

gÖl.Mobil

Einsatz von grünen Treibstoffen in der Mobilität

Kurzbericht

Verfassende: DI Lorenz Strimitzer, Mag. Christoph Dolna-Gruber, Dr. Martin Baumann, Österreichische Energieagentur

Auftrageber:innen: BMK, Abteilung VI/2 – Strategische Energiepolitik

Ort, Datum: Wien, 30.11.2022

Impressum

Herausgeberin: Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency, Mariahilfer Straße 136, 1150 Wien

Telefon: +43 1 586 15 24, Fax-Durchwahl 340, office@energyagency.at, energyagency.at

Für den Inhalt verantwortlich: DI Franz Angerer | Gesamtleitung: DI Lorenz Strimitzer

Lektorat und Layout: Gabriele Möhring

Herstellerin: Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency | Verlagsort und Herstellungsort: Wien

Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier. Nachdruck nur auszugsweise und mit genauer Quellenangabe gestattet.

Die Österreichische Energieagentur hat die Inhalte der vorliegenden Publikation mit größter Sorgfalt recherchiert und dokumentiert. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte können wir jedoch keine Gewähr übernehmen.

1 Kurzfassung

Der Sektor Verkehr ist laut Klimaschutzbericht des Umweltbundesamtes (2022) nach Energie und Industrie der wichtigste Verursacher von Treibhausgas-Emissionen in Österreich. Rund ein Drittel der Emissionen entfallen auf den Verkehr, seit dem Jahr 1990 sind die Emissionen deutlich gestiegen. Um das Ziel der Klimaneutralität bis 2040 zu erreichen, besteht akuter Handlungsbedarf.

Es gibt verschiedenste Optionen um die Emissionen des Verkehrssektors zu senken, beispielsweise durch die Vermeidung von Fahrten, der Verkehrsmittelwahl bis hin zur Substitution von fossiler Antriebsenergie. Neben der Elektromobilität kommen für Letzteres auch alternative Kraftstoffe in Frage. Diese werden von manchen Akteuren als vielversprechende Option zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors hervorgehoben. Vor diesem Hintergrund wurde in gegenständlichem Projekt für das Segment der Personenkraftwagen der Einsatz von strombasierten, synthetischen Kraftstoffen (E-Fuels) im Vergleich zur batterieelektrischen Mobilität untersucht. Das Ziel des Projekts war, die Treibhausgas-Emissionen über den Lebenszyklus, die Effizienzketten sowie die benötigten Energiemengen unterschiedlicher PKW-Antriebstechnologien miteinander zu vergleichen.

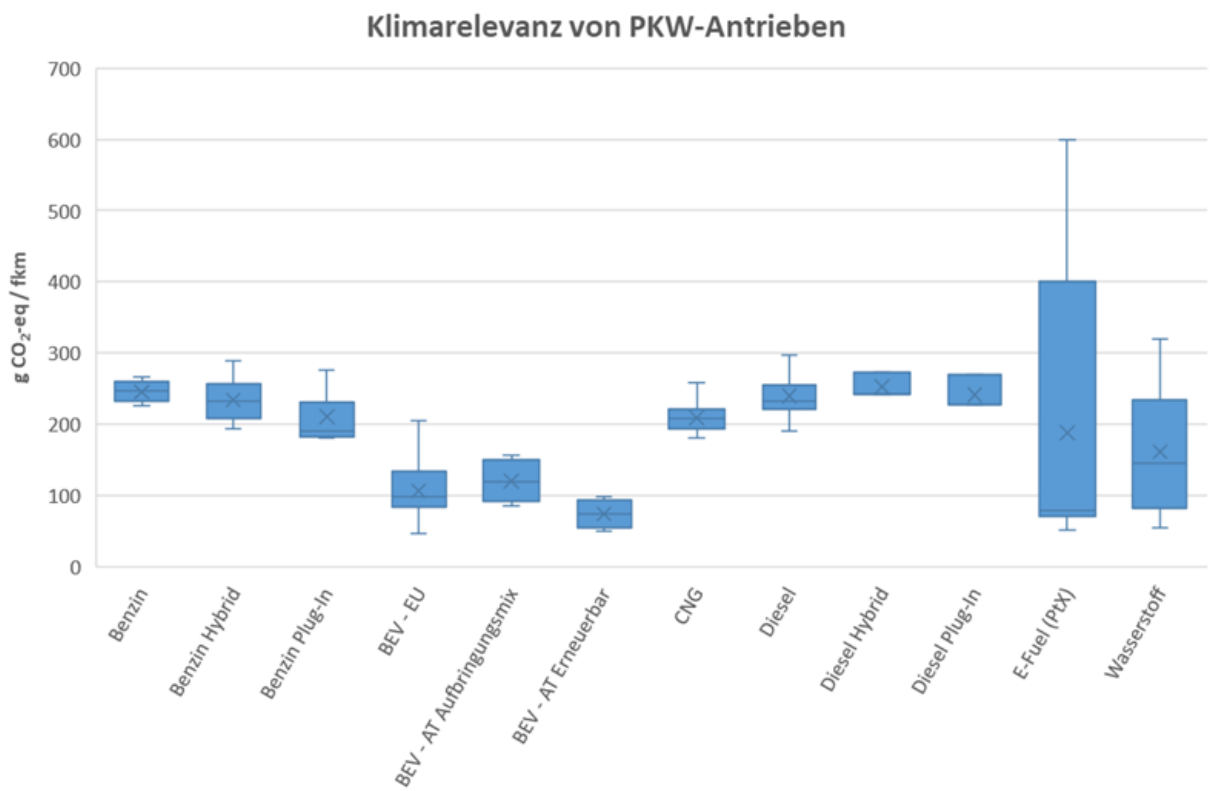
THG-Emissionen im Vergleich – die eingesetzte Energie entscheidet

Um die Treibhausgasemissionen von Antriebstechnologien zu quantifizieren wurde eine Meta-Analyse von bestehenden Lebenszyklusanalysen (LCA) durchgeführt, d.h. es wurden Studienergebnisse recherchiert, die den gesamten Lebenszyklus der PKW-Mobilität „von der Wiege bis zur Bahre“ (cradle-to-grave) abdecken. Im Gegensatz zu sog. „Well-to-Tank“ oder „Well-to-Wheel“-Analysen umfasst die LCA sämtliche Phasen des Lebenszyklus und ist daher am besten geeignet, die Umweltauswirkungen umfassend zu bewerten. Dies ist insofern wichtig, da die Gesamtemissionen je nach Technologie ungleich auf unterschiedliche Phasen des Lebenszyklus verteilt sind. Insgesamt wurden über 100 Studienergebnisse, Szenarien und Berechnungen recherchiert und zusammengefasst. Die Analyse zeigt, dass v.a. die eingesetzte Energie, die Batterie sowie die Art der Fahrzeugnutzung Einfluss auf die THG-Emissionen über den Lebenszyklus haben:

- Einfluss der eingesetzten Energie: der herangezogene Energiemix ist bei allen Technologien der wichtigste Parameter zur Beeinflussung der THG-Emissionen. Der Energieeinsatz wird dabei von der Nutzungsphase dominiert. Neben der batterieelektrischen Mobilität (BEV) haben auch E-Fuels (und auch H₂-Brennstoffzellen-PKW) über den Lebenszyklus gesehen rechnerisch geringe Emissionen. Der Schlüssel zur Emissionsreduktion liegt bei BEV sowie bei E-Fuels und Brennstoffzellen-PKW in der Dekarbonisierung des Stromsystems. Ladeverluste und Übertragungsverluste sind bei Elektroautos von geringer Relevanz. Bei allen Technologien sind Annahmen über künftige Entwicklungen (z.B. „Wie entwickeln sich die Emissionen der Stromproduktion über die Zeit?“) ein wesentlicher Unsicherheitsfaktor der Berechnung.
- Bedeutung der Batterie: Die Produktion von Akkumulatoren für Elektroautos ist energieintensiv und die Batteriegröße nimmt wesentlichen Einfluss auf die THG-Emissionen (insb. bei geringen Fahrleistungen). Die Analysen zeigen, dass je nach Herkunftsland mit teils sehr großen Schwankungen bei den THG-Emissionen der Batterieproduktion zu rechnen ist. Ein wesentlicher Grund hierfür sind Annahmen zur CO₂-Intensität des eingesetzten Strom-Mix. Da es zu Second-Life und Recyclingprozessen von Batterien noch keine LCA-Ergebnisse in vergleichbarer Qualität gab, wurden diese nicht berücksichtigt. Eine Einbeziehung dieser Effekte würde die batterieelektrische Mobilität im Vergleich nochmal etwas besser abschneiden lassen.
- Auswirkung der Fahrzeugnutzung: Die Nutzung des PKW bestimmt die Emissionen. Die Umweltvorteile von batterieelektrischen Fahrzeugen werden durch die Fahrleistung erzielt, Nutzungsprofile nehmen

wesentlichen Einfluss auf die Gesamtemissionen. Kleinere Batterien können die Emissionen von BEV signifikant senken, insbesondere für den Stadtverkehr oder Kurzstrecken. Der Trend zu immer größeren Batterien konterkariert die Emissionsreduktion bei BEV spürbar. Um möglichst geringe THG-Emissionen zu erzielen, müssten in einer Fahrzeugflotte möglichst wenige Fahrzeuge mit möglichst hohen Jahresfahrleistungen zum Einsatz kommen. Wichtig ist, dass Testverbräuche von realen Werten mitunter sehr deutlich abweichen.

Die Lebenszyklusemissionen verschiedener PKW-Antriebssysteme sind in folgender Grafik zusammengefasst:

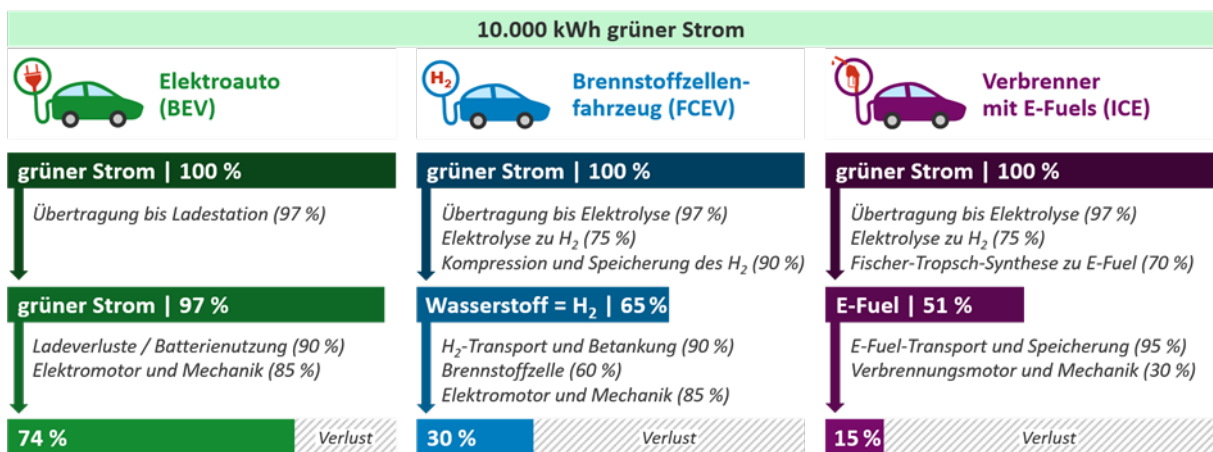


Die Meta-Analyse von LCA-Ergebnissen zeigt, dass die niedrigsten Emissionen je Fahrzeugkilometer mit BEV erreicht werden. Die Nutzung von erneuerbarem Strom senkt die THG-Emissionen noch einmal deutlich. Aber selbst im schlechtesten Fall schneiden batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge besser ab als mit konventionellem Diesel oder Benzin betriebene Verbrenner. E-Fuels und auch H₂-Brennstoffzellen-PKW können THG-Emissionen rechnerisch im gleichen Ausmaß senken wie BEV. Allerdings zeigt die Analyse, dass aufgrund der niedrigen Marktreife dieser Technologien viele Annahmen getroffen werden müssen. Die Schwankungsbreite der Ergebnisse bei E-Fuels ist daher sehr groß, es lassen sich ebenso Beispiele errechnen, in denen E-Fuel betriebene Verbrenner wesentlich schlechter abschneiden als konventionelle diesel- und benzinbetriebene PKW. Die Plug-In Hybrid-Technologie bringt jedenfalls keine nennenswerte Einsparung an CO₂-Emissionen. Sowohl für BEV als auch für E-Fuels und H₂-Brennstoffzellen-PKW gilt, dass die Dekarbonisierung der Stromproduktion Grundvoraussetzung für weitere Emissionsreduktionen ist. Wichtig ist, dass sich „Einsparungen“ nur dann rechtfertigen lassen, wenn tatsächlich „fossile“ Fahrten ersetzt werden. Wenn BEV oder E-Fuels zusätzlich zum bestehendem Verkehrsaufkommen „on top“ dazu kommen, kann in Summe nicht von einer tatsächlichen Emissionsreduktion gesprochen werden, ganz egal welche Technologie zum Einsatz kommt.

Batterieelektrische Mobilität ist am effizientesten

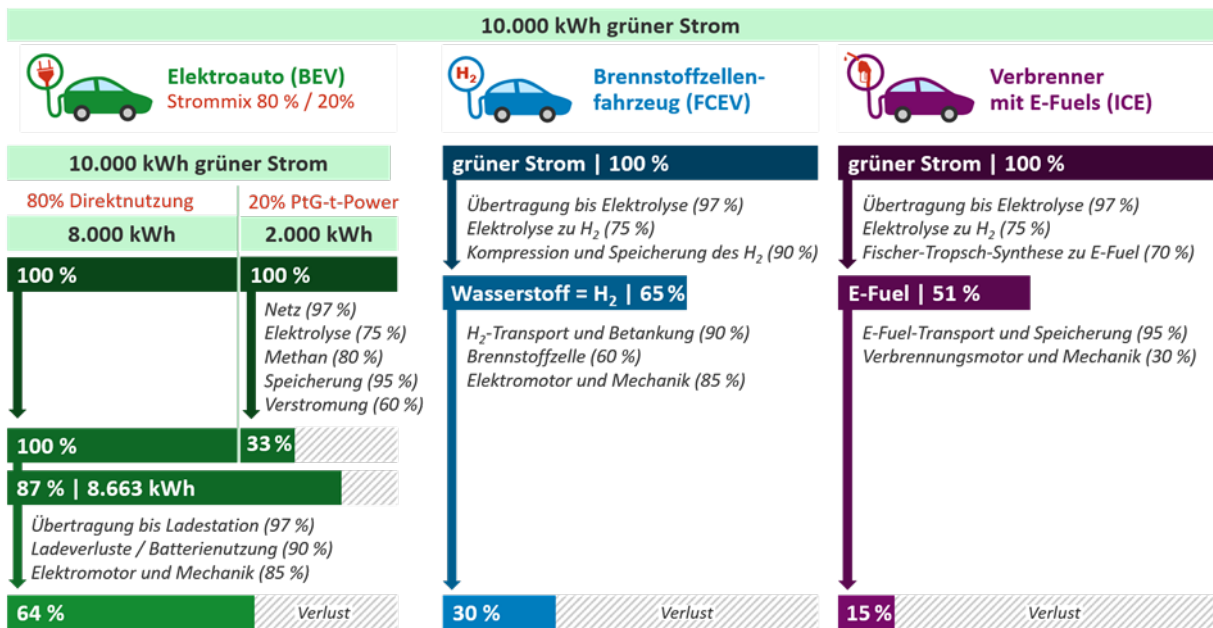
Energieeffizienz ist ein Schlüssel zur Bewältigung der Klima- und Energiekrise. Vor diesem Hintergrund haben wir die Effizienzketten der drei Antriebstechnologien BEV, Brennstoffzellen-Fahrzeug und Verbrenner mit E-Fuels im Detail analysiert und Umwandlungsverluste dargestellt. In der Analyse basieren alle drei Technologien auf erneuerbarem Strom, Unterschiede bestehen jedoch in der Art der Energiespeicherung (Batterie, Wasserstoff, E-Fuel) sowie der Art des Antriebs (Elektromotor, Brennstoffzelle & Elektromotor, Verbrennungsmotor).

