



E-Fuel – Fluch oder Segen?

Februar 2026

Prof. Dr. Werner Tillmetz

e2connect/Bodensee

wt@e2connect.org

Die derzeit sehr intensiven Diskussionen zum Verbrenner-Aus zeigen, dass sowohl die Europäische Kommission, als auch viele Fahrzeughersteller eine Strategie verfolgen, die fast ausschließlich auf rein batterieelektrische Antriebe setzt. Dabei sollten wir uns zuerst die Frage stellen, woher der CO₂-freie Strom zum bedarfsgerechten Laden der etwa 49 Millionen Pkw und 6,3 Millionen Nutzfahrzeuge nur in Deutschland kommen soll. Heute verbraucht der deutsche Transportsektor etwa 700 Terrawattstunden (TWh) an fossilen Kraftstoffen, die nicht nur einfach zu speichern und zu transportieren sind, sondern auch komplett importiert werden. Der Anteil der einheimischen Sonnen- und Windstromerzeugung am deutschen Primärenergieverbrauch von knapp 3.000 TWh liegt heute bei gerade einmal bei sieben Prozent (220 TWh). Wird es überhaupt möglich und bezahlbar sein, den für die E-Mobilität künftig notwendigen grünen Strom zu jeder Tages- und Jahreszeit in ausreichenden Mengen und bedarfsgerecht zur Verfügung zu stellen? Welche Rolle könnten auf Wasserstoff und seine Derivate (E-Fuel) zukommen? Den aktuellen Berichterstattungen zufolge gehören E-Fuels eher in die Kategorie „Teufelszeug“ – zu teuer und zu ineffizient in der Herstellung. Flugverkehr und die Handelsschifffahrt werden hingegen als unausweichliche Ausnahmen akzeptiert. Dabei ist der Flugverkehr mit einem weltweiten Verbrauch von 1,2 Milliarden Litern Kerosin pro Tag alles andere als ein Nischenmarkt.

Die notwendige ganzheitliche Analyse des künftigen Energiesystems inklusive Verkehr, die auch tages- und jahreszeitliche Aspekte berücksichtigt, findet bis heute kaum statt. Ein Beispiel für eine solche ganzheitliche Betrachtung ist eine Modellrechnung des Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) aus dem Jahr 2021: In einem Energiesystem, das zu 100 Prozent auf Erneuerbaren Energien basiert, werden für Deutschland etwa 80 Gigawatt (GW) an Elektrolyseuren zur Produktion von Wasserstoff und 100 GW an flexiblen Wasserstoff-Gasturbinen für die Spitzenstromerzeugung benötigt, unter anderem zum Laden von E-Fahrzeugen. Zum Vergleich: Derzeit sind nur etwa 30 GW an flexiblen Erdgaskraftwerken installiert. In der DIW-Studie wurde allerdings der Import von Wasserstoff oder E-Fuel nicht betrachtet.



Was sind E-Fuels und wie werden sie hergestellt?

E-Fuels werden aus CO_2 , Wasser und Sonnenlicht hergestellt. Dazu ein interessanter Vergleich: Die natürliche Photosynthese zur Erzeugung von Biomasse basiert auf denselben Ausgangsstoffen. Aus dieser Biomasse sind dann in den letzten 65 bis 300 Millionen Jahren Kohle, Erdöl und Erdgas entstanden. Damit wurden damals gigantische Mengen an CO_2 aus der Atmosphäre entfernt und unterirdisch als fossile Energie gespeichert. Diese wurde dann in den letzten 200 Jahren für unsere Energieversorgung wieder freigesetzt.

Die Herstellung von E-Fuels beginnt bereits heute in den Wüstenregionen unserer Erde und wird künftig stark zunehmen. Der dort sehr kostengünstige Strom aus Sonne und Wind kann in diesen weitgehend menschenleeren Regionen (Abb.1) nicht direkt genutzt werden und steht somit auch nicht in Konkurrenz zu anderen Anwendungen. Mit diesem Strom wird vor Ort Wasserstoff über die Elektrolyse von Wasser erzeugt. Aus CO_2 und Wasserstoff entsteht dann über katalytische Prozesse Methanol (Abb.2). Dieses Methanol kann direkt genutzt oder in E-Benzin oder E-Kerosin (SAF) umgewandelt werden, das dann direkt in den heutigen Motoren oder Turbinen eingesetzt werden kann (Drop-In-Kraftstoffe).

