutrophication Potential, MEP) wird die Umwelt deutlich mehr durch synthetisches Kerosin belastet, als dies bei der fossilen Referenz der Fall ist. Der KEA steigt, wie schon in Kapitel 3.2 beschrieben, um etwa das Doppelte (107 %).

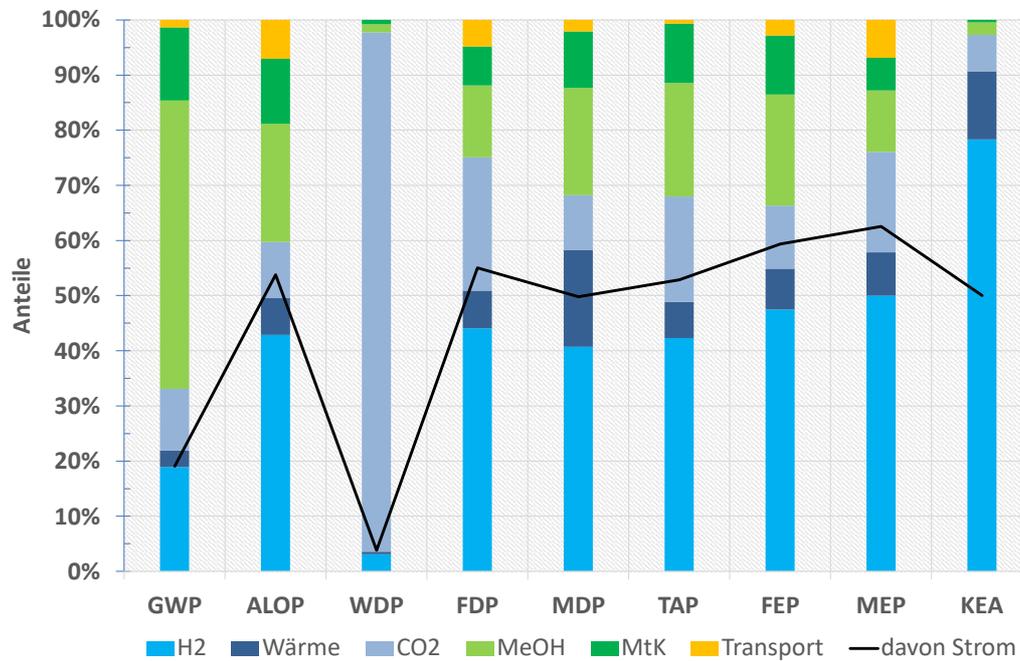
Zusammenfassend zeigt sich also die Notwendigkeit, neben GWP und KEA auch weitere Wirkungskategorien in die Bewertung mit einfließen zu lassen, da neuartige Technologien in diesen Kategorien teilweise deutlich schlechter abschneiden als etablierte Referenztechnologien. Eine Reduzierung nur auf das GWP und den KEA als Leitindikatoren könnte dagegen aus ganzheitlicher ökologischer Sicht zu Fehlinterpretationen führen.

### 3.4 Dominanzanalyse

In der Dominanzanalyse wird untersucht, welche Prozessschritte die größten Beiträge an den Umweltwirkungen haben. Abb. 3-5 zeigt die Beiträge der einzelnen Prozessschritte (vgl. Abb. 2-2 und Abb. 2-3) an allen untersuchten Wirkungskategorien exemplarisch für den Pfad AEL-MtK (**1**). Die schwarze Linie kennzeichnet den aufsummierten, prozentualen Anteil der Umweltwirkungen des für die Prozessschritte benötigten Stroms. Es ist zu erkennen, dass der Stromverbrauch in fast allen Kategorien zwischen 50 % und 60 % beiträgt. Lediglich in der Kategorie  $GWP_{100}$  und WDP liegen die Anteile deutlich niedriger (18 % und 3 %).