Für den Effizienzvergleich zwischen den genannten Technologie-Optionen wurde untersucht, wie effizient diese sind und welche Distanz bei einem Einsatz von 10.000 kWh erneuerbarer, elektrischer Energie zurückgelegt werden kann. Dabei zeigt sich, dass das BEV mit einer Gesamteffizienz von 74 % deutlich vor dem Brennstoffzellen-Fahrzeug (30 %) und dem Verbrenner mit E-Fuels liegt (15 %):



Quelle: AEA, eigene Darstellung

Bei der batterieelektrischen Mobilität wurde des Weiteren berücksichtigt, dass eine vollständige Strom-Direktnutzung zwar am effizientesten, allerdings auch unwahrscheinlich ist. Aus diesem Grund wurde eine Zwischenspeicherung in Form einer Power-to-Gas-Route mit anschließender Rückverstromung berechnet und Szenarien mit unterschiedlichen Anteilen der Strom-Direktnutzung angenommen. Werden 100 % des Stroms auf diese Art zwischengespeichert, sinkt die Gesamteffizienz der des BEV auf 25 %. Dieser aus Sicht der Effizienz angenommene Worst-Case für BEV ist immer noch wesentlich effizienter als die E-Fuel-Variante. Je nach angenommenem Verhältnis von Strom-Direktnutzung zu Zwischenspeicherung lassen sich unterschiedliche Werte für die Gesamteffizienz von BEV errechnen. Für den laut Expertenschätzung plausiblen Fall von 80 % Strom-Direktnutzung und 20 % Zwischenspeicherung sind die Ergebnisse in folgender Grafik übersichtlich zusammengefasst:



Quelle: AEA, eigene Darstellung

Die Analysen zeigen deutlich, dass die batterieelektrische PKW-Mobilität auch unter Berücksichtigung von Rückverstromung und angenommenen Verlusten die mit Abstand effizienteste Technologie darstellt.

Oft wird hier ins Treffen geführt, dass die erneuerbare Stromproduktion in anderen Gegenden der Welt viel effizienter sei und dass deswegen die Gesamteffizienz der E-Fuels mit dortiger Stromproduktion besser zu bewerten sei. In unserer Analyse kommen wir allerdings zum Schluss, dass für die Bestimmung des Gesamtwirkungsgrads das energetische Input-Output-Verhältnis maßgeblich ist, nicht hypothetische Mehrproduktionen an anderen Orten der Welt bzw. Opportunitäten.

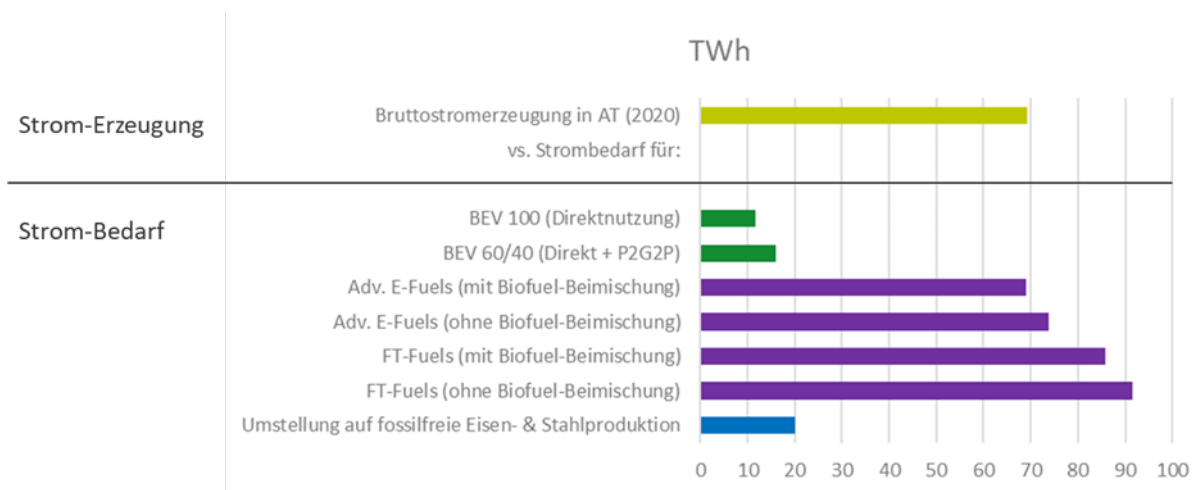
Strombedarf für E-Fuels in Österreich übersteigt derzeitige Gesamtstromproduktion

Im Projekt wurde des Weiteren abgeschätzt, welche Strommengen bei der Dekarbonisierung der PKW-Mobilität mittels BEV bzw. E-Fuels benötigt würden, und wie groß diese in Relation zur derzeitigen Stromproduktion sind. Hierzu wurden auf Basis des Flottenbestands 2021 sowie der jährlichen Fahrleistungen und eines durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs E-Fuel-Bedarfe ermittelt, welche in einem zweiten Schritt in für die E-Fuel-Produktion benötigte Strombedarfe umgerechnet wurden. Bei der Berechnung der Strombedarfe für die E-Fuel Herstellung wurden die Aufbringungsrouten „Fischer-Tropsch-Kraftstoffe“ sowie „Fortgeschrittene E-Fuels“ untersucht. Erstere können aufgrund ihrer Eigenschaften herkömmliche fossile Kraftstoffe (Benzin, Diesel) 1:1 ersetzen, ohne dass Anpassungen am Fahrzeug notwendig wären. Fortgeschrittene E-Fuels hingegen erfordern diverse technische Anpassungen bei KFZ. Die wichtigsten Ergebnisse der Berechnung des Strombedarfs sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

	Strombedarf [TWh] mit Biofuel- Beimischung	Strombedarf [TWh] ohne Biofuel- Beimischung	PV [GW] @ 1000 VLH	Wind [GW] @ 2400 VLH
FT-Fuel-Herstellung	85,9	91,8	85,9 - 91,8	35.8 - 38.2
Adv. E-Fuels-Herstellung	69,1	73,8	69,1 - 73,8	28.8 - 30.8
BEV 60/40 (Direkt + P2G2P)	15,9	15,9	15,9	6,3
BEV 100 (Direktnutzung)	11,6	11,6	11,6	4,6

Zur Abdeckung der Fahrleistungen des PKW-Bestands sind je nach Technologie erhebliche Unterschiede im benötigten Strombedarf ersichtlich. Während bei Einsatz von fortgeschrittenen E-Fuels und Beibehaltung der derzeitigen Biokraftstoffbeimischung 69,1 TWh erforderlich sind, sind bei Verwendung von Fischer-Tropsch-Kraftstoffen ohne Biokraftstoffe sogar 91,8 TWh und damit 33 % mehr erforderlich. Der Unterschied ist insbesondere durch die höhere Effizienz der Elektrolyse bei fortgeschrittenen E-Fuels zu erklären.

Im Vergleich zum Einsatz von E-Fuels erfordert die Abdeckung der Fahrleistung von batterieelektrischen Fahrzeugen mit direkter Ladung (BEV-100) einen um 83 % signifikant geringeren Stromverbrauch in der Höhe von 11,6 TWh. Im Falle eines gemischten Ladebetriebs (BEV-60/40) beträgt die Einsparung immer noch 77 %. Die folgende Grafik zeigt die Ergebnisse des Strombedarfs mit dem österreichischen Bruttostrombedarf 2020 und dem Strombedarf durch die Umstellung auf fossilfreie Eisen- und Stahlherstellung. Man sieht, dass der Strombedarf durch den Einsatz von E-Fuels in allen Fällen gleich groß oder größer als die derzeitige österreichische Bruttostromerzeugung ist, während die Nutzung batterieelektrischer Fahrzeuge nur ein Fünftel davon erfordert.



Quelle: AEA, eigene Darstellung

Conclusio

Zusammenfassend lassen sich aus den Projektergebnissen folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Bei der CO₂e-Bilanz über den Lebenszyklus sind die Nutzungsphase und die Art der eingesetzten Energie entscheidende Parameter.
- Mit allen drei Technologie-Optionen lassen sich im untersuchten PKW-Segment niedrige Lebenszyklusemissionen realisieren; insbesondere bei E-Fuels gibt es aufgrund fehlender Erfahrungswerte allerdings große Unsicherheiten in den Berechnungen.
- Die Marktverfügbarkeit von E-Fuels ist derzeit nicht gegeben, in relevanter Größenordnung konnten weltweit keine Produktionskapazitäten aufgezeigt werden.
- E-Fuels weisen hohe Effizienzverluste in der Bereitstellungskette auf: der Strombedarf für die heutige PKW-Flotte in Österreich liegt in der Größenordnung der österreichischen Gesamtstromproduktion.
- Die batterieelektrische Mobilität ist in allen Szenarien die mit Abstand effizienteste Technologie.
- E-Fuels werden aufgrund der fehlenden inländischen Potenziale primär importiert werden. Für Konkurrenz-Produkte auf Basis von erneuerbarem Strom wie erneuerbare Gase, Wasserstoff, Ammoniak oder Methanol besteht allerdings ebenfalls großer Importbedarf. Da die Produkte in direkter Konkurrenz zu einander stehen, ist eine Priorisierung ratsam.
- Aus Sicht des Energiesystems ist es nicht sinnvoll, erneuerbaren Strom als knappes Gut in Anwendungen wie die E-Fuels-Nutzung in der PKW-Mobilität zu lenken, welche um den Faktor vier ineffizienter als bestehende, marktfähige Alternativen wie die batterieelektrische PKW-Mobilität sind. Gesamtsystemisch sinnvoll sind E-Fuels dort, wo sie ihre Stärken der Energiedichte und Speicherbarkeit technisch gesehen bestmöglich ausspielen können, etwa im Flugverkehr oder zum Antrieb schwerer Maschinen. Auch gibt es in diesen Bereichen technisch gesehen noch keine anderen Alternativen zur Dekarbonisierung.
- Unabhängig davon, ob die PKW-Mobilität in Zukunft vermehrt batterieelektrisch, E-Fuel-basiert oder mittels Brennstoffzellenfahrzeugen erfolgt: Voraussetzung für eine gute Klimabilanz aller dieser Technologien ist erneuerbarer Strom in allen Stufen der Bereitstellungskette. Ein beschleunigter Ausbau der Ökostromproduktion in Österreich und weltweit ist daher jedenfalls unverzichtbar.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung.....	3
2	Einleitung.....	11
3	Metaanalyse Umweltauswirkungen PKW-Antriebssysteme	12
3.1	Allgemeines zu Lebenszyklusanalysen (LCA)	12
3.2	Methodik	12
3.3	Studienergebnisse im Detail.....	12
3.3.1	Einfluss der eingesetzten Energie.....	12
3.3.2	Bedeutung der Batterie	14
3.3.3	Nutzung des Fahrzeugs.....	15
3.4	Schlussfolgerungen der Metaanalyse.....	16
4	Effizienz.....	19
4.1	Effizienz von strombasierten Antrieben im Vergleich	19
4.2	Ist ein neuer Effizienzbegriff nötig?.....	23
5	Aufbringung vs. Bedarf	25
5.1	Kraftstoffbedarf des PKW-Bestandes	25
5.2	Strombedarf zur Kraftstoffherstellung	27
5.3	Strombedarf durch batterieelektrische Fahrzeuge	29
5.4	Ergebnisse.....	29
5.5	Einschätzungen zum möglichen Hochlauf der E-Fuel-Herstellung	31
6	Fazit	32
	Literatur	33
	Abbildungsverzeichnis	35
	Tabellenverzeichnis	37
	Abkürzungsverzeichnis	39

2 Einleitung

Aufgrund der energie- und klimapolitischen Ziele ist es dringend notwendig, dass insbesondere im Verkehrsbereich eine deutliche Reduktion der THG-Emissionen und des Energieeinsatzes erfolgt. Proponenten der unterschiedlichen Technologien argumentieren jeweils mit deren besonderen Vorteilhaftigkeit. Im internationalen Kontext gibt es daher auch zahlreiche Studien mit teils kontroversen Ergebnissen, welche als Argumentation im aktuellen Diskurs um die Klimawirkungen und zum Energieverbrauch im Verkehrssektor ins Treffen geführt werden. Vor diesem Hintergrund haben wir in gegenständlichem Vorhaben internationale Studien zu Lebenszyklusbetrachtungen (LCA) mit Fokus PKW-Antriebssysteme vergleichend analysiert (siehe Kapitel 3).

Der Zweite Schwerpunkt des Projekts zielte darauf ab, die für faktenbasierte Entscheidungen notwendigen Zahlen und Daten (Mengengerüst) zu erarbeiten:

In Kapitel 4 wird hierzu ein quantitativer Vergleich verschiedener strombasierter Effizienzketten gegeben („Wie weit kommt man mit 10.000 kWh Strom?“). Im Zuge dieser Arbeiten wurde auch der in der Studie „Der Effizienzbegriff in der klimapolitischen Debatte zum Straßenverkehr“ (Frontier Economics, 10/2020) verwendete Effizienzbegriff qualitativ im Hinblick auf seine Verwendung im Straßenverkehr bewertet. Aufgrund der großen Volatilität der Energiepreise musste von Aussagen zu künftigen Produktionskosten von E-Fuels Abstand genommen werden.

In Weiterer Folge wurde auch die Aufbringung und der Bedarf an E-Fuels und erneuerbarem Strom für die Dekarbonisierung der Bestandsflotte an PKW in Österreich analysiert (Kapitel 5). Zudem wurde qualitativ dargestellt, welche Nutzungskonkurrenzen bei E-Fuels bestehen und eine qualitative Einschätzung zum möglichen Markthochlauf von E-Fuels gegeben.