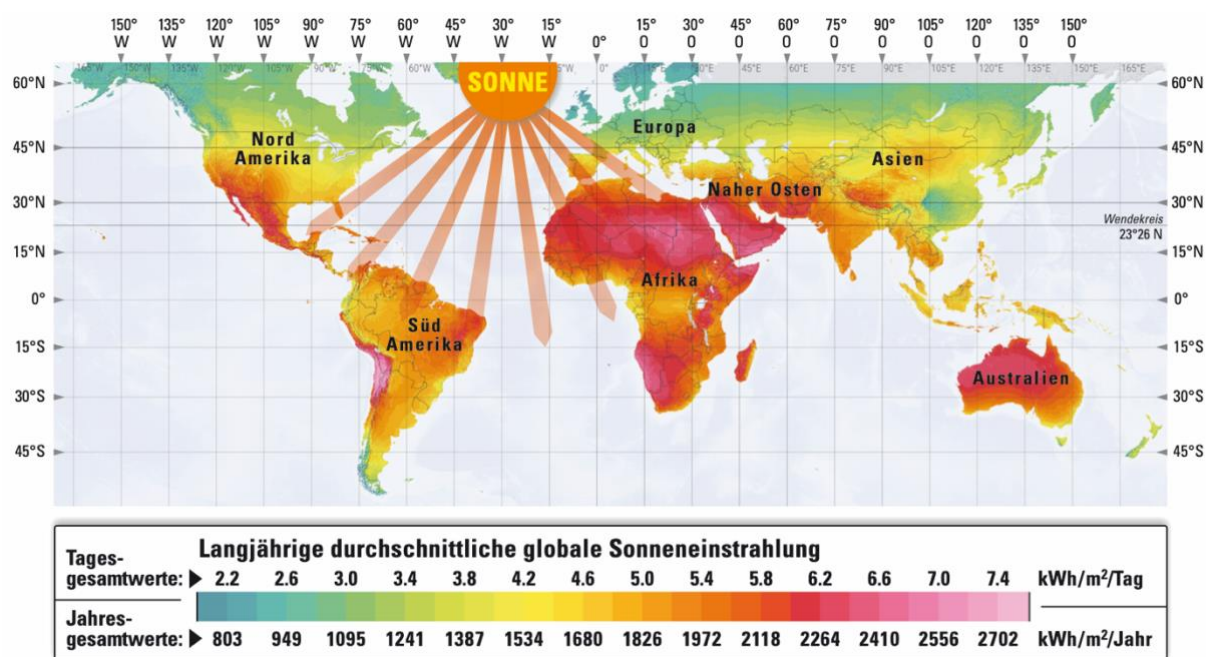


Abb.1: Globale horizontale Sonneneinstrahlung. In den sonnenreichen Regionen kann im Vergleich zu Zentraleuropa bis zu dreimal mehr Strom mit dem gleichen Solarmodul geerntet werden (Bildquelle: Arno Evers, Sunny Houses Samal Island)

Das für die Herstellung der E-Fuel notwendige CO_2 stammt heute meist aus Biomasse (z.B. aus der Biogas- oder der Ethanol-Erzeugung). Auch industrielle CO_2 -Quellen (Beispiel



Zementherstellung oder Müllverbrennung) eignen sich gut für die E-Fuel Produktion. Das mengenmäßig größte Potential liegt bei der Absorption von CO₂ aus der Atmosphäre (Direct-Air-Capture, DAC). Die zweite Generation an DAC-Technologien mit deutlich reduziertem Energiebedarf ist weltweit in der Entwicklung. Einige Technologien können sogar das für die Elektrolyse notwendige Wasser bereitstellen. Bei allen anderen Technologien wie der Wasserelektrolyse, der Methanol-Synthese oder der Methanol-to-Olefin-Technologie zur Erzeugung von E-Benzin oder E-Kerosin handelt es sich um industriell etablierte Prozesse.

