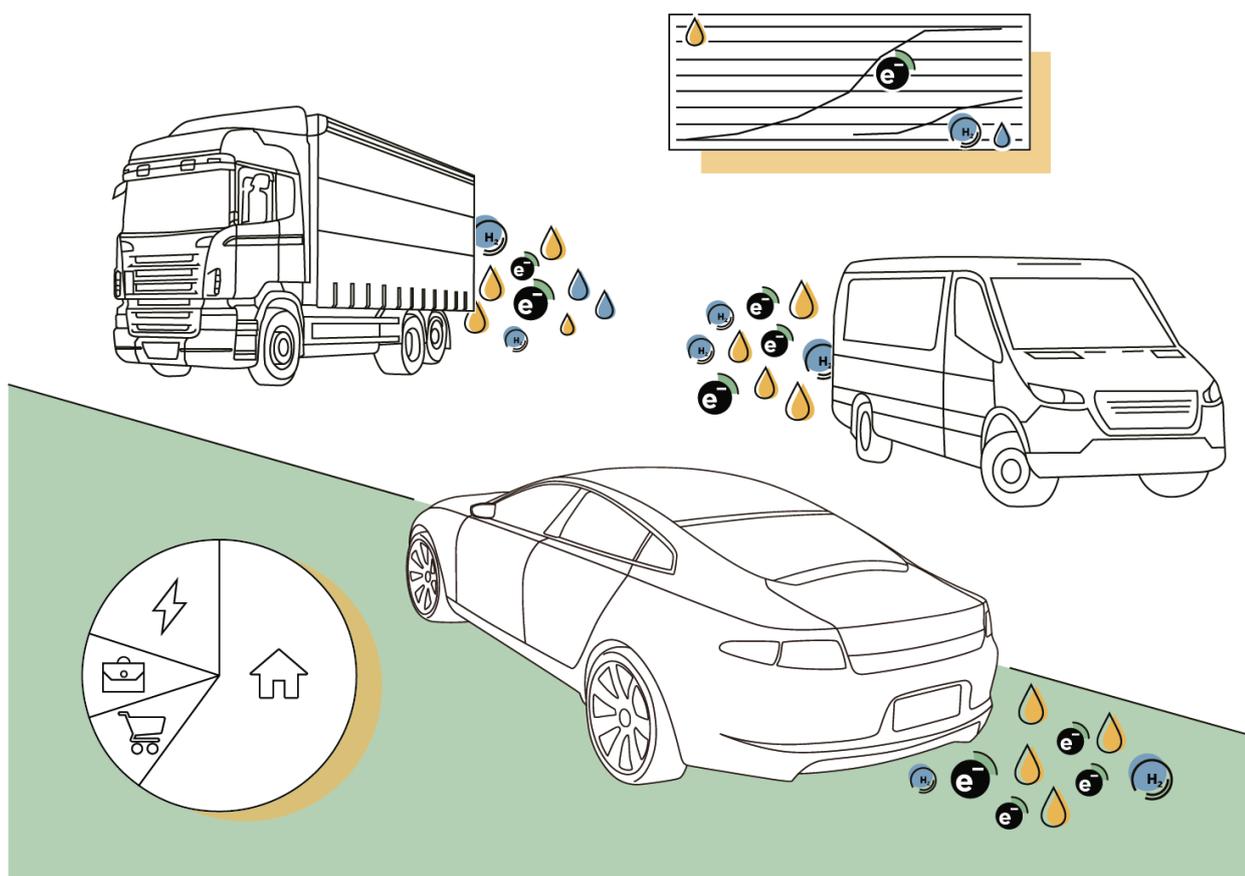


Electric and Hydrogen Mobility Scenarios Switzerland 2050

Regionalized scenarios for passenger cars, light commercial vehicles, heavy commercial vehicles and buses

Outlook 2024



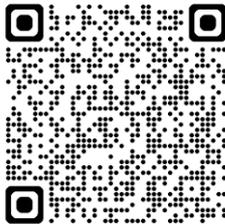
Bei diesem Dokument handelt es sich um einen öffentlich zugänglichen, kostenlosen Bericht. Er beschreibt die Systemgrenzen, Annahmen, Datenquellen und das zugrundeliegende diffusionstheoretische Modell der *Electric and Hydrogen Mobility Scenarios Switzerland 2050 – Outlook 2024*.

Die dem Bericht zugrundeliegenden Daten bietet EBP online zum Kauf an. Sie liefern eine marktführende Datengrundlage für zukunftsweisende Entscheidungen, unterstützen die datenbasierte Erarbeitung von Geschäftsmodellen oder Massnahmenplänen zur Erreichung der Netto-Null-Klimaziele im Bereich der Elektro- und Wasserstoffmobilität.

Erhältlich sind bis zu drei verschiedene, kombinierbare Datenpakete zu den Themen Verkehr, Energie und Ladewelten:

- Auf schweizerischer, kantonaler oder kommunaler Ebene
- Für bis zu vier verschiedene Fahrzeugkategorien (Personenwagen, leichte und schwere Nutzfahrzeuge, sowie Busse)
- Für die drei Szenarien «Business As Usual», «ZERO – E» und «ZERO – H2»
- Mit Szenarien bis ins Jahr 2050

Interessiert? Bestellen Sie auf Ihre Bedürfnisse abgestimmten Daten unter <https://www.ebp.global/ch-de/expertisen/energie/electric-and-hydrogen-mobility-scenarios> .



Autoren

Silvan Rosser, Peter de Haan, Michele Chamberlin, Alessio Mina, Lukas Lanz, Tim Trachsel, Daniel Andersen, Jimmy Kochuparampil, Rayén Mentler

EBP Schweiz AG
Mühlebachstrasse 11
8032 Zürich, Schweiz
Telefon +41 44 395 13 11
info@ebp.ch
www.ebp.ch

Update: September 2024

Inhaltsverzeichnis

1.	«Statusbericht» zur Elektromobilität in der Schweiz	4
2.	Entwicklung Ladenetz Schweiz	7
3.	Grössere Batterien und höhere Ladeleistung	11
4.	Szenarien zur Entwicklung der Marktanteile bis 2050	14
5.	Entwicklung des Energiebedarfs des Strassenverkehrs	20
6.	Ladewelten	23
7.	Localizer – die besten Ladestandorte	25
8.	Zielnetzplanung Strom	28
9.	Vergleich Gesamtkosten Antriebstechnologien	31
10.	Alternative Antriebe für eigene Flotten	34
11.	Gesamt-Umweltbelastung im Strassenverkehr	36
12.	Kreislaufwirtschaft und Recycling von Batterien	39
13.	Einsatz der Szenarien für Kantone, Städte, Energieanbieter und Parkhäusern	42

1. «Statusbericht» zur Elektromobilität in der Schweiz

Der Mobilitätssektor verursacht mit ca. 40 % die meisten inländischen Treibhausgasemissionen. Während die Emissionen im Gebäudesektor mittlerweile stark und rasch sinken (-44 % im Vergleich zu 1990), verlaufen die Fortschritte im Sektor Verkehr nur schleppend (-8 % im Vergleich zu 1990) (BAFU, 2024). Damit die Schweiz ihr Ziel der Klimaneutralität bis 2050 erreichen kann, sind deshalb grundlegende Veränderungen im Mobilitätssektor notwendig. Für die Dekarbonisierung des künftigen Verkehrs ist zu erwarten, dass der batterie-elektrische Antrieb dabei die zentrale Rolle spielt.

Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV) und Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) werden das zukünftige Bild des Strassenverkehrs prägen. Sie alle sind effizienter im Vergleich zum Verbrennungsmotor und damit Teil der Energiewende im Verkehr. Wird der notwendige Strom aus erneuerbaren Energien gewonnen, ist die Elektromobilität ein Schlüssel für die Dekarbonisierung des Strassenverkehrs und zur Erreichung von Netto-Null.

BEV sind besonders vorteilhaft, weil sie den mit erneuerbaren Energien erzeugte Strom direkt nutzen, ohne weitere Umwandlungsschritte und den damit verbundenen Verlusten. BEV benötigen daher am wenigsten erneuerbaren Strom. Bereits deutlich mehr erneuerbaren Strom benötigen FCEV, dann folgen Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor und E-Fuels mit einem deutlich höheren Strombedarf. Nach heutigem Wissenstand sind BEV aber nicht nur bezüglich der Energieeffizienz die beste Option, sondern auch volkswirtschaftlich die günstigste Variante zur Dekarbonisierung des Strassenverkehrs. Bereits heute sind die Gesamtkosten über 200'000 Kilometer über die ganze Lebensdauer des Autos bei batterie-elektrischen Personenwagen tiefer als bei einem vergleichbaren Verbrenner (EnergieSchweiz, 2023).

Noch vor wenigen Jahren war das Bild, welche alternativen Antriebe sich durchsetzen werden, noch nicht vollständig geschärft: Studien postulierten den batterieelektrischen Antrieb als klar kostengünstigste Variante für die allermeisten Anwendungen bei Personenwagen und bei weiteren, eher leichten Fahrzeugkategorien mit kürzeren Distanzen (Boulouchos et al., 2021, Kober et al., 2019). Darüber hinaus wurden jedoch insbesondere bei schwereren Fahrzeugen ein stärkerer Mix verschiedener Antriebstechnologien erwartet: Gemäss den Energieperspektiven 2050+ (BFE 2022) spielen bei diesen Segmenten neben BEV auch PHEV, FCEV und auch synthetische Treibstoffe (e-Fuels) eine Rolle.

Immer mehr zeichnet sich jedoch ab, dass der Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb auch in weiteren Fahrzeugkategorien nur in geringem Umfang und in sehr ausgewählten Segmenten Marktanteile gegenüber dem batterieelektrischen Antrieb gewinnen wird. Neuere Einschätzungen gehen von immer höheren Anteilen von BEV gegenüber FCEV auch bei schweren Nutzfahrzeugen und Bussen aus (Marti et al., 2022). Dafür sprechen auch aktuelle Entwicklungen in Politik und Markt: Während die EU bei der

Regulierung aufs Tempo drückt und strengere Vorschriften für schwere Fahrzeuge verabschiedet hat (Electrive, 2024a), richten sich in Reaktion darauf immer mehr Fahrzeughersteller in die Richtung von batterieelektrischen Modellen (Electrive, 2024b) – das Fenster für Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antriebe wird in vielen Marktsegmenten immer kleiner.

Der Anteil der Neuwagen mit alternativen Antrieben stieg 2023 in den Fahrzeugkategorien der Nutzfahrzeuge und Busse sowohl in der EU wie auch in der Schweiz deutlich an: Diese Fahrzeugkategorien erreicht 2023 in der Schweiz Marktanteile von 8-22 % (siehe Abbildung 1). Insbesondere bei den Nutzfahrzeugen sind das europaweite Spitzenplätze, direkt hinter Norwegen und Dänemark. Das Angebot von marktfähigen CO₂-armen Fahrzeugen steigt in diesen Fahrzeugkategorien aktuell rapide und es ist mit einer weiteren Zunahme der Marktanteile zu rechnen. EBP stellt mit dem Outlook 2024 erneut drei Szenarien zur künftigen Entwicklung der Elektromobilität in der Schweiz zur Verfügung – auch für leichte Nutzfahrzeuge (LNF), schwere Nutzfahrzeuge (SNF) und Busse (→ mehr dazu im Kapitel 4).

Demgegenüber zeigt sich bei den Personenwagen nach Jahren des steilen Wachstums eine leichte Stagnation der Entwicklung der alternativen Antriebe. Elektrofahrzeuge (Summe von BEV, PHEV und FCEV) waren bei den Personenwagen Ende 2023 zwar bereits für 6.5 % der gesamtschweizerischen Fahrleistung verantwortlich (Ende 2021 lag der Anteil der Elektrofahrzeuge an der Fahrleistung noch bei 3.1 %). Die Entwicklung bei den Neuzulassungen hat sich jedoch im Laufe des Jahres 2024 abgekühlt. Eine Begründung dafür findet man in den CO₂-Flottenzielen für Autohersteller. Europaweit und auch in der Schweiz wurden die Emissionsvorschriften für Neuwagen eingehalten. In der Schweiz wurde das Ziel im Jahr 2023 mit einem Marktanteil der Steckerfahrzeuge (BEV+PHEV) von knapp 30% (siehe Abbildung 1) erreicht. Im Jahr 2024 gilt nach wie vor der gleiche Zielwert. Von Seiten der Autohersteller und Importeure gibt es entsprechend im Jahr 2024 zumindest von Seiten der Emissionsvorschriften keinen dringenden Handlungsbedarf. Ab 2025 gelten dann EU-weit und auch in der Schweiz verschärfte CO₂-Flottenziele und es müssen wieder mehr Steckerfahrzeuge abgesetzt werden, möchte man die Emissionsvorschriften nicht verletzen.

