

DISKUSSIONSPAPIER

Niedersachsen und die E-Fuels

Jens Clausen
Pietro P. Altermatt
Severin Beucker
Christoph Gerhards
Sven Linow



IMPRESSUM

AUTOREN

Dr. Jens Clausen (Borderstep Institut)

Prof. Dr. Pietro P. Altermatt (University of Oxford, UK)

Dr. Severin Beucker (Borderstep Institut)

Dr. Christoph Gerhards (Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT, FIN)

Prof. Dr.-Ing. Sven Linow (Hochschule Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau und Kunststofftechnik)

HERAUSGEBER

Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH
Clayallee 323 | 14169 Berlin | +49 (0)30 306 45 100-1 | www.borderstep.de

ZITIERVORSCHLAG

Clausen, J., Altermatt, P.P., Beucker, S., Gerhards, C. & Linow, S. (2024). Niedersachsen und die E-Fuels. Berlin: Borderstep Institut.

TITELBILD

© Matt Boitor auf Unsplash

INHALTSVERZEICHNIS

Impressum.....	II
Inhaltsverzeichnis	III
1 Zusammenfassung.....	1
2 Einleitung.....	4
3 Das Fallbeispiel Niedersachsen	5
3.1 Die vollständige Versorgung eines Bestandes von Elektrofahrzeugen mit Strom	5
3.2 Die vollständige Versorgung eines Bestandes von Verbrennerfahrzeugen mit E-Fuels	6
3.3 Die Betriebskosten der Pkw	8
4 Gesundheitliche Folgen	10
5 Marktrisiken aufgrund chinesischer Importe und sinkender Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Exportwirtschaft	12
6 Gesamtbeurteilung.....	15
Quellen.....	17

1 Zusammenfassung

Der Arbeitgeberverband NiedersachsenMetall hat sich Ende 2023 für eine stärkere Berücksichtigung von E-Fuels in der Debatte um klimafreundliche Antriebstechnologien ausgesprochen. NiedersachsenMetall (2023) berichtet:

NiedersachsenMetall-Hauptgeschäftsführer Dr. Volker Schmidt: „Die europaweit wegbrechenden Zulassungszahlen von E-Fahrzeugen und ihr immer noch marginaler Anteil am gesamten Pkw-Bestand sprechen eine klare Sprache: Das von der Bundesregierung ausgegebene Ziel von 15 Millionen E-Autos in Deutschland bis 2030 ist schlicht unrealistisch. Auch die Prognosen für den Elektroauto-Absatz 2024 sind niederschmetternd. Die Strategie, allein und entgegen allen Warnungen auf die Karte E-Mobilität zu setzen, sollte auf den Prüfstand gestellt werden.“

Angesichts der offensichtlich fehlenden Marktakzeptanz von E-Autos plädierte Schmidt dafür, mit mehr Aufgeschlossenheit über alternative Antriebslösungen zu diskutieren: „Wer Klimaschutz ganzheitlich denkt, findet eine Vielzahl an Möglichkeiten. E-Fuels sind dabei unsere einzige Chance, dass auch der gesamte Verbrenner-Bestand unmittelbar einen Beitrag zur CO₂-Reduktion leisten kann. Brüssel und Berlin wären daher gut beraten, die Koexistenz von E-Mobilität und E-Fuels im Straßenverkehr zu ermöglichen. Es ist überhaupt nicht nachvollziehbar, warum es nur die eine Lösung geben soll. (...) Mobilität sollte nicht zum Luxusgut werden. Durch ihre nach wie vor hohen Gesamtkosten im Vergleich zum Verbrenner darf es nicht dazu kommen, dass E-Autos die Mobilität zur sozialen Frage werden lassen.“

NiedersachsenMetall steht mit dieser Position nicht allein. So heißt es im Wahlprogramm von CDU und CSU zur Europawahl 2024 (CDU & CSU, 2024):

„Wir wollen das Verbrennerverbot wieder abschaffen und die deutsche Spitzentechnologie des Verbrennungsmotors erhalten und technologieoffen weiterentwickeln. Synthetische Kraftstoffe spielen dafür eine zentrale Rolle. Wir schreiben keine Technologien vor.“

Ganz ähnlich argumentiert auch die FDP und sieht E-Fuels als wichtig für eine „sichere und bezahlbare Energieversorgung“ (FDP, 2024):

„Alternative Kraftstoffe, wie E-Fuels, sollen sowohl als Reinkraftstoff als auch als Beimischung zulässig sein. Denn Verbrennungsmotoren sind nicht per se klimaschädlich, sondern ihr Betrieb mit fossilen Kraftstoffen. Um die Flotte der weltweit über eine Milliarde Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor klimafreundlicher zu machen, setzen wir deshalb auf die Substituierung fossiler Kraftstoffe durch synthetische Kraftstoffe und auf das Bekenntnis zum Verbrennungsmotor als Teil der Mobilität der Menschen. Wir wollen Verbrennungsmotoren klimafreundlich machen, nicht verbieten.“

Der Verbrennungsmotor als deutsche Spitzentechnologie, seine als gesichert angenommene Zukunft und die Bezahlbarkeit von E-Fuels sind dabei häufig wiederkehrende Argumente. Auch die Aussicht, durch E-Fuels den existierenden Verbrennerbestand schnell bzw. sogar „unmittelbar“ (Niedersachsenmetall, 2023) klimaneutral betrieben zu können, dient als Argument.

- ▶ Aber wären E-Fuels zum Antrieb von Autos wirklich billiger als Strom und der Umstieg auf E-Autos?
- ▶ Wären sie schneller verfügbar, als wir den aktuellen Autobestand gegen Elektroautos austauschen können, damit wir unsere Klimaziele erreichen?
- ▶ Und gibt es zukünftig international gesicherte Absatzmärkte für Autos mit Verbrennungsmotor?

Was die „fehlende Marktakzeptanz von E-Autos“ betrifft: Die deutsche Autobranche exportiert etwa drei Viertel ihrer Produkte, und weltweit ist der Absatz elektrischer Automobile von 2022 bis 2023 um 35 % gestiegen (von 10,5 Mio. auf 14,2 Mio.). Im ersten Quartal 2024 wuchsen die Absatzzahlen um ca. 25 % gegenüber 2023 (IEA, 2024). In China erreichte der Absatz elektrischer Pkw in 2023 einen Anteil von 33,9 % (Irle, 2024) und im Jahr 2024 könnte der Marktanteil von Elektroautos in China bis zu 45 % betragen, in Europa bis zu 25 % (IEA, 2024). Äthiopien arbeitet als erstes afrikanisches Land an einem Verbrennerverbot, um so die teuren Benzinimporte zu beenden. Stromerzeugung hingegen ist in Äthiopien mit Photovoltaik (PV) und Wasserkraft eigenständig möglich (Fokus Online, n. d.).

Wenn in Europa kurzzeitig die Absatzzahlen von Elektroautos nicht so stark steigen wie prognostiziert, mag dies der Mineralölindustrie kurzfristig Gewinne bringen. Als Grundlage der Strategie eines Industrieverbandes oder einer wirtschaftsnahen Partei taugen die genannten Argumente dagegen nicht. Insbesondere dann nicht, wenn die Exportstärke der deutschen Automobilhersteller bedroht ist, falls sie weiterhin eine international immer weniger nachgefragte Technologie priorisieren und sich so den strategischen Herausforderungen solcher technischer Disruptionen aussetzt (Christensen, 2016).

Im Folgenden zeigen wir, dass durch E-Fuels angetriebene Verbrenner eine sehr teure Alternative zu E-Autos wären. Tabelle 1 vergleicht, was eine Vollausrüstung Niedersachsens mit E-Fuel Autos im Vergleich zu elektrischen Autos bedeuten würde.

Tabelle 1: Vergleich der Ausstattung Niedersachsens mit E-Fuel Autos verglichen mit elektrischen Pkw bei gleichbleibendem Fahrzeugbestand und Fahrverhalten

	Elektroautos	Autos mit E-Fuels
Anzahl Autos in Niedersachsen	5 Mio.	5 Mio.
Jährliche durchschnittliche Fahrstrecke pro Auto	13.700 km/a	13.700 km/a
Energiebedarf pro 100 km	20 kWh	74 kWh
Strombedarf incl. Übertragungsverluste, Elektrolyse von Wasserstoff und Synthese von E-Fuels, aber ohne Stromspeicher	14,4 TWh/a	115 TWh
Notwenige zusätzliche Zahl an Windrädern	740	5.940
Erforderliche Fläche für Freiflächen-Photovoltaikanlagen	60 km ²	480 km ²
Energiekosten pro Auto und Jahr	1.100 €	3.000 €
Investitionen in Energieerzeugung (Wind + PV)	9,7 Mrd. €	71,6 Mrd. €
Investitionen in Elektrolyseanlagen	0 Mrd. €	28 Mrd. €
Investitionen in E-Fuel Syntheseanlagen	0 Mrd. €	3 Mrd. €
Mehrkosten bei 5 Mio. Elektroautos à 5.000 €	25 Mrd. €	0 Mrd. €
Summe Kosten	34,7 Mrd. €	102,6 Mrd. €

Quelle: Borderstep Institut, alle Annahmen siehe Kap. 3.