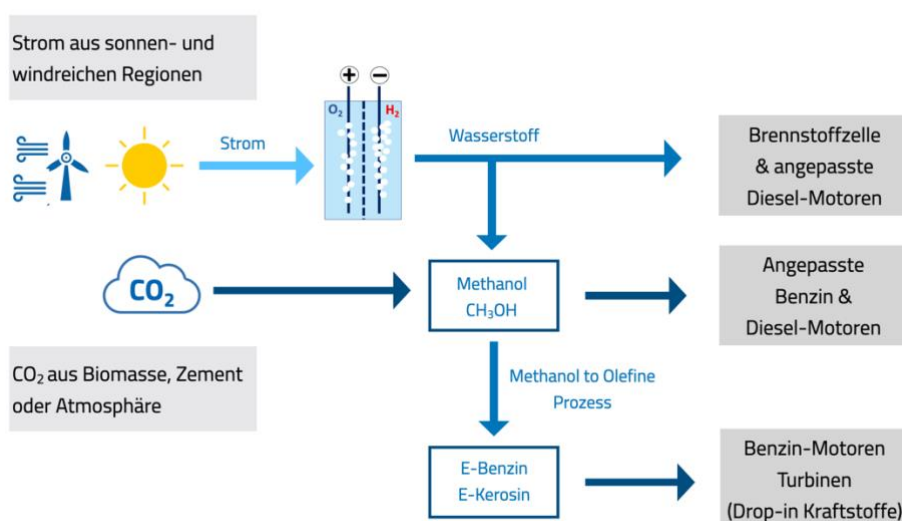


Abb.2: Prinzip der Herstellung von E-Fuel aus CO₂ und grünem Wasserstoff

In den letzten Jahren haben sich die Aktivitäten zur Herstellung von E-Fuels sehr dynamisch entwickelt. Die internationale Handelsschifffahrt hat sich zum größten Abnehmer für E-Methanol entwickelt. Neue Schiffe werden mit Dual-Fuel-Motoren ausgerüstet. Diese können zunächst mit relativ sauberem Schiffsdiesel betrieben und sobald verfügbar oder regional gefordert auf E-Methanol umgestellt werden. Weltweit entstehen derzeit zahlreiche Produktionsanlagen für dieses grüne Methanol. Die aktuell größte Anlage mit einer Kapazität von 1,4 Millionen Tonnen pro Jahr baut gerade Goldwind, einer der weltweit größten Hersteller von Windkraftanlagen, in der Mongolei. In China fahren heute rund 50.000 Pkw mit Methanol. Besonders interessant wird die Nutzung der synthetischen Kraftstoffe in Elektrofahrzeugen mit Range-Extender (Extended Range Electric Vehicle, EREV) werden. Im letzten Jahr wurden in China eine Million dieser effizienten, heute noch mit fossilen Kraftstoffen betriebenen, effizienten Fahrzeuge zugelassen.

In den Formel1- Rennen wird ab diesem Jahr nur noch klimaneutrales E-Benzin erlaubt sein. Die gleichzeitig geforderte Hybridisierung dieser Antriebe reduziert den Kraftstoffverbrauch um 25 Prozent. Dieses E-Benzin wird von Saudi Aramco, BP, Shell,



Exxon und Petronas hergestellt. Bei einer großtechnischen Produktion werden Herstellungskosten von 80 Cent pro Liter erwartet.

Der heutige Verkehrssektor basiert fast ausschließlich auf fossilen Kraftstoffen

Unser heutiges Energiesystem basiert in Deutschland, wie auch weltweit, zu etwa 80 Prozent auf den unkompliziert zu transportierenden und einfach zu lagernden fossilen Energieträgern Öl, Kohle und Erdgas. Damit einher gehen jedoch auch die bis heute zunehmenden CO₂-Emissionen von rund 40 Milliarden Tonnen pro Jahr. Die fossilen Energien werden heute kontinuierlich, Tag für Tag, nach Deutschland importiert. Die dafür notwendige Infrastruktur, von der Pipeline bis zur Tankstelle, wurde über Jahrzehnte aufgebaut und optimiert, und ist bis heute voll funktionsfähig. Die fossilen Energien sind darüber hinaus der weltweit bedeutendste Wirtschaftsfaktor mit einem Umsatz von etwa sieben Milliarden USD pro Tag nur für Rohöl (100 Millionen Barrel pro Tag Produktion bei einem Handelspreis von 70 USD pro Barrel). Mit der Veredelung des Rohöls bis zu den alltäglich an der Tankstelle genutzten Kraftstoffen verdreifacht sich der Gesamtumsatz – inklusiver Steuern. Nachdem 96 Prozent aller Pkw und mehr als 99 Prozent aller Nutzfahrzeuge heute mit fossilen Kraftstoffen auf Deutschlands Straßen unterwegs sind, erfordert die komplette Umstellung auf klimaneutrale Energieträger (Strom, Wasserstoff, E-Fuel) eine gut durchdachte und langfristig angelegte Strategie.