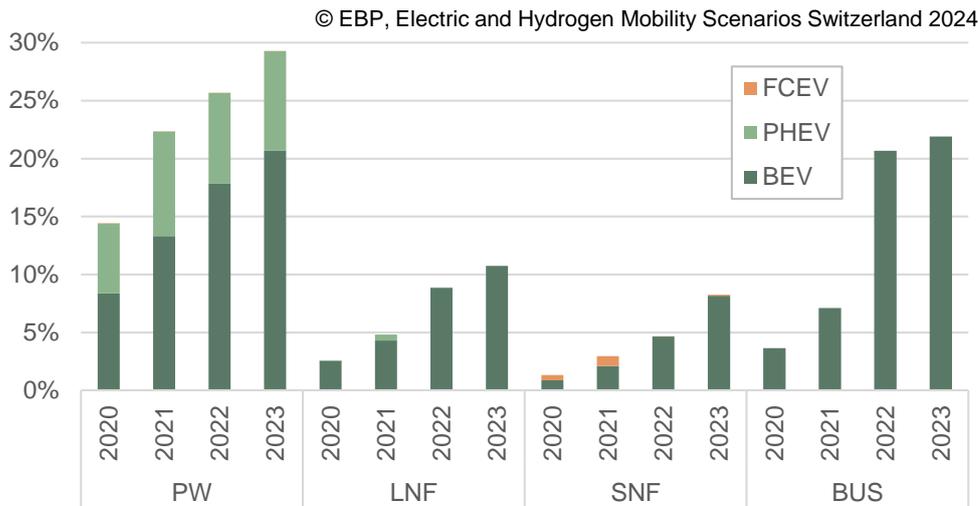


Abbildung 1 Marktanteil der alternativen Antriebe (BEV, PHEV und FCEV) je Fahrzeugkategorie in der Schweiz in den Jahren 2020 bis 2023. Datenquelle: Motorfahrzeug-informationssystem der Eidgenössischen Fahrzeugkontrolle (IVZ ASTRA).

Die Schweiz befindet sich bei der Elektromobilität bei den Personenwagen damit im vorderen europäischen Mittelfeld, deutlich hinter den Spitzenreitern Norwegen, Island, Schweden und Finnland. Gegenüber dem Vorjahr hat die Elektromobilität in ganz Europa deutlich Marktanteile gewonnen. Zu den Aufsteigern des Jahres gehören Luxemburg und Portugal – beide lagen 2022 bezüglich Marktanteile noch hinter der Schweiz (siehe Abbildung 2). In Norwegen sind mittlerweile neu von zehn neuzugelassenen Personenwagen elektrisch.

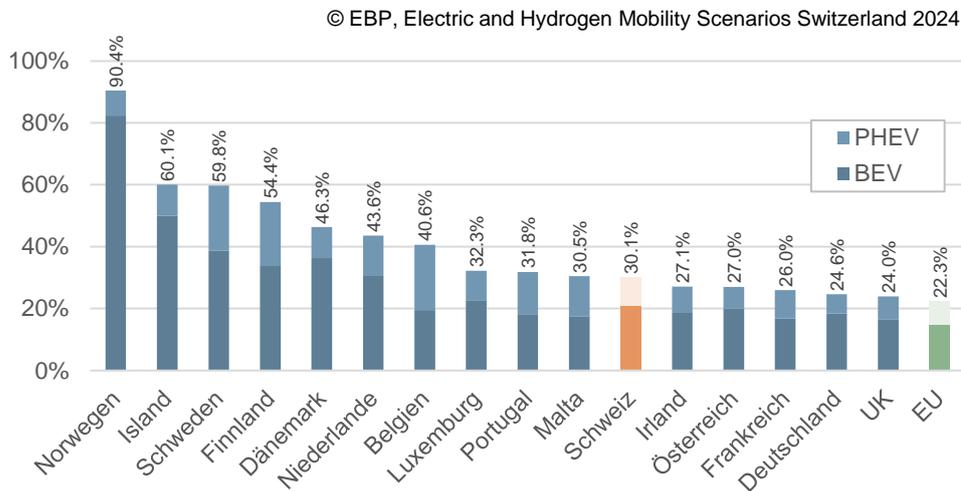


Abbildung 2 Marktanteil der Steckerfahrzeuge (BEV + PHEV) am Neuwagenmarkt der Personenwagen in ausgewählten europäischen Ländern im Jahr 2023. Datenquelle: ACEA, 2024.

2. Entwicklung Ladenetz Schweiz

In der Schweiz gibt es über 16'500 öffentlich zugängliche Ladepunkte (AC und DC), welche von knapp 30 CPO's (Charge Point Operators) bereitgestellt werden (UVEK, 2024). Davon sind über 2'300 DC-Ladepunkte, mit einer installierten Gesamtleistung von 266 MW (Stand Juni 2024). Dies entspricht einer Leistung von 118 kW pro km Nationalstrasse. EBP hat ermittelt, dass 93.7% dieser DC-Ladepunkte von den 10 grössten CPO's in der Schweiz abgedeckt werden.

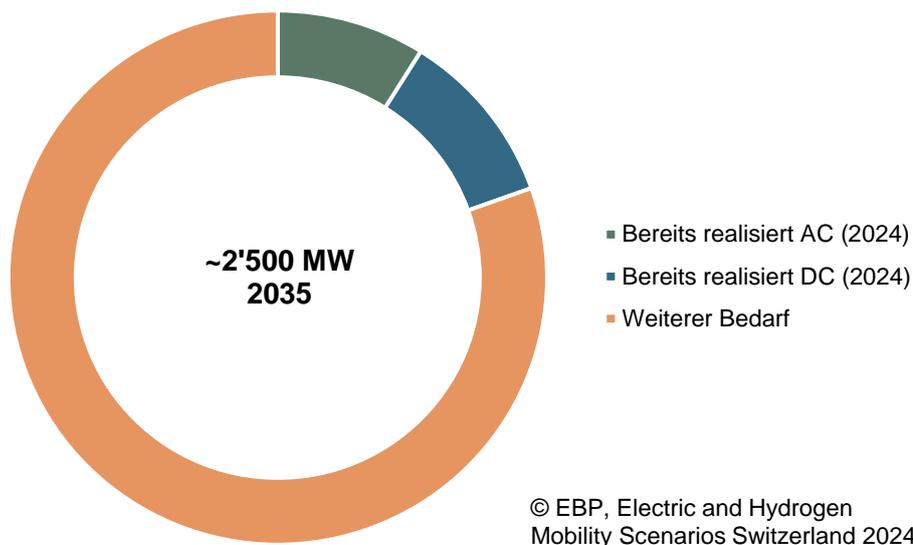


Abbildung 3: Benötigte Ladeleistung an allgemein zugänglichen Ladepunkten in der Schweiz im Jahr 2035

Das allgemein zugängliche Ladenetz in der Schweiz sollte bis 2035 2'300 bis 2'700 MW Ladeleistung anbieten (Abbildung 3). Das bedeutet einen grossen Handlungsbedarf in den nächsten 10 Jahren.

Entwicklung des Ladenetzes für schwere Nutzfahrzeuge

Mehr als die Hälfte der neuzugelassenen schweren Nutzfahrzeuge wird 2030 emissionsfrei sein. Dabei besteht ein breiter Konsens, dass der grösste Teil der LKW batterie-elektrisch unterwegs sein wird. E-LKWs werden entweder im Depot geladen (nicht-öffentlich zugänglich), in Logistikhubs (öffentlich zugänglich bei Umschlagpunkten) oder am Schnell-Ladehub (öffentlich zugänglich entlang des Nationalstrassennetz) geladen. Ein Grossteil der Tageseinsätze können ohne Nachladung geleistet werden und somit reicht das Laden im Depot. Im Jahr 2030 wird der Ladebedarf der E-LKWs ca. 490 GWh betragen, in 2040 wird sich diese Menge vervierfachen. In den Modellen von EBP wird der schweizweite Ladebedarf mit inländischen LKWs, ausländische Fahrzeuge mit Start- oder Ankunftspunkt in der Schweiz und Transitverkehr berechnet.

Bereits heute wird in den ersten Depots Ladeinfrastruktur für E-LKWs gebaut, denn die E-LKW werden primär im Depot während der Nacht laden, was für die meisten Tageseinsätze genügt. Es wird jedoch Schnell-Ladehubs

für E-LKWs brauchen, um dem Ladebedarf von inländischen und ausländischen nachzukommen, vor allem im Bereich von Nutzfahrzeugen über 32 Tonnen. Deswegen sind öffentlich zugängliche Ladeoptionen notwendig. Bei E-LKWs wird beim «Schnell-Ladehub Charging» zwischen zwei Ladeoptionen unterschieden: High Power Charging (HPC) mit bis zu 400 kW Ladeleistung und Megawatt Charging (MWC) mit bis zu 1'000 kW Ladeleistung.

Um die EU-Vorgaben gemäss AFIR zu erfüllen, werden in der Schweiz bis 2030 125 Ladepunkte von 1'000 kW benötigt sowie 55 Ladepunkte mit einer Ladeleistung von 350/400 kW. Diese Ladepunkte werden in 15 modular aufgebauten Schnell-Ladehubs angeboten, welche mit steigender Nachfrage ausgebaut werden können.

Da die Logistikbranche in der Schweiz sehr divers ist bezüglich der Einsatzbereiche und Grösse, ist eine rasche Skalierung der Ladeinfrastruktur mengen- und leistungsmässig nicht in allen Fällen möglich. Die Branche benötigt ein klares Signal, um Schnell-Ladeinfrastruktur zeitgerecht bereitzustellen, um breitflächig auf E-LKW umzusteigen. Die Defossilierung des schweren Strassengüterverkehrs ist ohne Schnell-Ladehubs erst zu einem späteren Zeitpunkt und mit Mehrkosten möglich, weswegen der Aufbau des Ladenetzes koordiniert, flächendeckend und bald erfolgen muss (EBP, 2023a).

Elektrobusse können entweder als Depotlader (Steckerlader) oder Gelegenheitslader (Opportunity Charger) betrieben werden. Beim Depotlader laden die Busse hauptsächlich nachts in der Garage. Die Ladezeiten sind lang, und die Ladeleistung ist moderat. Gelegenheitslader hingegen laden teilweise nachts, aber auch tagsüber an Haltestellen mit längeren Standzeiten, wie z. B. Endhaltestellen. Hier erfolgt das Laden während kurzer Zeiträume mit hoher Leistung. Es gibt auch Mischformen zwischen diesen beiden Konzepten.

Die verschiedenen Fahrzeugklassen weisen sehr unterschiedliche Ladebedürfnisse auf (Abbildung 4).



Abbildung 4: Ladebedürfnisse in den Fahrzeugklassen Personenwagen, schwere Nutzfahrzeuge, leichte Nutzfahrzeuge und Busse.

Bezüglich der Ladesysteme sind in Europa vor allem Plug-In-Systeme mit einem CCS (Combined Charging System) Typ 2 verbreitet. Diese ermöglichen Ladeleistungen von bis zu 44 kW mit Wechselstrom oder bis zu 350 kW mit Gleichstrom. Alternativ können Busse über Docking-Systeme mit einem Stromabnehmer (Pantograph) schnell geladen werden. Hier sind Leistungen von bis zu 600 kW oder mehr möglich.

Plug-and-Charge und AFIR

Bei Plug-and-Charge (ISO 15118) handelt es sich um eine Authentifizierungsmethode für Steckerfahrzeuge und Ladepunkte, mit welcher Fahrzeuge ohne Freischalten durch Ladekarte oder App ihr Fahrzeug laden können (ISO, 2022). Für Plug-and-Charge muss einerseits das Fahrzeug aber auch der Ladepunkt die Technologie unterstützen, ausserdem braucht es einen entsprechenden Ladestromvertrag von einem Plug-and-Charge-unterstützenden Anbieter, damit der Strom auch verrechnet werden kann. Um einen Ladevorgang zu initiieren, wird beim Einstecken des Ladekabels das Fahrzeug identifiziert und die Authentifizierungs- und Zahlungsdaten verschlüsselt übertragen. Danach beginnt der Ladevorgang. Die meisten Steckerfahrzeuge unterstützen Plug-and-Charge bereits und neue Ladesäulen sind oft schon mit Plug-and-Charge ausgerüstet.

Die Alternative Fuel Infrastructure Regulation (AFIR) ist ein in 2023 verabschiedetes Gesetz in der EU, welches Ziele für die Ladeinfrastruktur in der EU setzt. Ab 2025 müssen entlang der Hauptverkehrskorridore der EU, des sogenannten "Trans-European Transport (TEN-T) Netzwerks", Schnellladestationen mit einer Leistung von mindestens 150 kW für Autos und Lieferwagen alle 60 km installiert werden. Für schwere Nutzfahrzeuge sind Ladestationen mit einer Mindestleistung von 350 kW entlang des TEN-T-Kernnetzes alle 60 km und entlang des umfassenderen TEN-T-Gesamtnetzes alle 100 km erforderlich, mit vollständiger Netzabdeckung bis 2030. Besitzerinnen und Besitzer von Steckerfahrzeugen müssen an Ladepunkten oder Tankstellen leicht mit Zahlungskarten oder kontaktlosen Geräten bezahlen können, ohne ein Abonnement zu benötigen und bei voller Preistransparenz. Charge Point Operators (CPOs) müssen die Verbraucherinnen und Verbraucher über elektronische Mittel vollständige Informationen zur Verfügbarkeit, Wartezeit oder Preis an verschiedenen Stationen bereitstellen (European Council, 2023a).