NIEDERSACHSEN UND DIE E-FUELS

Der Betrieb einer Autoflotte mit E-Fuels erfordert sehr, sehr große Energiemengen und sehr hohe Investitionen in die Energieerzeugung und ist daher für jeden Einzelnutzer unnötig teuer. Abgesehen davon würden E-Fuels die Schadstoffbelastung unserer Städte und Dörfer nicht reduzieren. Die derzeit vielen frühen Todesfälle, tausende Asthmaanfalle und tausende von verlorenen Arbeitstagen aufgrund der Schadstoffemissionen der Verbrennungsmotoren würden weiterhin die Kosten des Gesundheitssystems in die Höhe treiben (siehe Kap. 4).

2 Einleitung

Diese Arbeit zeigt die besonderen Schwierigkeiten, die bei einer Umstellung von fossilem Benzin und Diesel auf grüne Treibstoffe wie E-Fuels bewältigt werden müssten. In einem exemplarischen Beispiel werden diese Schwierigkeiten besonders deutlich. Vor allem dann, wenn man sie mit der Elektromobilität vergleicht. Man bedenke zudem, dass die chinesische Regierung seit 30 Jahren konsequent die Strategie verfolgt, auf Elektromobilität umzustellen. Zieht Europa bei der technisch wie ökologisch überlegenen Elektromobilität nicht mit, kann dies die europäische Automobilbranche aus dem Massengeschäft verdrängen.

Um dies gut nachvollziehbar zu machen, wird hier an einem einfachen Beispiel ein direkter Vergleich dargestellt. Es wird errechnet, was es bedeuten würde, die 5 Mio. Pkw, die die Menschen in Niedersachsen heute fahren, zukünftig entweder mit E-Fuels oder mit Strom zu betreiben¹. Damit wird der Vorschlag von Niedersachsen Metall technisch und wirtschaftlich konsequent durchgerechnet, um so die gesamten Auswirkungen aufzuzeigen (Schleichert, 1999).

Die Arbeit baut auf den Projekten des Borderstep Instituts „Wasserstoff als Allheilmittel“ (12/21 bis 11/23) sowie „Strukturwandel in der Automobilbranche“ (1/20 bis 12/21) auf. Die Erstellung der Publikation erfolgt aus Eigenmitteln, d.h. ohne Förderung oder Zuwendung. Sie wird fachlich durch das Netzwerk der „Scientists for Future“ unterstützt.

Da die Arbeit ausschließlich das Ziel hat, den hohen Aufwand nur exemplarisch zu verdeutlichen, werden eine Reihe von Zusammenhängen nicht betrachtet. So werden z.B. die Strommengen bilanziell betrachtet und die Notwendigkeit, Strom für einige Zeit im Netz zu speichern, nicht analysiert. Die Notwendigkeit der **Stromspeicherung** ist dabei sowohl im Fall der Elektromobilität wie auch im Fall der Elektrolyse von grünem Wasserstoff gegeben, wobei die in Frage stehenden Strommengen im Fall der E-Fuels deutlich höher sind. Analog verhält es sich mit den Aufwänden für den **Stromnetzausbau**, der für die großen Strommengen für die E-Fuel Herstellung deutlich aufwendiger sein dürfte als für die Stromverteilung an die Ladeinfrastrukturen der Elektroautoflotte. Auch der **Import von E-Fuels** wird hier weitgehend außen vorgelassen. Der Grund hierfür liegt daran, dass die beschriebenen technischen Anlagen zur Erzeugung von grünem Wasserstoff und E-Fuels ohnehin gebaut werden müssen, in Deutschland oder in Ländern, aus denen dann importiert werden muss. Da die Anlagen dazu auf dem Weltmarkt gehandelt werden, unterscheiden sich die Investitionskosten dieser Anlagen international nur wenig. Im Importfall kommen jedoch noch Investitionen in Tank- und Verladestrukturen in den Lieferländern sowie Tankschiffe hinzu.

¹ Um die Abschätzung auf ganz Deutschland mit seinem Pkw-Bestand von knapp 50 Millionen Fahrzeugen zu übertragen, können die entsprechenden Zahlen in Tabelle 1 mit 10 multipliziert werden.

3 Das Fallbeispiel Niedersachsen

Im Zentrum der Betrachtung steht Niedersachsen mit seinen ca. 8 Mio. Einwohnenden und seinem Bestand von ca. 5 Mio. Pkw. Die durchschnittliche Fahrleistung mit Pkw in Deutschland lag 2020 bei rund 13.700 Kilometern (Statista, 2024a).

3.1 Die vollständige Versorgung eines Bestandes von Elektrofahrzeugen mit Strom

Der durchschnittliche Stromverbrauch von Elektroautos ist für den Gesamtbestand vom Kraftfahrtbundesamt noch nicht dokumentiert. Eine Studie des Umweltbundesamtes zeigt, dass der Realverbrauch von Elektroautos im Bereich von etwa 18 kWh/100 km liegt und damit im Mittel etwa 15 % über den im Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP) gemessenen Werten (Helms et al., 2022). Ecomento dokumentiert zur Mitte 2023 die zulassungstärksten Modelle, die zusammen ca. 30 % des Bestandes ausmachen (Ecomento, 2023). Nach Spritmonitor lassen sich diesen Modellen folgende Durchschnittsverbräuche des realen Fahrzeugbetriebs zuordnen (Spritmonitor, 2023a und andere Modelle):

- ▶ Renault Zoe mit einem Verbrauch von 16,79 kWh/100 km
- ▶ Tesla Model 3 mit einem Verbrauch von 18,58 kWh/100 km
- ▶ VW ID.3 mit einem Verbrauch von 18,94 kWh/100 km
- ▶ Tesla Model Y mit einem Verbrauch von 20,31 kWh/100 km
- ▶ VW-Modelle ID.4/ID.5 mit einem Verbrauch von 20,90 kWh/100 km

Der durchschnittliche reale Stromverbrauch einer Flotte von Elektroautos wird in dieser Studie eher hoch angesetzt und mit 20 kWh/100 km angenommen.

Würden 5 Mio. Elektrofahrzeuge in Niedersachsen jeweils 13.700 km im Jahr zurücklegen und dabei 20 kWh/100 km Strom verbrauchen, so benötigen sie dafür jährlich 13,7 TWh Strom. Da noch ca. 5 % Übertragungsverluste zu berücksichtigen sind (Perner, Unteutsch & Lövenich, 2018, S. 12), müssten dafür ca. 14,4 TWh Strom mittels Windrädern und Photovoltaik erzeugt werden.

Um diese Strommenge vorstellbar zu machen, wird hier angenommen, dass zur Stromerzeugung zum einen Windräder mit einer Nennleistung von 5 MW aufgestellt werden, deren Stromproduktion an einem Binnenlandstandort mit dort typischen 2.580 Vollaststunden pro Jahr² bei ca. 12,9 GWh liegt (IG Windkraft, 2023). Zum zweiten wird auch eine Stromerzeugung mit Photovoltaik-Freiflächenanlagen stattfinden. Das Umweltbundesamt (Umweltbundesamt, 2023) hält die Installation von ca. 1 MW_{peak}/ha PV-Leistung auf Freiflächen für machbar. Bei einem Ertrag von ca. 900 bis 1.100 kWh/kW_{peak} wäre ein Ertrag von 900 bis 1.100 MWh/ha denkbar. Wirth (2024) ergänzt, dass mit Agro-PV etwa 600 MWh/ha erzielt werden können. Im Mittel werden im Folgenden 800 MWh/ha angenommen. Um an dieser Stelle dem Wasserstoff keine unangemessen hohen Kosten anzulasten, werden die Investitionskosten für Freiflächen-PV errechnet und die höheren Kosten von Agri-PV oder Dachflächen-PV nicht betrachtet.

² Statista (2024b) gibt für Onshorestandorte in Norddeutschland 2.500 Vollaststunden an.