Strom wird in den PtL-Pfaden hauptsächlich für die Wasserstofferzeugung und die Wärmebereitstellung benötigt, weshalb die Beiträge der beiden Prozessschritte mit der schwarzen Linie korrelieren. Für die anderen Prozessschritte wird vergleichsweise wenig Strom benötigt, weshalb hier keine Korrelation zwischen Strom und den übrigen Prozessschritten zu erkennen ist. Außerdem zeigt die Abbildung, dass in allen Kategorien die größten Beiträge aus den Prozessschritten Wasserstofferzeugung,  $CO_2$ -Abscheidung und Methanolsynthese stammen. Auffällig ist auch, dass die Methanolsynthese beim  $GWP_{100}$  einen Anteil von etwa 50 % hat, in den anderen Kategorien jedoch maximal 25 %. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass bei der Methanolsynthese neben Methanol gasförmige Koppelprodukte entstehen, die entweder direkt zur internen Strom- oder Wärmeversorgung genutzt oder in den Reaktor zurückgeführt werden. Allerdings entstehen bei der direkten Nutzung sowohl  $CO_2$ - als auch  $H_2$ -Emissionen. Um die Anreicherung von Inertgasen zu vermeiden, muss außerdem ein gewisser Anteil dieser Koppelprodukte als Abgas abgeführt werden. Des Weiteren ist

hervorzuheben, dass der Wasserverbrauch hauptsächlich (95 %) durch die CO<sub>2</sub>-Abscheidung bedingt ist. Der MtK-Prozess und der Transport machen hingegen in fast allen Kategorien nur kleinere Anteile aus.



**Abb. 3-5 Dominanzanalyse der einzelnen Prozessschritte von Pfad 1 für das Jahr 2050 bei verschiedenen Wirkungskategorien**

## 4 Fazit

Die Ergebnisse der Ökobilanzen lassen sich wie folgt zusammenfassen und einordnen:

- **Hohe THG-Minderung erreichbar:** Insbesondere für die Kernaufgabe, der Reduktion von THG-Emissionen im Flugverkehr, kann der Einsatz von Synfuels einen großen Beitrag leisten, falls CO<sub>2</sub> aus der Abscheidung aus der Atmosphäre (DAC) verwendet wird, das als „klimaneutral“ gilt. Durch die Aufnahme von atmosphärischem CO<sub>2</sub> in den PtL-Routen ergeben sich – trotz höherer THG-Emissionen während der Herstellungsphase – bilanziell für die Erzeugung einschließlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verbrennung des Kraftstoffs deutlich geringere Belastungen gegenüber der Referenz. Diese entsprechen je nach Pfad einer Netto-Minderung um 57–84 %. In der Wirkungskategorie Klimawandel (GWP<sub>100</sub>) schneiden demnach alle betrachteten synthetischen Pfade im Jahr 2050 besser ab als fossiles Kerosin. Es zeigt sich allerdings auch, dass über die betrachteten Pfade trotz des Einsatzes von DAC-Technologien keine CO<sub>2</sub>-Neutralität erreichbar ist.
- **Nachteile in Bezug auf weitere Wirkungsindikatoren:** Die mehrstufigen Prozessketten zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe sind tendenziell mit einem größeren technischen Aufwand verbunden als die Förderung und Raffination von fossilem Rohöl. Für die exemplarisch untersuchten PtL-Prozessketten zur Herstellung synthetischen Kerosins über die Fischer-Tropsch- sowie über die Methanol-Route zeigt sich deshalb, dass der synthetische Kraftstoff in allen Wirkungskategorien mit Ausnahme des GWP<sub>100</sub> und des Verbrauchs fossiler Rohstoffe (FDP) schlechter abschneidet als die fossile Referenz. Dies gilt beispielsweise für die Indikatoren Landnutzung, terrestrische Versauerung und Eutrophierung sowie für den kumulierten Energieaufwand. So wird für alle betrachteten synthetischen Pfade im Vergleich zur Referenz etwa die doppelte Menge Primärenergie für die Kraftstoffbereitstellung benötigt.
- **Zentrale Einflussfaktoren:** Das schlechtere Abschneiden der synthetischen Kraftstoffe in Bezug auf zahlreiche Wirkungsindikatoren ist in erster Linie durch den hohen Bedarf an Energie zur Wasserstoffherzeugung und CO<sub>2</sub>-Bereitstellung begründet, aber auch durch die ebenfalls höheren Rohstoffbedarfe bei der Errichtung der PtL-Anlagen. Die Art der Stromquelle und die Wärmebereitstellung kristallisieren sich als wesentliche Einflussfaktoren auf die Umweltwirkungen heraus, wobei sich die Nutzung ausschließlich erneuerbarer Quellen an Standorten mit hohen Volllaststunden als vorteilhaft erweist.
- **Übereinstimmung mit der Literatur:** Die erzielten Ergebnisse in Bezug auf unterschiedliche Wirkungsindikatoren decken sich mit Einschätzungen der einschlägigen Fachliteratur. Je nach angenommener CO<sub>2</sub>-Quelle schneiden die synthetischen Kraftstoffe in der Literatur teilweise allerdings auch beim GWP<sub>100</sub> schlechter ab als im vorliegenden Bericht beschrieben. Ebenso stimmt das schlechtere Abschneiden in Bezug auf weitere Wirkungskategorien beispielsweise mit den Erkenntnissen von Liebich et al. (2020) oder Ausfelder et al. (2021) überein. Auch dass sich in den hier erzielten Ergebnissen keine CO<sub>2</sub>-Neutralität ab einer bestimmten CO<sub>2</sub>-Intensität des Stromes einstellt, deckt sich mit Analysen von Ueckerdt et al. (2021). Selbst im Jahr 2050 und bei Speisung der PtL-Anlage ausschließlich mit erneuerbarem Strom entstehen nach wie vor klimawirksame Rest-

