



E-Fuels - Aktueller Stand und Projektionen

E-Fuels sind heute noch nicht kommerziell verfügbar. Bisher gibt es weltweit nur sehr wenige Demonstrationsanlagen. Bis 2035 sind derzeit etwa 60 neue E-Fuel-Projekte angekündigt, von denen nur etwa 1 Prozent mit einer finalen Investitionsentscheidung gesichert sind. Alle diese weltweiten Projekte entsprechen zusammen nur etwa 10 % der unverzichtbaren E-Fuel-Bedarfe Deutschlands (Flugverkehr, Schiffsverkehr und Chemie). Die Politik hat mit verpflichtenden Quoten für E-Fuels im Flug- und Schiffsverkehr eine Stellschraube, um den E-Fuel-Markthochlauf zu beschleunigen.

1. Was sind E-Fuels?

E-Fuels (auch Elektro-Fuels) sind strombasierte synthetische Kohlenwasserstoffe und nahezu baugleich mit gasförmigen oder flüssigen fossilen Energieträgern. Im Unterschied zu synthetischen Biokraftstoffen, stammt die Energie im E-Fuel aus einer Stromquelle wie einer Windkraft- oder Solar-PV-Anlage.

Das Herzstück der Produktion von E-Fuels ist die chemische Reaktion von grünem Wasserstoff mit Kohlenstoffdioxid¹ (CO₂) unter Druck und Hitze. E-Fuels sind nur dann klimaneutral², wenn der Wasserstoff aus emissionsfreiem Strom hergestellt wurde und das CO₂ aus der Atmosphäre stammt, um einen geschlossenen Kreislauf sicherzustellen (Ueckerdt et al., 2021). Atmosphärisches CO₂ kann entweder aus biogenen Quellen wie Biogasanlagen kommen oder mit einer Anlage zur CO₂-Luftabscheidung (Direct-Air-Capture) direkt aus der Umgebungsluft gefiltert werden.

2. Was ist der aktuelle Stand von E-Fuels?

E-Fuels sind heute noch nicht kommerziell verfügbar. Bisher gibt es nur sehr wenige Anlagen zur E-Fuel-Produktion weltweit. Dazu gehören einerseits Forschungsanlagen und Reallabore wie das Energy Lab 2.0 (KIT) in Karlsruhe³, in denen die zugrundeliegenden Prozesse weiterentwickelt werden - und andererseits Demonstrationsanlagen wie die im Dezember 2022 eröffnete Anlage „Haru Oni“ in Chile (Patagonien), in der nur bis zu 350 Liter E-Fuels am Tag produziert werden können⁴.

¹ Oft mit einem Zwischenschritt über „Synthesegas“ (Mischung von Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid)

² Bei der Herstellung der E-Fuel-Produktionsanlagen (z.B. die Anlagen für erneuerbare Stromerzeugung) fallen CO₂-Emissionen an, da die industriellen Prozesse noch nicht dekarbonisiert sind. Daher ist die CO₂-Intensität von E-Fuel im Lebenszyklus aktuell nicht ganz Null.

³ <https://www.elab2.kit.edu/>

⁴ <https://hifglobal.com/location/haru-oni/>

3. Flüssige E-Fuels sind unverzichtbar im Flugverkehr, im Schiffsverkehr und als Rohstoff für die Chemie.

Flüssige E-Fuels (Power-to-Liquid, PtL) sind unverzichtbar für den Klimaschutz, da in einigen Sektoren und Anwendungen andere Optionen an technische Grenzen stoßen. Große Teile des Flug- und Schiffsverkehrs lassen sich aufgrund der hohen notwendigen Energiedichten nicht direkt elektrifizieren. Die petrochemische Industrie ist auf Kohlenwasserstoffe als Rohstoff angewiesen - vor allem für die Produktion von Kunststoffen. In Zukunft müssen diese Bedarfe neben Biomasse und Recycling-Kunststoffen auch aus E-Fuels wie synthetischem E-Naphtha oder E-Methanol gedeckt werden. Diese Mengen sind so groß wie die Kraftstoffnachfrage aller PKWs (2019, Abbildung 1d).