Bidirektionales Laden

Bidirektionales Laden ermöglicht die Nutzung von Elektrofahrzeugbatterien nicht nur zum Fahren, sondern auch als Stromspeicher für das Haus (Vehicle to Home, V2H) oder das Stromnetz (Vehicle to Grid, V2G). Während V2H bereits auf Gebäudeebene praktikabel ist, steckt V2G in der Schweiz noch in den Kinderschuhen. Auf Netzebene ist die bidirektionale Ladeinfrastruktur bisher hauptsächlich in theoretischen Modellen und Pilotprojekten vorhanden. Es bestehen noch Unsicherheiten auf verschiedenen Ebenen. Obwohl das Potenzial der kurzfristigen Flexibilität für das Stromnetz erheblich ist, sind andere Massnahmen wie kontrolliertes Laden derzeit effektiver. Der zusätzliche Einfluss von V2G bleibt jedoch vergleichsweise begrenzt.

EBP-Projekte aus der Praxis:

- Schnell-Ladehubs für E-LKWs in der Schweiz. [Link](#).
- Ladeinfrastruktur für Elektrobusse. [Link](#).
- Studie zur gemeinsamen Nutzung von Ladeinfrastruktur für Elektrobusse. [Link](#).

3. Grössere Batterien und höhere Ladeleistung

Die rasante Entwicklung beim Herzstück des Steckerfahrzeugs – der Batterie – hat weiter zugenommen und starke Verbesserungen gebracht. Batterien für batterieelektrische Fahrzeuge werden immer günstiger, während die Energiedichte und Lebensdauer stetig steigen. Dies ist eine erfreuliche Entwicklung, da so günstigere, leichtere und kleinere Batterien mit mehr Reichweite für Fahrzeuge gebaut werden können (Abbildung 5). Weltweit hat sich das Volumen der produzierten Batterien für Elektromobilität in den letzten drei Jahren vervierfacht, wobei Batterien für Personenkraftwagen über 90 % dieses Wachstums ausmachen (IEA, 2024a). Die Elektromobilität schreitet auch in anderen Bereichen voran, insbesondere bei Zwei- und Dreirädern sowie Stadtbussen, vor allem in Schwellen- und Entwicklungsländern (IEA, 2024b).

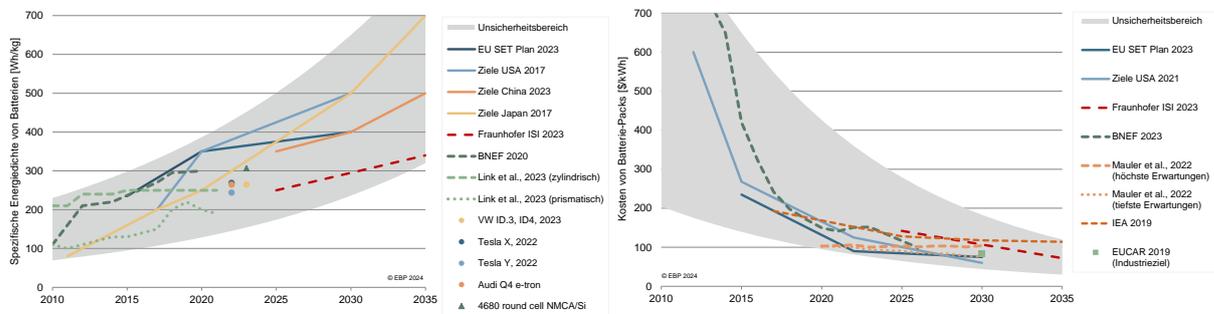


Abbildung 5 Entwicklung der gewichtsbezogenen Energiedichte (links) und der spezifischen Kosten (rechts) der Batterien bis 2035 (eigene Darstellung EBP).

Die globalen Investitionen in die Batterieentwicklung haben sich seit 2018 verachtfacht, was einiges zu der rasanten Entwicklung beigetragen hat.

Lithium-Ionen-Batterien sind die am häufigsten verwendete Technologie, aufgrund ihrer verhältnismässig hohen Energiedichte und tiefen Kosten. Die Batterien bestehen unter anderem aus einer Lithium-Metalloxid-Kathode und umfassen verschiedene Arten von Zellchemien. Davon sind NMC (Nickel-Mangan-Cobalt) und LFP (Lithium-Eisenphosphat) die am häufigsten verwendeten. Jedoch wird in der Batterieforschung vermehrt versucht Nickel und Cobalt zu vermeiden, aufgrund von schwankenden Materialpreisen, Lieferkettenproblemen und ethischen Bedenken beim Abbau. Lithium-Ionen-Batterien haben in den letzten zehn Jahren eine beispiellose technologische Entwicklung zurückgelegt, wobei sich ihre Energiedichte und Lebensdauer stark erhöht, und die Kosten reduziert haben (IEA, 2024a).

Die jüngsten Trends zeigen, dass die Batterieindustrie, angetrieben von der chinesischen Nachfrage, vermehrt in Lithium-Eisen-Phosphat-Batterien (LFP) investiert. Die Vorteile gegenüber NMC-Batterien liegen in erster Linie in den tieferen Kosten, der geringeren Abhängigkeit von seltenen Rohstoffen (Nickel, Mangan, Kobalt) und der längeren Lebensdauer (IEA, 2024a). So zeigen LFP-Zellen im Durchschnitt 32 % tiefere Kosten im Vergleich zu NMC (BNEF, 2023). Trotz der 20-30% geringeren Energiedichte hat der Einsatz von LFP-Batterien für Elektrofahrzeuge in den letzten Jahren stark zugenommen, insbesondere in China seit 2021. Zunehmend setzen auch

europäische und US-amerikanische Autohersteller vermehrt auf LFP anstatt NMC. Die Beliebtheit von LFP beruht hauptsächlich auf ihrem niedrigeren Preis, der längeren Lebensdauer, stetige Verbesserungen der Energiedichte wie der Cell-to-Packs-Konfiguration und der verbesserten thermischen Stabilität. Aufgrund ihrer Kosteneffizienz und Haltbarkeit ist LFP zudem die bevorzugte Batterietechnologie für Busse und Nutzfahrzeuge.

Die Batteriewahl variiert je nach Klima: LFP ist in heißen, NMC in kalten Regionen besser geeignet. NMC dominierte 2023 noch mit über 50 % Marktanteil bei PKWs, gefolgt von LFP (ca. 40 %) (IEA, 2024a). Rund 95 % der LFP-Batterien für Elektro-PKWs wurden in China verwendet, aber auch nicht-chinesische Hersteller investieren zunehmend in LFP-Technologien. Wir vermuten, dass der Anteil an LFP-Batterien über die nächsten Jahre weiter steigen wird und sie auch in Europa vermehrt zum Einsatz kommen werden.

Die Preise für Lithium-Ionen-Batterien für elektrische Fahrzeuge sind von 2010 bis 2023 um 90% gesunken, einerseits durch Forschung und Entwicklung neuer Technologien, aber auch durch Skalierungseffekte. Heute werden die Batteriepreise hauptsächlich durch die Preise der Mineralien bestimmt, welche in den letzten Jahren äusserst volatil waren. Die Preisvolatilität seltener Mineralien (z.B. Lithium) führte 2021 und 2022 zu erhöhten Preisen, bevor sie 2023 wieder stark gesunken sind. In Bezug auf den Preis der Batterien haben LFP-Batterien einen niedrigeren Preis als NMC-Batterien, da sie eine geringere Abhängigkeit von seltenen Rohstoffen aufweisen.

Die Abhängigkeit von seltenen Rohstoffen begründet die Forschung und Entwicklung alternativer Batterie-Technologien, wie Natrium-Ionen- oder Festkörperbatterien. Natrium-Ionen-Batterien sind kostengünstiger herzustellen, da sie weniger seltene Rohstoffe benötigen, aber ihre geringere Energiedichte beschränkt ihren Einsatz derzeit hauptsächlich auf städtische Autos, Zwei-/Dreiräder und stationäre Energiespeicher. Festkörperbatterien bieten eine höhere Energiedichte und potenzielle Sicherheitsverbesserungen gegenüber traditionellen Lithium-Ionen-Batterien. Bisher ist es jedoch schwierig, diese Vorteile im grossen Maßstab zu demonstrieren und Herstellungsprobleme zu überwinden. In den nächsten Jahren werden Festkörperbatterien wahrscheinlich nur eine kleine Rolle im Markt spielen, aber ihre Bedeutung könnte in den 2030er Jahren erheblich steigen, wenn diese Herausforderungen gemeistert werden.

Durch grössere Batterien und Verbesserungen in der Batterietechnologie und im Fahrzeugdesign stieg die durchschnittliche Reichweite von batterieelektrischen Autos um fast 75 % zwischen 2015 und 2023. Seit 2020 hat sich das Wachstum der durchschnittlichen Reichweite verlangsamt, möglicherweise aufgrund schwankender Batteriepreise, verstärktem Wettbewerb und technischen Beschränkungen. Aufgrund der stetigen Weiterentwicklung und zusätzlichen Skaleneffekten ist es wahrscheinlich, dass die Reichweite auch in Zukunft weiter steigen wird. Die meisten heute neu in Verkehr gesetzten, rein elektrischen Personenwagen haben eine reale Reichweite von mehr als 400 Kilometern. Technisch möglich sind

allerdings wesentlich höhere Reichweiten. So hat CATL, ein chinesischer Batteriehersteller, im April 2024 eine LFP-Batterie mit einer Reichweite von über 1'000 km vorgestellt (CATL, 2024). Immer mehr Hersteller wechseln bei ihrer Batterie von einer 400-Volt-Architektur auf eine mit 800-Volt-Architektur, was deutlich schnellere Ladegeschwindigkeiten zulässt. Durch die höhere Spannung ist die Stromstärke niedriger, was dünnere Kabel und kleinere Komponenten erlaubt und somit Fahrzeuge effizienter macht. Die aktuelle Entwicklung zeigt, dass batterieelektrische Personenwagen durch die technologischen Verbesserungen sich bezüglich der Reichweite in näherer Zukunft kaum noch von den heutigen Verbrennerfahrzeugen mehr unterscheiden werden und dass die Ladedauer sich weiter reduzieren wird.

In den letzten Jahren gab es auch spannende Entwicklungen bei Nutzfahrzeugen, Bussen und Fahrzeugen mit speziellem Nutzen. Im schweren Nutzverkehr hat sich das Megawatt Charging etabliert. 2024 fand die erste öffentliche Ladedemonstration mit einem E-LKW mit mehr als 700kW und 1'000 A durchgeführt, womit Batterien von 10% auf 80% in einer halben Stunde geladen werden können (ABB, 2024). Mit dem Megawatt Charging System sind Ladeleistungen von bis zu 3,5 MW möglich. Die Reifung der Technologie spiegelt sich auch in der Anzahl der Neuzulassungen wider (siehe Kapitel 1).

EBP-Projekte aus der Praxis:

- Risikoanalyse E-Mobilität bei Rettungsfahrzeugen. [Link](#).

4. Szenarien zur Entwicklung der Marktanteile bis 2050

Die Entwicklung der Marktanteile je Antriebstechnologie bis zum Jahr 2050 wird für Personenkraftwagen, leichte Nutzfahrzeuge, schwere Nutzfahrzeuge und Busse, jeweils differenziert nach vier Grössenklassen. Diese Analysen basieren auf drei Szenarien und sind für alle Fahrzeugkategorien sowohl für die Schweiz als auch räumlich fein aufgelöst für alle Kantone und Gemeinden der Schweiz oder hektarscharf verfügbar.

Die zukünftigen Marktanteile der batterieelektrischen Fahrzeuge hängen stark von den CO₂-Emissionsvorschriften für neu in Verkehr gesetzte Fahrzeuge ab. Dabei orientiert sich die Schweiz an den Vorgaben der EU und überführt die entsprechenden Verschärfungen ins CO₂-Gesetz. Der Bundesrat hat im Juni 2023 einen Bericht zu drei Postulaten über die Elektromobilität verabschiedet (BR, 2023). Der Bericht des Bundesrats empfiehlt die Umstellung auf einen fossilfreien Verkehr bis 2050 grundsätzlich im Gleichschritt und analog zu den Massnahmen der EU umzusetzen.