emissionen bei der Herstellung und dem Transport nach Deutschland – zum einem durch nicht vollständig defossilisierte Vorketten und zum anderen durch Restemissionen und H<sub>2</sub>-Verluste mit indirektem Erderwärmungspotenzial (vgl. Pfad 4 und 5).

- **Vorteilhaftigkeit des Transports finaler Kraftstoffe:** Die Ergebnisse verdeutlichen auch, dass der Import von Wasserstoff als Zwischenprodukt zu deutlich größeren Umweltbelastungen führt als der Import von in der MENA-Region direkt synthetisierten Kerosins. Der Langstreckentransport von Wasserstoff ist durch dessen Diffusionsvermögen mit hohen Verlusten und daher auch mit erhöhtem Energieverbrauch und einer indirekten Klimawirkung durch die erhöhte Wasserstoff-Konzentration in der Atmosphäre verbunden (vergleiche Kapitel 2.2). Das indirekte Erderwärmungspotenzial für Wasserstoff sollte deshalb in zukünftigen Betrachtungen einer Wasserstoffwirtschaft berücksichtigt werden – vor allem, wenn dieser über große Distanzen transportiert wird. Nach eigener Einschätzung vernachlässigen bisherige Betrachtungen zu Langstreckentransporten oder allgemein zu Wasserstofftechnologien diese zusätzliche Wirkung, weshalb bisher angegebene Erderwärmungs-Potenziale zu niedrig angenommen sein könnten. Die räumliche Trennung der Wasserstoff- und Kraftstofferzeugung unterbindet zudem die Synergieeffekte einer Wärme- und Wasserintegration der verschiedenen Teilprozesse. Es empfiehlt sich daher, über große Entfernungen nicht den benötigten Wasserstoff, sondern den finalen Kraftstoff zu transportieren. Darüber hinaus sollte ein weiteres Augenmerk auf die Verhinderung von Leckagen gelegt werden, um die Wasserstoffkonzentration in der Atmosphäre und die damit verbundenen Auswirkungen auf das Klima niedrig zu halten.