Der für 2035 zu erwartende Strommix enthält eine etwa doppelt so große Menge an Windenergie wie Strom aus Photovoltaik (Müller, Lenk & Saerbeck, 2023). Für die Erzeugung von zwei Dritteln der für die gesamte Pkw-Mobilität in Niedersachsen notwendigen Strommenge von 14.400 GWh (14,4 TWh) wären also 740 große Windräder mit einer gemeinsamen elektrischen Spitzenleistung von 3,7 GW erforderlich. Bei Investitionskosten um die 7,5 Mio. € pro Windrad (Deutsche Windguard, 2023; Fraunhofer ISE, 2021; Trinomics, 2020)³ fallen hierfür knapp 5,5 Mrd. € Investitionskosten für Windräder an. Weiterhin wird etwa ein Drittel der notwendigen Strommenge von 14.400 GWh (14,4 TWh) durch (wie hier angenommen wird) 60 km² Photovoltaik (halb Freifläche, halb Agri-PV) erzeugt. Die Anlagen haben insgesamt eine Leistung von ca. 4,8 GW_{peak}. Bei Investitionskosten von ca. 700.000 €/MW_{peak} (Badelt et al., 2020; Fraunhofer ISE, 2021; Müller, 2023) wären damit Investitionen von ca. 4,2 Mrd. € in Freiflächen-PV erforderlich⁴.

Insgesamt müssen also für die Versorgung von 5 Millionen elektrischen Pkw in Niedersachsen etwa 740 große Windräder aufgestellt und etwa 60 km² Freiflächenphotovoltaikanlagen gebaut werden. Hierfür sind Investitionen von etwa 9,7 Mrd. € erforderlich.

Auf der Seite der Stromerzeugung kommen dadurch zusätzliche Leistungen ans Netz: Ca. 3,7 GW Windkraftanlagen und 4,8 GW PV-Anlagen würden zusätzlich ins Stromnetz einspeisen. Auf der Seite der Stromabnahme käme das Laden der Elektroautos hinzu. Würden die 5 Millionen Autos gleichmäßig verteilt zwischen 7 Uhr morgens und 21 Uhr abends laden, würden sie eine Last von ca. 3 GW darstellen. Durch Ladespitzen nach Feierabend könnte dieser Wert höher ausfallen, durch die Einführung variabler Stromtarife könnte aber auch das preiswertere Laden nachts den Wert sinken lassen.

Weiter bedarf es zusätzlicher technischer Einrichtungen wie Stromspeicher und eines Ausbaus der Stromnetze, Ladeinfrastruktur, um die Versorgung der Autoflotte ganzjährig sicherzustellen. Wie auch unten bei den E-Fuels werden diese Einrichtungen hier nicht im Detail betrachtet.

3.2 Die vollständige Versorgung eines Bestandes von Verbrennerfahrzeugen mit E-Fuels

Die in Zukunft möglichen flüssigen E-Fuels sind Methanol, Ammoniak, synthetischer Diesel und synthetisches Kerosin (Ramboll, 2024). Eine Studie des europäischen Parlaments erwartet, dass Kohlenwasserstoffe wie synthetischer Diesel und synthetisches Kerosin den höchsten Anteil am Verbrauch solcher Kraftstoffe ausmachen werden (TRAN Committee, 2023). Die Herstellung von grünen E-Fuels erfordert zunächst die Herstellung von grünem Strom, dann die Elektrolyse zur Erzeugung von Wasserstoff und danach die chemische Umwandlung des Wasserstoffs in E-Fuels. In dieser Kette treten eine Reihe von Energieverlusten auf (Fasihi, Bogdanov & Breyer, 2016; Perner et al., 2018, S. 12):

- ▶ 5 % Übertragungsverluste im Stromnetz,
- ▶ 30 % Verluste bei der Elektrolyse,
- ▶ 30 % bei der Umwandlung in E-Fuels,
- ▶ 5 % für den Ferntransport des Kraftstoffs zu den Tankstellen.

³ Die Kosten werden in den Studien mit einer Spanne von 1.400 €/kW bis 2.000 €/kW angegeben, die Abschätzung wird mit Investitionskosten von 1.500 €/kW durchgeführt.

⁴ Die zitierten Studien geben Werte zwischen 500.000 €/MW_{peak} und 800.000 €/MW_{peak} an. Da alle Daten einige Jahre alt sind und die Baukosten zuletzt stark stiegen, wird die Abschätzung hier mit einem Kostenansatz im oberen Spektrum durchgeführt.

Letztlich stehen ca. 44 % der im Strom enthaltenen Energie als Nutzenergie in Form von E-Fuels zur Verfügung.⁵ Wieviel genau, das hängt letztlich davon ab, welches E-Fuel hergestellt wird.

In Deutschland verfügten am 1. Januar 2023 rund 63 % der zugelassenen Pkw über einen Benzinmotor und rund 30 % wurden mit Diesel betrieben (Statista, 2024c). Die durchschnittliche Leistung von Neuwagen lag in den letzten Jahren bei 130 bis 160 PS. Laut Spritmonitor ist dieser Leistung ein realer Verbrauch von ca. 8,7 Litern Benzin oder 7,5 Litern Diesel je 100 km zuzuordnen (Spritmonitor, 2023b).

Benzin enthält pro Liter ca. 8,5 kWh Nutzenergie, Diesel ca. 9,8 kWh. In kWh umgerechnet, ergibt sich daher für Benziner ein Verbrauch von 74 kWh/100 km, für Diesel ebenfalls 74 kWh/100km.⁶

Würden 5 Mio. Pkw mit Verbrennungsmotor in Niedersachsen jeweils 13.700 km im Jahr zurücklegen und dabei 74 kWh/100 km Energie in Form von E-Fuels verbrauchen, so wären dies jährlich 50,6 TWh Energie in Form von E-Fuels. Da bei der Herstellung von E-Fuels Verluste in Höhe von 56 % auftreten und nur 44 % Energie in den E-Fuels ankommen, wären für die Herstellung dieser E-Fuels ca. 115 TWh Strom notwendig.

Um diese Strommenge vorstellbar zu machen, werden die gleichen Annahmen verwendet, wie schon oben. Strom wird mit Windrädern mit einer Nennleistung von 5 MW erzeugt, zusätzlich erfolgt Stromerzeugung mit Freiflächen Photovoltaik. Der für 2035 zu erwartende Strommix enthält eine etwa doppelt so große Menge an Windenergie, wie Strom aus Photovoltaik (Müller et al., 2023). Für die Erzeugung von zwei Dritteln der für die gesamte Pkw-Mobilität mit E-Fuels in Niedersachsen notwendigen Strommenge von 115.000 GWh (115 TWh) wären also 5.940 große Windräder mit einer Gesamtleistung von ca. 30 GW erforderlich. Bei Investitionskosten um die 7,5 Mio. € pro Windrad (Deutsche Windguard, 2023; Fraunhofer ISE, 2021; Trinomics, 2020) fallen hierfür ca. 45 Mrd. € Investitionskosten für Windräder an. Weiterhin wird etwa ein Drittel der notwendigen Strommenge von 115.000 GWh (115 TWh) durch ca. 480 km² Photovoltaik (halb Freifläche, halb Agri-PV) erzeugt. Die Anlagen haben insgesamt eine Leistung von ca. 38 GW_{peak}. Bei Investitionskosten von ca. 700.000 €/MW_{peak} (Badelt et al., 2020; Fraunhofer ISE, 2021; Müller, 2023) wären Investitionen von ca. 26,6 Mrd. € in Freiflächen-PV erforderlich.

Für die Versorgung von 5 Millionen mit E-Fuels angetriebenen Pkw in Niedersachsen müssen also etwa 5.940 große Windräder aufgestellt und etwa 480 km² Freiflächenphotovoltaikanlagen gebaut werden. Hierfür sind zusammen Investitionen von etwa 71,6 Mrd. € erforderlich. Allein die Freiflächen-PV benötigt 1 % der Fläche Niedersachsens.

Um den nötigen grünen Wasserstoff herstellen zu können, ist die Elektrolyse von Wasser erforderlich. Bei Investitionskosten für den Elektrolyseur von 700 €/kW (Diermann, 2024; Holst, Aschenbrenner, Smolinka, Voglstätter & Grimm, 2023)⁷ fallen für ca. 40 GW Elektrolyseleistung weitere ca. 28 Mrd. € an Kosten an. Dazu kommen die Kosten für Montage, Genehmigungsverfahren, Ausschreibungen u.a.m.