	2021–2024	Ab 2025	Ab 2030	Ab 2035	Ab 2040
Personenkraftwagen	118 g CO ₂ /km (WLTP-Messung)	–15 % ggü. Durchschnitt Jahr 2021	EU- –55 % ggü. im Durchschnitt Jahr 2021	EU- –100 % ggü. im Durchschnitt Jahr 2021	EU-
Leichte Nutzfahrzeuge	186 g CO ₂ /km (WLTP-Messung)	–15 % ggü. Durchschnitt Jahr 2021	EU- –55 % ggü. im Durchschnitt Jahr 2021	EU- –100 % ggü. im Durchschnitt Jahr 2021	EU-
Schwere Nutzfahrzeuge	Kein Zielwert	–15 % ggü. Durchschnitt Jahr 2019/20	EU- –45 % ggü. im Durchschnitt Jahr 2019/20	EU- –65 % ggü. im Durchschnitt Jahr 2019/20	EU- –90 % ggü. im Durchschnitt Jahr 2019/20

Tabelle 1 Aktuelle geltende Emissionsvorschriften für neu in Verkehr gesetzte Fahrzeuge.

Die EU-Staaten und das EU-Parlament haben sich im Oktober 2022 auf neue Grenzwerte geeinigt und im März 2023 dafür grünes Licht gegeben. Die Autohersteller in Europa müssen ihre durchschnittlichen Flottenemissionen bis 2030 um 55 % und bis 2035 um 100 % senken. Ab 2035 dürfen in der EU nur noch Autos und leichte Nutzfahrzeuge zugelassen werden, die im Betrieb kein CO₂ ausstossen. Das revidierte CO₂-Gesetz der Schweiz, welches per 1.1.2025 in Kraft tritt, übernimmt diese Zielvorgaben auch für schweizerische Importeure.

Auf Ebene der EU wurde eine Technologieklausel eingeführt: 2026 müssen die technischen Fortschritte überprüft und erneut bewertet werden, ob diese Grenzwerte erreichbar sind. Aufgrund von Diskussionen im Parlament wurde entschieden, dass Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, die ausschliesslich CO₂-neutrale Kraftstoffe tanken (E-Fuels), ebenfalls nach 2035 noch zugelassen wären.

Im Mai 2024 hat der Europäische Rat nun konkretisiert, dass Hersteller von schweren Nutzfahrzeugen mit einem Gewicht ab 7.5 Tonnen und Reisebusse ihre durchschnittlichen Emissionen senken müssen. Ab 2030 müssen sie ihre durchschnittlichen Emissionen um 45 % senken, ab 2035 um 65 % und ab 2040 um 90% (CO₂-Emissionen von 2019 gelten als Referenz).

Für Berufsfahrzeuge, wie Müll- und Baufahrzeuge, müssen die neuen Vorschriften ab 2035 ebenfalls eingehalten werden. Ausserdem müssen bis 2030 90 % der neuen Stadtbusse emissionsfrei sein, dieses Ziel wird auf 100 % erhöht bis 2035. Wie bei den Personenwagen, können in der aktuellen Verordnung E-Fuels als emissionsfreier Antrieb berücksichtigt werden.

Die Wirksamkeit und die Auswirkungen dieser Regulierung werden von der zuständigen Kommission im Jahr 2027 überprüft. In einem weiteren Schritt wird die Kommission die Möglichkeit für die Entwicklung einer einheitlichen Methodik zur Bilanzierung und Berichterstattung über die CO₂-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus von neuen schweren Nutzfahrzeugen prüfen (European Council, 2024a).

Mit der zunehmenden Anzahl von batterie- und anderen alternativ angetriebenen Fahrzeugen sinken die Einnahmen aus der Mineralölsteuer. Der Bundesrat berichtet, dass diese Einnahmen langfristig nicht ausreichen, um den Finanzbedarf zu decken. Daher plant der Bundesrat eine Ersatzabgabe (die voraussichtlich bis 2030 in Kraft treten wird) für alternativ angetriebene Fahrzeuge und hat dafür 2022 die Eckpunkte festgelegt (Bundesrat, 2022).

Der Bundesrat hat 2023 auch beschlossen, dass der Import von Elektroautos ab 2024 nicht mehr steuerbefreit ist und nun auch eine Automobilsteuer fällig ist. Die seit 1997 gültige Steuerbefreiung wurde aufgehoben, da die Anzahl importierter Elektroautos stark zugenommen hat und somit die Steuerausfälle jährlich steigen. Der Bund wollte ursprünglich marktwirtschaftliche Anreize zur Förderung der Elektromobilität schaffen. Diese sind nun nicht mehr notwendig, da die Anzahl neuzugelassenen batteriebetriebenen Fahrzeuge stetig zunimmt (Bundesrat, 2023).

Die Zukunft des Strassenverkehrs ist batterieelektrisch

Die Investitionen in das öffentlich zugängliche Ladenetz, die strengeren Emissionsgrenzwerten und die Fortschritte in den Batterien sind nur einige der Gründe, wieso die zukünftige Mobilität batterie-elektrisch angetrieben sein wird. In den letzten zwei Jahren hat sich der batterie-elektrische Antrieb nicht nur bei den Personenwagen als Alternativantrieb durchgesetzt, sondern auch bei den leichten und schweren Nutzfahrzeugen, sowie bei Bussen (siehe Kapitel 1). Durch die Elektrifizierung wird zwar der Gesamtenergiebedarf deutlich abnehmen, aber der Strombedarf nimmt zu (siehe Kapitel 5). Für Besitzerinnen und Besitzer eines batterie-elektrischen Fahrzeugs lohnt sich die Anschaffung auch finanziell: Trotz höheren durchschnittlichen Anschaffungskosten sind die Gesamtkosten über die Besitzdauer tiefer (siehe Kapitel 9).

Die Rolle von Wasserstoff im Strassenverkehr

Noch vor ein paar Jahren wurde Wasserstoff im Strassenverkehr als potenziell attraktive Möglichkeit zur Dekarbonisierung vermutet. Heute zeigt sich allerdings eindeutig ein anderes Bild. Die Fortschritte in Batterietechnologien und die dadurch gestiegene Nachfrage sowie Skalierung der Produktionskapazitäten haben zu erheblichen Kostenreduktionen geführt. Im Falle der Wasserstoffmobilität war allerdings keine derartige Entwicklung zu beobachten, was sich auch in den Neuzulassungen der Fahrzeuge mit den jeweiligen Antrieben zeigt. Im Jahr 2023 wurden in der Schweiz lediglich 27 Wasserstofffahrzeuge (FCEV) neu zugelassen, und es handelt sich dabei ausschliesslich um Personenwagen (BFE, 2024b). Im Gegensatz dazu wurden im gleichen Jahr über 52'000 Personenwagen und mehr als 4'000 leichte Nutzfahrzeuge mit batterieelektrischem Antrieb neu zugelassen.

Auch in Anwendungsbereichen, wo sehr hohe Tagesfahrleistungen am Stück absolviert werden sollen (Fernbusse, Langstrecken-Güterverkehr) konnten batterieelektrische Modelle zeigen, dass sie eine marktreife Option zur Dekarbonisierung darstellen. Generell zeigt sich darüber hinaus, dass über praktisch alle Fahrzeugsegmente hinweg batterieelektrische Fahrzeuge günstigere Gesamtkosten (Total Cost of Ownership, TCO) aufweisen, als wasserstoffbasierte Brennstoffzellenfahrzeuge. Dies ist in erster Linie auf die wesentlich höheren Energiekosten des Wasserstoffs zurückzuführen, da hier unter anderem hohe Energieverluste anfallen, im Vergleich zur direkten Verwendung von Strom.

Im Verkehrssektor sind dennoch Potenziale für Wasserstoff und dessen Derivate vorhanden. Vor allem in Bereichen, wo auch die gravimetrische Energiedichte eine grössere Rolle spielt, stellt Wasserstoff als Energieträger oft die derzeit einzige praktikable Option zur Dekarbonisierung dar. Die wichtigsten Beispiele sind hier sicherlich der Luftverkehr, der über strombasierte, synthetische Flugtreibstoffe (Sustainable Aviation Fuels, SAF) dekarbonisiert werden könnte sowie die Schifffahrt, in der auch andere Wasserstoffderivate eine Rolle spielen könnten (z.B., Methanol und Ammoniak).

Für die Anwendung von Wasserstoff im Strassenverkehr schliesst sich das «Window of Opportunity» mehr und mehr, angesichts der anhaltenden Fortschritte im Bereich der Batteriefahrzeuge. Grundsätzlich bestehen nur noch Marktpotenziale für Wasserstoff im Strassenverkehr, sofern Wasserstoff möglichst bald und in grossen Mengen als günstiger globaler Rohstoff zur Verfügung steht. Dies würde die Möglichkeit eröffnen, dass Wasserstoff für gewisse, schwierig zu elektrifizierende Marktnischen attraktiv wird.

Die drei bottom-up gerechneten Szenarien lassen sich wie folgt charakterisieren (Abbildung 6):

- **BAU (Business As Usual).** Das Szenario BAU orientiert sich an den beschlossenen CO₂-Emissionsvorschriften für neu in Verkehr gesetzte Fahrzeuge (revidiertes CO₂-Gesetz für die Periode 2025 bis 2030) sowie an den technologischen Entwicklungen der verschiedenen Antriebstechnologien. Die Reduktionsziele werden in allen Fahrzeugkategorien hauptsächlich mit batterie-elektrischen Fahrzeugen erreicht. Nach 2030 werden die CO₂-Emissionsvorschriften nicht weiter verschärft. Das Szenario ist nicht kompatibel mit dem Netto-Null-Ziel 2050. Die Bedeutung der konventionellen Verbrennungsmotoren nimmt langfristig ab, allerdings bleiben die «schwer zu elektrifizierenden» Segmente primär Plug-in-Hybride und Dieselfahrzeuge.
- **ZERO-E.** Das Szenario ZERO-E orientiert sich neben dem revidierten CO₂-Gesetz (2025-2030) am aktuellen EU-Beschluss zur weiteren Verschärfung der Emissionsvorschriften (gemäss Tabelle 1). Im Szenario ZERO-E übernimmt die Schweiz diese EU-Vorgaben zeitgleich und ohne individuelle Anpassung. Es bildet ein faktisches Verbrennerverbot für Personenwagen und leichte Nutzfahrzeuge im Jahr 2035 ab. Das Szenario ist kompatibel mit dem Netto-Null-Ziel 2050. Der batterie-elektrische Antrieb ist die Schlüsseltechnologie zur Dekarbonisierung des Strassenverkehrs und dominiert den Markt in allen Fahrzeugkategorien und Grössenklassen deutlich. Plug-in-Hybride spielen bei den Personenwagen nur kurzfristig eine relevante Rolle und verschwinden nach 2030 wieder vom Markt. Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeuge werden nur in Nischenanwendungen eingesetzt.
- **ZERO-H2.** Das Szenario ZERO-H2 orientiert sich an den gleichen regulatorischen Vorgaben wie das Szenario ZERO-E. Der batterie-elektrische Antrieb dominiert kurz- und mittelfristig den Markt in allen Fahrzeugkategorien und Grössenklassen deutlich. Nach 2030 wird Wasserstoff zu einer kostengünstigen «Global Commodity». Fahrzeugsegmente mit Dieselantrieb (insbesondere Langstrecken-Güterverkehr und Reisebusse), die bis dann noch nicht durch den batterie-elektrischen Antrieb dominiert werden, werden zunehmend durch Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeuge substituiert. Durch diese Entwicklung gewinnt diese Antriebsform auch in weiteren Marktsegmenten höhere Marktanteile, als im Szenario ZERO-E.

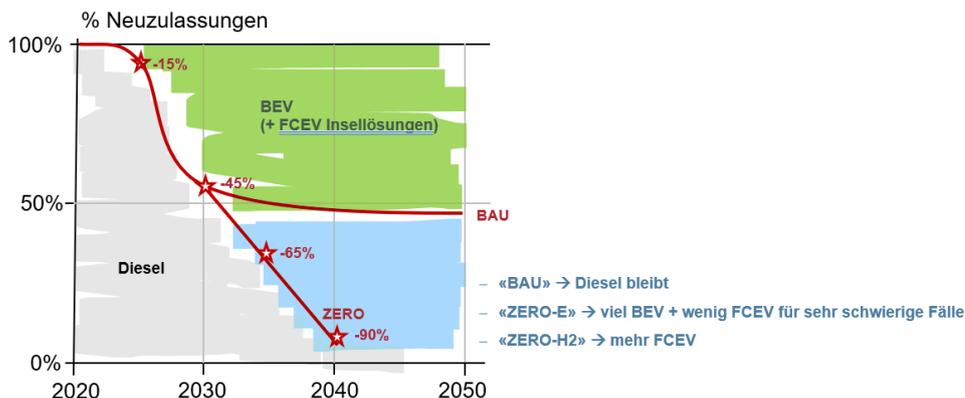


Abbildung 6 Grundprinzip der drei EBP-Szenarien für schwere Nutzfahrzeuge.