## 5 Literaturverzeichnis

### Zitierte Literatur

- Albrecht, U., Schmidt, P., Weindorf, W., Wurster, R., Zittel, W. (2013). Zukünftige Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren und Gasturbinen: Eine Expertise für die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen eV (FVV). Ludwig-Bölkow-Systemtechnik.
- Arndt, C., Neuling, U., Vorsatz, M., Molzberger, U., Prause, J., Le Clercq, P., Frech, G., Tauchnitz, H., Wollenweber, H., Jänisch, T. (2021). Konzeptionelle und technische Ausgestaltung einer Entwicklungsplattform für Power-to-Liquid-Kraftstoffe: Abschlussbericht. NOW GmbH. [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/08/EPP\\_Abschlussbericht.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/08/EPP_Abschlussbericht.pdf)
- Arvidsson, R., Tillman, A.-M., Sandén, B. A., Janssen, M., Nordöf, 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>
- Ausfelder, F., Dura, H., Bauer, F., Fröhlich, T., Cadavid, A., Gawlick, J., De la Rua, C., Hamacher, T., Kotzur, L., Hildbrand, J., et al. (2021). 3. Roadmap des Kopernikus-Projektes P2X Phase II - OPTIONEN FÜR EIN NACHHALTIGES ENERGIESYSTEM MIT POWER-TO-XTECHNOLOGIEN. DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
- Baumstark, L., Bauer, N., Benke, F., Bertram, C., Bi, S., Gong, C. C., Dietrich, J. P., Dirnaichner, A., Giannousakis, A., Hilaire, J., Klein, D., Koch, J., Leimbach, M., Levesque, A., Madeddu, S., Malik, A., Merfort, A., Merfort, L., Odenweller, A., Luderer, G. (2021). REMIND2.1: Transformation and innovation dynamics of the energy-economic system within climate and sustainability limits. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2021, 1–50. <https://doi.org/10.5194/gmd-2021-85>
- 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>
- Bergins, C., Fox, E. L., Tran, K. C., Wuebben, P. (2016). Commercialization of Low Carbon Methanol. *ATZextra worldwide*, 21(S11), 22–25. <https://doi.org/10.1007/s40111-015-0517-0>
- Cox, B., Mutel, C. L., Bauer, C., Beltran, A. M., van Vuuren, D. P. (2018). Uncertain Environmental Footprint of Current and Future Battery Electric Vehicles. *Environmental Science & Technology*, 52(8), 4989–4995. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00261>
- Deutz, S., Bardow, A. (2021). Life-cycle assessment of an industrial direct air capture process based on temperature–vacuum swing adsorption. *Nature Energy*, 6(2), 203–213. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00771-9>

- 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).
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., van Zelm, R. (2016). ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- IPCC (2014). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. In Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- IPCC (2018). Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5 °C*. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above preindustrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://ipcc.ch/report/sr15/>
- Jülich, A. (2022). Prospektive Ökobilanzen von Power-to-Liquid-Pfaden: Herstellung von Flugzeugtreibstoff für die Bereitstellung in Deutschland [Masterarbeit]. Ruhr-Universität Bochum in Kooperation mit Wuppertal Institut.
- Liebich, A., Fröhlich, T., Münther, D., Fehrenbach, H., Giegrich, J., Köppen, S., Dünnbeil, F., Knörr, W., Biemann, K., Simon, S. (2020). Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte\\_2020\\_68\\_systemvergleich\\_speicherbarer\\_energetraeger\\_aus\\_erneuerbaren\\_energien.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_2020_68_systemvergleich_speicherbarer_energetraeger_aus_erneuerbaren_energien.pdf)
- Madhu, K., Pauliuk, S., Dhathri, S., Creutzig, F. (2021). Understanding environmental trade-offs and resource demand of direct air capture technologies through comparative life-cycle assessment. *Nature Energy*, 6(11), 1035–1044. <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00922-6>
- Müller, L. J., Kätelhön, A., Bachmann, M., Zimmermann, A., Sternberg, A., Bardow, A. (2020). A Guideline for Life Cycle Assessment of Carbon Capture and Utilization. *Frontiers in Energy Research*, 8. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00015>
- 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>