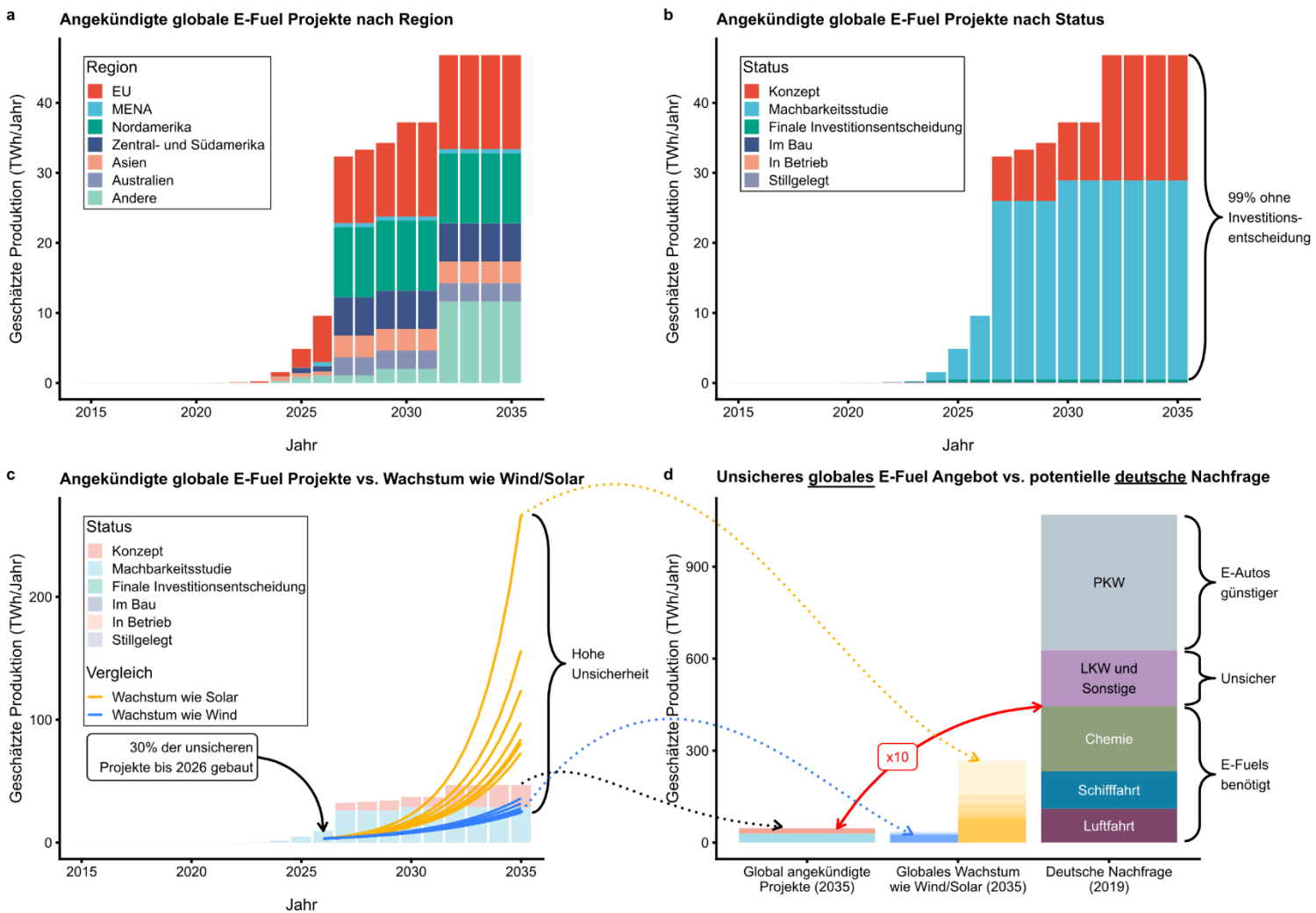


Abbildung 1: (a) global angekündigte E-Fuel-Projekte (flüssige strombasierte Kohlenwasserstoffe) nach Region und (b) nach Projektstatus. (c) Hochlaufszenerarien mit historischen Wachstumsraten⁵ von Windkraft und Solar-Photovoltaik. (d) Vergleich der globalen Ankündigungen und Hochlaufszenerarien (für 2035) mit dem Bedarf Deutschlands⁶ an flüssigen Kohlenwasserstoffen (2019). Daten: IEA, AG Energiebilanzen, Destatis.

⁵ Die verschiedenen Wachstumsraten entsprechen 9-Jahres-Intervallen innerhalb der Jahre 1995–2010.

⁶ Die Energiebedarfe für Luftfahrt und Schifffahrt beinhalten anteilig den internationalen Verkehr durch die Bilanzierung nach dem so genannten Inländerkonzept.