3 Metaanalyse Umweltauswirkungen PKW-Antriebssysteme

3.1 Allgemeines zu Lebenszyklusanalysen (LCA)

Eine Lebenszyklusanalyse (englisch: „Life Cycle Assessment“, LCA) oder auch Ökobilanz genannt, ist eine normierte Methode, um Umweltaspekte und Umweltauswirkungen von Produktsystemen über den gesamten Lebensweg, von der Rohstoffgewinnung über die Produktion, Nutzung bis hin zur Beseitigung, zu analysieren. Die Struktur jeder LCA gibt vor, erst das Ziel und den Untersuchungsrahmen festzulegen, eine Sachbilanz physischer Input- und Output-Ströme des Untersuchungssystems zu erstellen, eine Wirkungsabschätzung zu machen und die Ergebnisse auszuwerten.

Obwohl die Methode klar definiert ist, gibt es in der Ausgestaltung solcher Analysen große Freiheitsgrade, sei es durch gewählte Systemgrenzen, Vereinfachungen oder getroffene Annahmen. Ein wichtiger Aspekt ist zudem Wahl der „funktionelle Einheit“ solcher Analysen, d.h. der Bezugseinheit, welche den Nutzen des untersuchten Systems darstellt. Dass sich der Nutzen von Systemen oft grundlegend unterscheidet, ist einer der Hauptgründe für die schlechte Vergleichbarkeit von Ökobilanzstudien.

3.2 Methodik

Zu Beginn wurde eine Grob-Analyse aktueller LCA-Studien mit Fokus PKW-Antriebssysteme durchgeführt. Der Fokus lag dabei auf Veröffentlichungen, die den gesamten Lebenszyklus von PKW-Antriebssystemen analysieren, um die THG-Emissionen umfassend darzustellen. Andere Wirkungskategorien wie Humantoxizität, Ozonbildungspotenzial usw. wurden nicht explizit betrachtet. Neben Lebenszyklusanalysen gibt es auch sog. „Well-to-Tank“ (WtT) und „Tank-to-Wheel“ (TtW) Studien. Erstere berücksichtigen die Emissionen aus der Bereitstellung von Kraftstoff bis zur Systemgrenze „Tankstelle“, Zweitere jene der Transportleistung mit dem Fahrzeug. Kombiniert man beide Ansätze spricht man von „Well-to-Wheel“ (WtW). Bei diesen Ansätzen werden jedoch bewusst relevante Teile wie die Fahrzeug- und Anlagen-Produktion bzw. End-of-Life-Prozesse (Recycling, Entsorgung, ...) nicht betrachtet, weshalb WtW-Analysen nicht im Fokus dieser Studie stehen. Aufbauend auf den recherchierten LCA-Studien wurden in einer Detailanalyse auf das Gesamtergebnis einflussnehmende Randbedingungen der unterschiedlichen Studien untersucht.

3.3 Studienergebnisse im Detail

3.3.1 Einfluss der eingesetzten Energie

In einer umfassenden LCA wurden vom Umweltbundesamt (2021) 39 verschiedene Fahrzeug- und Technologiekombinationen untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass der eingesetzte Energiemix der wesentliche Parameter zur Beeinflussung der Treibhausgasemissionen ist. Von entsprechender Bedeutung ist demnach auch das Tempo der Dekarbonisierung des Stromsektors in Europa bzw. die österreichische Zielerreichung von 100 % erneuerbarer Strom (national, bilanziell) bis 2030.

Dies deckt sich mit anderen Studienergebnissen (etwa Jungmeier et al., 2019), die ebenfalls den Energieaufwand zum Betrieb des Fahrzeugs als den ausschlaggebendsten Parameter identifizieren. In einer Metaanalyse von LCA-Studien zur Klimabilanz von Elektroautos kommt auch die Agora Verkehrswende (2019a) zum Schluss, dass die Nutzungsphase bei Weitem den größten Einfluss auf das Gesamtergebnis hat, und hier insbesondere die CO₂-Intensität der Stromerzeugung. Große Unterschiede wurden beim angenommenen Energieverbrauch der Fahrzeuge gefunden, welche neben den Eigenschaften des Fahrzeugs auch auf die der Bewertung zugrunde gelegten Fahrzyklen zurückzuführen sind. In einer Sensitivitätsanalyse zu wichtigen Parametern der Elektromobilität kamen Agora Verkehrswende (2019a) zum Schluss, dass der Einfluss des „getankten“ Stroms auf die Klimabilanz von E-PKW am wichtigsten ist, dicht gefolgt von der Lebensfahrleistung des PKW.

Bei der Ökobilanzierung von elektrischem Strom ist zu beachten, dass das Stromprodukt zur Ladung eines E-Autos in der Regel bilanziell Ökostrom darstellt. Physikalisch sind für das aufrechterhalten der Stromversorgung selbstverständlich (noch) fossile Energieträger notwendig. Die Emissionen des Stroms sind daher eine Frage der Zuteilung. Außerdem ist zu beachten, dass die Forcierung der E-Mobilität einen Mehrbedarf an (erneuerbarer) Stromerzeugung nach sich zieht, welche entsprechend Emissionen verursacht. Je nach Ausbau der Ökostrom-Erzeugungskapazität verändert sich der Klimavorteil eines BEV gegenüber konventionell betriebener PKW über die Lebensdauer.

Buchal et al. (2019) errechnen in einem Vergleich eines Diesel-PKW mit einem BEV im Worts-Case mit höheren Emissionen des BEV, wobei dies für deutsche Verhältnisse untersucht wurde (Braunkohleverstromung). Wird mit europäischen Strommischen gerechnet, erzielen BEV in allen anderen untersuchten Studien deutliche Emissionseinsparungen.

Sinkende THG-Emissionen im Straßenverkehr können demnach durch den Einsatz erneuerbarer Energie erreicht werden, welche aber auch möglichst effizient genutzt werden sollte. Hierbei wird deutlich, dass BEV mit derselben Menge an erneuerbarer Energie eine größere Reichweite als H₂-Brennstoffzellen-PKW oder mit strombasierten E-Fuels betankte Verbrenner erzielen können (Jungmeier et al., 2019). Eine Analyse der Gesamteffizienz je Technologie wird in Kapitel 4 dieses Berichts gegeben.

Ladeverluste und Übertragungsverluste bei elektrischem Strom sind von geringer Bedeutung für die THG-Bilanz. Im EU-Durchschnitt erhöhen die Übertragungsverluste die THG-Emissionen des Stromnetzes um 7 %. Transport&Environment (2020) nehmen in ihrer LCA zusätzlich 10 % Effizienzverluste durch Ladeprozesse an. Eine Szenario-Analyse der Lebenszyklusemissionen von im Jahr 2030 verkauften BEV zeigte, dass diese aufgrund der technologischen Weiterentwicklung, der gesteigerter Effizienz sowie der zunehmend dekarbonisierten Stromerzeugung erheblich geringere Lebenszyklus-THG-Emissionen (im Durchschnitt -41%) aufweisen als heute.

Bei der Produktion von Energieträgern fallen auch Nebenprodukte an (z.B. Wärme im Fall von KWK-Anlagen), dessen Berücksichtigung in der LCA relevant für die THG-Emissionen ist (Jungmeier et al., 2019).

In manchen Studien (z.B. VDI, 2020; Jungmeier et al., 2019) wird betont, dass nicht nur BEV, sondern prinzipiell alle Antriebstechnologien das Potenzial besitzen, signifikant zur THG-Emissionsreduktion beizutragen. Der Schlüssel hierzu sind niedrige Emissionen der Fahrzeugherstellung sowie der Betrieb der Fahrzeuge mit erneuerbaren Energieträgern.

3.3.2 Bedeutung der Batterie

Bei der Betrachtung der Batterie selbst hat laut Agora Verkehrswende (2019a) die Batteriegröße einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis, wenn für verschiedene Batteriegrößen der gleiche Nutzen (Lebensfahrleistungen) angenommen wird. Wesentlich ist auch die Energiedichte, welche sich in den vergangenen Jahren deutlich vergrößert hat. Die Zellchemie (d.h. Art der verwendeten Kathodenmaterialien: LMO, LFP, NMC, NCA) ist für die gesamte Fahrzeugbilanz von nachgelagerter Relevanz. Wichtiger als die Zellchemie ist der Energieeinsatz der Batteriezellen-Produktion selbst. Hier gibt es nur wenige Primärdaten, verschiedene Modellierungsansätze und daher entsprechende Unsicherheiten und große Schwankungsbreiten in den Ergebnissen. Jedenfalls ist die Vorkette des eingesetzten elektrischen Stroms wichtig: ein Großteil der Batterieproduktion erfolgt in Ostasien und auch in den USA, mit entsprechend großen THG-Emissionen der dortigen Strombereitstellung. Neben der Batterie sind auch die verbauten Materialien bei BEV CO₂-intensiver als bei Verbrenner-PKW: so wird aus Gewichtsgründen entsprechend mehr Aluminium verbaut, auch die größeren Anteile an elektronischen Bauteilen in einem BEV verursachen größere CO₂-Emissionen in der Herstellung. Laut Agora Verkehrswende (2019b) liegen die Emissionen der Herstellung und Entsorgung eines E-Autos bei rund 13 Tonnen CO₂-Äquivalente, vergleichbare Verbrenner verursachen rund 7,5 Tonnen CO₂-Äquivalente. Bei der Batterieentsorgung können jedoch teilweise Materialien zurückgewonnen werden (wie etwa Kobalt und Nickel), welche als Sekundärmaterialien eingesetzt werden und so Primärrohstoffe substituieren.

Auch das Umweltbundesamt (UBA, 2021) hat in Sensitivitätsanalysen nachgewiesen, dass die Akkukapazität nennenswerten Einfluss auf die THG-Emissionen der Fahrzeugherstellung hat. Die Herstellung eines BEV im Kleinwagensegment verursacht so nur rund die Hälfte der Emissionen eines BEV der Oberklasse. Bei der Batterietechnologie gibt es jedenfalls noch Potenzial zur Senkung der THG-Emissionen über den Lebenszyklus.

In einer umfassenden LCA-Studie zu PKW-Antriebssystemen beschreibt der VDI (2020) einen signifikanten Einfluss der verwendeten Batteriegröße auf die THG-Emissionen der Produktion. Im Sinne des Klimaschutzes sind demnach Fahrzeuge mit kleinen Batteriekapazitäten zu bevorzugen.

In einer umfassenden Analyse von 50 Ökobilanzen zur Umweltauswirkung von Batterien für E-Autos kamen Aichberger und Jungmeier (2020) zum Schluss, dass diese über den Lebenszyklus eines PKW Emissionen von rund 20 g CO₂-eq/km verursachen. Die Umweltauswirkungen der Batteriezellen-Herstellung wurden laut Autoren von vielen Studien aber überschätzt. Ebenso wie Agora Verkehrswende (2019a) betonen die Autoren, dass es bei den Daten zur Batterieherstellung fehlende Transparenz gibt und dass nach Möglichkeit Primärdaten und keine Sekundärdaten herangezogen werden sollten. Second-Life-Effekte und Recycling von Batterien sind in Studien bislang nicht adäquat berücksichtigt und könnten die LCA-Ergebnisse entsprechend verändern. Es wird zudem davon ausgegangen, dass die Weiterentwicklung der Batterieproduktion die spezifischen Emissionen (pro kWh Batteriekapazität) in Zukunft senken wird.

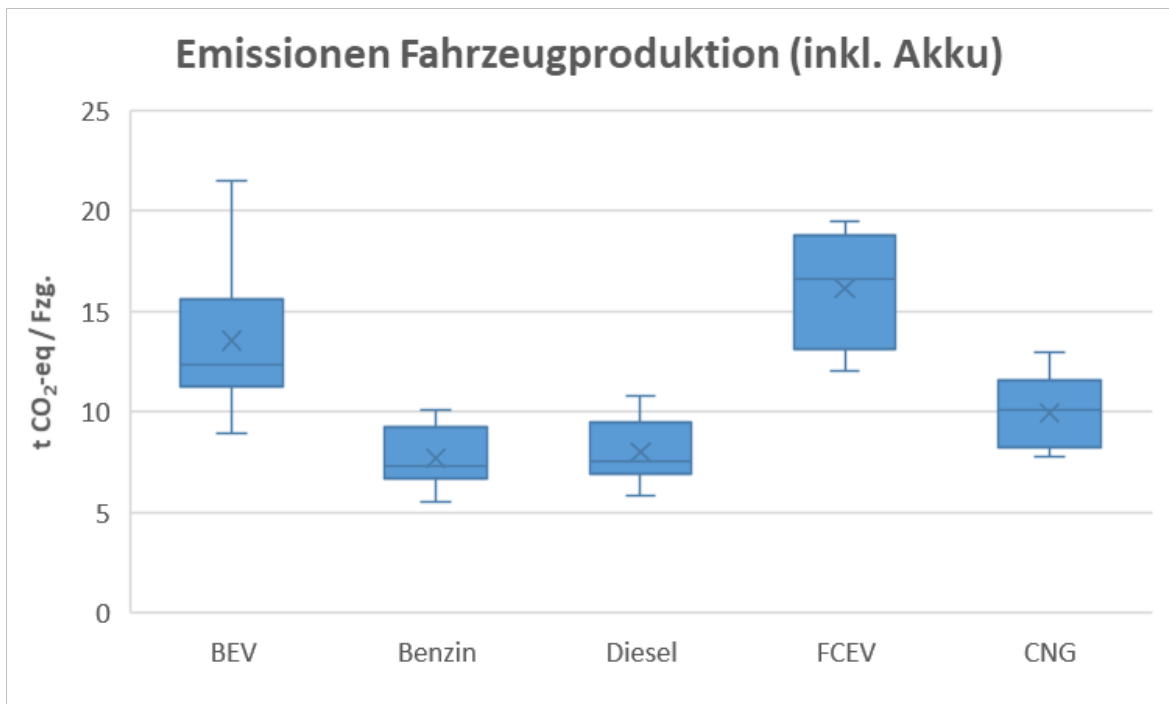
Die Variation der Batteriegröße und -Herstellung nehmen laut Agora Verkehrswende (2019a) bei Weitem einen geringeren Einfluss auf das Gesamtergebnis als der „getankte“ Strom. Zudem wird davon ausgegangen, dass sich die Energiedichte, die Materialzusammensetzung der Batterien, der Strombedarf für die Herstellung und die CO₂-Intensität des zur Herstellung eingesetzten Strom-Mix bis zum Ende des Jahrzehnts deutlich verbessert, was bei gleicher Kapazität zu einer Halbierung der Emissionen der Batterieproduktion führen wird. Entscheidend wird sein, ob der Trend zu größeren Batterien diesen Fortschritt in Zukunft wieder kompensiert.