⁵ Um auf die 44 % zu kommen, muss man die jeweils verbleibende Restenergie errechnen. Also nach der Übertragung 95 %, nach der Elektrolyse davon 70 %, nach der Umwandlung in E-Fuels wiederum davon 70 % und nach dem Transport nochmals davon nur 95 %

⁶ Der Verbrauch von Benzin und Diesel auf 100 km ist zu multiplizieren mit der pro Liter enthaltenen Nutzenergie.

⁷ Die Kosten werden in den Studien mit einer Spanne von 500 €/kW bis 1.800 €/kW angegeben, die Abschätzung wird mit Investitionskosten von 700 €/kW durchgeführt.

Da die Leistung der geplanten Elektrolyseanlagen in Richtung auf Anlagen mit einer Leistung von 100 bis 1.000 MW tendiert (acatech, 2024) und insoweit die Leistung der Windkraft- und Photovoltaikanlagen um ein Vielfaches übersteigt, ist zudem die Nutzung des Stromnetzes unumgänglich, um den regenerativ dezentral erzeugten Strom zu den Elektrolyseuren zu transportieren. Zudem wird die Zahl der Betriebsstunden eines Elektrolyseurs dadurch optimiert, dass er im Sommer PV-Strom nutzt, im Winter dagegen primär Windstrom. Auch hierfür ist ein auf hohe Leistungen ausgelegtes Stromnetz Bedingung.

Auf der Seite der Stromerzeugung kommen dadurch zusätzliche Leistungen ans Netz: Ca. 30 GW Windkraftanlagen und 38 GW PV-Anlagen würden zusätzlich ins Stromnetz einspeisen. Auf der Seite der Stromabnahme kämen Elektrolyseure mit einer Gesamtleistung von etwa 40 GW hinzu.

Im Anschluss an die Elektrolyse werden in einer sogenannten Fischer-Tropsch Synthese die E-Fuels produziert. Da Wasserstoff gespeichert werden kann, kann die Synthese so ausgelegt werden, dass sie ganzjährig betrieben wird. Sollen 50,6 TWh E-Fuels in 8.760 Stunden hergestellt werden, so ist eine Syntheseleistung von 6 GW erforderlich. Bei Anlagenkosten von 500 €/kW (Perner et al., 2018) ergeben sich Investitionskosten in die Syntheseanlagen in Höhe von ca. 3,0 Mrd. €.

Weiter bedarf es zusätzlicher technischer Einrichtungen:

- ▶ Stromspeicher, um die angenommene hohe Auslastung der Elektrolyseure sicherzustellen,
- ▶ Wasserstoffspeicher, um die E-Fuel Herstellung auch dann aufrechterhalten zu können, wenn kein Wind weht und die Elektrolyse steht und
- ▶ Ausbau des Stromnetzes, um die zusätzliche Leistung der Windkraft- (30 GW) und Photovoltaikanlagen (38 GW) mit den Lasten der Elektrolyseure (40 GW) zu verbinden.

Allein die Investitionen für Windräder, Photovoltaik, Elektrolyseure und Syntheseanlagen summieren sich auf ca. 100 Mrd. €. Hinzu kommen weitere, hier nicht quantifizierte, Investitionen.

Die im Vergleich zum Elektroauto mindestens aufzubringenden zusätzlichen Investitionen für die Versorgung mit E-Fuels lägen also bei 90 Mrd. €. Selbst wenn Elektroautos auch in Zukunft 5.000 € mehr kosten würden als Verbrenner, würden die Mehrkosten, wenn 5 Millionen Pkw elektrisch und nicht als Verbrenner gekauft würden, nur bei 25 Mrd. € liegen. Mit Blick auf zunehmende Importe preiswerter Elektroautos aus China (vgl. Kapitel 5) ist allerdings auch vorstellbar, dass Elektroautos schon in wenigen Jahren günstiger werden als Verbrenner. Es bleibt zu fragen, welchen Sinn die hohen Investitionen in eine Energieinfrastruktur ergeben, deren Bau und Kosten man durch die höhere Effizienz der Elektroautos einfach vermeiden kann.

3.3 Die Betriebskosten der Pkw

Für den Antrieb der 5 Mio. Elektroautos mit je 13.700 km Fahrleistung fallen Stromkosten an. Liegen diese im Bereich von Haushaltstarifen, z.B. bei 40 Cent/kWh, dann lägen die Stromkosten bei einem Verbrauch von 20 kWh/100 km bei ungefähr 1.100 € pro Jahr, wobei teures Schnellladen im Fernverkehr zwar hinzukommt, für die meisten Fahrzeuge aber nur an wenigen Tagen im Jahr erforderlich ist. Und im Falle der Selbstversorgung durch 50 % selbsterzeugten PV-Strom mit kalkulatorischen Kosten von 12 Cent/kWh betragen die jährlichen Stromkosten sogar nur etwas über 700 €.

Viel höher liegen die Kosten beim Antrieb durch E-Fuels. Das International Council for Clean Transportation hat ein zukünftiges Preisszenario erstellt. Das Ergebnis weist ca. 2,80 € Kosten für einen

Liter E-Fuel aus (Reichel, 2023; T&E, 2023). Auch Agora Verkehrswende schätzt mittelfristig (2050) Preise zwischen 2 und 5 € pro Liter E-Fuel, wobei der Mittelwert bei knapp 3 € liegen könnte (Agora Verkehrswende, 2023).

Bei einem Verbrauch von ca. 8 Litern E-Fuel pro 100 km und E-Fuel-Kosten von ca. 2,8 €/Liter errechnen sich die Treibstoffkosten zu etwas über 3.000 € pro Auto und Jahr.

Wäre mit Importen nicht alles billiger?

Arthur D. Little prognostiziert, dass Wasserstoff aus Saudi-Arabien mit 19 Cent/kWh (exklusive Steuern und Gewinn) sehr deutlich teurer wäre als Energie in Form von fossilem Diesel (Bechtolsheim, 2020). Beim Fernimport aus z.B. Australien ermittelt die Boston Consulting Group aufgrund der hohen Transportkosten Wasserstoffkosten bis zu 24 Cent/kWh (Burchard et al., 2023). Ein Preis von 19 Cent/kWh bis 24 Cent/kWh für den Rohstoff Wasserstoff würde dazu führen, dass die mit 30 % Verlust aus Wasserstoff hergestellten E-Fuels bei einem Energiegehalt von ca. 10 kWh/l etwa 2,79 €/l bis 3,40 €/l kosten müssten.

Beim Import von Methanol und Ammoniak aus dem - politisch instabilen - Nordafrika kommt eine Studie von Fraunhofer ISE exklusive Steuern und Gewinn auf Kosten von ca. 19 bis 25 Cent/kWh (Hank et al., 2023). Da es sich hierbei schon um E-Fuels handelt, wäre ein Preis von 1,90 €/l bis 2,50 €/l zu erwarten, zuzüglich Transport zu den Tankstellen, Vertrieb, Steuern und Gewinn.

Insgesamt führen diese Studien zu der Erkenntnis, dass importierte E-Fuels voraussichtlich nicht wesentlich mehr oder weniger kosten würden, als wenn sie hierzulande hergestellt werden. Ein höherer Ertrag von Wind- und Photovoltaikanlagen aufgrund besserer Standorte wird durch die Kosten für den Transport aufgezehrt. Zudem würden dann viele Arbeitsplätze in anderen Ländern entstehen und das deutsche Außenhandelsbudget würde durch hohe Importkosten belastet. Hinzu kämen – wieder einmal – Abhängigkeiten von anderen Ländern.