- Pichlmaier, S., Regett, A., Kigle, S., Haas, S., Feinauer, M., Oswald, M. (2021). Ökobilanzen synthetischer Kraftstoffe—Methodikleitfaden. Forschungsstelle für Energiewirtschaft eV (FfE). <https://www.ffe.de/projekte/beniver-begleitforschung-energiewende-im-verkehr/>
- Premise. (2021). Premise—Documentation. Potsdam Institute for Climate Impact Research & Paul Scherrer Institut. <https://premise.readthedocs.io/en/latest/>
- 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>
- Rihko-Struckmann, L. K., Peschel, A., Hanke-Rauschenbach, R., Sundmacher, K. (2010). Assessment of Methanol Synthesis Utilizing Exhaust CO<sub>2</sub> for Chemical Storage of Electrical Energy. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(21), 11073–11078. <https://doi.org/10.1021/ie100508w>
- 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., Daïoglou, 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>
- Smolinka, T., Wiebe, N., Sterchele, P., Palzer, A., Lehner, F., Jansen, M., Kiemel, S., Miehe, R., Wahren, S., Zimmermann, F. (2018). Studie IndWEDe; Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme. NOW GmbH, Natioanle Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie.
- 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., 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>

- Terlouw, T., Treyer, K., Bauer, C., Mazzotti, M. (2021). Life Cycle Assessment of Direct Air Carbon Capture and Storage with Low-Carbon Energy Sources. *Environmental Science & Technology*, 55(16), 11397–11411. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03263>
- 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>
- Ueckerdt, F., Bauer, C., Dirnaichner, A., Everall, J., Sacchi, R., Luderer, G. (2021). Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 11(5), 384–393. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01032-7>
- VDI (2012). VDI 4600:2012-01 Kumulierter Energieaufwand (KEA)—Begriffe, Berechnungsmethoden.
- von der Assen, N., Müller, L. J., Steingrube, A., Voll, P., Bardow, A. (2016). Selecting CO<sub>2</sub> Sources for CO<sub>2</sub> Utilization by Environmental-Merit-Order Curves. *Environmental Science & Technology*, 50(3), 1093–1101. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03474>
- Warwick, N., Griffiths, P., Keeble, J., Archibald, A., Pyle, J. (2022). Atmospheric implications of increased Hydrogen use: Research into the atmospheric impacts of fugitive hydrogen emissions in a future UK hydrogen economy. Government of UK: Department for Business, Energy & Industrial Strategy. <https://www.gov.uk/government/publications/atmospheric-implications-of-increased-hydrogen-use>
- 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>
- World Bank Group, ESMAP, SOLARGIS. (2022). Global Solar Atlas. <https://globalsolaratlas.info/>
- Wulf, C., Reuß, M., Grube, T., Zapp, P., Robinius, M., Hake, J.-F., Stolten, D. (2018). Life Cycle Assessment of hydrogen transport and distribution options. *Journal of Cleaner Production*, 199, 431–443. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.180>