© EBP, Electric and Hydrogen Mobility Scenarios Switzerland 2050. Outlook 2024

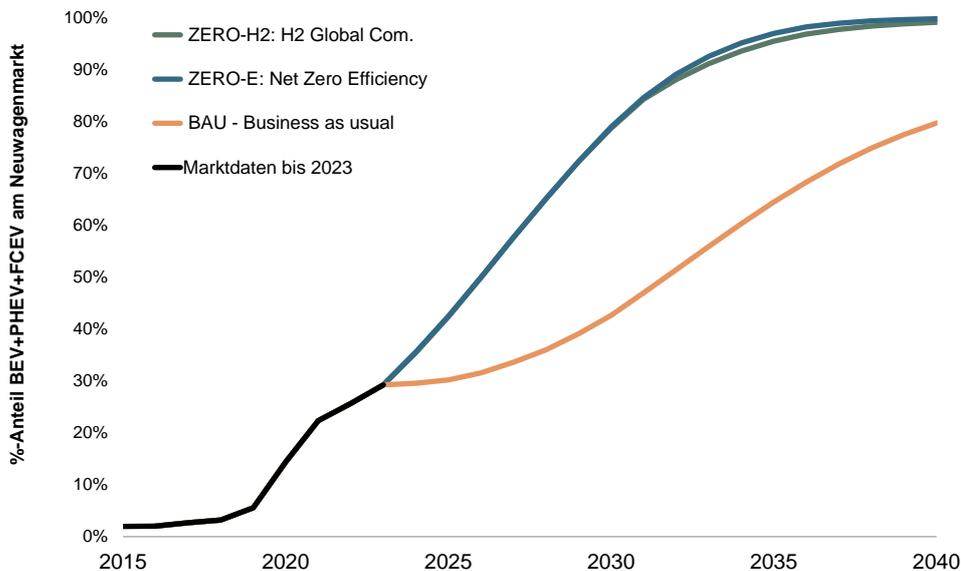


Abbildung 7 Drei Szenarien zur künftigen Entwicklung der Marktanteile von 2024 bis 2050 bei Personewagen in der Schweiz für BEV, PHEV, FCEV.

Der vorliegende Outlook 2024 berücksichtigt das 2020er-Referenzszenario zur Bevölkerungsentwicklung der Schweiz und der Kantone 2020–2050 (BFS 2020a). Im Unterschied zu den Energieperspektiven 2050+ des Bundes, die noch auf den alten Verkehrsperspektiven 2040 basieren, berücksichtigen die Szenarien auch bereits das Basisszenario der aktuellen Verkehrsperspektiven 2050 (ARE 2022). Auch wird die neue ständige Wohnbevölkerung, der Motorfahrzeugbestand 2024 und die kommunale und kantonale Verteilung der Erstinverkehrsetzungen berücksichtigt. Bei den Daten zum Mobilitätsverhalten wird das Nationale Personenverkehrsmodell (NPVM) 2017 (ARE 2020) sowie der Mikrozensus Verkehr und Mobilität 2021 (BFS 2023) verwendet.

Das Modell berücksichtigt die verkehrliche Entwicklung des Strassenverkehrs in der Schweiz bis 2050 und leitet daraus die Entwicklung des Fahrzeugbestands über ein Kohortenmodell ab. Das Kohortenmodell bildet die Lebensdauer und Dynamik einzelner Jahrgänge des Bestands anhand empirischer Daten ab und modelliert damit die Umwälzung des Bestands in Abhängigkeit des Alters der Fahrzeuge. Durch eine Umlegung auf jeweils vier Grössenklassen wird damit in jeder Fahrzeugkategorie die jährliche Grösse des Neuwagenmarkts ermittelt. Über differenzierte Daten zu spezifischen Fahrleistungen pro Fahrzeug werden zudem aus dem Fahrzeugbestand die jährlichen Fahrleistungen der Flotte berechnet.

Abbildung 8 illustriert die Marktdiffusion der Zero-Emission-Vehicles (BEV, PHEV und FCEV) in den dynamischen Fahrzeugbestand, also die tatsächliche Fahrleistung, in der Schweiz für die Periode 2015 bis 2050 für das Szenario BAU und ZERO-E. Bis im Jahr 2030 steigt der Anteil der Zero-Emission-Vehicles (BEV+PHEV+FCEV) an der Fahrleistung über alle Fahrzeugkategorien gesehen je nach Szenario auf 20 bis 35 %. In den beiden Szenarien ZERO-E und ZERO-H2 erreicht der Anteil der Zero-Emission-Vehicles an der Fahrleistung 2050 beinahe 100 %, mit

unterschiedlicher Zusammensetzung. In ZERO-H2 spielen FCEV eine grössere Rolle: Insgesamt steigt der Anteil von FCEV an der Gesamtfahrleistung des Strassenverkehrs (Personenwagen, leichte Nutzfahrzeuge, schwere Nutzfahrzeuge und Busse) auf rund 6% bis 2050, gegenüber 2 % im Szenario ZERO-E und 0 % im Szenario BAU. Der Anteil der Plug-in-Hybride an der Gesamtfahrleistung im Strassenverkehr ist im Szenario BAU am grössten und erreicht im Jahr 2040 mit rund 10 % den Höchstwert. In den Szenarien ZERO-E (7 % im Jahr 2032) und ZERO-H2 (6 % im Jahr 2032) liegt der Anteil der Plug-in-Hybride an der Fahrleistung darunter und der Höhepunkt der Plug-in-Hybride wird früher erreicht.

© EBP, Electric and Hydrogen Mobility Scenarios Switzerland 2050. Outlook 2024

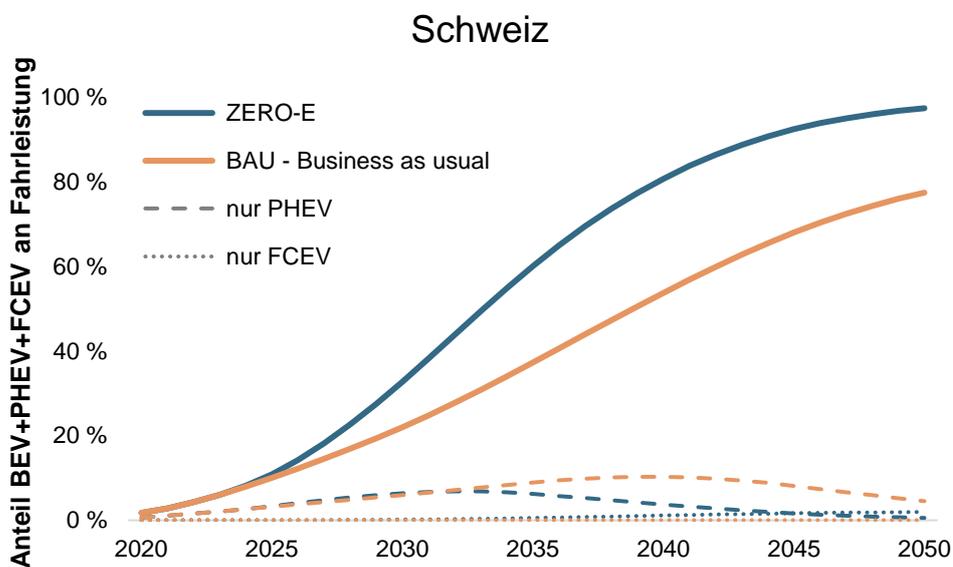


Abbildung 8 Anteil aller Elektrofahrzeuge (BEV, PHEV und FCEV aller Fahrzeugkategorien) sowie einzeln für PHEV und FCEV an der gesamtschweizerischen Fahrleistung.

5. Entwicklung des Energiebedarfs des Strassenverkehrs

Laut den Verkehrsperspektiven 2050 des UVEK nimmt die Verkehrsleistung aufgrund des Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstums zu (ARE, 2022). Die Bevölkerung wächst um 21 Prozent, das Bruttoinlandsprodukt (BIP) um 57 Prozent. Im Vergleich zur Bevölkerung steigt der Personenverkehr jedoch nur um 11 Prozent. Der Güterverkehr hingegen verzeichnet einen Anstieg von 31 Prozent. Besonders der Lieferwagenverkehr nimmt zu, während Arbeitswege weniger werden und Freizeitwege häufiger genutzt werden. Durch die Dekarbonisierung des Strassenverkehrs wird der Gesamtenergiebedarf trotz höherer Verkehrsleistung sinken (BAFU, 2023).

Entwicklung flüssige Treibstoffe

In allen Szenarien werden Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren durch Zero-Emission-Vehicles (BEV, PHEV und FCEV) ersetzt. Durch Effizienzsteigerungen (insbesondere Hybridisierung) sinkt zudem der Energiebedarf der neuzugelassenen Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Insgesamt nimmt deshalb die Energienachfrage nach flüssigen Treibstoffen in der Schweiz trotz leicht steigender Fahrzeugbestand und Fahrleistung deutlich ab. In den Szenarien wird die Entwicklung der Nachfrage nach flüssigen Treibstoffen separat für Benzin und Diesel modelliert.

Der Höhepunkt der schweizweiten Nachfrage nach flüssigen Treibstoffen wird gemäss den Szenarien von EBP voraussichtlich 2024 erreicht. Bis 2040 dürfte sich der Absatz im Strassenverkehr je nach Szenario um 50 % bis 75 % reduzieren (siehe Abbildung 12).

© EBP, Electric and Hydrogen Mobility Scenarios Switzerland 2050. Outlook 2024

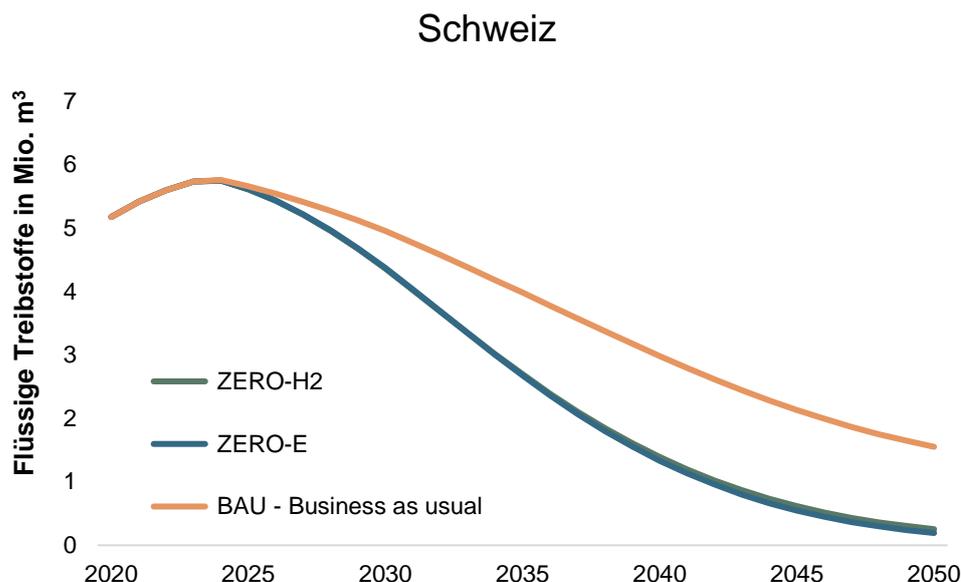


Abbildung 9 Bedarf an flüssigen Treibstoffen für Personenwagen, leichte und schwere Nutzfahrzeuge und Busse in der Schweiz bis 2050.

Entwicklung elektrischer Energiebedarf

Der elektrische Ladebedarf aller in der Schweiz verkehrenden Steckerfahrzeuge beläuft sich Ende 2023 schätzungsweise auf 900 GWh, über 85 % davon fällt auf die Fahrzeugkategorie der Personenwagen. Im Jahr 2025 dürfte der elektrische Ladebedarf der Elektromobilität bereits bei 1'800 GWh liegen, wobei über 80 % des Bedarfs von den Personenwagen kommt. Im Jahr 2035 steigt der elektrische Energiebedarf im Szenario ZERO-E bereits über 10'000 GWh. Im Jahr 2040 benötigen im Szenario ZERO-E allein die elektrisch angetriebenen Personenwagen rund 10'000 GWh Strom pro Jahr (Abbildung 10). EBP hat relevante Kenngrößen für Verteilnetzsimulationen und Stresstests berechnet, um den Einfluss der Elektromobilität auf die Verteilnetze zu quantifizieren (siehe Kapitel 8).