Trotz des enormen Wachstums in den letzten Jahren fristen Sonnen- und Windenergie in Bezug auf den gesamten Energiebedarf – nicht nur bezogen auf die Stromerzeugung – noch immer ein Nischendasein: Nur sieben Prozent des deutschen Primärenergiebedarfs werden heute über Sonne und Wind bereitgestellt. Künftig müssen sie die dominierende Rolle bei der Energieversorgung übernehmen. Die sehr unstete Erzeugung von Strom aus Wind- und Sonnenenergie ist heute schon und wird immer mehr zur größten Herausforderung werden. Laut Deutschem Wetterdienst gibt es hierzulande nur etwa an 1.800 der insgesamt 8760 Stunden eines Jahres oder etwa an 130 Tage nennenswerten Sonnenschein. In den restlichen 7.000 Stunden (80 Prozent der Zeit) steht bei uns auch künftig kein oder nur sehr wenig Sonnenstrom zur Verfügung. Die Verfügbarkeit von Wind ist ebenfalls begrenzt. Gerade bei Hochdruckwetterlagen gibt es für viele Tage, manchmal Wochen nur wenig Strom aus Windkraftanlagen. Batterien eignen sich nur für die Kurzzeitspeicherung sowie für die Pufferung des temporär hohen Leistungsbedarfs beim Schnellladen. Es bedarf auch regelmäßig ausreichend grünen Strom zum Wiederaufladen der Batteriespeicher. Die meiste Zeit müssen heute fossile, künftig mit Wasserstoff betriebene Kraftwerke den Strombedarf decken für die heutigen Stromverbraucher und künftig zusätzlich für das Laden der batterie-elektrischen Fahrzeuge und Wärmepumpen (Abb. 3).



Die bereits heute installierten 200 GW an Photovoltaik und Windenergie führen andererseits temporär zu hohen Überschüssen an Strom, die trotz der dann sehr niedrigen, oft negativen Preise, keine Verbraucher finden und abgeregelt werden müssen. Diesen überschüssigen Strom in Form von Wasserstoff zu speichern, wird ein essentieller Baustein des künftigen Energiesystems sein, so wie es das DIW berechnet hat.