4. Alle derzeit weltweit geplanten E-Fuel-Projekte (PtL) entsprechen nur etwa 10 % der unverzichtbaren E-Fuel-Bedarfe Deutschlands.

Für die nächsten Jahre (bis 2035) werden weltweit aktuell etwa 60 neue E-Fuel-Projekte (PtL) angekündigt, die zunehmend auch im industriellen Maßstab E-Fuels produzieren sollen (Abbildung 1a). Nur etwa 1 Prozent dieser Ankündigungen haben bisher eine finale Investitionsentscheidung (Abbildung 1b). Wenn man annimmt, dass alle diese Projekte ihre Finanzierung realisieren und gebaut werden, so entspräche dieses gesamte globale Angebot etwa 10 % der deutschen Nachfrage nur in den unverzichtbaren E-Fuel-Anwendungen (Flugverkehr, Schiffsverkehr und stoffliche Nutzung in der Chemie).

Es gibt Unsicherheiten, aber auch Erfahrungen, wie schnell der Markthochlauf von Energietechnologien passieren kann. Historisch war Solar-PV mit globalem Wachstum von 40-65 % pro Jahr die erfolgreichste Energietechnologie (Odenweller et al., 2022). Unter der Annahme, dass E-Fuels über die aktuellen Ankündigungen hinaus genauso schnell wachsen wie Solar-PV, entspräche das gesamte globale Angebot⁷ in 2035 höchstens etwa 50 % der unverzichtbaren Bedarfe für Deutschland.

5. Der E-Fuel-Markthochlauf wird durch hohe Kosten und fehlende Investitionssicherheit gehemmt.

E-Fuels aus den ersten Demonstrationsanlagen sind nicht für die kommerzielle Nutzung gedacht. Aus den Investitionen der Pilotanlage in Chile (Haru Oni, ~74 Mio. Dollar) würden sich Kosten von etwa 50 EUR pro Liter E-Fuel ergeben. Sobald sich die Produktion von E-Fuels in industriellem Maßstab mit Direct-Air-Capture etabliert, können sich zunächst Produktionskosten von etwa 2 EUR pro Liter⁸ einstellen (Ueckerdt et al., 2021). Das entspricht dem Vierfachen des typischen Großhandelspreises von fossilem Benzin von etwa 0,50 EUR pro Liter. Für Kostenparität mit fossilen Energieträgern wären dann CO₂-Preise in der Größenordnung von etwa 1000 EUR/tCO₂ notwendig.

Langfristig werden sich wahrscheinlich Produktionskosten von unter einem Euro pro Liter E-Fuel einstellen können. Es besteht jedoch große Unsicherheit über die zeitliche Entwicklung dieser Kostensenkungen, die stark von der Geschwindigkeit des globalen Markthochlaufs der E-Fuel-Produktion abhängen. Eine Voraussetzung sind starke Kostendegressionen bei den Direct-Air-Capture-Technologien. Aktuell fehlt die Investitionssicherheit, um den notwendigen Schritt hin zu großskaligen Anlagen zu gehen. Es bedarf einer aktiven Politik, um den Hochlauf von Direct-Air-Capture und E-Fuels anzuschieben.

⁷ Dabei benutzen wir nicht die sehr niedrige aktuelle Produktion als Basis, sondern das Jahr 2026, wobei wir annehmen, dass bis dahin 30% aller Ankündigungen eine Investitionsentscheidung bekommen und gebaut werden können.

⁸ Ohne Steuern, Abgaben und ohne Gewinnmargen der Produzenten.



6. Die Politik hat mit E-Fuel-Quoten im Flug- und Schiffsverkehr eine Stellschraube, um den E-Fuel-Markthochlauf zu beschleunigen.

Verbindliche E-Fuel-Quoten für Anwendungen, die auf E-Fuels angewiesen sind, können eine gesicherte Nachfrage schaffen. Auf dieser Basis können zum Beispiel langfristige Abnahmeverträge geschlossen werden, die Planungs- und Investitionssicherheit für E-Fuel-Produktionsanlagen schaffen.

Deutschland hat bereits eine E-Kerosinquote für den Flugverkehr von 2 % in 2030 implementiert⁹. Die EU-Kommission plant eine Quote für E-Kerosin von 0,7 % in 2030 und 5 % in 2035 (Fit-for-55-Paket) und das EU-Parlament schlägt eine Erhöhung der 2030-Quote auf 2 % vor.¹⁰ Diese Quoten sind eine politische Stellschraube, mit der das E-Fuel-Angebot auch schneller entwickelt werden kann. Eine Erhöhung und eine Erweiterung auf andere Sektoren wie die Schifffahrt oder die Chemieindustrie, die ebenfalls auf E-Fuels angewiesen sind, können den E-Fuel-Hochlauf zusätzlich beschleunigen.