4 Gesundheitliche Folgen

Transport and Environment (T&E) ist die Dachorganisation von nichtstaatlichen europäischen Organisationen, die sich für einen nachhaltigen Verkehr einsetzen. Angesichts der Behauptungen zu sauberen Kraftstoffen beauftragte T&E die IFP Energies Nouvelles mit einer Reihe von Labortests, die den realen Fahrbetrieb simulierten (Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle (WLTC) und Real Driving Emissions (RDE)), um die Emissionen verschiedener E-Benzin-mischungen in einem Mercedes der A-Klasse zu messen (Transport & Environment, 2021). Die Ergebnisse der Schadstoffemissionen machen eine Reihe von Sachverhalten deutlich:

- ▶ Bei keinem der getesteten E-Kraftstoffe wurden im Vergleich zu den heutigen Benzinkraftstoffen Unterschiede bei den NO_x-Emissionen festgestellt, weder im Labor noch bei Straßentests. Dies bedeutet, dass E-Kraftstoffe die gleiche Menge an NO_x ausstoßen wie die heutigen fossilen Kraftstoffe.
- ▶ Bei allen Tests wurde ein erheblicher Rückgang der Partikelemissionen festgestellt. Die Anzahl der Partikelemissionen (PN), die größer als 10 nm sind, sank beim Labortest um 97 % und beim RDE-Testzyklus um 81 - 86 %. Dies war zwar eine deutliche Verbesserung im Vergleich zu den getesteten fossilen Kraftstoffen - und liegt um ein Vielfaches unter dem gesetzlichen Grenzwert -, doch die sehr große Anzahl der aus dem Auspuff ausgestoßenen Partikel bedeutete, dass die Partikelverschmutzung noch lange nicht beseitigt war. Selbst bei der Verwendung von 100 % E-Sprit-Mischungen wurden immer noch mindestens 2,2 Milliarden Partikel pro gefahrenem Kilometer freigesetzt. Bei den Partikelmassenemissionen (PM) wurde kein Unterschied festgestellt.
- ▶ Die giftigen Kohlenmonoxid-Emissionen waren bei den getesteten E-Benzin-Mischungen deutlich höher. Die Emissionen waren beim WLTC-Labortest bis zu dreimal und beim RDE-Test 1,2- bis 1,5-mal höher als bei fossilem Kraftstoff. Der größte Anstieg der Emissionen trat beim ersten Einschalten des Motors auf, was in Städten häufig vorkommt.
- ▶ Die Kohlenwasserstoffemissionen, d. h. schädliche chemische Verbindungen aus Wasserstoff und Kohlenstoff, sanken bei der WLTC-Prüfung um 23 - 40 %, während bei der RDE-Prüfung aufgrund der niedrigen Emissionen bei allen Kraftstoffen kein Unterschied festgestellt wurde. Die Emissionen gefährlicher, aber noch nicht regulierter Aldehyde - Acetaldehyd und Formaldehyd - sanken bei der Verwendung von E-Kraftstoffen beim ersten Einschalten des Motors, aber im Test insgesamt wurde kein signifikanter Unterschied festgestellt.
- ▶ Die Ammoniakemissionen von zwei E-Kraftstoffmischungen verdoppelten sich im RDE-Test in etwa, wobei die Emissionen besonders nach dem ersten Einschalten des Motors (Kaltstart) zunahm. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass einige E-Kraftstoffmischungen einen Anstieg der Ammoniakemissionen verursachen können, der zu einer Vorstufe der PM_{2,5}-Belastung führen würde.

Luftschadstoffe insgesamt schädigen nicht nur Menschen und Tiere, sondern haben auch auf Pflanzen, Gewässer, Böden und sogar Bauwerke negative Auswirkungen. Insgesamt haben die weltweiten Benzin- und Dieselfahrzeugflotten erhebliche Auswirkungen nicht nur auf den Klimawandel, sondern auch auf die Luftqualität und die menschliche Gesundheit und führen jährlich zu tausenden vorzeitiger Todesfälle (Huang, Unger, Harper & Heyes, 2020).

Verkehrsreiche Ballungsräume sind besonders belastet. Die Abgase von Pkw, Lastwagen, Bussen, aber auch von Baumaschinen und Diesel-Lokomotiven verursachen Atemwegs- und Herz-Kreislaufkrankungen. Der hannoversche Herzspezialist Axel Haverich schreibt im Deutschen Ärzteblatt (Haverich & Kreipe, 2016):

„Nimmt man Daten der Weltgesundheitsorganisation (WHO) zur globalen Umweltverschmutzung, so lernt man, dass Feinstaub jährlich über vier Millionen Opfer durch Herzinfarkt und Schlaganfall fordert“

Die Vereinigung US-amerikanischer Lungenärzte hat die positiven Auswirkungen der Elektromobilität auf die Gesundheit in der USA quantifiziert (American Lung Association, 2020 eigene Übersetzung):

„Der weitreichende Übergang zu emissionsfreien Verkehrstechnologien könnte bis zum Jahr 2050 zu einer Verringerung von Schadstoffemissionen führen, die bis zu 72 Mrd. \$ an vermiedenen Gesundheitsschäden ausmachen würden, wobei etwa 6.300 Menschenleben gerettet und die Vermeidung von mehr als 93.000 Asthmaanfällen und 416.000 verlorenen Arbeitstagen pro Jahr durch eine deutliche Verringerung der verkehrsbedingten Verschmutzung möglich wäre.“

Haverich zieht eine klare Konsequenz: *„Wir müssen uns vom Verbrennungsmotor verabschieden“* (Haverich, 2020).

5 Marktrisiken aufgrund chinesischer Importe und sinkender Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Exportwirtschaft

Die Förderung von F&E für die Schlüsseltechnologien elektrischer Autos begann in China bereits in der Periode des 8. Fünfjahresplanes (1991-1995) und wurde im Rahmen des 9. Fünfjahresplans fortgesetzt (Tyfield et al. 2014). Die chinesische Regierung hatte erkannt, dass die chinesische Automobilindustrie nicht mit der auf die Verbrennertechnologie fokussierten Konkurrenz aus dem Ausland mithalten konnte. Durch den Systemwechsel hin zum Elektroantrieb sah man eine Chance, diesen bestehenden Knowhow-Abstand zu verkleinern und nach Möglichkeit sogar durch ‚Leapfrogging‘ in einen Vorsprung zu wandeln (Sun 2012). Dabei war die seinerzeit vergleichsweise niedrige Motorisierungsrate in China ein Vorteil, da so der Massenmarkt noch nicht langfristig auf den Verbrennungsmotor festgelegt war (Beigang & Clausen, 2017).

Die langfristige Politik zur Förderung des Elektroantriebs begann sich im Jahr 2014 erstmals deutlich auf die Verkaufszahlen auszuwirken. War die Zahl der verkauften Elektroautos bis zu diesem Zeitpunkt langsam und kontinuierlich auf 14.604 im Jahr 2013 gestiegen, so stieg sie 2014 auf 45.048 und 2019 auf 972.000 (Kane, 2020). Im Jahr 2023 wurden in China 5,34 Mio. batterieelektrische Autos verkauft, die damit einen Marktanteil von 25 % erreichten (Kane, 2024).

Die Dynamik der Absatzzahlen wurde durch eine Reihe von Kaufanreizen und anderen Maßnahmen der nationalen Regierung und von Lokalregierungen getragen (Masiero et al. 2016, S. 8). In Kombination verschiedener Programme kam es zu einer Förderung von bis zu 120.000 CNY (ca. 16.000 Euro) für elektrische Pkw (Fulton et al. 2012, S. 11). Parallel wurde seit 2012 erheblich in Ladeinfrastrukturen investiert (Beigang/Clausen 2017, S. 12). Neben der finanziellen Förderung spielt auch das Ordnungsrecht eine entscheidende Rolle für die Verbreitung von E-Autos.

Seit Beginn der 2020er Jahre exportiert China Automobile eigener Marken. Gleich mehrere neue Autohersteller aus China sind in den letzten Jahren auf dem europäischen Markt aufgetaucht oder bereiten ihren Markteinstieg in Europa vor. So ist der chinesische Unternehmer Li Shu Fu mit seinem Unternehmen Geely mit 9,7 % heute sogar einer der größten Aktionäre der Mercedes-Benz AG und hat die Marke Smart übernommen, die heute nur noch in China produziert wird. Zudem hat er Volvo gekauft. Mit Volvo zusammen wurden die Elektroautos von Polestar entwickelt, die schon in großer Zahl durch Deutschland fahren. Firmen wie BYD, MG, Aiyas, SAIC, XPENG und NIO aus China (wie auch Lucid aus Kalifornien) haben erste Modelle eingeführt und sind seit 2023 im europäischen Markt aktiv.