## Teilberichte

- Acosta-Fernández, J., Viebahn, P., Hanke, T., Block, S. (2023). Gesamtwirtschaftliche Effekte von Investitionen zur Versorgung Deutschlands mit Wasserstoff und synthetischen Energieträgern aus der MENA-Region. MENA-Fuels: Teilbericht 13 des Wuppertal Instituts an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- Braun, J., Kern, J., Scholz, Y., Hu, W., Moser, M., Schillings, C., Simon, S., Ersoy, S. R., Terrapon-Pfaff, J. (2022). Technische und risikobewertete Kosten-Potenzial-Analyse der MENA-Region. MENA-Fuels: Teilbericht 10 des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und des Wuppertal Instituts an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- Doré, L., Krüger, C., Janßen, T. (2022). Weitere Szenarioanalysen: Berücksichtigung von Investitionsrisiken und Sensitivitäten der Basisszenarien. MENA-Fuels: Teilbericht 7 des Wuppertal Instituts an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- Ersoy, S. R., Terrapon-Pfaff, J., Viebahn, P., Pregger, T., Braun, J. (2022). Synthese der Kurzstudien für Jordanien, Marokko und Oman. MENA-Fuels: Teilbericht 11 des Wuppertal Instituts und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- Horst, J., Klann, U. (2022). MENA-Fuels—Analyse eines globalen Marktes für Wasserstoff und synthetische Energieträger hinsichtlich künftiger Handelsbeziehungen. MENA-Fuels: Teilbericht 12 des Instituts für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme (IZES) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- 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).
- Krüger, C., Doré, L. (2022). Nachfrageszenarien – Storylines und Herleitung der Entwicklung der Nachfrage nach Synfuels und Grundstoffen. MENA-Fuels: Teilbericht 5 des Wuppertal Instituts an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- Krüger, C., Doré, L., Janßen, T. (2022). Basisszenarien – Ergebnisse und Infrastrukturauswertung. MENA-Fuels: Teilbericht 6 des Wuppertal Instituts an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- Pregger, T. (2022). Szenarien zur Eigenbedarfsanalyse für die MENA-Länder. MENA-Fuels: Teilbericht 9 des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- Saurat, M., Doré, L., Janßen, T., Kiefer, S., Krüger, C., Nebel, A. (2022). Beschreibung des Energieversorgungsmodells WISEE-ESM-I. MENA-Fuels: Teilbericht 4 des Wuppertal Instituts an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).

- Terrapon-Pfaff, J., Prantner, M., Ersoy, S. R. (2022). Risikobewertung und Risikokostenanalyse der MENA-Region. MENA-Fuels: Teilbericht 8 des Wuppertal Instituts an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- Viebahn, P., Kern, J., Horst, J., Rosenstiel, A., Terrapon-Pfaff, J., Doré, L., Krüger, C., Zelt, O., Pregger, T., Braun, J., Klann, U. (2022a). Synthese und Handlungsoptionen – Ergebnisbericht des Projekts MENA-Fuels. Teilbericht 14 des Wuppertal Instituts, des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und des Instituts für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme (IZES) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- Viebahn, P., Kern, J., Horst, J., Rosenstiel, A., Terrapon-Pfaff, J., Doré, L., Krüger, C., Zelt, O., Pregger, T., Braun, J., Klann, U. (2022b). Synthesis and courses of action. Report on results of the MENA-Fuels project. Sub-report 14 to the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK). Wuppertal Institut, German Aerospace Center (DLR), Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme (Institute for Future Energy and Material Flow Systems, IZES).
- Viebahn, P., Kern, J., Horst, J., Rosenstiel, A., Terrapon-Pfaff, L., Doré, L., Krüger, C., Zelt, O., Pregger, T., Braun, J., Klann, U. (2022c) : synthèse et pistes d'action. Rapport sur les résultats du projet MENA-Fuels. Sous-rapport 14 au ministère fédéral de l'Économie et de la Protection du climat (BMWK). Wuppertal Institut, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme (IZES).
- Zelt, O., Kobiela, G., Ortiz, W., Scholz, A., Monnerie, N., Rosenstiel, A., Viebahn, P. (2020). Multikriterielle Bewertung von Bereitstellungstechnologien synthetischer Kraftstoffe. MENA-Fuels: Teilbericht 3 des Wuppertal Instituts und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- Zelt, O., Scholz, A., Viebahn, P. (2021). Auswahl der zu bewertenden synthetischen Kraftstoffe und ihrer Bereitstellungstechnologien. MENA-Fuels: Teilbericht 1 des Wuppertal Instituts an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).