Auch in anderen Studien (Transport&Environment, 2020) wird darauf hingewiesen, dass viele LCA-Studien zur E-Mobilität veraltete Daten verwenden. Aufgrund der rasanten Batterie-Entwicklung sind die neuesten

Primärdaten oft nicht verfügbar und THG-Emissionen werden daher überschätzt. Die Autoren gehen davon aus, dass die durch BEV verursachten THG-Emissionen in den nächsten Jahren noch deutlich gesenkt werden können, etwa durch die Dekarbonisierung des Stromsystems in Europa, aber auch durch verlängerte Akkulebensdauern sowie durch die aufkommende 2nd-Life-Nutzung, Wiederverwendung und das Batterierecycling. Der VDI (2020) zeigt in seiner Ökobilanz von PKW-Antriebssystemen die positiven Effekte auf die THG-Emissionen einer europäischen Batteriezellenproduktion, welche auf dem – im Vergleich zu China – „saubereren“ Strom-Mix zurückzuführen ist.

Die folgende Grafik zeigt eine Auswertung der Emissionen der PKW-Produktion (inkl. Batterie) je Technologie:

Abbildung 1: Emissionen der PKW-Produktion. N = 39 untersuchte Szenarien/Varianten



Quelle: AEA, eigene Darstellung auf Basis von Daten aus Bubenberg et al. (2022), Agora Verkehrswende (2019b), Transport&Environment (2022), Hirz und Nguyen (2022), UBA (2021).

Es ist deutlich zu erkennen, dass BEV wesentlich größere Emissionen in der Fahrzeugproduktion aufweisen als konventionelle Verbrenner. Ebenso ist die Produktion von Brennstoffzellenfahrzeugen technisch aufwändiger und mit größeren Emissionen je Fahrzeug verbunden.

3.3.3 Nutzung des Fahrzeugs

Einen wesentlichen Einfluss auf die Klimabilanz nehmen neben den Fahrzeugeigenschaften auch deren Nutzung ein (Agora Verkehrswende, 2019a). Für kürzere Strecken reicht eine kleinere Batteriekapazität aus, was bei gleicher Fahrleistung zu einer besseren Klimabilanz führt. Daneben spricht für Elektroautos, dass diese einen besonderen Effizienzvorteil gegenüber Verbrennungsmotoren (Teillastbetrieb, Stop-and-Go) im Stadtverkehr haben. Eine größere Batteriekapazität führt zu einem größeren „Rucksack“ an CO₂-Emissionen der Produktion, die über eine entsprechende Fahrleistung wieder „abgeschrieben“ werden muss. Die Fahrzeugnutzung ist daher ein wichtiger Hebel um die Klimabilanz positiv zu beeinflussen. Aus Sicht der Energieeffizienz und der CO₂-Emissionen ist es sinnvoll, möglichst wenige Fahrzeuge mit möglichst hoher Jahresfahrleistung

einzusetzen, um die Mobilitätsanforderungen zu bedienen. Dies kann zum Beispiel mit Modellen zur gemeinschaftlichen Nutzung von Fahrzeugen erreicht werden (Sharing etc.).

Bezieht man die Emissionen auf Fahrleistungen (in Kilometern), dann kann die Lebensdauer des Fahrzeugs und insbesondere der H₂-Brennstoffzelle oder der Batterie einen wesentlichen Einfluss auf die THG-Emissionen aus der Produktionsphase haben (Jungmeier et al., 2019).

Auch das UBA konnte in der Studie „Die Ökobilanz von Personenkraftwagen“ (2021) aufzeigen, dass mit Hilfe von kleineren, leichteren BEV mit ebenso kleinerer Akkukapazität die THG-Emissionen halbiert werden können.

Einen wesentlichen Effekt auf den Verbrauch hat – unabhängig von der eingesetzten Antriebstechnologie – selbstverständlich die Fahrweise und die Art der Nutzung (Langstrecke, Kurzstrecke). Realverbräuche können daher stark von Testzyklen abweichen, was bei der Interpretation von LCA-Studienergebnissen berücksichtigt werden sollte.

Gemäß Transport & Environment (2020) sind lange Nutzungsdauern und große Jahresfahrleistungen, wie sie z.B. bei Sharing-PKW vorkommen, bezogen auf ihre THG-Emissionen pro Fahrzeugkilometer besonders vorteilhaft. Die Autoren beschreiben zudem, dass BEV gegenüber konventionellen Verbrennungsmotoren wahrscheinlich längere Lebensdauern haben, weil Elektromotoren robuster sind und weniger bewegliche Teile aufweisen. Andererseits wird die Batterielebensdauer bislang in Studien unterschätzt.

3.4 Schlussfolgerungen der Metaanalyse

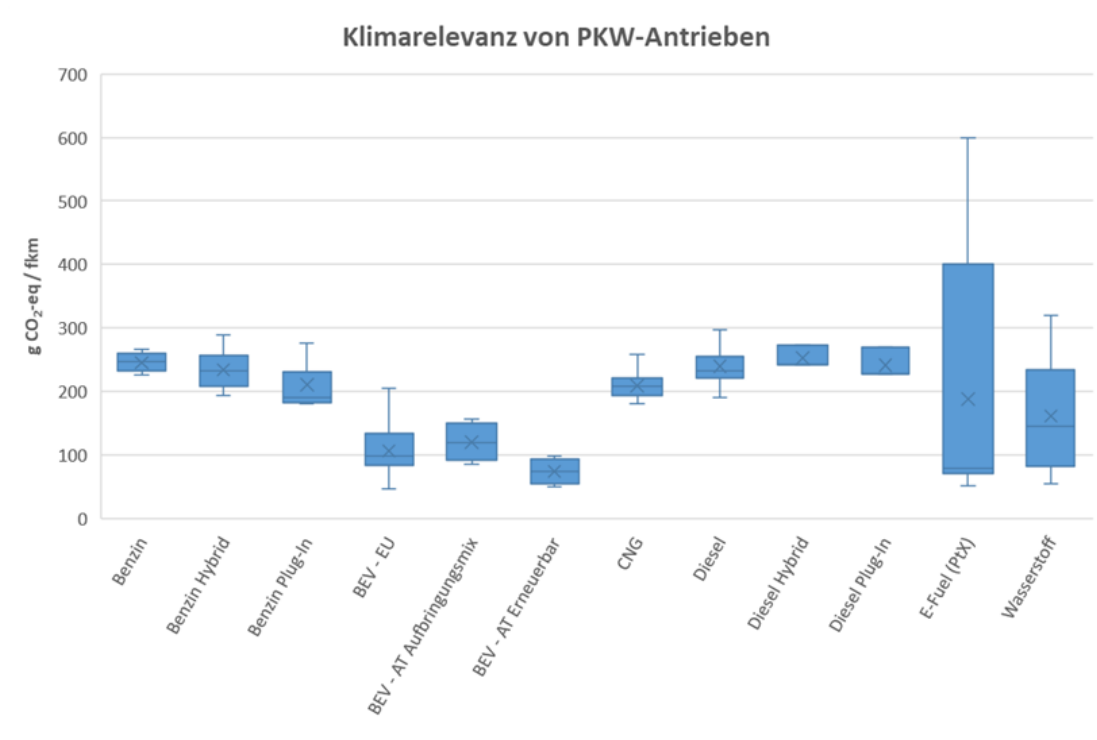
Auf Basis der in dieser Studie durchgeführten Literaturanalyse wurden folgende allgemeine Aspekte identifiziert, die im Kontext der Bewertung der Umweltleistung von PKW-Antrieben und insbesondere der batterieelektrischen E-Mobilität von großer Relevanz sind:

1. **Verwendete Daten:** Maßgeblich für die Ergebnisse sind die verwendeten Daten, insbesondere jene für die Fahrzeugbatterie. Die rasante Batterieentwicklung wird bei Verwendung von Sekundärdaten (wie z.B. Ökobilanzdaten aus Datenbanken) oft nicht adäquat abgebildet, da die Daten nicht dem aktuellen Stand der Technik entsprechen. Selbstverständlich ist auch der verwendete Strom-Mix entscheidend, allen voran für den Betrieb des Fahrzeugs, im kleineren Maße auch für die Fahrzeug- bzw. Batterieproduktion.
2. **Systemgrenzen:** Wesentlich für die Ergebnisse ist, welche Bereiche in die Untersuchung einfließen und welche bewusst weggelassen werden. Entscheidend ist vor allem, ob alle Lebensphasen von der Herstellung über die Nutzung bis hin zur Entsorgung eines Fahrzeugs berücksichtigt sind. Wichtig ist auch der Umgang mit Allokationen, d. h. die Art der Zuteilung von Emissionen auf verschiedenen Outputs eines Produktionsprozesses.
3. **Bezugsbasis:** Ökobilanzen beziehen sich immer auf eine funktionelle Einheit, welche den Nutzen des Untersuchungsgegenstandes ausdrücken soll. Je nach gewählter Einheit (z.B. Personenkilometer, Fahrzeugkilometer) können die Ergebnisse beträchtlich schwanken. Zudem sollte die untersuchte Fahrzeugauslegung vergleichbar sein, da z. B. Batteriegrößen je nach Fahrzeugmodell entsprechend unterschiedlich ausfallen. Getroffene Annahmen (z. B. zur Lebensfahrleistung, zu Verbrauchswerten, etc.) können die Ergebnisse einer LCA entscheidend verändern.

In folgender Grafik werden über hundert LCA-Szenario-Ergebnisse verschiedener Studien zur THG-Relevanz von PKW-Antriebssystemen in Bandbreiten je Technologie zusammengefasst und die Lebenszyklusemissionen pro Fahrzeugkilometer verglichen. Dabei wurde ein besonderes Augenmerk auf die systemische Vergleichbarkeit

gelegt: so werden nur Studien mit den gleichen Systemgrenzen (Betrachtung des gesamten Lebenszyklus) sowie mit Realverbräuchen und keine Verbräuche von Testzyklen (wie etwa WLTP) herangezogen.

Abbildung 2: Ergebnisse Literaturanalyse zur Klimarelevanz von PKW-Antrieben. N=105 untersuchte Szenarien/Varianten



Quelle: AEA, eigene Darstellung auf Basis von Daten aus UBA (2021), Agora Verkehrswende (2019b), Transport&Environment (2020), Joanneum Research (2019), Fraunhofer

Die niedrigsten THG-Emissionen je Fahrzeugkilometer werden durch die Bank bei BEV unter Einsatz elektrischen Stroms aus erneuerbaren Energiequellen erreicht. Die Ergebnisse schwanken je nach angenommenem Strom-Mix, hinterlegter Lebensfahrleistung und Fahrzeugkategorie (Gewicht, Akkukapazität). Selbst im schlechtesten Fall sind BEV hinsichtlich ihres THG-Ausstoßes laut den untersuchten Studien noch deutlich besser als konventionell betriebene PKW. In weiterer Folge ergibt sich aus den LCA-Ergebnissen, dass die Dekarbonisierung des Strom-Mix eine Grundvoraussetzung für hohe Emissionseinsparungen durch BEV ist. Hierfür ist der Ausbau der Produktionskapazität für erneuerbaren Strom alternativlos. Zu beachten ist, dass die Einspareffekte nur zur vollen Geltung kommen, wenn „fossile Fahrleistung“ auch tatsächlich durch „elektrische Fahrleistung“ ersetzt wird. Additional BEV als Zweit- oder Drittautos mit entsprechend geringen Fahrleistungen werden keinen entsprechenden THG-Minderungseffekt in der Flotte generieren.

Im Fall von Wasserstoff-Brennstoffzellen können ähnlich gute THG-Emissionswerte wie bei BEV je Fahrzeugkilometer erreicht werden, Voraussetzung dafür ist jedoch eine H₂-Produktion via Elektrolyse unter ausschließlichen Einsatz von erneuerbarem Strom. Anzumerken ist, dass bei dieser Variante zwar die THG-Emissionen ähnlich niedrig wie bei BEV sind, jedoch die Energieeffizienz des Gesamtprozesses deutlich schlechter ausfällt (siehe Kapitel 4). Dies gilt ebenso für strombasierte Flüssigkraftstoffe für Verbrennungsmotoren (E-Fuels). Die Ergebnisse der Metaanalyse zu den THG-Emissionen zeigt insbesondere bei E-Fuels eine große Schwankungsbreite, was darauf zurückzuführen ist, dass es noch keine kommerziellen Anlagen im Industriemaßstab gibt. Daher ist die Datenlage schlecht und LCA-Studien müssen mit Sekundärdaten und Abschätzungen arbeiten. Die potenziell sehr großen THG-Emissionen der E-Fuels sind

darauf zurückzuführen, dass u. a. nicht-erneuerbarer Strom und fossile Rohstoffe als Kohlenstoff-Quelle bilanziert wurden. Wird H₂ über die Dampfreformierung aus Erdgas hergestellt, schneidet auch die H₂-Brennstoffzelle in der Klimabilanz sehr schlecht ab.

In Studien, die den gesamten Lebenszyklus von KFZ berücksichtigen, müssen zwangsläufig Annahmen zu künftigen Entwicklungen (Expertenschätzungen) getroffen werden. Die Literaturanalyse zeigt, dass dies insbesondere im Bereich der Dekarbonisierung der Antriebsenergie bzw. im Falle von BEV des Stromsystems und des Batterierecyclings von großer Relevanz betreffend der THG-Emissionen ist. Auch die Entwicklung der Energieeffizienz in der Mobilität muss für die Zukunft auf Basis von Annahmen bewertet werden. Für eine positive Entwicklung der THG-Emissionen sind Lock-In-Effekte (d. h. Effekte, welche die Dekarbonisierung durch das Weiternutzen bestehender fossiler Systeme verunmöglichen) unbedingt zu vermeiden. Aus jetziger Sicht scheint leider schwer absehbar, ob Effizienzgewinne der Zukunft nicht durch (unnötig) große und schwere BEV (bzw. durch eine entsprechende Fahrzeugnutzung) marginalisiert oder gar gänzlich kompensiert werden.

Die THG-Emission steht ganz klar im Fokus der meisten Analyse zur Umweltfreundlichkeit von Antriebssystemen. Selbstverständlich gibt es darüber hinaus viele weitere Umweltauswirkungen und Wirkungskategorien, welche im Rahmen einer umfassenden Ökobilanz ebenfalls betrachtet werden sollten. Ein gewichtiges Argument pro BEV ist beispielsweise, dass diese lokal emissionsfrei sind und beim Ersatz von Verbrennungsmotoren speziell in Ballungszentren regionale Belastungen (Staub, NO_x, CO, ...) verhindern können.