Abbildung 1: Monatliche Autoexporte aus Japan, Deutschland und China in Millionen Stück

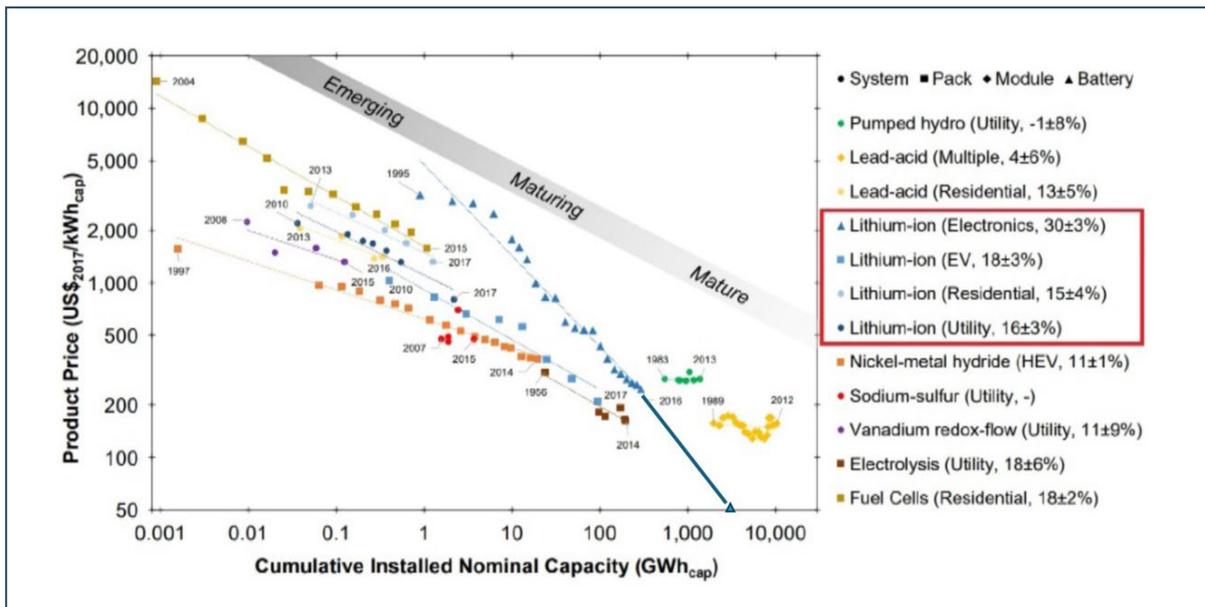


Quelle: The Economist (2023)

China hat im Jahr 2023 die globale Spitzenposition in der Produktion von Elektroautos übernommen. Etwa 60 % der weltweiten Produktion von Elektroautos erfolgt heute in China (Irle, 2024). BYD alleine erreichte bei batterieelektrischen Automobilen 2023 fast die Produktionszahlen von Tesla. Der Marktanteil von Elektroautos in China ist in 2023 auf 33,9 % gestiegen (Irle, 2024) und könnte schon in 2024 45 % erreichen (IEA, 2024). Die chinesische Leitmarktstrategie kann so auf einem starken Heimatmarkt aufbauen – vergleichbar mit Deutschland bei Verbrennern. China exportierte 2023 etwa 900.000 Elektroautos, davon (noch) 560.000 Autos westlicher Hersteller wie z.B. in China produzierte Modelle von Volvo, Mercedes und Volkswagen.

In den nächsten Jahren ist eine deutliche Stärkung der Position chinesischer Elektroautohersteller absehbar, nicht nur aufgrund des starken Leitmarktes in China selbst. Ein weiterer Faktor sind die stark sinkenden Preise für Lithium-Eisen Phosphat Batterien (LiFePO₄). Diese Batterien dominieren mittlerweile weltweit den Markt und sind quasi nicht brennbar. Die Preise betragen im Februar 2023 ca. 110 €/kWh und im Februar 2024 nur noch 51 €/kWh. Hoekstra (2024) hält ein weiteres Absinken auf 40 €/kWh für möglich. Der noch vor wenigen Jahren bei Elektroautos alles beherrschende Kostenblock der Batterie wird auf einen überschaubaren Anteil absinken. Im Kontext anderer Energiespeichertechnologien sind die stark sinkenden Preise Ausdruck einer „normalen“ Lernkurve, die widerspiegelt, dass die erfolgreiche Skalierung die Preise kontinuierlich sinken lässt. Die weltweite Kapazität von Lithium-Ionen Akkus wurde schon im Mai 2023 von Statista (2023) auf 2,8 TWh veranschlagt.

Abbildung 2: Lernkurven für verschiedene Stromspeichertechnologien



Quelle: Schmidt et al. (2017) nach Oberholzer (2021), auf Basis aktueller Daten für Traktionsbatterien 2024 fortgeschrieben

Ab 2026 sind so Preise für Elektroautos denkbar, mit denen Verbrenner nicht mehr mithalten können. Schon im März 2024 stellte BYD in China das erste Elektroauto mit 305 km Reichweite zu einem Preis von umgerechnet 8.900 € vor (Martins Machado, 2024).

Seit Anfang 2024 sind zudem in China erste Kleinwagen mit Natrium-Ionen Batterien zu kaufen (Abraham, 2020; Braga, Grundish, Murchison & Goodenough, 2017). Für diese Batterie wird im Vergleich zu Lithium-Ionen Akkus zukünftig ein Kostenvorteil von ca. 40 % erwartet (Hopf, 2023). Noch wichtiger dürfte allerdings sein, dass die Zellchemie der Natrium-Ionen Batterie mit Rohstoffen auskommt, die fast überall auf der Welt zu finden sind, womit auch die häufige Kritik an den Lieferketten von Batterierohstoffen wie Lithium, Kobalt, Mangan, Nickel oder Grafit gegenstandslos wird und die Rohstoffversorgung einfacher wird (König, 2023).

Die ADAC-Pannenstatistik erfasste 2023 erstmals auch Elektroautos (ADAC, 2023). Elektroautos erweisen sich hier im Vergleich zu gleichalten Verbrennern als deutlich zuverlässiger. Mit 4,9 Pannen pro 1.000 Fahrzeugen liegen sie deutlich vor den Verbrennern mit 6,9 Pannen pro 1.000 Fahrzeugen pro Jahr.

Das für die deutsche Automobilindustrie noch größere Problem wird aber sein, dass in immer mehr Ländern weltweit der veraltete und ineffiziente Antrieb durch Verbrennungsmotor durch den effizienteren, schadstoffärmeren und absehbar preiswerteren Elektroantrieb verdrängt wird. Der norwegische Absatzmarkt ist für den Verbrennungsmotor ohnehin schon verloren und in immer mehr Märkten weltweit dürfte er ins Hintertreffen geraten. Wenn die deutschen Automobilunternehmen zusammen mit ihren Zulieferern überleben wollen, sollten sie auf die Technik von Morgen und nicht auf die von Gestern setzen.

6 Gesamtbeurteilung

E-Fuels wären grundsätzlich geeignet, den gegenwärtigen und zukünftigen Bestand an Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor klimaneutral anzutreiben. Die Versorgung dieses Fahrzeugbestands mit E-Fuels erfordert allerdings einen kaum realisierbaren Ausbau der Erzeugung erneuerbarer Energien, deren Wandlung zu grünem Wasserstoff und schließlich die Synthese zu E-Fuels. Die hierfür benötigte sehr, sehr große Menge an Wasserstoff steht damit in direkter Konkurrenz zur Versorgung von industriellen Anwendungen, die nur mit Wasserstoff dekarbonisiert werden können, wie die Stahl- und Chemieindustrie, sowie auch die Versorgung von Spitzenlastkraftwerken und Schifffahrt mit Brennstoff. Die Aussicht auf ein „weiter so“ mit den Verbrennern verzögert zudem den Wandel auf der Nachfrageseite. Wird aber der Wandel auf der Nachfrageseite vernachlässigt, besteht die Gefahr, dass die heutige massive Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen bestehen bleibt (Ueckerdt et al., 2021). Eine vernünftige Klimapolitik unterstützt den Einsatz von Wasserstoff und E-Fuels daher nur in Sektoren, für die eine direkte Elektrifizierung nicht möglich ist.

Die zentralen Fragen der Studie sind damit wie folgt zu beantworten:

Wären E-Fuels zum Antrieb von Autos wirklich billiger als Strom?

- ▶ Nein, das Fahren mit E-Fuels wird im Gegenteil etwa dreimal teurer sein als der Betrieb von Elektroautos.

Wären E-Fuels schneller verfügbar als wir den Autobestand gegen Elektroautos austauschen können?

- ▶ Nein, der Aufbau der notwendigen Energie- und Wasserstoffherstellungsanlagen wird Jahrzehnte dauern und damit länger, als wir für die Umstellung auf Elektroautos benötigen.

Gibt es zukünftig international gesicherte Absatzmärkte für Autos mit Verbrennungsmotor?

- ▶ Dies ist zumindest unsicher. Der weiter schnell wachsende Weltmarkt für Elektroautos sowie immer mehr Staaten, die aus dem Verbrennungsmotor aussteigen, weisen hier eher auf hohe Risiken einer solchen Strategie hin. Sich auf sehr arme Regionen als Markt zu verlassen, die keine ausreichende Elektrifizierung erreichen können, erscheint für die eher auf Premium-Produkte orientierten deutschen Hersteller wenig sinnvoll. Zudem erkennen bereits die ersten armen Länder, dass Elektromobilität langfristig günstiger sein wird.