## **Überblick über die Teilberichte in MENA-Fuels**

Alle Teilberichte können über die folgende Website heruntergeladen werden:

[www.wupperinst.org/MENA-Fuels/](http://www.wupperinst.org/MENA-Fuels/)

### **Teilprojekt A.I: Technologiebewertung für synthetische Kraftstoffe**

- 1 Auswahl der zu bewertenden synthetischen Kraftstoffe und ihrer Bereitstellungstechnologien
- 2 Ökobilanzen für synthetisches Kerosin – Vergleich von Produktionsrouten in MENA und Deutschland
- 3 Multikriterielle Bewertung von Bereitstellungstechnologien synthetischer Kraftstoffe

### **Teilprojekt A.II: Potenzial- und Infrastrukturanalyse für EE-Strom, Wasserstoff und synthetische Folgeprodukte**

- 4 Beschreibung des Energieversorgungsmodells WISEE-ESM-I
- 5 Nachfrageszenarien – Storylines und Herleitung der Entwicklung der Nachfrage nach Synfuels und Grundstoffen
- 6 Basisszenarien – Ergebnisse und Infrastrukturauswertung
- 7 Weitere Szenarioanalysen: Berücksichtigung von Investitionsrisiken und Sensitivitäten der Basisszenarien
- 8 Risikobewertung und Risikokostenanalyse der MENA-Region

### **Teilprojekt B.I: Analyse der Exportpotenziale in den MENA-Ländern**

- 9 Szenarien zur Eigenbedarfsanalyse für die MENA-Länder
- 10 Technische und risikobewertete Kosten-Potenzial-Analyse der MENA-Region
- 11 Synthese der Kurzstudien für Jordanien, Marokko und Oman

### **Teilprojekt B.II: Künftige Märkte, Handelsprodukte und Wertschöpfungsketten**

- 12 MENA-Fuels – Analyse eines globalen Marktes für Wasserstoff und synthetische Energieträger hinsichtlich künftiger Handelsbeziehungen
- 13 Gesamtwirtschaftliche Effekte von Investitionen zur Versorgung Deutschlands mit Wasserstoff und synthetischen Energieträgern aus der MENA-Region

### **Teilprojekt B.III: Synthese und Handlungsoptionen**

- 14 (DE) Synthese und Handlungsoptionen – Ergebnisbericht des Projekts MENA-Fuels
- 14 (EN) Synthesis and courses of action – Report on results of the MENA-Fuels project
- 14 (FR) Synthèse et pistes d'action – Rapport sur les résultats du projet MENA-Fuels

Die Zukunft der Mobilität in Deutschland und der EU bietet ein vielfältiges Portfolio an Technologien und Lösungen. Neben der Elektromobilität ist auch der Einsatz synthetischer Kraftstoffe eine denkbare Lösung.

Die Herstellung großer Mengen synthetischer Kraftstoffe (und Feedstocks) benötigt erhebliche Mengen an preisgünstigen erneuerbaren Energien. Insbesondere die sonnen- und windreichen Länder der MENA-Region (Nordafrika und Naher Osten) mit ihren großen erneuerbaren Energiepotenzialen bieten sich als Standorte zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe und ihrer Vorprodukte an. Darüber hinaus bestehen zu vielen Ländern bereits Handelsbeziehungen und Infrastrukturen, auf die aufgebaut werden kann.

Aber welche Potenziale sind in den einzelnen Staaten verfügbar? Zu welchen Kosten stehen entsprechende Ressourcen zur Verfügung? Welche Transportstrukturen werden benötigt? Welche Auswirkungen hat ein Import auf die Wertschöpfung sowohl in Deutschland als auch in den MENA-Staaten? Welches Interesse besteht in den Staaten der MENA-Region selbst, ihre erneuerbaren Energiepotenziale für die inländische Versorgung, aber auch für den Export zu nutzen? Mit welchen Mitbewerbern ist außerhalb von MENA und EU zu rechnen?

Vor dem Hintergrund dieser Fragestellungen hat das Projekt MENA-Fuels analysiert, in welchem Umfang die MENA-Region ein strategisch wichtiger Handelspartner bei der Versorgung Deutschlands (und der EU) mit synthetischen Kraftstoffen oder deren Vorprodukten sein kann.

[www.wupperinst.org/MENA-Fuels/](http://www.wupperinst.org/MENA-Fuels/)