4 Effizienz

Energieeffizienz ist bei der Bewältigung der Energie- und Klimakrise entscheidend. Die direkte Nutzung von elektrischer Energie ist ein wesentlicher Baustein dafür. Ein Beispiel: Das Umweltbundesamt (2020) hat in seiner Analyse „Pathways to a Zero Carbon Transport Sector“ den vollständigen Ausstieg aus fossiler Energie im Verkehr modelliert und einen starken Fokus auf Elektrifizierung gelegt: Pkw werden hauptsächlich batterieelektrisch betrieben, im Schwerverkehr spielen auch Oberleitungen und wasserstoffbasierte Brennstoffzellen-Antriebe eine große Rolle. Die Luftfahrt wird im Verhältnis 55:45 mit strombasierten und biobasierten synthetischen Kraftstoffen von Treibhausgasemissionen befreit (bilanziell). Mit Konsequenzen: Die notwendige Primärenergiemenge reduziert sich im Szenario mit priorisierter Direktnutzung von elektrischer Energie von heute 413 PJ auf 172 PJ im klimaneutralen Verkehrssystem, was auf enorme Effizienzsteigerungen durch den Wechsel von Verbrennungskraftmaschinen auf elektrische Antriebe hindeutet.

4.1 Effizienz von strombasierten Antrieben im Vergleich

Im öffentlichen Diskurs werden primär drei unterschiedliche Antriebsarten genannt, die den Weg in eine klimaneutrale Verkehrszukunft ebnen könnten:

- **Batterieelektrisches Fahrzeug (BEV | Battery Electric Vehicle):** Strom auf Basis erneuerbarer Energie wird in einer Batterie gespeichert und im Fahrzeug genutzt, um einen Elektromotor anzutreiben.
- **Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV | Fuel Cell Electric Vehicle):** Strom auf Basis erneuerbarer Energie wird mittels Elektrolyse in Wasserstoff umgewandelt. Mittels Brennstoffzelle wird im Fahrzeug wieder elektrische Energie erzeugt, die einen Elektromotor antreibt.
- **Verbrennerfahrzeug mit E-Fuels (ICE | Internal Combustion Engine):** Strom auf Basis erneuerbarer Energie wird mittels Elektrolyse in Wasserstoff umgewandelt und schließlich zu einem synthetischen Flüssigtreibstoff synthetisiert, welcher in einem effizienten Verbrennerfahrzeug eingesetzt wird.

Alle drei Antriebstechnologien haben grünen Strom als Ausgangspunkt. Sie unterscheiden sich in der Art der Speicherung (Batterie, Wasserstoff, E-Fuel) und der Art des Antriebs (Elektromotor, Brennstoffzelle + Elektromotor, Verbrennungsmotor). Strom auf Basis erneuerbarer Energiequellen ist jedoch knapp, und wird auf absehbare Zeit knapp bleiben, insbesondere aus zwei Gründen:

- **Die Nachfrage steigt.** Direktelektrische Anwendungen (Elektromobilität, Elektrodenkessel usw. und Power-to-X (Wärmepumpen, thermische Speicher, Wasserstoff, E-Fuels, SAF, Ammoniak usw.) lassen die Nachfrage steigen. Die Stromstrategie der österreichischen E-Wirtschaft etwa geht für 2040 von einem Strombedarf von knapp 140 TWh aus (Österreichs Energie, 2022). Aktuell werden in Österreich rund 55 TWh bis 58 TWh elektrische Energie auf Basis Erneuerbarer erzeugt. Der Ausbaubedarf für die nächsten 18 Jahre ist demnach enorm.
- **Das Angebot ist knapp.** 2021 hat der Anteil erneuerbarer Energie an der EU-27-Nettostromerzeugung 36,4 % betragen (Fraunhofer ISE, 2022). Um aus fossiler Energie auszusteigen müssen 1) aktuell nicht-erneuerbare Mengen ersetzt und 2) der steigende, zusätzliche Strombedarf gedeckt werden. Das Energiesystem ist träge, bedingt umfangreicher Infrastruktur und Investitionen in Stromnetze, Pipelines, Erzeugungsanlagen, Logistik, Speicher und verbraucherseitige Änderungen. Elektrische Energie auf Basis Erneuerbarer (wie auch Biomasse) sowie davon abgeleitete

Energieträger und Einsatzstoffe wie Wasserstoff, Ammoniak, synthetische Gase oder Treibstoffe werden auf absehbare Zeit ein knappes Gut bleiben.

Vor diesem Hintergrund ist der effiziente Einsatz von elektrischer Energie ein wichtiges Element, um die Transformation hin zu fossilfreier Energie zu beschleunigen. Denn, je geringer der zusätzliche Bedarf an grünem Strom ist, umso schneller lässt sich die Gesamtnachfrage bei gleichem Nutzen decken.

Ein großer Teil der zusätzlichen Nachfrage an Strom wird künftig von der Industrie ausgehen. Die „Wasserstoffstrategie für Österreich“ nennt hier auf Basis einer Studie von AEA, E.ON Energy Research Center (ERC) und MUL (2021) Details: Unter der Annahme, dass der dezidierte Methan-Bedarf der Industrie 2040 zur Gänze mittels biogenem CH₄ abgedeckt werden kann verbleibt in einem Szenario, das den maximal Exergie-Effizienten Einsatz von Energie zum Ziel hat, ein Wasserstoffbedarf von 59,5 TWh. Unter der vereinfachten Annahme eines Elektrolysewirkungsgrads von 75 % (und unter Vernachlässigung von Übertragungs-, Transport- und Speicherverlusten) benötigt man zur Herstellung dieses Wasserstoffs mehr als 79 TWh grünen Strom. Hinzu kommen z.B. in der Eisen- und Stahlerzeugung noch Strombedarfe von rund 8 TWh für Lichtbogenöfen, Walz- und andere Bearbeitungsanlagen (WKO, IV, 2019). Ein Großteil dieses Wasserstoffs wird voraussichtlich importiert werden. Dennoch zeigen die Zahlen die Dimensionen der Herausforderung und die Relevanz des sinnvollen Einsatzes von elektrischer Energie auf.

Wie oben aufgezeigt funktionieren die Dekarbonisierung-Optionen im Mobilitätssektor (nicht nur Pkw, auch Busse, Lkw, Flugzeuge, Schiffe usw.) allesamt auf Basis von erneuerbarem Strom. Vor diesem Hintergrund ist auch im Bereich des motorisierten Individualverkehrs der effiziente Einsatz dieser Energieform von herausragender Bedeutung. Deshalb werden die drei skizzierten Antriebstechnologien unter dem Gesichtspunkt des maximal nutzenstiftenden Einsatzes von grünem Strom analysiert. Ausgangspunkt ist jeweils eine Menge von 10.000 kWh elektrischer Energie auf Basis erneuerbarer Quellen. Sämtliche Wirkungsgrade dieser Berechnungen basieren auf Agora Verkehrswende et al. (2018), die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe auf aktualisierten Herstellerangaben (Elektrolyse) sowie Expert*inneneinschätzungen (für die Rückverstromung).

Effizienzvergleich: BEV, FCEV, ICE

Abbildung 3: Effizienzvergleich von BEV, FCEV, ICE – 100 % Strom-Direktnutzung bei BEV.



Quelle: AEA, eigene Darstellung.

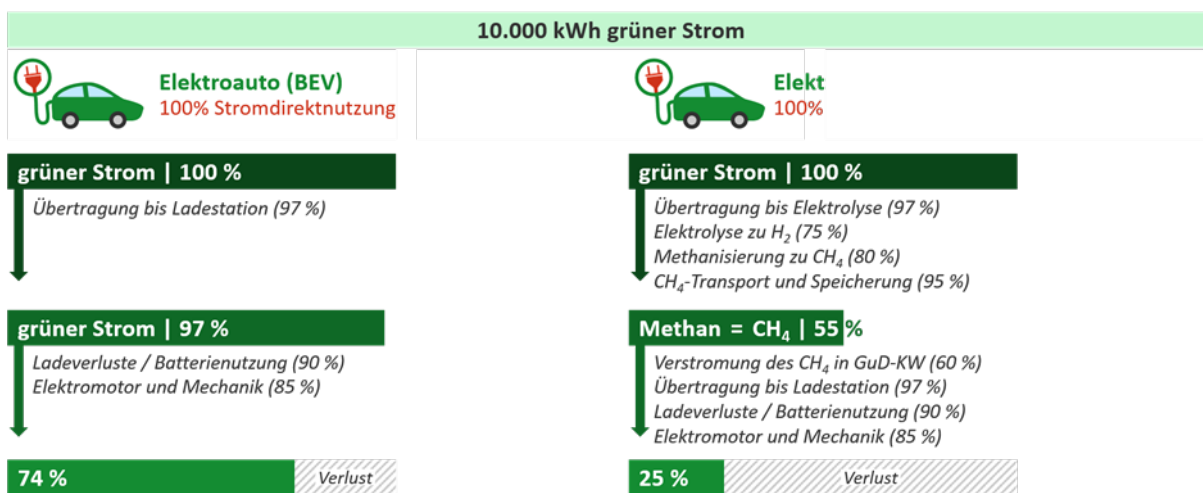
Die Strommenge wird in den drei unterschiedlichen Routen für strombasierte Antriebe in Pkw eingesetzt und ergibt neben einem Gesamtwirkungsgrad – der beim Elektroauto mit 74 % deutlich besser ausfällt als bei den

anderen Antriebstechnologien auch eine Reichweite, die sich mittels durchschnittlicher Verbräuche abschätzen lässt.

Die Abschätzung oben geht – was das Elektroauto betrifft – allerdings von Idealbedingungen aus, die in der Realität kaum zutreffen werden: Die vollständige Stromdirektnutzung. Einen Zustand also, in dem die Energiemenge ohne Zwischenspeicherung in eine Autobatterie geladen werden kann. Besonders in der kalten Jahreszeit wird dies allerdings oft nicht der Fall sein – der grüne Strom muss zwischengespeichert werden, entweder kurzzeitig vom Tag in die Nachtstunden oder längerfristig, indem Strom (und Wasser) über eine Power-to-Gas-Route erst zu Wasserstoff (H₂) umgewandelt, anschließend mit Hilfe von Kohlenstoff methanisiert (CH₄) und anschließend zwischengespeichert wird, um im Bedarfsfall wieder verstromt zu werden. Geht man davon aus, dass – im Gegensatz zur 100%igen Stromdirektnutzung – die eingesetzte Energie zu 100 % zwischengespeichert werden muss, reduziert sich der Wirkungsgrad der BEV-Route von 74 % auf 25 %, was noch immer deutlich über dem E-Fuel (15 %) und knapp unter dem Wasserstoff-Pkw (30 %) liegt.

Effizienzvergleich: BEV mit unterschiedlichen Stromerzeugungsketten

Abbildung 4: Effizienzvergleich von BEV, FCEV, ICE – Variante PtG-t-Power bei BEV.



Quelle: AEA, eigene Darstellung

Diese sehr verlustbehaftete Power-to-Gas-to-Power-Kette ist ebenso eine theoretische – sie wird in der Realität nicht zutreffen, weshalb die Analyse von Mischszenarios sinnvoll scheint. Im Rahmen dieser Analyse werden zwei Kombinationen untersucht:

Effizienz: BEV mit einem Strom-Mix 60/40

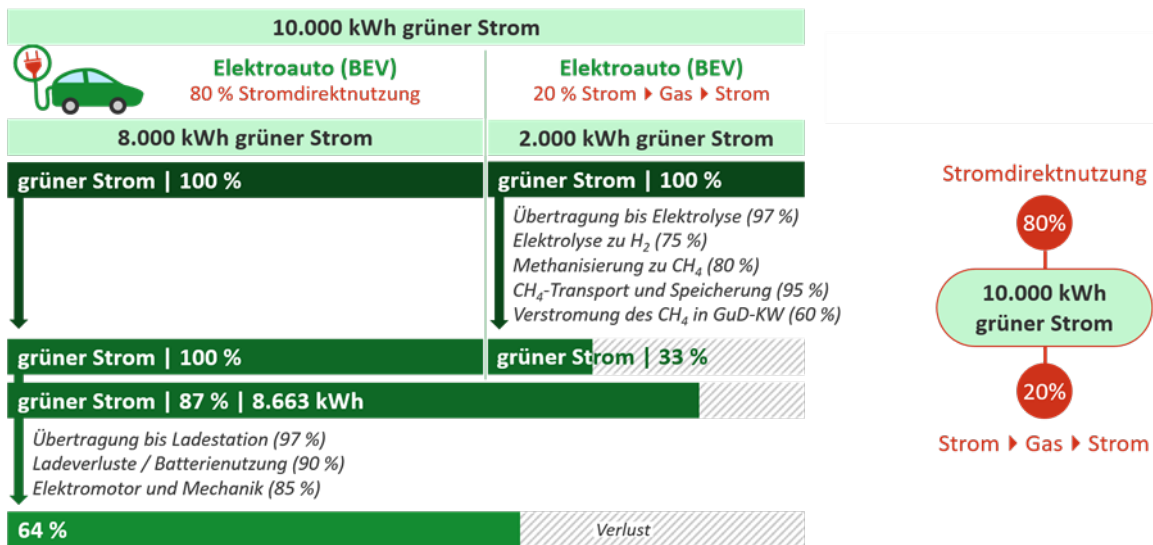
Abbildung 5: Effizienzvergleich von BEV, FCEV, ICE – 60 % Strom-Direktnutzung; 40 % PtG-t-Power bei BEV



Quelle: AEA, eigene Darstellung

Effizienz: BEV mit einem Strom-Mix 80/20

Abbildung 6: Effizienzvergleich von BEV, FCEV, ICE – 80 % Strom-Direktnutzung; 20 % PtG-t-Power bei BEV

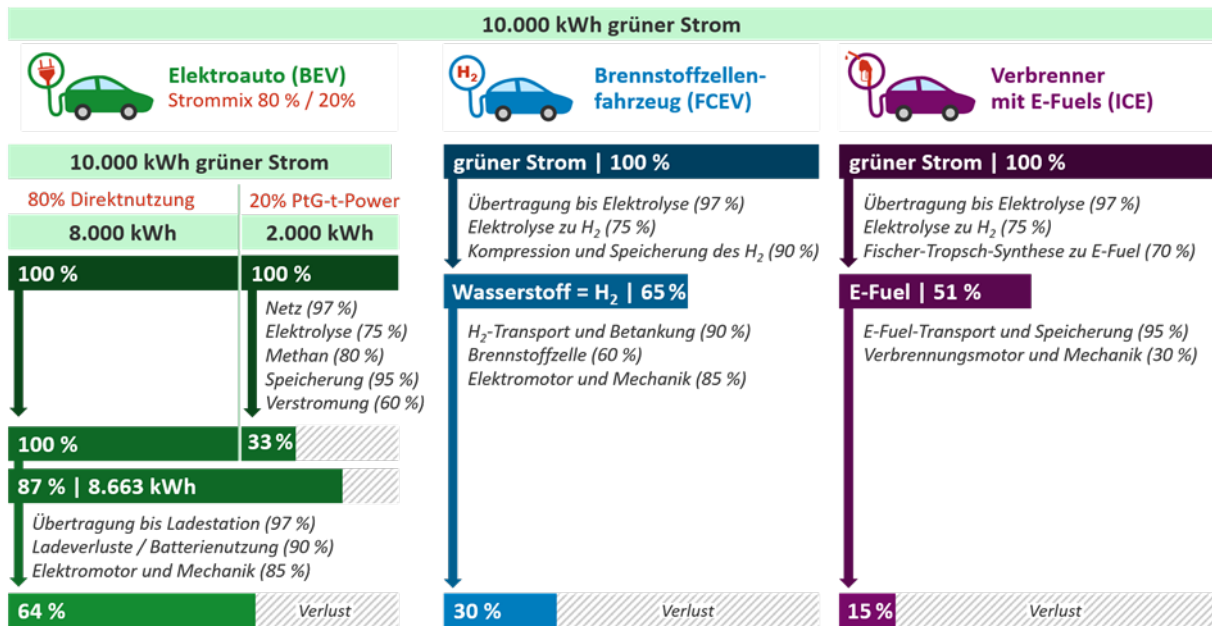


Quelle: AEA, eigene Darstellung

Einmal ein Strom-Mix, der sich zu 60 % aus Stromdirektnutzung und 40 % über die Zwischenspeicherung mit Gas bildet, und einmal das Verhältnis von 80 % Direktstrom und 20 % zwischengespeicherter grüner Strom. Es resultieren Gesamtwirkungsgrade von 54 % (60/40) bzw. 64 % (80/20). Diese dürften näher an der Realität sein als jener, der von 100 % Direktnutzung ausgeht. Den beiden anderen Antriebstechnologien ist das Elektroauto im Effizienzvergleich noch immer deutlich überlegen.