Die hohen für die Produktion der E-Fuels erforderlichen Strommengen machen auch den Ausbau der Stromnetze aufwendig. Würden in Niedersachsen 5 Millionen Elektroautos betrieben, würden etwa 4 GW zusätzliche Lasten auf der Erzeugungs- wie Verbrauchsseite an das Stromnetz angeschlossen werden, im Falle der E-Fuels wären es sowohl auf der Erzeugungs- wie auf der Verbrauchsseite ca. 40 GW.

NIEDERSACHSEN UND DIE E-FUELS

Eine auf die zukünftige Versorgung der Bevölkerung mit bezahlbarer Energie sowie preiswerten Waren und Dienstleistungen einerseits und auf Innovationen für Wirtschaftswachstum andererseits orientierte Wirtschaftspolitik wird E-Fuels ausschließlich für den nicht straßengebundenen Verkehr einsetzen. Denn es ist nicht einzusehen, warum Autofahrerinnen und Autofahrer dreimal so viel für Antriebsenergie ausgeben sollten wie nötig. Und es ist kaum aussichtsreich, die ineffiziente Verbrennertechnologie aus dem 19. Jahrhundert ernsthaft der modernen Elektro- und Batterietechnologie aus dem 21. Jahrhundert entgegensetzen zu wollen. Eine solche Strategie käme der Kapitulation der deutschen Automobilbranche vor chinesischen und anderen Importen gleich.

QUELLEN

- Abraham, K. M. (2020). How Comparable Are Sodium-Ion Batteries to Lithium-Ion Counterparts? *ACS Energy Letters*, 5(11), 3544–3547. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.0c02181>
- acatech. (2024). Elektrolyse-Monitor. Zugriff am 20.4.2024. Verfügbar unter: <https://www.wasserstoff-kompass.de/elektrolyse-monitor>
- ADAC. (2023, Mai 9). ADAC Pannenstatistik 2023: Wie zuverlässig sind Elektroautos? Zugriff am 26.3.2024. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/unfall-schaden-panne/adac-pannenstatistik/>
- Agora Verkehrswende. (2023). *E-Fuels zwischen Wunsch und Wirklichkeit*. Berlin. Zugriff am 12.3.2024. Verfügbar unter: <https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/e-fuels-zwischen-wunsch-und-wirklichkeit/>
- American Lung Association. (2020). *The Road to Clean Air. Benefits of a Nationwide Transition to Electric Vehicles*. Zugriff am 5.3.2024. Verfügbar unter: <https://www.lung.org/getmedia/99cc945c-47f2-4ba9-ba59-14c311ca332a/electric-vehicle-report.pdf>
- Badelt, O., Niepelt, R., Wiehe, J., Matthies, S., Gewohn, T., Stratmann, M. et al. (2020). *Integration von Solarenergie in die niedersächsische Energielandschaft (INSIDE)*. Hameln. Zugriff am 12.4.2024. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/346940983_Integration_von_Solarenergie_in_die_niedersachsische_Energielandschaft_INSIDE
- Bechtolsheim, M. von. (2020). *Wasserstoff – Strategie erforderlich. Wo und wie sollten sich Energieversorger beim Wasserstoff engagieren?*. Luxembourg. Zugriff am 7.2.2024. Verfügbar unter: <https://www.adlittle.com/de-de/HydrogenStrategy>
- Beigang, A. & Clausen, J. (2017). *Elektromobilität in China. Fallstudie im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy*. Berlin: Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. Zugriff am 23.3.2017. Verfügbar unter: https://evolution2green.de/sites/evolution2green.de/files/documents/2017-03-e2g-fallstudie_emobilitaet_china_borderstep.pdf
- Braga, M. H., Grundish, N. S., Murchison, A. J. & Goodenough, J. B. (2017). Alternative strategy for a safe rechargeable battery. *Energy Environ. Sci.*, 10(1), 331–336. <https://doi.org/10.1039/C6EE02888H>
- Burchard, J., Hegnsholt, E., Holm, M., Klose, F., Ritter, D. & Schönberger, S. (2023). *Turning the European Green Hydrogen Dream into Reality: A Call to Action*. Berlin, Kopenhagen, Düsseldorf, München: Boston Consulting Group. Zugriff am 6.2.2024. Verfügbar unter: <https://media-publications.bcg.com/Turning-the-European-Green-H2-Dream-into-Reality.pdf>
- CDU & CSU. (2024). *Wahlprogramm von CDU und CSU zur Europawahl 2024*. Zugriff am 11.4.2024. Verfügbar unter: <https://www.csu.de/aktuell/meldungen/maerz-2024/gemeinsames-europawahlprogramm-von-cdu-und-csu/>
- Christensen, C. M. (2016). *The innovator's dilemma: when new technologies cause great firms to fail* (The management of innovation and change series) (Paperback.). Boston, Massachusetts: Harvard Business Review Press.
- Deutsche Windguard. (2023). *Kostensituation der Windenergie an Land Stand 2023*. Varel. Zugriff am 12.4.2024. Verfügbar unter:

- https://www.windguard.de/veroeffentlichungen.html?file=files/cto_layout/img/unternehmen/veroeffentlichungen/2023/Kostensituation%20der%20Windenergie%20an%20Land%20Stand%202023.pdf
- Diermann, R. (2024). Elektrolyse – Aus Wasser wird Wasserstoff. *Wasserstoffwirtschaft.SH*. Zugriff am 10.3.2024. Verfügbar unter: <https://wasserstoffwirtschaft.sh/de/wasserstoff-elektrolyseur>
- Ecomento. (2023, August 22). CAM: E-Fahrzeuge im Pkw-Bestand in Deutschland am 1. Juli 2023. Zugriff am 4.3.2024. Verfügbar unter: <https://ecomento.de/2023/08/22/cam-e-fahrzeuge-im-pkw-bestand-in-deutschland-am-1-juli-2023/>
- Fasihi, M., Bogdanov, D. & Breyer, C. (2016). Techno-Economic Assessment of Power-to-Liquids (PtL) Fuels Production and Global Trading Based on Hybrid PV-Wind Power Plants. *Energy Procedia*, 99, 243–268. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.115>
- FDP. (2024). *Das Programm der FDP zur Europawahl 2024*. Zugriff am 11.4.2024. Verfügbar unter: <https://www.fdp.de/europa-einfach-machen>
- Fokus Online. (n. d.). Erstes Land setzt rein auf E-Autos und will Verbrenner-Verbot umsetzen. Zugriff am 11.4.2024. Verfügbar unter: https://www.focus.de/auto/elektroauto/news/ladeinfrastruktur-noch-duerftig-erstes-land-setzt-rein-auf-e-autos-und-will-verbrenner-verbot-umsetzen_id_259627938.html
- Fraunhofer ISE. (2021). *Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien Juni 2021*. Freiburg i. Br. Zugriff am 12.4.2024. Verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.html>
- Fulton, M., Carboy, M., Cotter, L., Capalino, R. & Cao, J. (2012). *China's Green Move - Vehicle Electrification Ahead*. Deutsche Bank Groups. DB Climate Change Advisors. Verfügbar unter: https://www.db.com/cr/en/docs/China_GreenCars_080712.pdf
- Hank, C., Holst, M., Thelen, C., Kost, C., Längle, S., Schaadt, A. et al. (2023). *Site-specific, comparative analysis for suitable Power-to-X pathways and products in developing and emerging countries*. Freiburg i. Br. Zugriff am 7.2.2024. Verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-H2Global-Study-Power-to-X-Country%20Analysis.pdf>;
- Haverich, A. (2020). *Wir müssen uns vom Verbrennungsmotor verabschieden und mehr Rad fahren*. Hannover. Zugriff am 5.3.2024. Verfügbar unter: https://stadtmenschfahrrad.de/wp-content/uploads/2020/07/Interview_Haverich.pdf
- Haverich, A. & Kreipe, H. H. (2016). Ursachenforschung Arteriosklerose: Warum wir die KHK nicht verstehen. *Deutsches Ärzteblatt*, 113(10), A 426.
- Helms, H., Bruch, B., Räder, D., Hausberger, S., Lipp, S. & Matzer, K. (2022). *Energieverbrauch von Elektroautos (BEV)*. Dessau-Roßlau: UBA. Zugriff am 10.4.2024. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_160-2022_energieverbrauch_von_elektroautos.pdf
- Hoekstra, A. (2024, Februar 25). Lithium Battery Price War! X. Zugriff am 25.2.2024. Verfügbar unter: <https://twitter.com/AukeHoekstra/status/1761884090913992724>
- Holst, M., Aschenbrenner, S., Smolinka, T., Voglstätter, C. & Grimm, G. (2023). *Cost Forecast for Low Temperature Electrolysis - Technology Driven Bottom-Up Prognosis for PEM and Alkaline Water Electrolysis Systems*. Freiburg. Zugriff am 12.4.2024. Verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2022/auf-dem->

weg-zur-gw-industrie-fraunhofer-ise-liefert-detaillierte-kostenanalyse-fuer-wasserelektrolyse-systeme.html