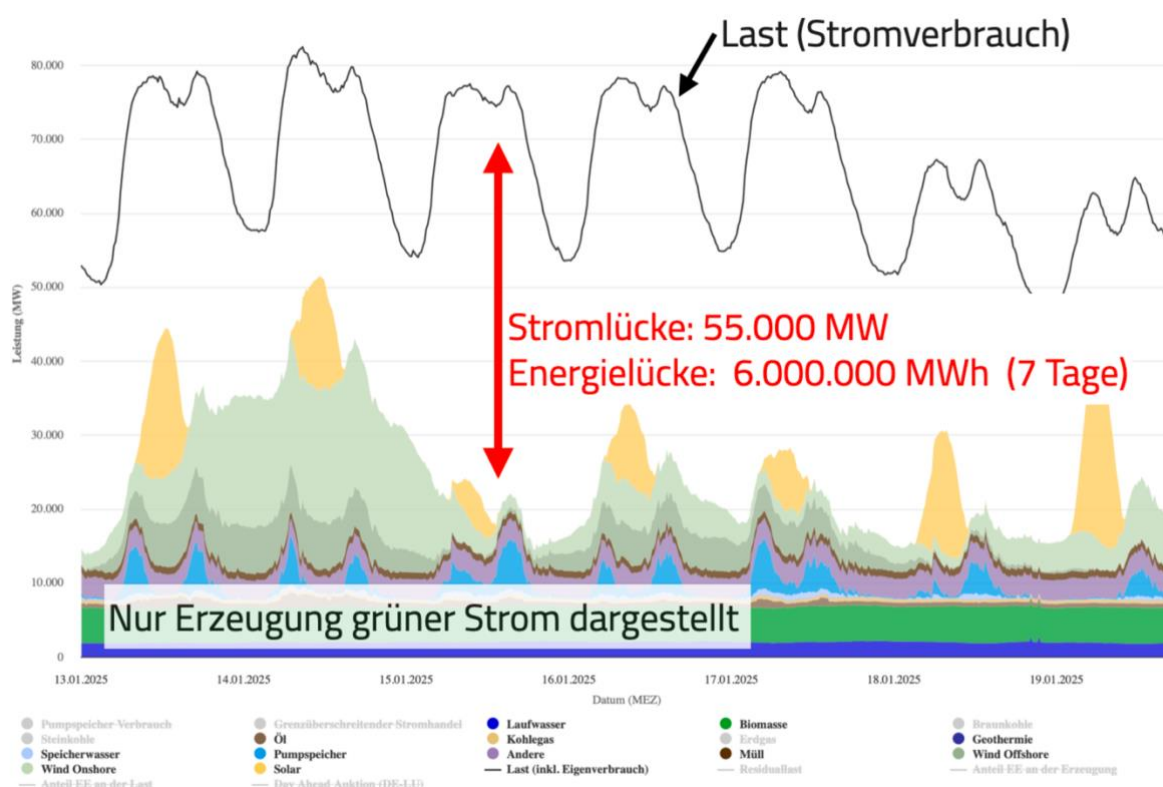


Abb.3: Stromerzeugung und Verbrauch in einer typischen Winterwoche. Trotz steigender installierter Kapazitäten wird auch künftig zu sonnen- und windarmen Zeiten kaum grüner Strom zur Verfügung stehen. Die Last wird sich dagegen mit dem weiteren Ausbau der batterie-elektrischen Mobilität deutlich erhöhen. Die Lücke kann nur durch Spitzenlast Kraftwerke (Wasserstoff) geschlossen werden. (Quelle: Fraunhofer ISE, Energy-Charts)

Was bedeutet das für die Energieversorgung des Verkehrs von morgen?

Zur Beantwortung dieser Frage ist es wichtig, folgendes zu verstehen: Das global real verfügbare Potential an Sonnen- und Windenergie übersteigt den heutigen weltweiten Energiebedarf um ein Vielfaches. Die vielen Wüsten im Sonnengürtel der Erde und die fast unendlich langen, windreichen Meeresküsten ermöglichen die Erzeugung riesiger Mengen an grünem Strom (Abb.1). In den Wüsten gibt es beispielsweise an 360 Tagen für mehr als 10 Stunden Sonnenschein. In diesen meist menschenleeren Regionen kann der sehr billige Strom (1 Cent/kWh) kaum vor Ort genutzt werden. Ein Stromtransport rund um den Globus



ist nicht realistisch umsetzbar. Vor Ort können aus dem Strom jedoch flüssige Kraftstoffe erzeugt werden, die dann einfach per Schiff, Bahn und LKW zum Verbraucher in den dicht besiedelten Gebieten der Erde transportiert werden. Dabei ist E-Methanol einer der attraktivsten Energieträger. Methanol kann direkt in leicht angepassten Motoren genutzt, oder zu den etablierten Kraftstoffen wie Benzin oder Kerosin weiterveredelt werden (Abb.2). Die Tatsache, dass in den sonnenreichen Regionen mit einem Solarmodul zwei- bis dreimal so viel Strom produziert wird als in Deutschland, dieser vor Ort aber nicht genutzt werden kann, spiegelt sich in den so beliebten Wirkungsgraddiskussion (Abb.4) nicht wider. Entscheidend sind am Schluss die (künftigen) Herstellkosten des Kraftstoffes inklusive der Transportkosten. Und nicht zu vergessen: Die Speicherfrage ist bei flüssigen und damit einfach zu transportieren und lagernden Energieträgern bereits gelöst.