Effizienzvergleich strombasierter Antriebstechnologien: BEV (80/20), FCEV und ICE

Abbildung 7: Zusammenfassung des Effizienzvergleichs von BEV, FCEV, ICE.



Quelle: AEA, eigene Darstellung.

4.2 Ist ein neuer Effizienzbegriff nötig?

In den nächsten Jahrzehnten wird ein großer Wandel im Automobilssektor stattfinden. Mit dem Wandel warten neue Geschäftschancen. Die Veränderung bedeutet aber auch, dass Geschäftsbereiche schrumpfen oder verschwinden werden. Wie oben ausgeführt ist es bei Policies und rechtlichen Grundlagen zum Thema notwendig, auf die Effizienz zu achten, um eine möglichst rasche und schlanke Transformation des Energiesystems zu ermöglichen. Vor diesem Hintergrund beschäftigen sich immer mehr Fachbeiträge mit dem Effizienzbegriff. Ein Beispiel hierfür ist ein Bericht von Frontier Economics im Auftrag des (deutschen) Mineralölwirtschaftsverband (MWV) und Uniti, des Verbands mittelständischer Mineralölunternehmen (in Deutschland). Die Analyse trägt den Titel „Der Effizienzbegriff in der klimapolitischen Debatte zum Straßenverkehr – ein gesamtheitlicher Ansatz für die Effizienzbewertung von Technologien“ vom Oktober 2020.

Der Kritikpunkt: Bisherige Effizienzbetrachtungen sind unzureichend. Das BMK beauftragte die Erkenntnisse der Analyse aufzugreifen und zu kommentieren. Ein Teil der Kritik stützt sich auf der Feststellung, dass bisherige Effizienzvergleiche das Elektroauto in zu positivem Licht erscheinen lassen, gewisse effizienzmindernde Aspekte wie Netzverluste, die Stromspeicherung, Ladeverluste oder Effizienzverluste am Fahrzeug selbst vernachlässigen würden. Diese Punkte sind teilweise durchaus gerechtfertigt und wurden im Rahmen der obenstehenden Effizienzbetrachtung entsprechend berücksichtigt. Ein Kernpunkt der Kritik fußt auf der Kernthese, dass Windkraftanlagen und Photovoltaik-Parks in Patagonien bzw. Nordafrika viel effizienter Strom als in Mitteleuropa erzeugen würden. Dort produzierte E-Fuels, die in Deutschland in Verbrennerfahrzeugen eingesetzt werden, lassen diese – was die Gesamteffizienz betrifft – ebenbürtig mit Elektroautos erscheinen, die mit in Deutschland produziertem erneuerbaren Strom betrieben werden. Der Minderertrag von Windkraft- und PV-Erzeugung in Deutschland gegenüber anderen Weltregionen geht mit einem theoretischen Verlust von 61 % in die Betrachtung ein, was den Gesamtwirkungsgrad von Elektroautos stark reduziert. In unserem

Beispiel von oben hätte die BEV-Schiene bei einem Strom-Mix von 80/20 nur mehr einen Wirkungsgrad von 3 %, im Strom-Mix 60/40 würde der Gesamtwirkungsgrad sogar negativ.

Allein diese Umlegung zeigt schon den fehlenden physikalischen Realitätsbezug dieser alternativen Effizienzbetrachtung. Für die Bestimmung eines Gesamtwirkungsgrads ist das energetische Input-Output-Verhältnis entscheidend, und nicht eine hypothetische Mehrproduktion an anderen Orten der Welt bzw. Opportunitäten.

Neben dieser Umdeutung der Physik fehlt zudem die Skalier- und Realisierbarkeit des Ansatzes, wie auch Kapitel 5 dieser Studie aufzeigt. Die zur vollständigen und zeitgerechten Dekarbonisierung notwendigen Mengen können mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht realisiert werden, zudem der Bedarf an strombasierten Energieträgern bzw. Grundstoffen in anderen Bereichen hoch ist.

Zudem unberücksichtigt: Eine Auslagerung von Energieproduktion in andere Regionen der Welt erzeugt neue Kapazitätslimits (Transport, Anlandung, Regasifizierung usw.) und vor allem Importabhängigkeiten statt regionaler Wertschöpfung und Versorgungsautonomie im Inland bzw. in Europa. Die aktuelle Energiekrise rund um Lieferreduktionen durch Russland und resultierende Preisrallyes demonstrieren aber die hohe Bedeutung von Energieeffizienz und einer im Kern auf eigenen lokalen Ressourcen aufbauenden Energieversorgung.

5 Aufbringung vs. Bedarf

Zur Veranschaulichung der Größenordnungen der Strommengen, die zur Dekarbonisierung des motorisierten Individualverkehrs durch den Einsatz von E-Fuels erforderlich wären, wurde diese berechnet und dem Stromeinsatz für eine Dekarbonisierung durch reine Elektromobilität gegenübergestellt.

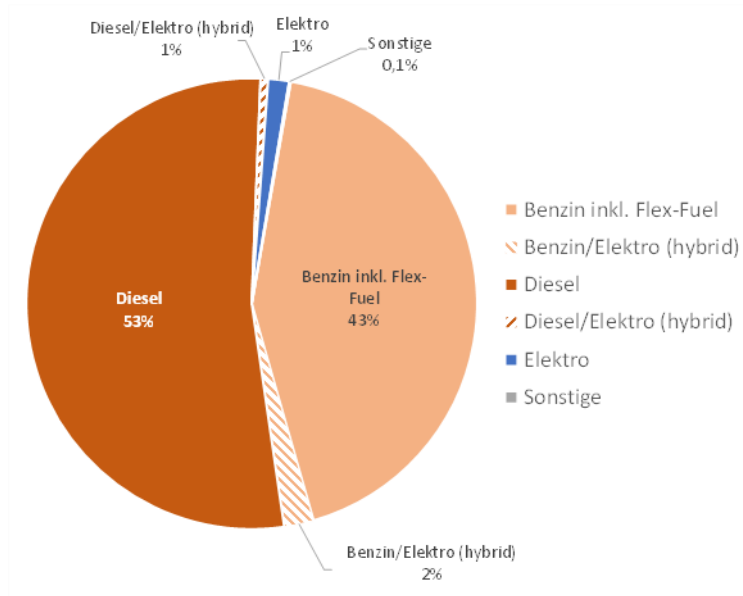
Die Berechnung des Strombedarfs für die Dekarbonisierung der PKW-Bestandsflotte durch E-Fuels erfolgte in zwei Schritten: in einem ersten Schritt wurde auf Basis des Flottenbestandes 2021 sowie der jährlichen Fahrleistungen und des durchschnittlichen spezifischen Kraftstoffverbrauchs der E-Fuel-Bedarf ermittelt, der zur Abdeckung der Fahrleistungen der benzin- und dieselbetriebenen Fahrzeuge zur Erfüllung dieser jährlichen Fahrleistung im Jahr 2021 erforderlich ist. In einem zweiten Schritt wurde dann der zur Erzeugung dieser E-Fuels benötigte Strombedarf berechnet.

5.1 Kraftstoffbedarf des PKW-Bestandes

Die Berechnung des Kraftstoffbedarfs erfolgte auf Basis der derzeit zugelassene PKW-Bestandes sowie Annahmen zu durchschnittlichen Kraftstoffverbräuchen sowie jährlichen Fahrleistungen.

Nachstehende Abbildung 8 zeigt die Struktur des PKW-Bestandes im Jahr 2021, aufgeteilt nach den wesentlichen Antriebstechnologien und eingesetzten Treibstoffen. Die beiden größten Fahrzeugarten Benzin inklusive Flex-Fuel sowie Diesel umfassen dabei mehr als 95 % des Fahrzeugbestandes. Der Rest des Fahrzeugbestandes besteht ca. zur Hälfte aus Benzin-Elektro-Hybriden, zu einem Drittel aus reinen Elektrofahrzeuge, sowie zu 13 % aus Diesel-Elektro-Hybriden. Alle übrigen Antriebsarten machen nur ca. 0,1 % des Bestandes an Personenkraftwagen aus.

Abbildung 8: Verteilung des PKW-Bestandes in Österreich 2021 nach Fahrzeugarten.



Quelle: Zulassungsstatistik 2021, Statistik Austria (2022)

In der Berechnung des Kraftstoffbedarfs wurden ausschließlich die Fahrzeuge mit reinen Verbrennungsmotoren auf der Basis von Benzin- und Dieselmotoren (inklusive Biokraftstoffbeimischung) berücksichtigt. Fahrzeuge mit anderen Antriebstechnologien (Benzin- und Diesel-Hybrid-, Flüssiggas- und Erdgasfahrzeuge) wurden aufgrund ihrer geringen Anzahl (weniger als 3 % der PKW-Flotte) vernachlässigt. Die derzeit bereits zugelassenen Elektrofahrzeuge wurden aus methodischen Gründen nicht berücksichtigt.

Tabelle 1: Anteil der Personenkraftwagen Kl. M1 nach Antriebsarten

Fahrzeugarten	Anzahl 2021	Anteil in %
Benzin inkl. Flex-Fuel	2.197.006	42,8
<i>darunter Flex-Fuel</i>	<i>4.878</i>	<i>0,2</i>
Diesel	2.717.475	52,9
Elektro	76.539	1,5
Flüssiggas	1	0,0
Erdgas	2.654	0,1
Benzin/Flüssiggas (bivalent)	331	0,0
Benzin/Erdgas (bivalent)	2.801	0,1
Benzin/Elektro (hybrid)	108.978	2,1
Diesel/Elektro (hybrid)	27.996	0,5
Wasserstoff (Brennstoffzelle)	55	0,0
Summe	5.133.836	100,0

Quelle: Zulassungsstatistik 2021, Statistik Austria (2022).

Die durchschnittliche jährliche Fahrleistung der benzin- und dieselgetriebenen Fahrzeug wurde aus der CROSS-DB entnommen, und betrug im Fall von Benzin 9.967 km bzw. 16.745 km pro Fahrzeug pro Jahr. Mit dem Fahrzeugbestand kommt es damit zu einer Gesamtfahrleistung von 21.898 Mio. Fahrzeug-Kilometern von benzingetriebenen Fahrzeugen, bzw. im Fall von Diesel-PKW von 45.505 Mio. Fahrzeug-Kilometern.

Tabelle 2: Daten zur Berechnung des Kraftstoffbedarfs der PKWs mit Benzin- und Dieselantrieb

Parameter	Benzin-PKW	Diesel-PKW	Datenquelle
PKW-Bestand	2.197.006	2.717.475	Zulassungsstatistik
Spez. Fahrzeugleistung	9.967 km/Jahr	16.745 km/Jahr	CROSS
Spez. Verbrauch	59 kWh/100 km	64 kWh/100 km	Mikrozensus Haushalte
Biokraftstoffanteil	4,90 %	7,00 %	Biokraftstoffbericht

Mit dem spezifischen Kraftstoffverbrauch je Fahrzeugart ergibt sich für diese Fahrleistungen ein Energiebedarf von 12.920 GWh für Benzin sowie 29.123 GWh Diesel, wovon derzeit ca. 94 % mit fossil Treibstoffen abgedeckt

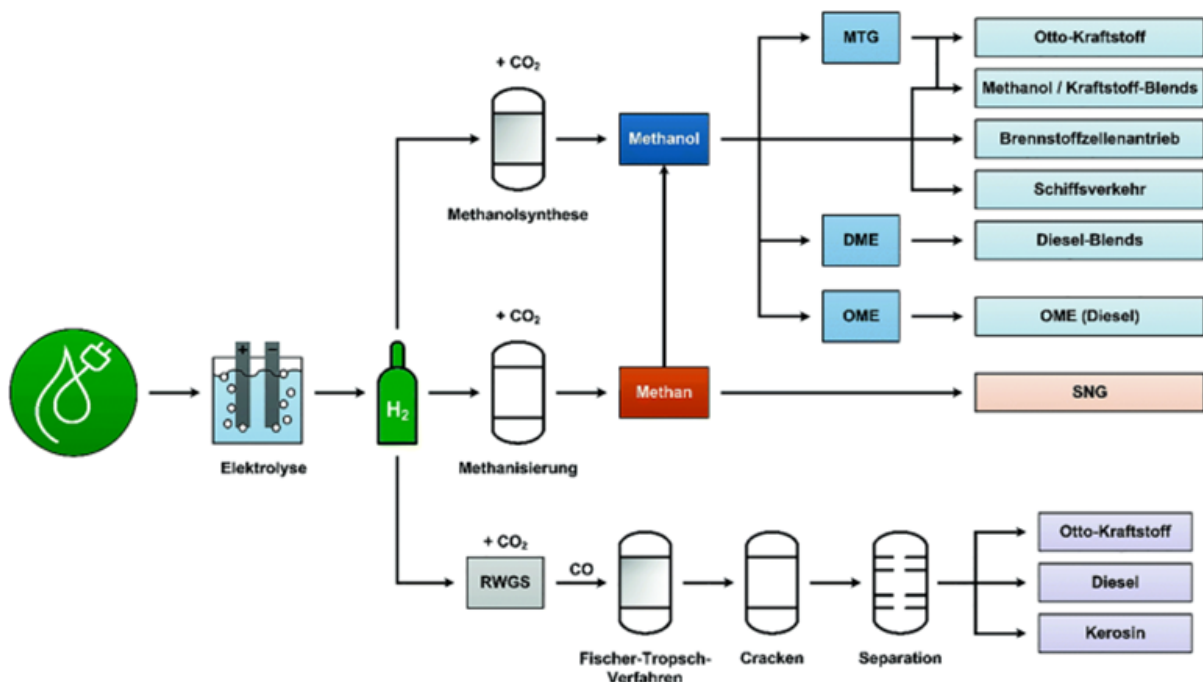
wird und daher zur Dekarbonisierung von E-Fuels substituiert werden muss. Der gesamte fossile Energiebedarf beträgt damit 39.371 GWh, der Biokraftstoffbedarf 2.672 GWh.