© EBP, Electric and Hydrogen Mobility Scenarios Switzerland 2050. Outlook 2024

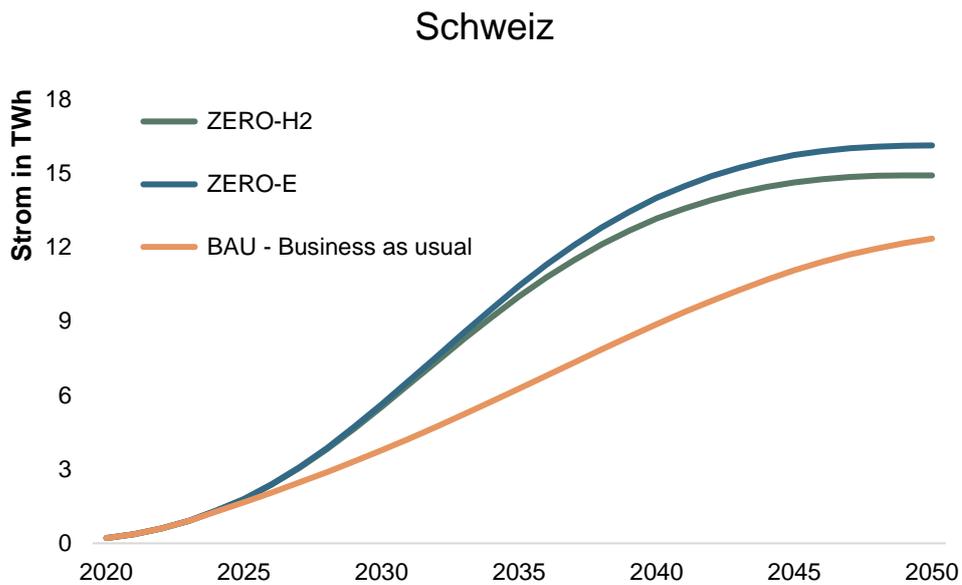


Abbildung 10 Entwicklung des elektrischen Ladebedarfs für Personenwagen, leichte und schwere Nutzfahrzeuge und Busse in der Schweiz bis 2050.

H2-Bedarf im Strassenverkehr

Im Jahr 2022 wurde der grösste Anteil des Wasserstoffs im globalen Strassenverkehr von Bussen verbraucht (IEA, 2023). In der Schweiz sieht das Bild ganz anders aus. Da hierzulande keine Wasserstoff-Brennstoffzellen-Busse unterwegs sind, entfällt aktuell 70 % des Bedarfs auf FCEV-Lastwagen und rund 30 % auf FCEV-Personenwagen. Die Gesamtnachfrage lag 2023 bei schätzungsweise 0.1 kt. Bis 2030 erhöht sich der Bedarf je nach Szenario auf 0.2 bis rund 6 kt. Der langfristige Bedarf an Wasserstoff im Strassenverkehr ist sehr ungewiss. Bei vollständiger Dekarbonisierung des Strassenverkehrs entsteht ein Bedarf von 25 bis 75 kt im Jahr 2050 (Abbildung 11). 50-70 % dieses Bedarfs stammt von schweren Nutzfahrzeugen.

© EBP, Electric and Hydrogen Mobility Scenarios Switzerland 2050. Outlook 2024

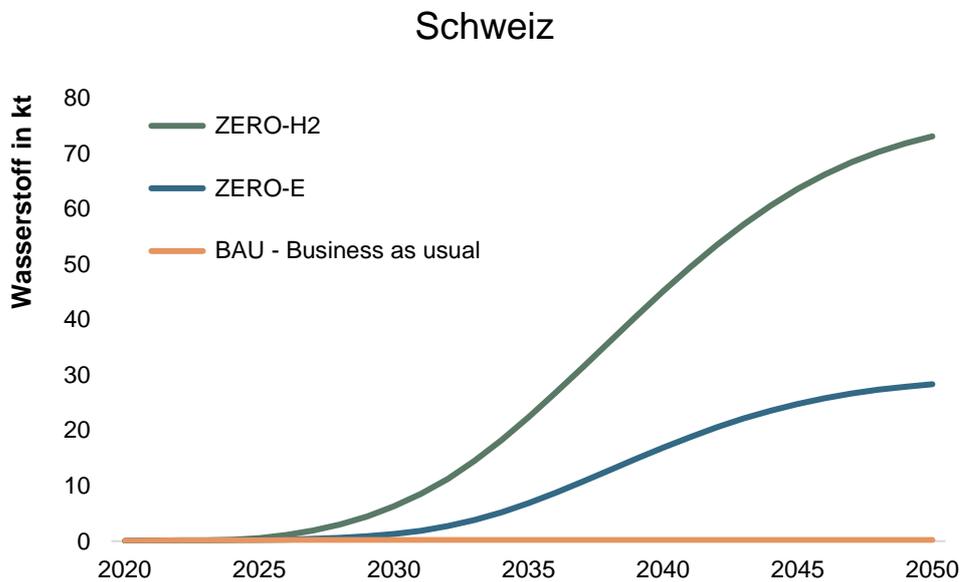


Abbildung 11 Entwicklung des Wasserstoffbedarfs für Personenwagen, leichte und schwere Nutzfahrzeuge und Busse in der Schweiz bis 2050.

6. Ladewelten

Bis anhin fehlte in der Schweiz ein breit getragenes Verständnis zur künftigen Entwicklung der Ladeinfrastruktur. Für diesen Zweck bildete EBP gemeinsam mit dem BFE und zahlreichen anderen Akteurinnen und Akteuren drei Ladewelten. Alle drei Ladewelten gehen von der gleichen Entwicklung des Fahrzeugbestands und deren Ladebedarfe aus. Sie unterscheiden sich lediglich in der Weise, wie dieser Ladebedarf gedeckt wird. Somit sind sie ein hilfreiches Instrument, um Aussagen über die Zukunft machen zu können, trotz der bestehenden Unsicherheit bei der Entwicklung der Ladeinfrastruktur. Im Rahmen der Studie «[Verständnis Ladeinfrastruktur 2050](#)» und der «[Ladebedarfsszenarien](#)» liegen die Ladewelten für die Kategorie Personenwagen auf Basis des Szenarios ZERO-E vor (BFE, 2024a).

Aus heutiger Sicht gibt es vor allem zwei Bereiche, in denen es sinnvoll ist, unterschiedliche Entwicklungspfade zu betrachten: Die Verfügbarkeit von privaten Heimpladepunkten und die Relevanz und Rolle des allgemein zugänglichen Ladenetzes und des Ladens am Arbeitsplatz. Diese beiden Bereiche sind besonders von den Entscheidungen diverser Akteurinnen und Akteuren abhängig und sind nicht durch scharfe Vorgaben reguliert. Zusammen mit diversen Fachexpertinnen und -experten haben das BFE und EBP mit diesen Überlegungen die drei breit abgestützten Ladewelten «Bequem», «Geplant» und «Flexibel» gebildet (siehe Abbildung 12).

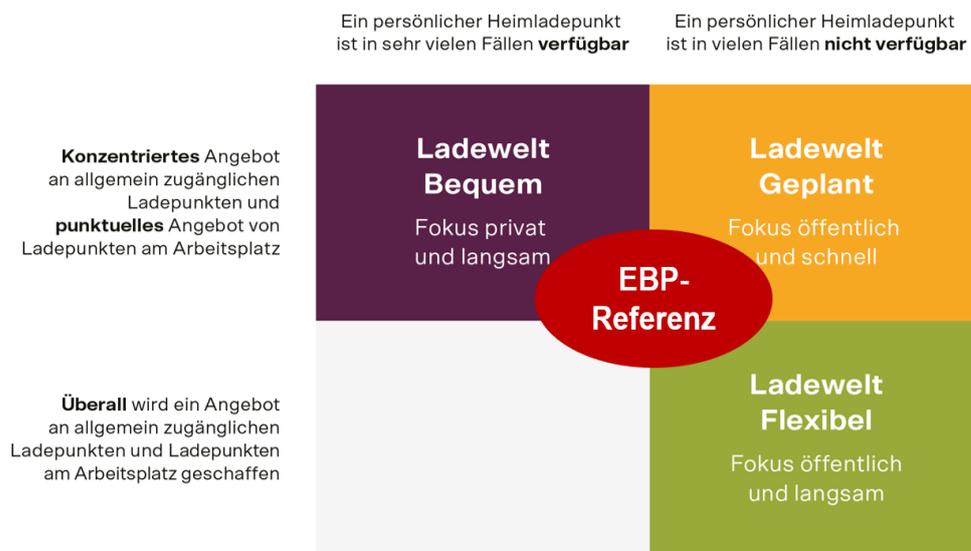


Abbildung 12: Ladewelten "Bequem", "Geplant", "Flexibel", sowie "EBP-Referenz"

In der Ladewelt «Bequem» hat ein sehr hoher Anteil von Halterinnen und Haltern eines Steckerfahrzeugs einen privaten Ladepunkt, wobei das allgemein zugängliche Ladenetz eine ergänzende Rolle spielt. Öffentliche, allgemein zugängliche Ladeinfrastruktur wird trotzdem stark ausgebaut, denn eine Minderheit verfügt über keine private Lademöglichkeit und ist abhängig von Ladelösungen im Quartier und Schnell-Ladestationen.

Die Ladewelt «Geplant» zeichnet das Bild einer Welt, in der deutlich weniger Ladepunkte zu Hause oder am Arbeitsplatz vorhanden sind. Darin stellt das allgemein zugängliche Ladenetz eine Schlüsselfigur dar und wird sehr stark ausgebaut. Dabei liegt der Fokus auf das Schnell-Laden, welches von vereinzelt Ladelösungen im Quartier ergänzt wird.

Auch die Ladewelt «Flexibel» geht von einer geringen Anzahl von Heimladestationen aus. Dafür wird die Ladeinfrastruktur vor allem am Arbeitsplatz, an Zielorten und im Quartier stark ausgebaut. Somit handelt es sich um im Vergleich zur Ladewelt «Geplant» um weniger konzentrierte Infrastruktur mit tiefen Ladeleistungen auf bestehenden Parkplätzen, was in länger andauernden Ladevorgängen resultiert.

EBP hat zusätzlich die Ladewelt «EBP-Referenz» entwickelt, welche aus heutiger Sicht die wahrscheinlichste Entwicklung abbildet. Die Ladewelt «EBP-Referenz» positioniert sich zwischen den Ladewelten «Bequem» und «Geplant». Verglichen mit «Bequem» können weniger Fahrzeughalterinnen und Fahrzeughalter privat laden. Das allgemein zugängliche Ladenetz wird, wie in der Ladewelt «Geplant» primär mit leistungsstarken DC-Ladepunkten ausgebaut.

Die Ladewelten zeigen, dass es in jedem Fall einen Mix an Ladeoptionen braucht, um das zukünftige Ladebedürfnis zu befriedigen. In allen Ladewelten braucht es ein allgemein zugängliches Ladenetz, das ausgebaut werden muss, zumindest als Ergänzung für Personen ohne Lademöglichkeit zu Hause oder am Arbeitsplatz.

7. Localizer – die besten Ladestandorte

Die Elektromobilität entwickelt sich nicht überall in der Schweiz gleich schnell. Die regionalen Unterschiede in Soziodemographie und Mobilitätsverhalten werden in der EBP-Modellierung durch die Abbildung aller Haushalte und Unternehmen der Schweiz abgebildet (siehe Anhang A3 EBP synPop). Dies umfasst eine quantitative Analyse der Gebäude- und Wohnstatistik, des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015 (BFS / ARE, 2017), des nationalen Personenverkehrsmodells (ARE 2020) sowie der BFS-Haushaltsbudgeterhebung berücksichtigt.

So fließen in die regionalisierten Szenarien von EBP folgende Faktoren ein: Mobilitätsverhalten, Kaufkraft und Ausbildungsstand, sowie Anzahl Fahrzeuge der Haushalte, Motorisierungsgrad, Alter der Fahrzeugflotte, Zusammensetzung der Haushalte und Gebäudetypen, kantonale Förderprogramme, existierende Ladeinfrastruktur und/ oder Pilotprojekte und Qualität des ÖV-Angebots.

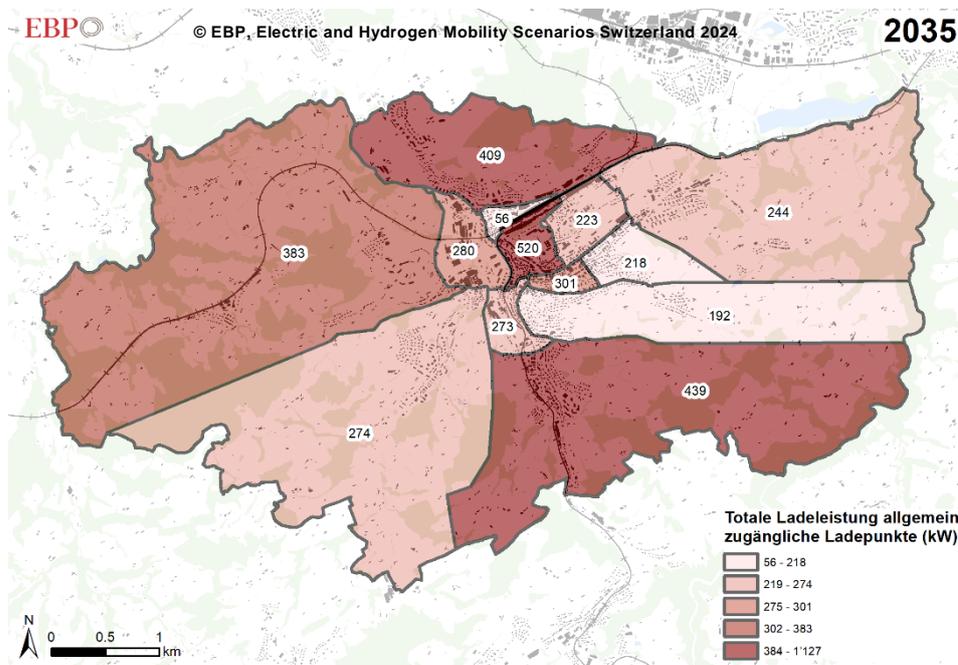


Abbildung 13: Summe der benötigten allgemein zugänglichen Ladeleistung im Jahr 2035 in einer Gemeinde je Zone.