Die Vielzahl effizienter E-Antriebe

In der öffentlichen Kommunikation wird der Begriff „E-Fahrzeug“ automatisch mit batterie-elektrischen Antrieben gleichgesetzt. Dabei gibt es viele Varianten an elektrischen Antrieben. Bei den rein batterie-elektrischen Antrieben (Battery Electric Vehicle, BEV) muss die für die Fahrt notwendige Energie in den Batterien gespeichert werden, die bei Pkw bis zu 800 kg und bei Lkw und Bussen oft mehr als 5.000 kg wiegen. Bei Brennstoffzellen-Antrieben (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV) wird der Strom zum Fahren an Bord aus Wasserstoff erzeugt. In Kombination mit einer deutlich kleineren Batterie, die die Rückgewinnung von Bremsenergie ermöglicht, wird ein effizienter, emissionsfreier Antrieb möglich, der vor allem für Fahrzeuge mit hohem Energieverbrauch und hoher Fahrleistung vorteilhaft ist (kurze Betankungszeiten und geringeres Gesamtgewicht). Bei E-Fahrzeugen mit einem Range Extender (Extended Range Electric Vehicle, EREV) wird eine kleine Batterie (bei Pkw etwa 20 kWh) von einem Stromgenerator auf Basis eines Verbrennungsmotors und nur bei Bedarf an Bord nachgeladen. Der Motor des Stromgenerators wird dann im Bestpunkt mit einem hohen Wirkungsgrad von etwa 45 Prozent und minimalen Schadstoffemissionen betrieben. Das Tanken des flüssigen Kraftstoffes (E-Fuel) erfolgt wie heute bei den konventionellen Fahrzeugen an einer ganz normalen Tanksäule.

In der omnipräsenten Diskussion zu den Wirkungsgraden wird entweder nur die Effizienz des Fahrzeuges (vom Tank bis zum Rad) betrachtet oder angenommen, dass immer ausreichend grüner Strom direkt zum Laden zur Verfügung steht (Abb.4, Pfad oben). Dies ist aber relativ selten der Fall, z.B. an sonnigen Sommertagen zur Mittagszeit oder bei stürmischem Wetter. Begrenzt ist auch eine Zwischenspeicherung über Batterien möglich. Die meiste Zeit kommt der zusätzlich zum Laden der Fahrzeuge notwendige Strom aus einem thermischen Kraftwerk mit einem Wirkungsgrad von maximal 40 Prozent. Für CO₂-freien Strom muss das Kraftwerk künftig mit grünem Wasserstoff betrieben werden. Damit reduziert sich der Gesamtwirkungsgrad von der grünen Stromquelle bis zum Rad unter das



Niveau von Verbrennungsmotoren. Diese ganzheitliche Betrachtung findet so gut wie nie statt.

Die direkte Nutzung des Wasserstoffs in Brennstoffzellen-Antrieben wird dann ganzheitlich betrachtet effizienter als in einem BEV, bei dem der Strom aus dem Kraftwerk kommt. Im Sonnengürtel unserer Erde wird Solarstrom inzwischen für 1 Cent/kWh erzeugt. Daraus kann dann sehr kostengünstig Wasserstoff erzeugt und in E-Fuels weiterverarbeitet werden (Abb.2). In einer ganzheitlichen Analyse ist dies sogar relativ effizient und vor allem aufgrund der sehr niedrigen Stromkosten auch preislich attraktiv.