Referenzen

- Odenweller, Adrian, Falko Ueckerdt, Gregory F. Nemet, Miha Jensterle, and Gunnar Luderer. 2022. "Probabilistic Feasibility Space of Scaling up Green Hydrogen Supply." *Nature Energy* 7 (9): 854–65. <https://doi.org/10.1038/s41560-022-01097-4>.
- Ueckerdt, Falko, Christian Bauer, Alois Dirnacher, Jordan Everall, Romain Sacchi, and Gunnar Luderer. 2021. "Potential and Risks of Hydrogen-Based e-Fuels in Climate Change Mitigation." *Nature Climate Change* 11 (5): 384–93. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01032-7>.

Autoren: Falko Ueckerdt, Adrian Odenweller
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
Kontakt: ueckerdt@pik-potsdam.de
März 2023

⁹ https://www.gesetze-im-internet.de/bimschg/___37a.html

¹⁰ https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0297_EN.html



7. Anhang

Am 30.03.2023 haben wir diesen Anhang ergänzt. Er enthält die spezifischen Links zu den oben genannten Datenquellen sowie ergänzende Beschreibungen zur methodischen Vorgehensweise für die Analyse in Abbildung 1:

Die Datenbasis der globalen Projektankündigungen ist die IEA Hydrogen Projects Database:

<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database>

Berücksichtigt wurden alle PtL-Projekte, das heißt alle Projekte des Produkts „Synfuels“ sowie „MeOH“ in Spalte 11. Alle Projekte wurden durch eine manuell Recherche überprüft, wodurch sich das Projektvolumen in 2035 im Vergleich zur nicht überprüften Datenbasis erhöhte. Die Umrechnung der unterschiedlichen Angaben zu Projektgrößen in eine einheitliche Metrik TWh/Jahr erfolgt mit folgenden Energiedichten: SynFuels 12 kWh/kg sowie 9,5 kWh/liter, Methanol 5,5 kWh/kg (lower heating value), Wasserstoff 33,36 kWh/kg (lower heating value). Falls nur eine Elektrolysekapazität angegeben war, erfolgte die Umrechnung mit folgenden Annahmen: 70% Effizienz der Elektrolyse, 80% Effizienz der Fischer-Tropsch-Synthese und 5000 Volllaststunden.

Die Datenbasis der Vergleichs-Szenarien zu Wind und Solar ist BP Statistical Review of World

Energy 2022: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/downloads.html>

Die verschiedenen Wachstumsszenarien ergeben sich aus einer Kurvenanpassung an eine Exponentialfunktion in gleitenden 9-Jahres-Intervallen (entsprechend dem Zeitraum 2026-2035) innerhalb der Jahre 1995-2010. Die zugrundeliegenden Kapazitätsdaten sind in den Blättern „Renewable Energy – Wind (Installed Capacity)“ sowie „Renewable Energy – Solar (Installed Capacity“ zu finden.

Die Datenbasis der potenziellen deutschen Nachfrage für das Jahr 2019 sind für Luftfahrt, Schifffahrt, LKW und Sonstige sowie PKW die Umweltökonomischen Gesamtrechnungen des Statistischen Bundesamtes Destatis:

<https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/verkehr-tourismus/Publikationen/Downloads/verkehr-umwelt-5859007207004.html>

Pressemitteilung mit einer Zusammenfassung der Daten für das Jahr 2019:

https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/12/PD22_510_85.html

Wie in Fußnote 6 beschrieben handelt es sich bei Luftfahrt und Schifffahrt um Zahlen nach dem Inländerkonzept, das heißt um alle Verbräuche, die sich auf in Deutschland ansässige wirtschaftliche Akteure beziehen (siehe Glossar der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen). Auf diese Weise wird der deutsche Anteil am internationalen Verkehr berücksichtigt.

Für die Chemie ist die Datenbasis der potenziellen deutschen Nachfrage für das Jahr 2019 die Bilanz 2019 der Arbeitsgruppe Energiebilanzen:

<https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2021/11/bilanz19d.xlsx>

Berücksichtigt wurden die Summe des nichtenergetischen Verbrauch von Mineralölen (Zeile 50, Spalte K bis U).