Regional angepasste Szenarien der Elektromobilität liefern wichtige Planungsgrundlagen für Kantone, Gemeinden und Stadtwerke. Sie ermöglichen einen bedarfsgerechten Ausbau der Ladeinfrastruktur, die Vorbereitung der Verteilnetze auf die Elektromobilität sowie die gezieltere Implementierung energie- und klimapolitischen Instrumenten zur Förderung einer nachhaltigen Mobilität. Die beschriebene Modellierung ermöglicht regional feinaufgelöste und ortsspezifische Szenarien, beispielsweise auf Ebene Kanton, Gemeinde, auf Ebene der Verkehrszonen sowie auf Hektaren (100m x 100m) (Abbildung 13 und Abbildung 14).

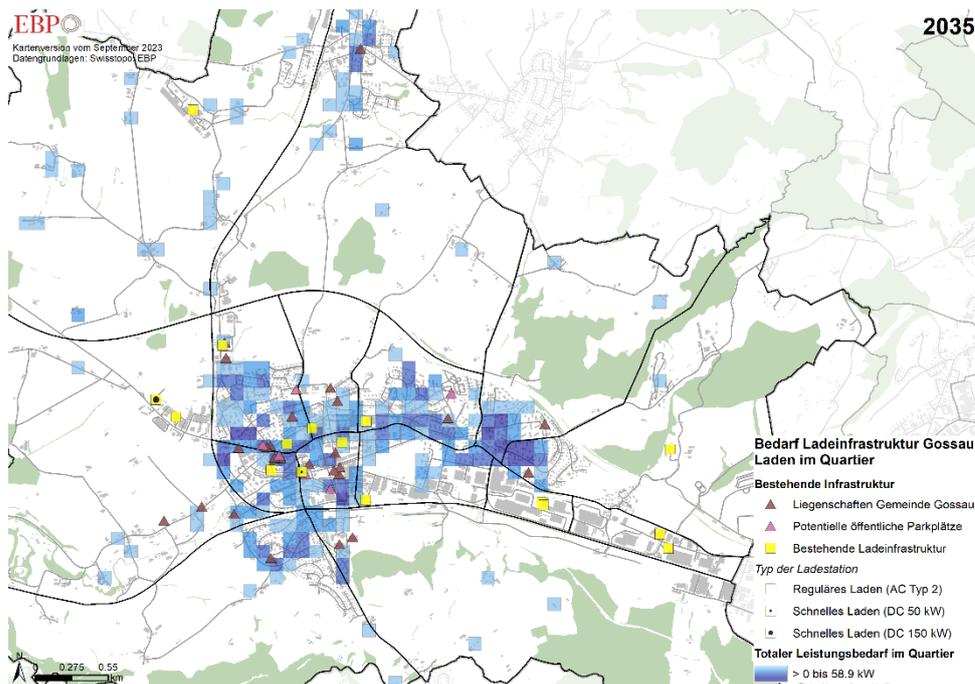


Abbildung 14: Benötigte Ladeleistung für das Laden im Quartier in einer Gemeinde im Jahr 2035, je Hektare (100m x 100m). Das Ladepotenzial wird mit den vorhandenen Parkflächen überlagert, damit ideale Standorte für den Ausbau der allgemein zugänglichen Infrastruktur gefunden werden können.

Eine robuste Grösse für die Planung

Die Ladewelten (siehe Kapitel 6) geben eine Bandbreite der möglichen Entwicklungen der Ladeinfrastruktur an, sowohl vom Typ der Ladeinfrastruktur wie auch von der Leistung. Diese Faktoren führen dazu, dass erhebliche Unterschiede in der Ladeinfrastruktur-Anzahl zwischen den Ladewelten entstehen. Es hat sich gezeigt, dass die installierte Leistung eine robustere Planungsgrösse für die Ladeinfrastruktur ist (vgl. Abbildung 14). Es wird dadurch mehr Flexibilität für die Umsetzung der Ladeinfrastruktur geschaffen, um im Einzelfall auf das Ladeverhalten und die Platzverhältnisse Rücksicht zu nehmen.

EBP-Projekte aus der Praxis:

- **Energie Wasser Bern (ewb)** setzt beim Rollout der Ladeinfrastruktur auf den «Localizer» von EBP und kann so das optimale Ladenetz realisieren. Dieser zeigt wirtschaftlich rentable Standorte an gut frequentierten Standorten und ermöglicht gleichzeitig ein engmaschiges Ladenetz mit guter Abdeckung (EBP, 2019a).
- **Gesamtkonzept erneuerbare Antriebe für die Stadt Luzern**
EBP begleitet die Stadt Luzern im Rahmen eines partizipativen Prozesses beim Erarbeiten einer Haltung zu den alternativen Antrieben. Das Konzept von EBP definiert das angestrebte Entwicklungsszenario, damit die Emissionsziele der Stadt im Transportsektor eingehalten werden können (EBP, 2024a).

- **Machbarkeitsstudie Ladeinfrastruktur Steffisburg**

Für die Berner Gemeinde Steffisburg modellierte EBP wir den zukünftigen Ladebedarf und identifizierte die besten Standorte für allgemein zugängliches Laden im Quartier und am Zielort. EBP dimensionierte die Ladeinfrastruktur an diesen Standorten erarbeitete ein Betreibermodell und eine Planerfolgsrechnung für die Refinanzierung kommunaler Ausgaben ([EBP](#), 2023b).

8. Zielnetzplanung Strom

Verteilnetzbetreiber stehen vor der Herausforderung das Stromverteilnetz resilient und zukunftssicher, aber auch effizient und kostenoptimiert auszubauen. Die Elektrifizierung im Wärmesektor (Wärmepumpen), im Bereich Mobilität (Elektromobilität) aber auch der stetige Zuwachs an dezentralen Photovoltaikanlagen stellen eine besondere Herausforderung für das Stromnetz dar. Die Auswirkungen auf das Verteilnetz sind regional sehr unterschiedlich.

Die installierte Ladeleistung ist abhängig von der Anzahl der Ladepunkte und der jeweiligen Ladeleistung pro Ladepunkt. Zur Analyse der Auswirkungen der Ladevorgänge auf die Verteilnetze sind neben der installierten Ladeleistung insbesondere das Ladeverhalten, das Lastmanagement und die Gleichzeitigkeit relevant. Das Ladeverhalten beeinflusst die Wahl der Ladeinfrastruktur (z.B. eher Heimpladen mit tiefer Leistung oder das Schnellladen unterwegs mit hoher Leistung) und den Zeitpunkt des Ladevorgangs. Eine feinträumliche Betrachtung der Ladevorgänge, welche die Entwicklungen in der Bevölkerung, bei den Arbeitsplätzen, im Fahrzeugbestand und im Verkehrsverhalten berücksichtigt ist daher essentiell, um gezielte Aussagen zum Einfluss im Verteilnetz treffen zu können.

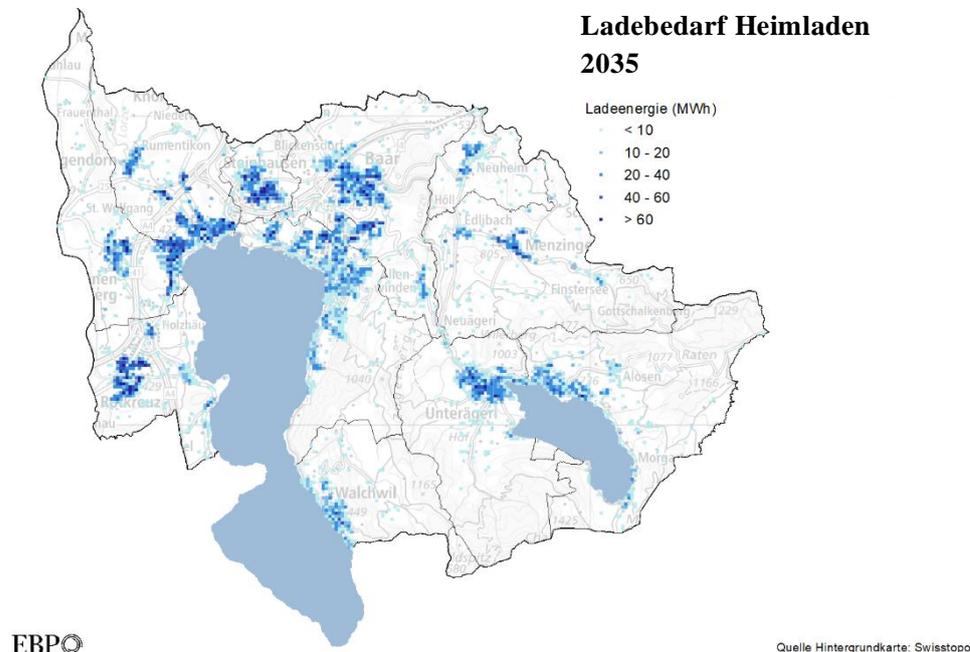


Abbildung 15: Ladebedarf in Megawattstunden (MWh) gemäss möglichem Entwicklungsszenario im Jahr 2035 für Personenwagen, in einem Versorgungsgebiet, modelliert je Hektare (100m x 100m)

EBP modelliert den Bedarf an Ladeinfrastruktur für privates Laden (Laden zu Hause und am Arbeitsplatz) je Gebäude und für allgemein zugängliches Laden (Laden am Zielort, im Quartier und Schnellladen) je Hektare (100m x 100m) im Versorgungsgebiet. In der gleichen räumlichen Auflösung werden

minutenscharfe/ stundenscharfe Lastgänge für die Ladevorgänge mit einem probabilistischen Modell erstellt (vgl. Abbildung 16).

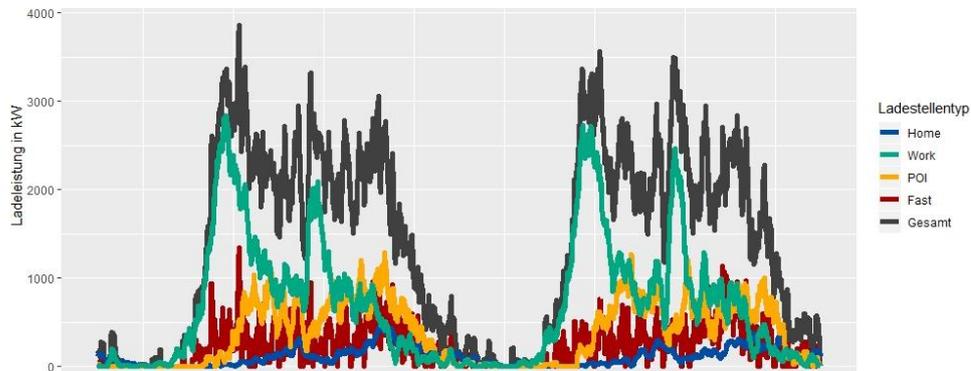


Abbildung 16: Minuten-Ladeprofile je Ladestationstyp für zwei Tage auf Ebene Unterwerk einer Schweizer Stadt im Jahr 2040 bei hoher Marktdurchdringung der Elektromobilität.

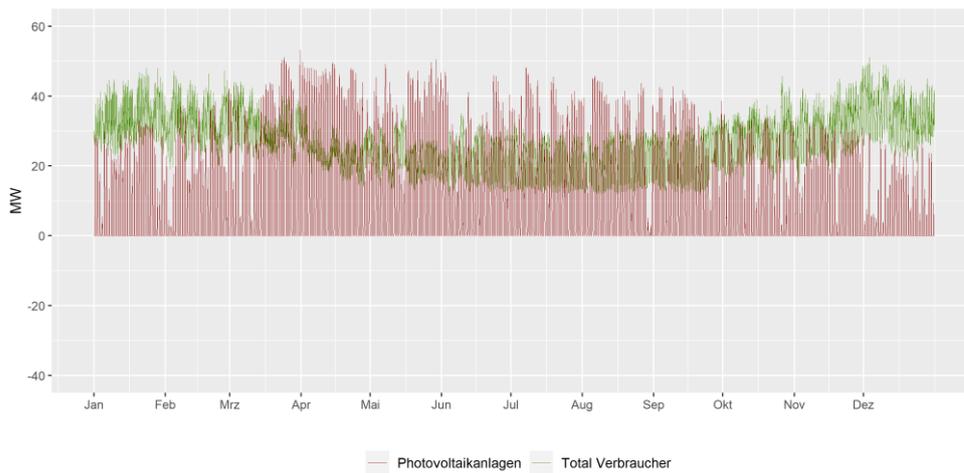


Abbildung 17: Stündlicher Beispiellastgang eines Unterwerks. Der Lastgang zeigt den kombinierten Lastgang von Allgemiestrom, Wärmepumpen und Elektromobilität, kombiniert mit einem Beispiellastgang für Photovoltaik, im Jahr 2035.