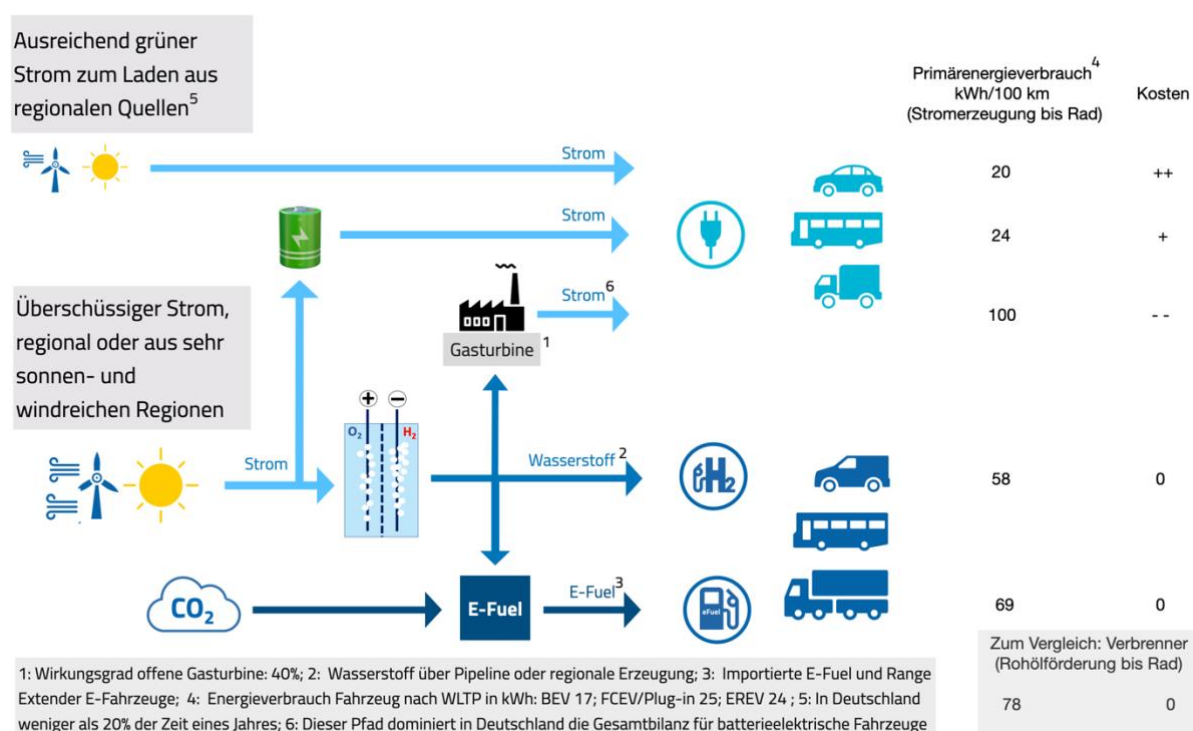


Abb.4: Ganzheitliche Betrachtung (von der Stromerzeugung bis zum Rad) zu Wirkungs-graden und Kosten für die verschiedenen Optionen an E-Fahrzeugen und grünen Kraftstoffen.

Für E-Fuels werden bei großtechnischer Produktion Kosten von acht Cent/kWh (80 Cent/l) erwartet. Das ist etwa doppelt so viel wie fossiles Benzin heute kostet. Durch den effizienten Range Extender würde sich der Verbrauch halbieren und die Kosten pro Kilometer blieben ähnlich wie beim heutigen Verbrenner. Im Vergleich zu einem Strompreis von 80 Cent/kWh an einer Schnellladesäule ist das sehr günstig, auch umgerechnet auf den Verbrauch pro Kilometer. Heute sind E-Fuels erst begrenzt verfügbar, obwohl fast alle für die Herstellung erforderlichen Prozesse großtechnisch etabliert sind. Die neuen, sehr kostengünstigen Technologien zur CO₂-Separation (Direct Air Capture) stehen aktuell kurz vor der Industrialisierung. Die attraktiven Marktpreise entwickeln sich dann im künftigen



Ökosystem. In der Grafik unten nicht betrachtet sind die gigantischen Kosten für den Ausbau des Stromnetzes der Ladeinfrastruktur und die Spitzenlastkraftwerke, die für eine dominant batterie-elektrische Mobilität anfallen werden.

Fazit

Bei einer ganzheitlichen Betrachtung sind E-Fuels eine attraktive Option, vor allem für effiziente Range Extender E-Antriebe. Die vorhandene Infrastruktur für die flüssigen Kraftstoffe spart Investitionen und erfreut sich einer hohen Akzeptanz bei den Nutzern. Der hunderte von Milliarden Euro teure Ausbau der Ladeinfrastruktur und des Stromnetzes, wie auch die Investitionen in Spitzenlastkraftwerke für die bedarfsgerechte Erzeugung von Strom, könnten dann entfallen. Brennstoffzellen, Elektrolyseure und Range Extender bieten ein hohes Potential für eine heimische Wertschöpfung und werden zentraler Baustein der Energiewende sein, die nur mit technologischer Vielfalt und nicht mit Einfachheit erfolgreich umgesetzt werden wird.