5.2 Strombedarf zur Kraftstoffherstellung

Abbildung 9 zeigt verschiedene mögliche Herstellungsrouten von E-Fuels, die in Benzin- und Dieselmotoren eingesetzt werden können. Für die Betrachtungen dieser Studie werden dabei zwei mögliche Routen betrachtet:

- **Fischer-Tropsch-Kraftstoffe (FT-Fuels):** In diesem Szenario erfolgt die Herstellung der Kraftstoffe auf Basis des Fischer-Tropsch-Verfahrens. Die mit diesem Verfahren hergestellten Kraftstoffe können aufgrund ihrer Eigenschaften die herkömmlichen, aus Erdöl hergestellten Benzin- und Dieselmotoren vollständig, d.h. ohne weitere erforderliche Anpassungen der Motoren und der Tanksysteme, ersetzen. Damit können diese Kraftstoffe in allen Benzin- und Diesel-Fahrzeugen des heutigen PKW-Bestandes eingesetzt werden.
- **Fortgeschrittene E-Fuels (Adv. E-Fuels):** Fortgeschrittene E-Fuels können prinzipiell in Benzin- bzw. Diesel-Motoren eingesetzt werden. Die Herstellung dieser Kraftstoffe erfordert im Vergleich zum Fischer-Tropsch-Verfahren einen geringeren Energieeinsatz. Aufgrund ihrer technischer Eigenschaften sind jedoch im Vergleich zu heute eingesetzten Fahrzeugen Anpassungen an Motor und Tanksystem erforderlich, wie z.B. Dichtungsmaterialien, Flüssiggastanks und Schmiermittelbeimischungen. Damit ist der vollständige Ersatz von fossilem Benzin und Diesel durch diese Kraftstoffe erst in angepassten und zukünftig zugelassenen Fahrzeugen möglich.

Abbildung 9: Aufbringungsrouten für E-Fuels



Quelle: (Bertau, M., Kraft, M., Plass, L., Wernicke, HJ., 2019)

Die Berechnung des Energiebedarfs zur Herstellung von E-Fuels berücksichtigt die Prozessschritte Elektrolyse, CO_2 -Absorption aus Abgasen, sowie – kraftstoffabhängig – Methanol- oder Fischer-Tropsch-Synthese (JEC Well-

to-Tank report v5; JRC, 2020). Die Werte für den spezifischen Energie- und Strombedarf, die sich aus diesen Einzelschritten ergeben, sind in nachstehender Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3: Parameter zur Berechnung des Energiebedarfs der E-Fuel-Herstellung

Parameter	Fischer-Tropsch		SynDiesel		Methanol	
	Benzin u. Diesel					
Elektrolyse-Effizienz [%]	75 %	80 %	75 %	80 %	75 %	80 %
Energiebedarf [kWh/kWhKraftstoff]	2,45	2,32	2,13	2,01	1,93	1,83
Anteil Strom am Energiebedarf [%]	86,4 %	85,7 %	87,8 %	87,1 %	87,9 %	87,2 %
Strombedarf [kWh/kWhKraftstoff]	2,12	1,99	1,87	1,75	1,69	1,59

Quelle: AEA, eigene Berechnungen

Den höchsten Strombedarf hat die Erzeugung von E-Fuels über die Fischer-Tropsch-Route. Demgegenüber ermöglicht die Nutzung fortgeschrittener Erzeugungsrouten Einsparungen von 12 % bzw. 20 %. Eine Verringerung der Elektrolyseeffizienz um fünf Prozentpunkte von 80 % auf 75 % führt im Gegenzug zu einem um 6 % höheren Strombedarf je erzeugter Kraftstoffmenge. In allen Routen muss der Großteil (d. h. zwischen 86 und 88 %) des Energiebedarfs durch Strom gedeckt werden, und zwar vorwiegend aufgrund der Herstellung des erforderlichen Wasserstoffs durch Elektrolyse.

Der Strombedarf zur Herstellung der zur Deckung des Kraftstoffbedarfs des PKW-Bestandes ist in Tabelle 5 gegeben. Dabei wurde der Strombedarf getrennt für Benzin- und Diesel-Ersatzkraftstoffe berechnet, unter Berücksichtigung der beiden Herstellungsrouten, Effizienz der Elektrolyse sowie des jeweiligen Biokraftstoffanteils. Der Strombedarf zur Herstellung von Benzin beträgt dabei zwischen 20.160 und 28.198 GWh, und von Diesel zwischen 48.920 und 63.563 GWh.

Tabelle 4: Ergebnisse der Berechnung des Strombedarfs der E-Fuel-Herstellung

Strombedarf [GWh]	FT-Fuels		Adv. Fuels	
	75 %	80 %	75 %	80 %
<i>Elektrolyseeffizienz [%]</i>				
<i>Exkl. Biokraftstoffbeimischung</i>				
Benzin	26.816	25.236	21.456	20.160
Diesel	59.114	55.630	52.158	48.920
<i>Inkl. Biokraftstoffbeimischung</i>				
Benzin	28.198	26.563	22.561	21.198
Diesel	63.563	59.817	56.084	52.602

Quelle: AEA, eigene Berechnungen

5.3 Strombedarf durch batterieelektrische Fahrzeuge

Der Strombedarf zur Erzeugung der E-Fuels wird mit dem Strombedarf von Elektromobilität zur Abdeckung der Fahrleistung der Benzin- und Diesel-Fahrzeuge (67.402 Mio. Fahrzeug-Kilometern, siehe Tabelle 2) verglichen. Dabei wurden zwei Fälle der Nutzung erneuerbarer elektrischer Energie unterschieden: im ersten Fall wird angenommen, dass die Fahrzeugbatterien direkt zu 100 % durch erneuerbaren Strom geladen werden können (BEV-100), während im zweiten Fall 40 % des Stroms mittels Power-to-Gas-to-Power¹ vor der Ladung der Fahrzeuge gespeichert werden müssen (BEV-60/40 siehe auch Kapitel 4). Die Ladeverluste betragen in beiden Fällen 10 %, die Stromverteilverluste 3 %. Als spezifischer Verbrauch des Betriebs der batterieelektrischen Fahrzeuge wurden dabei 15 kWh/100 km angenommen.

Der Strombedarf beträgt für den Fall der direkten Ladung (BEV-100) 11.581 GWh, und für den Fall der teilweisen Zwischenspeicherung (BEV-60/40) 15.870 GWh.

5.4 Ergebnisse

Ausgewählte Ergebnisse der Berechnung des Strombedarfs zur Abdeckung der Fahrleistung des heute zugelassenen Bestandes an Benzin- und Diesel-betriebenen Fahrzeugen sind in Tabelle 5: Vergleich ausgewählter Ergebnisse des Strombedarfs dargestellt:

- E-Fuel-Herstellung aus der Fischer-Tropsch-Herstellungsrouten mit Elektrolyseeffizienz von 75 %, mit und ohne Ersatz der Biokraftstoffbeimischung;
- E-Fuels aus fortgeschrittenen Herstellungsrouten mit Elektrolyseeffizienz von 80 %, mit und ohne Ersatz der Biokraftstoffbeimischung;
- Gemischte Ladung von batterieelektrischen Fahrzeugen bei Zwischenspeicherung von 40 % des Stroms über Power-to-Gas-to-Power; sowie
- Direktladung von batterieelektrischen Fahrzeugen mit 100 % erneuerbarem Strom.

Darüber hinaus ist Tabelle 5 in die zur Aufbringung der jeweiligen Strommengen erforderliche Erzeugungskapazität in Form von PV bei 1000 Volllaststunden bzw. Windkraft bei 2400 Volllaststunden angegeben.

Tabelle 5: Vergleich ausgewählter Ergebnisse des Strombedarfs

	Strombedarf [TWh] mit Biofuel- Beimischung	Strombedarf [TWh] ohne Biofuel- Beimischung	PV [GW] @ 1000 VLH	Wind [GW] @ 2400 VLH
FT-Fuel-Herstellung	85,9	91,8	85,9 - 91,8	35.8 - 38.2
Adv. E-Fuels-Herstellung	69,1	73,8	69,1 - 73,8	28.8 - 30.8
BEV 60/40 (Direkt + P2G2P)	15,9	15,9	15,9	6,3
BEV 100 (Direktnutzung)	11,6	11,6	11,6	4,6

¹ Power-to-Gas-to-Power bedeutet die Erzeugung von erneuerbaren Gasen aus erneuerbarem Strom zur Speicherung und anschließenden Rückverstromung und führt zu aggregierten Verlusten entlang der Umwandlungskette von 67 %.

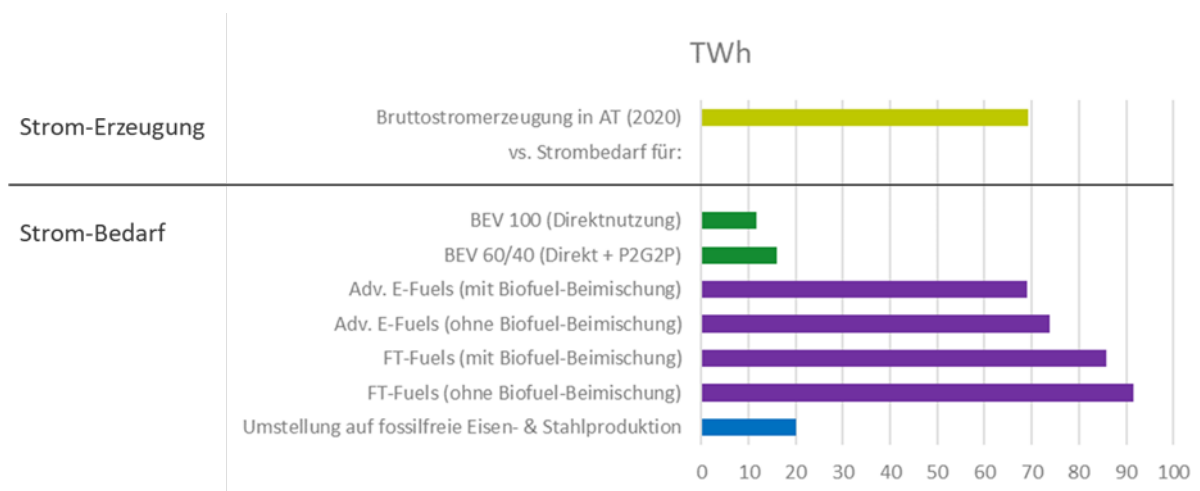
Die Ergebnisse in Tabelle 5 zeigen eine große Bandbreite des Strombedarfs, der zur Abdeckung der Fahrleistung des heutigen PKW-Bestandes durch E-Fuels erforderlich ist. Während beim Einsatz von fortgeschrittenen E-Fuels und Beibehaltung der derzeitigen Biokraftstoffbeimischung 69,1 TWh erforderlich sind, sind bei Verwendung der Fischer-Tropsch-Route ohne Biokraftstoffe sogar 91,8 TWh und damit um 33 % mehr erforderlich. Der Unterschied zwischen beiden Ergebnissen ist dabei im Wesentlichen auf den geringeren Strombedarf der fortgeschrittenen E-Fuels und der höheren Effizienz der dabei eingesetzten Elektrolyse zurückzuführen, die Biokraftstoffbeimischung hat einen geringeren Einfluss.

Im Vergleich zum Einsatz von E-Fuels erfordert die Abdeckung der Fahrleistung durch eine batterieelektrische Fahrzeuge mit direkte Ladung bereitgestellte Fahrleistung (BEV-100) einen um 83 % signifikant geringeren Stromverbrauch in der Höhe von 11,6 TWh. Im Falle eines gemischten Ladebetriebs (BEV-60/40) beträgt die Einsparung immer noch 77 %.

Die zur Bereitstellung des erneuerbaren Strombedarfs in den verschiedenen betrachteten Fällen erforderliche Erzeugungskapazität unterscheidet sich ebenfalls wesentlich, und zwar sowohl abhängig von der verwendeten Fahrzeug- und Treibstoffwahl, als auch der genutzten Stromerzeugungspotentiale. Im Fall von fortgeschrittenen E-Fuels und Windkraft ist im günstigsten Fall eine Erzeugungskapazität von 28,8 GW erforderlich, bei anderen Herstellungsrouten und ohne Biokraftstoffe kann dieser Bedarf um beinahe 10 GW auf 38,2 GW steigen. Im Vergleich dazu erfordert die Versorgung von batterieelektrischen Fahrzeugen im Falle von Zwischenspeicherung von 40 % der Strommenge und dem Einsatz von PV eine Erzeugungskapazität von 15,9 GW und damit nur knapp mehr als die Hälfte des günstigsten Falles bei Einsatz von E-Fuels. Bei reiner batterieelektrischer Ladung und ohne Zwischenspeicherung bei Nutzung von Windkraft sinkt dieser Bedarf weiter auf 4,6 GW.

Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse des Strombedarfs aus Tabelle 4 mit dem österreichischen Bruttostrombedarf 2020 und dem Strombedarf durch die Umstellung auf fossilfreie Eisen- und Stahlherstellung. Man sieht, dass der Strombedarf durch den Einsatz von E-Fuels in allen Fällen gleich groß oder größer als die derzeitige österreichische Bruttostromerzeugung ist, während die Nutzung batterieelektrischer Fahrzeuge nur ein Fünftel davon erfordert.

Abbildung 10: Vergleich der Ergebnisse des Strombedarfs aus Tabelle 5 mit dem österreichischen Bruttostrombedarf 2020 und dem Strombedarf durch die Umstellung auf fossilfreie Eisen- und Stahlherstellung.



Quelle: AEA, eigene Darstellung

5.5 Einschätzungen zum möglichen Hochlauf der E-Fuel-Herstellung

Die heutige bereits verfügbare globale Kapazität zur Herstellung von E-Fuels ist noch sehr begrenzt. Laut der Branchenplattform eFuel alliance sind heute (2022) sechs Projekte mit einer Gesamterzeugungskapazität von ca. 12 Millionen Liter bzw. ca. 120 GWh in Betrieb, was ca. 0,3 % des heutigen österreichischen Bedarfs entspricht (E-Fuel-Alliance, 2022).

Der mögliche zeitliche Hochlauf der E-Fuel-Herstellung zur Abdeckung des oben ermittelten österreichischen Bedarfs ist von angebots- und bedarfsseitigen Faktoren abhängig, deren Einfluss auf die tatsächliche zukünftige Verfügbarkeit dieser Dekarbonisierung-Option zum derzeitigen Zeitpunkt schwer abschätzbar ist.

Die erneuerbare Stromerzeugung ist ein wesentlicher Faktor, da ohne diese E-Fuels keine Dekarbonisierung-Option darstellen, jedoch gleichzeitig in Österreich wie auch in Europa nur noch in einem begrenzten Ausmaß verfügbar. Damit würde es erforderlich sein, E-Fuels wie schon heute Rohöl nach Österreich zu importieren.