Hopf, E. (2023, Juni 8). Natrium-Ionen-Batterie vor dem Durchbruch? Zugriff am 25.2.2024. Verfügbar unter: <https://www.elektroniknet.de/power/energiespeicher/natrium-ionen-batterie-vor-dem-durchbruch.204322.html>

Huang, Y., Unger, N., Harper, K. & Heyes, C. (2020). Global Climate and Human Health Effects of the Gasoline and Diesel Vehicle Fleets. *GeoHealth*, 4(3), e2019GH000240. <https://doi.org/10.1029/2019GH000240>

IEA. (2024). *Global EV Outlook 2024 Moving towards increased affordability*. International Energy Agency (IEA). Zugriff am 27.4.2024. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>

IG Windkraft. (2023). Wieviel Strom produziert ein Windrad? Zugriff am 4.8.2023. Verfügbar unter: https://www.igwindkraft.at/?xmlval_ID_KEY%5b0%5d=1147

Irle, R. (2024). Global EV Sales for 2023. Zugriff am 5.3.2024. Verfügbar unter: <https://www.ev-volumes.com/>

Kane, M. (2020, Februar 4). Chinese NEVs Market Slightly Declined In 2019: Full Report. *InsideEVs*. Zugriff am 10.9.2020. Verfügbar unter: <https://insideevs.com/news/396291/chinese-nevs-market-slightly-declined-2019/>

Kane, M. (2024, Februar 5). China Plug-In Car Sales Hit A New 8 Million Record In 2023. Zugriff am 12.4.2024. Verfügbar unter: <https://insideevs.com/news/707264/china-plugin-car-sales-2023/>

Martins Machado, R. F. (2024, März 7). Neues E-Auto von BYD für unter 10.000 Euro vorgestellt. *Computerbild*. Zugriff am 10.3.2024. Verfügbar unter: <https://www.computerbild.de/artikel/cb-News-Connected-Car-Neues-E-Auto-von-BYD-fuer-unter-10.000-Euro-vorgestellt-38102883.html>

Masiero, G., Ogasavara, M. H., Jussani, A. C. & Risso, M. L. (2016). Electric vehicles in China: BYD strategies and government subsidies. *RAI Revista de Administração e Inovação*, 13(1). <https://doi.org/10.1016/j.rai.2016.01.001>

Müller, G. (2023, September 9). Freiflächen-Photovoltaik: Alles Wichtige zur Nutzung, Kosten und Planung. *Sonnenbereich*. Zugriff am 10.4.2024. Verfügbar unter: https://sonnenbereich.de/freiflaechen-photovoltaik/#Was_kostet_1_ha_Solarpark

Müller, S., Lenk, T. & Saerbeck, B. (2023). *Klimaneutrales Stromsystem 2035*. Berlin. Zugriff am 11.4.2024. Verfügbar unter: <https://www.agora-energiewende.de/publikationen/klimaneutrales-stromsystem-2035>

Niedersachsenmetall. (2023, Dezember 6). NiedersachsenMetall und eFuel Alliance plädieren für Technologieoffenheit. Zugriff am 5.4.2023. Verfügbar unter: <https://niedersachsenmetall.de/aktuelles/niedersachsenmetall-und-efuel-alliance-plaedieren-fuer-technologieoffenheit>

Oberholzer, S. (2021). *Energiespeichertechnologien. Kurzübersicht 2021*. Bern: Bundesamt für Energie. Zugriff am 21.2.2024. Verfügbar unter: <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/10623>

Perner, J., Unteutsch, M. & Lövenich, A. (2018). *Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe*. Köln. Zugriff am 10.1.2020. Verfügbar unter: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf

- Ramboll. (2024). Power-to-X: paving the way for a greener future. *Ramboll.com*. Zugriff am 12.3.2024. Verfügbar unter: <https://www.ramboll.com/net-zero-explorers/power-to-x-explained>
- Reichel, J. (2023, März 22). T&E-Analyse: E-Fuel-Tankfüllung würde 210 Euro kosten. Zugriff am 4.3.2024. Verfügbar unter: <https://vision-mobility.de/news/t-e-analyse-e-fuel-tankfuellung-wuerde-210-euro-kosten-250774.html>
- Schleichert, H. (1999). *Wie man mit Fundamentalisten diskutiert, ohne den Verstand zu verlieren: Anleitung zum subversiven Denken* (12.-14. Tsd.). München: Beck.
- Schmidt, O., Hawkes, A., Gambhir, A. & Staffell, I. (2017). The future cost of electrical energy storage based on experience rates. *Nature Energy*, 2(8), 17110. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.110>
- Spritmonitor. (2023a). Spritmonitor Tesla 3. *Spritmonitor*. Zugriff am 18.11.2023. Verfügbar unter: https://www.spritmonitor.de/de/uebersicht/198-Tesla_Motors/1582-Model_3.html
- Spritmonitor. (2023b). Leistung kontra Verbrauch. *Spritmonitor.de*. Zugriff am 7.11.2023. Verfügbar unter: https://www.spritmonitor.de/de/leistung_kontra_verbrauch.html
- Statista. (2023). Leading countries by lithium-ion battery capacity worldwide as of May 2023. Zugriff am 28.2.2024. Verfügbar unter: <https://www.statista.com/statistics/1419540/global-lithium-ion-battery-capacity-by-country/>
- Statista. (2024a). Fahrleistung der Personenkraftwagen in Deutschland nach Merkmalen in den Jahren 2019 und 2020. Zugriff am 4.3.2024. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/246069/umfrage/laufleistung-privater-pkw-in-deutschland/>
- Statista. (2024b). Anzahl der Wind-Volllaststunden nach typischen Standorten für Windenergieanlagen in Deutschland im Jahr 2021. Zugriff am 16.3.2024. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/224720/umfrage/wind-volllaststunden-nach-standorten-fuer-wea/>
- Statista. (2024c). Verteilung der Personenkraftwagen in Deutschland nach Kraftstoffarten von 2019 bis 2023. Zugriff am 4.3.2024. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/994393/umfrage/verteilung-der-kraftstoffarten-zugelassener-pkw-in-deutschland/>
- Sun, L. (2012). Development Policies of New Energy Vehicles in China. *Asian Social Science*, 8(2), 86–94. <https://doi.org/10.5539/ass.v8n2p86>
- T&E. (2023, März 22). Scholz is fuelled with illusions. *Transport & Environment*. Zugriff am 12.3.2024. Verfügbar unter: <https://www.transportenvironment.org/discover/scholz-is-fuelled-with-illusions/>
- The Economist. (2023). How China became a car-exporting juggernaut. Zugriff am 5.3.2024. Verfügbar unter: <https://www.economist.com/graphic-detail/2023/08/10/how-china-became-a-car-exporting-juggernaut>
- TRAN Committee. (2023). *Assessment of the potential of sustainable fuels in transport*. Brüssel. Zugriff am 12.3.2024. Verfügbar unter: <https://bit.ly/3Yw1RPe>
- Transport & Environment. (2021). *Magic green fuels: Why e-fuels in cars will not solve pollution*. Zugriff am 21.4.2024. Verfügbar unter: <https://www.transportenvironment.org/discover/magic-green-fuels-why-synthetic-fuels-in-cars-will-not-solve-europes-pollution-problems/>

- Trinomics. (2020). *Final Report Cost of Energy (LCOE)*. Rotterdam. Zugriff am 12.4.2024. Verfügbar unter: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-10/final_report_levelised_costs_0.pdf
- Tyfield, D., Zuev, D., Ping, L. & Urry, J. (2014). *Low Carbon Innovation in Chinese Urban Mobility: Prospects, Politics and Practices*. STEPS Working Paper 71. Brighton: Steps Centre.
- 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>
- Umweltbundesamt. (2023). Photovoltaik-Freiflächenanlagen. Zugriff am 10.4.2024. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/photovoltaik/photovoltaik-freiflaechenanlagen#flacheninanspruchnahme-durch-photovoltaik-freiflaechenanlagen>
- Wirth, H. (2024). *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland April 2024*. Freiburg i.Br. Zugriff am 10.4.2024. Verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.html>