Die global jährlich zugebauten erneuerbaren Erzeugungskapazitäten eine haben Größenordnung, die den Strombedarf zur Herstellung der für Österreich erforderlichen E-Fuel-Mengen leicht abdecken können. Diese nicht in Europa installierten Kapazitäten erfordern jedoch einen Import von E-Fuels auf dem Seeweg, wodurch E-Fuels Teil eines globalen Marktes in Konkurrenz mit anderen Verbrauchern würden. Diese Verbraucher sind sowohl Länder mit einem eigenen Bedarf an zusätzlicher erneuerbarer Energie als auch Anwendungen, die nur unzureichenden Substitutionsmöglichkeiten des derzeitigen Einsatzes fossiler Energieträger haben (wie zum Beispiel der Flugverkehr oder die chemische Industrie). Durch diese Konkurrenz ist damit zu rechnen, dass sich die Preise zukünftig verfügbarer E-Fuels aus Knappheit auf einem höheren Niveau einpendeln.

Der wesentliche Treiber für den Einsatz von E-Fuels auf Basis erneuerbaren Stroms ist die Notwendigkeit, die Emission von Treibhausgasen massiv zu reduzieren. Zur Erreichung der Klimaneutralität ab dem Jahr 2040 müssen bis dahin die Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors schrittweise reduziert werden. Diese Reduktion kann neben einer Verringerung der Fahrleistungsnachfrage durch den Einsatz von neuen Technologien wie Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren für konventionelle oder fortgeschrittene Treibstoffe oder – auf energieeffizientere Weise - mit batterieelektrischen Fahrzeugen erfolgen.

Damit ergibt sich die Situation, dass der heutige Fahrzeugbestand aufgrund derzeit fehlender E-Fuel-Erzeugungskapazität nicht auf diese Weise dekarbonisiert werden kann. E-Fuels sind damit nur eine Dekarbonisierung-Option für zukünftig zugelassene Fahrzeuge mit Verbrennungskraftmaschinen, die jedoch in Konkurrenz zu wesentlich effizienteren Fahrzeugen mit batterieelektrischem Antrieb stehen werden. Die zukünftige Verfügbarkeit von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren ist zudem von den Technologieentscheidungen der großen Fahrzeughersteller abhängig, auf die der österreichische Markt aufgrund der Größe nur eine geringe Bedeutung hat.

6 Fazit

Die Analysen des gegenständlichen Projekts zeigen ein gemischtes Bild von E-Fuels. Technisch gesehen lassen sich Verbrenner mit Drop-In fähigen E-Fuels betreiben. E-Fuels können die klimarelevanten Emissionen des PKW-Verkehrs auch im gleichen Ausmaß senken wie die batterieelektrische Mobilität oder H₂-Brennstoffzellen-PKW. Voraussetzung für möglichst niedrige Treibhausgasemissionen ist bei allen drei Technologien allerdings der Einsatz von erneuerbarem Strom, welcher ein knappes Gut darstellt. Die zunehmende Elektrifizierung unserer Wirtschaft erhöht den Bedarf an erneuerbarem Strom in unterschiedlichsten Anwendungen. Für die Umstellung der heutigen PKW-Flotte in Österreich auf E-Fuels kann mit einem Strombedarf in der Größenordnung der derzeitigen Gesamtstromproduktion gerechnet werden. Dies liegt primär an den nicht vermeidbaren Umwandlungsverlusten in der E-Fuels-Herstellung sowie der Bereitstellungskette. Die Betrachtung der Effizienz der Umwandlung von Strom in zurückgelegte Kilometer zeigt eindeutig, dass die batterieelektrische Mobilität auch unter Berücksichtigung der Zwischenspeicherung von Energie deutlich effizienter ist als die Technologie-Optionen E-Fuels und H₂-Brennstoffzelle. Oft wird hier ins Treffen geführt, dass die erneuerbare Stromproduktion in anderen Gegenden der Welt viel effizienter sei und dass deswegen die Gesamteffizienz der E-Fuels besser zu bewerten sei. In unserer Analyse kommen wir allerdings zum Schluss, dass für die Bestimmung des Gesamtwirkungsgrads das energetische Input-Output-Verhältnis maßgeblich ist, nicht hypothetische Mehrproduktionen an anderen Orten der Welt bzw. Opportunitäten.

Angesichts der enormen Mengen an Strom, die zur E-Fuels Produktion eingesetzt werden müssten, ist eine inländische Produktion zur (vollständigen) Bedarfsdeckung sehr unwahrscheinlich. Zudem wird erneuerbarer Strom für viele weitere Anwendungen in Haushalten, Industrie und Gewerbe gebraucht, welche in Konkurrenz zur PKW-Mobilität stehen. Zwangsläufig müssten E-Fuel-Mengen daher am Weltmarkt bezogen und importiert werden. Allerdings bestehen auch hier massive Nutzungskonkurrenzen für Produkte auf Basis erneuerbarer Stromerzeugung wie etwa erneuerbares Methan, Wasserstoff, Ammoniak oder Methanol. Viele Industrien wie die Eisen- und Stahlindustrie, die chemische Industrie und Weitere sind bei der Dekarbonisierung auf entsprechende Importe angewiesen, die in direkter Konkurrenz zu E-Fuels stehen. Die Recherchen ergaben, dass E-Fuels noch gar nicht am Markt verfügbar sind und die Produktionskapazitäten zur Deckung des Bedarfs fehlen.

Aus Sicht des Energiesystems ist es nicht sinnvoll, erneuerbaren Strom als knappes Gut in Anwendungen wie die E-Fuels-Nutzung in der PKW-Mobilität zu lenken, welche um den Faktor vier ineffizienter als bestehende, marktfähige Alternativen wie die batterieelektrische PKW-Mobilität sind. Gesamtsystemisch sinnvoll sind E-Fuels dort, wo sie ihre Stärken der Energiedichte und Speicherbarkeit technisch gesehen bestmöglich ausspielen können, etwa im Flugverkehr oder zum Antrieb schwerer Maschinen. Auch gibt es in diesen Bereichen technisch gesehen noch keine anderen Alternativen zur Dekarbonisierung.

Unabhängig davon, ob die PKW-Mobilität in Zukunft vermehrt batterieelektrisch, E-Fuel-basiert oder mittels Brennstoffzellenfahrzeugen erfolgt: Voraussetzung für eine gute Klimabilanz aller dieser Technologien ist erneuerbarer Strom in allen Stufen der Bereitstellungskette. Ein beschleunigter Ausbau der Ökostromproduktion in Österreich und weltweit ist daher jedenfalls unverzichtbar.

Literatur

- AEA, E.ON Energy Research Center und MIT (2021): Erneuerbares Gas in Österreich 2040 – Quantitative Abschätzung von Nachfrage und Angebot. Studie im Auftrag des BMK. Wien, 2021.
- Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Berlin, März 2018.
- Agora Verkehrswende (2019a): Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial. Zweite Auflage, Mai 2019.
- Agora Verkehrswende (2019b): Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen. Dezember 2019.
- Aichberger, C. und Jungmeier, G. (2020): Environmental Life Cycle Impacts of Automotive Batteries Based on a Literature Review. *Energies* 2020, 13, 6345.
- BMK (2021): Biokraftstoffe im Verkehrssektor 2021. Wien, 2021.
- Borkowski, A. and Zawislak, M. (2022): Comparative analysis of the life-cycle emissions of carbon dioxide emitted by battery electric vehicles using various energy mixes and vehicles with ICE. *Combustion Engines* 0000, XXX(X), xx-xx. <https://doi.org/10.19206/CE-147159>
- Buchal, C., Karl, H-D. und Sinn, H-W. (2019): Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO₂-Bilanz? *Ifo Schnelldienst* 8/2019, 72 Jahrgang, 25. April 2019.
- Bertau, M., Kraft, M., Plass, L., Wernicke, HJ. (2019): „Methanol – der Kraftstoff, der uns morgen antreibt.“ In *Zukünftige Kraftstoffe*, von W. Maus, 750-757. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2019.
- CROSS-DB: <https://www.odyssee-mure.eu/> [abgefragt 11/2022]
- E-Fuel-Alliance (2022): Produktionsstandorte von eFuels weltweit. Online: <https://www.efuel-alliance.eu/de/efuels/efuel-produktionskarte> [abgefragt 11/2022]
- Fraunhofer ISE (2022): Jährlicher Anteil Erneuerbarer Energien an der öffentlichen Stromerzeugung in Europa: https://energy-charts.info/charts/renewable_share/chart.html?l=de&c=EU&interval=year&legendItems=10 [abgefragt 10/2022]
- Fraunhofer-ISI & ifeu (2022): Langfristige Umweltbilanz und Zukunftspotenzial alternativer Antriebstechnologien. Studie zum deutschen Innovationssystem, Nr. 9-2022; im Auftrag der Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI); Berlin, Februar, 2022.
- Frontier Economics (2020): Der Effizienzbegriff in der klimapolitischen Debatte zum Strassenverkehr. Ein gesamtheitlicher Ansatz für die Effizienzbewertung von Technologien. Studie im Auftrag von UNITI Bundesverband mittelständischer Mineralölunternehmen e.V. und Mineralölwirtschaftsverband e.V. 2. Auflage, November 2020.
- ICCT (2021): A Global Comparison of the Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions of Combustion Engine and Electric Passenger Cars. Juli, 2022.
- Joanneum Research (2019): Geschätzte Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch in der Lebenszyklusanalyse von PKW-basierten Verkehrssystemen. Studie im Auftrag ÖAMTC, Fédération Internationale de l'Automobile, ADAC. Graz, September 2019.

JRC (2020): JEC Well-to-Tank report v5. EUR 30269 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-19926-7, doi:10.2760/959137, JRC119036

Österreichs Energie (2022): Stromstrategie 2040: Österreichs Weg in eine klimaneutrale Energiezukunft. Wien, 2022.

Statistik Austria (2021): Energiestatistik: Mikrozensus Energieeinsatz der Haushalte 2019/2020. Erstellt am 14.09.2021, aktualisiert am 23.05.2022.

Statistik Austria (2022): Kfz-Statistik (Zulassungsstatistik) 2021. Wien, November 2022.

Umweltbundesamt (2020): Pathways to a Zero Carbon Transport Sector. Studie im Auftrag des Klima- und Energiefonds im Rahmen der 1. Ausschreibung „Zero Emission Mobility“. Wien, 2020.

Umweltbundesamt (2021): Die Ökobilanz von Personenkraftwagen. Bewertung alternativer Antriebskonzepte hinsichtlich CO₂-Reduktionspotetial und Energieeinsparung. Studie im Auftrag des BMK, Wien, 2021.

Umweltbundesamt (2022): Klimaschutzbericht 2022. REP-0816, Wien, 2022.

WKO & IV (2019): Im Wettbewerb um die Zukunft. Klimapolitische Perspektiven für den Beitrag der Österreichischen Industrie zur Treibhausgasneutralität. Policy-Paper, Wien, Dezember 2019.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Emissionen der PKW-Produktion. N = 39 untersuchte Szenarien/Varianten; eigene Darstellung auf Basis von Daten aus Bubenberg et al. (2022), Agora Verkehrswende (2019b), Transport&Environment (2022), Hirz und Nguyen (2022), UBA (2021).	15
Abbildung 2: Ergebnisse Literaturanalyse zur Klimarelevanz von PKW-Antrieben. N=105 untersuchte Szenarien/Varianten.....	17
Abbildung 3: Effizienzvergleich von BEV, FCEV, ICE – 100 % Strom-Direktnutzung bei BEV.	20
Abbildung 4: Effizienzvergleich von BEV, FCEV, ICE – Variante PtG-t-Power bei BEV.	21
Abbildung 5: Effizienzvergleich von BEV, FCEV, ICE – 60 % Strom-Direktnutzung; 40 % PtG-t-Power bei BEV	22
Abbildung 6: Effizienzvergleich von BEV, FCEV, ICE – 80 % Strom-Direktnutzung; 20 % PtG-t-Power bei BEV	22
Abbildung 7: Zusammenfassung des Effizienzvergleichs von BEV, FCEV, ICE.	23
Abbildung 8: Verteilung des PKW-Bestandes in Österreich 2021 nach Fahrzeugarten.	25
Abbildung 9: Aufbringungsrouen für E-Fuels	27
Abbildung 10: Vergleich der Ergebnisse des Strombedarfs aus Tabelle 5 mit dem österreichischen Bruttostrombedarf 2020 und dem Strombedarf durch die Umstellung auf fossilfreie Eisen- und Stahlherstellung.....	30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anteil der Personenkraftwagen Kl. M1 nach Antriebsarten	26
Tabelle 2: Daten zur Berechnung des Kraftstoffbedarfs der PKWs mit Benzin- und Dieselantrieb	26
Tabelle 3: Parameter zur Berechnung des Energiebedarfs der E-Fuel-Herstellung	28
Tabelle 4: Ergebnisse der Berechnung des Strombedarfs der E-Fuel-Herstellung	28
Tabelle 5: Vergleich ausgewählter Ergebnisse des Strombedarfs	29

Abkürzungsverzeichnis

AEA	Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency
BEV	Battery Electric Vehicle
BMK	Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
LCA	Lebenszyklusanalysen
THG	Treibhausgas
TtW	Tank-to-Wheel
WtT	Well-to-Tank
WtW	Well-to-Wheel

Über die Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency (AEA)

Die Österreichische Energieagentur liefert Antworten für die klimaneutrale Zukunft: Ziel ist es, unser Leben und Wirtschaften so auszurichten, dass kein Einfluss mehr auf unser Klima gegeben ist. Neue Technologien, Effizienz sowie die Nutzung von natürlichen Ressourcen wie Sonne, Wasser, Wind und Wald stehen im Mittelpunkt der Lösungen. Dadurch wird für uns und unsere Kinder das Leben in einer intakten Umwelt gesichert und die ökologische Vielfalt erhalten, ohne dabei von Kohle, Öl, Erdgas oder Atomkraft abhängig zu sein.

Das ist die missionzero der Österreichischen Energieagentur.

Mehr als 85 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus vielfältigen Fachrichtungen beraten auf wissenschaftlicher Basis Politik, Wirtschaft, Verwaltung sowie internationale Organisationen. Sie unterstützen diese beim Umbau des Energiesystems sowie bei der Umsetzung von Maßnahmen zur Bewältigung der Klimakrise.

Die Österreichische Energieagentur setzt zudem im Auftrag des Bundes die Klimaschutzinitiative klima**aktiv** um. Der Bund, alle Bundesländer, bedeutende Unternehmen der Energiewirtschaft und der Transportbranche, Interessenverbände sowie wissenschaftliche Organisationen sind Mitglieder dieser Agentur.

Besuchen Sie uns auf unserer Webseite: energyagency.at.



AUSTRIAN ENERGY AGENCY