Das Modell von EBP bildet die Netztopologie des Versorgungsgebiets ab und aggregiert die Hausanschlüsse auf Stränge, Transformatoren und diese auf die Unterwerke. Durch die unterschiedlichen Aggregationsstufen lassen sich Aussagen über die Belastung und Resilienz einzelner Netzkomponenten treffen. Zusätzlich lässt sich z.B. der Gleichzeitigkeitsfaktor (vgl. Abbildung 18) der Ladeinfrastruktur errechnen, der die effektive maximale Netzbelastung in Bezug auf die Anzahl Ladepunkte aufzeigt.

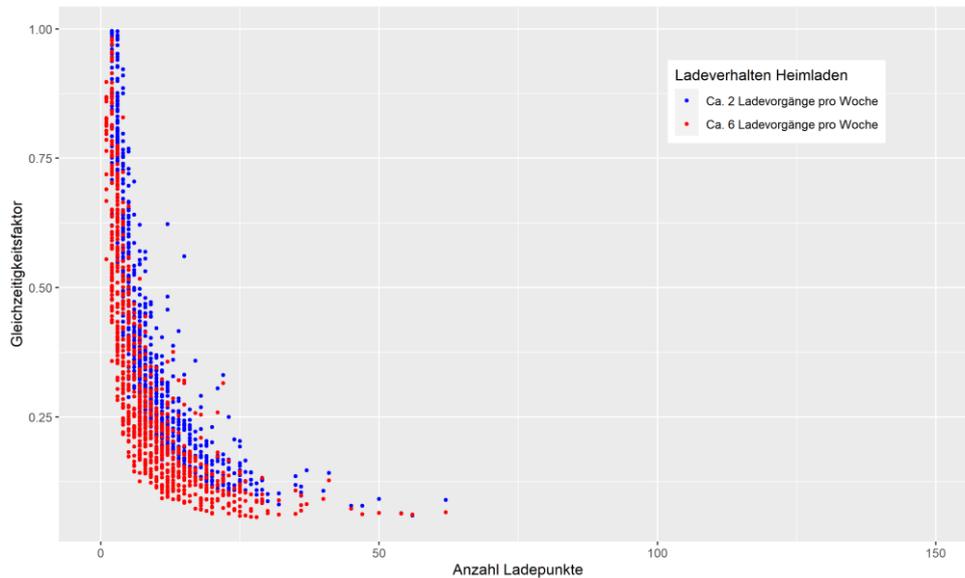


Abbildung 18: Gleichzeitigkeitsfaktor aus einem Beispielgebiet. Der Gleichzeitigkeitsfaktor beschreibt, wie sich die effektiv bezogene Leistung (kW) in Bezug auf die total installierte Leistung (kW) in Abhängigkeit der Anzahl Ladepunkte verhält.

EBP-Projekte aus der Praxis:

- **Netzausbau: Szenarien für die Zielnetzplanung von WWZ**
EBP begleitet die WWZ bei der Erarbeitung von Szenarien für die Entwicklung von Elektromobilität, Wärmepumpen, Photovoltaik und Allgenernstrom bis 2050, in regional fein aufgelösten Lastgang-Prognosen (Haushalt und Hektaren) ([EBP](#), 2022).
- **Quantitative Analyse für VSE Verteilnetzstudie 2050**
Dies EBP analysierte den Einfluss von Elektromobilität, Photovoltaik und Wärmepumpen auf das Verteilnetz für den Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen VSE. Mit der ETH und der EMPA regionalisierte EBP nationale Entwicklungsszenarien für acht Verteilnetzbetreiber bzw. Vertiefungsgebiete und errechnete detaillierte Lastgangprofile je Gebiet ([EBP](#), 2023c).
- **VSE Energiezukunft 2050: Auswirkungen auf die Verteilnetze.**
[Link](#).

9. Vergleich Gesamtkosten Antriebstechnologien

Ein Schlüsselfaktor für die Verbreitung von alternativen Antriebstechnologien ist die Wirtschaftlichkeit. Dies kann mit verschiedenen Methoden betrachtet werden. Eine typische Methode ist die Berechnung der Gesamtkosten über die Besitzdauer, auch *Total Cost of Ownership* (TCO) genannt.

Für gewerbliche Flotten wird diese Methode oft verwendet, um sich rational für die wirtschaftlichste Option zu entscheiden. Bei privaten Fahrzeugen sind die Kosten über die Besitzdauer hinweg zwar von Bedeutung, doch die Entscheidung wird auch stark von anderen Faktoren beeinflusst. Dazu gehören rationale Überlegungen, wie die Höhe der Anfangsinvestition, aber auch persönliche Vorlieben.

Für die Berechnung beginnt die Besitzdauer bei der Anschaffung des Fahrzeugs und endet mit dem Wiederverkauf. Typischerweise werden folgende Kostenkomponenten betrachtet: Beschaffungskosten, Energiekosten, Service- und Reifenkosten, Steuern, Versicherung, Infrastruktur- und Finanzierungskosten.

Die Ergebnisse einer TCO-Berechnung sind je Fahrzeugkategorie unterschiedlich und hängen sehr stark von den getroffenen Annahmen ab. EBP hat in Auftrag für EnergieSchweiz eine vertiefte Studie für die Fahrzeugkategorie Personenwagen durchgeführt (EnergieSchweiz, [2023](#)): Batterieelektrische Personenwagen sind in allen Grössenklassen günstiger über die Besitzdauer als Verbrenner- und Plug-In Hybrid-Fahrzeuge. Die Robustheit dieser Ergebnisse wird durch Sensitivitätsanalysen bestätigt.

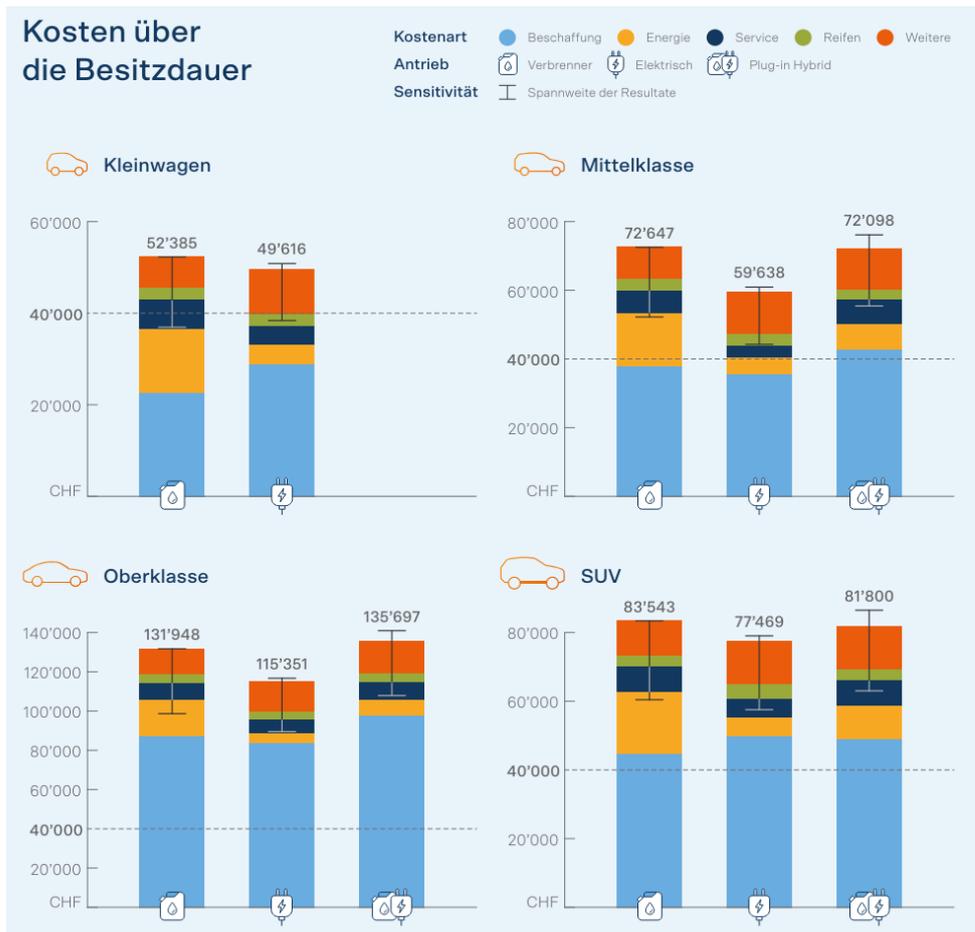


Abbildung 19: Gesamtkosten über die Besitzdauer für verschiedene Antriebstechnologien (EBP Studie in Auftrag für BFE; EnergieSchweiz, 2023)

Für zuverlässige Behauptungen über andere Fahrzeugkategorien muss jeder Fall einzeln betrachtet werden. Jedoch kann man eine allgemeine Aussage formulieren: Batteriebetriebene Fahrzeuge (BEV) sind gegenüber Verbrennerfahrzeugen teurer in der Anschaffung aber vor allem dank tieferen Energie- und Wartungskosten günstiger im Betrieb. Eine lange Besitzdauer und eine höhere Fahrleistung beeinflussen deshalb eine TCO-Berechnung positiv zugunsten von BEV.

Es gibt sowohl Trends, die die Wirtschaftlichkeit von alternativen Antrieben verbessern als auch Trends, die sie verschlechtern. In Zukunft wird aber die TCO-Berechnung sich immer mehr zugunsten von BEV bewegen. Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge werden auch mittelfristig nicht wirtschaftlich sein.

Dank der Skalierung und Standardisierung der Produktion von BEV, sowie die Senkung der Batteriekosten, werden die Beschaffungskosten für diese Fahrzeuge weiter sinken. Das wurde in den letzten Jahren für mehrere Fahrzeugsegmente und diverse Hersteller bereits beobachtet.

Es bestehen Unsicherheiten über die Entwicklung von Treibstoff- und Strompreisen. BEV sind aber TCO-mässig weniger sensibel auf die Änderung der Energiekosten, weil sie im Vergleich mit anderen

Kostenkomponenten weniger ins Gewicht fallen als bei Verbrennerfahrzeugen.

Die Wartungskosten werden weiterhin bei BEV deutlich tiefer als bei Verbrennern bleiben.

Die aktuelle politische Stossrichtung lässt vermuten, dass die steuerliche Lage für BEV sich in Zukunft verschlechtern wird. Ab dem 1.1.2024 sind emissionsfreie Fahrzeuge nicht mehr von der Importsteuer befreit und der Bundesrat plant die Einführung einer Ersatzabgabe, weil Elektrofahrzeuge heute keine Mineralölsteuer bezahlen. Weiter bezahlen emissionsfreie Fahrzeuge heute keine LSVA, was ein wesentlicher Faktor ist, weshalb die Schweiz europaweit die höchste BEV-Zulassungsquote bei schweren Nutzfahrzeugen aufweist. Der Bundesrat will ab 2031 diese Befreiung progressiv aufheben. Andererseits werden Fehlanreize zugunsten von Verbrennungsfahrzeuge ebenfalls gestrichen. Das neue CO₂-Gesetz sieht zum Beispiel vor, dass die Befreiung von der Mineralölsteuer für Linienbusse ab 2026 bzw. ab 2030 entfällt und emissionsfreie Busse gefördert werden.

EBP-Projekte aus der Praxis:

- **EnergieSchweiz:** Berechnung der Gesamtkosten von Personenwagen ([EBP](#); [EnergieSchweiz](#), 2023)

10. Alternative Antriebe für eigene Flotten

Nicht nur viele Städte und Gemeinden haben sich das Ziel gesetzt klimaneutral zu werden und konsequenterweise die eigene Flotte zu dekarbonisieren, sondern auch private Unternehmen wollen ihre Treibhausgasemissionen reduzieren.

Die Dekarbonisierung einer Flotte kann ein komplexes Projekt sein, weil viele interdependente Aspekte zu berücksichtigen sind: Betrieb, Infrastruktur und Fahrzeuge. Eine sorgfältige Planung ist deshalb notwendig, damit Ressourcen eingespart und die Dienstleistungen kontinuierlich gewährleistet werden können.

Grundsätzlich sollen für die Umstellung einer Flotte auf alternative Antriebe drei Bedingungen erfüllt werden:

- **Technische Machbarkeit:** Das alternative Fahrzeug muss das Anforderungsprofil erfüllen. Das betrifft insbesondere die Reichweite, sowie andere spezifische Anforderungen wie die Einsatzbereitschaft und die Resilienz. Die Elektromobilität befindet sich nicht in allen Fahrzeugkategorien auf dem gleichen Entwicklungsstand. Für gewisse spezielle Fahrzeuge können die Anforderungen nicht immer erfüllt werden. Allgemein können betriebliche und infrastrukturelle Massnahmen (z.B. Gelegenheitsladen, Vorsehen von Zwischenladungen, Anpassung Fahrzeugroute) helfen die Anforderungen zu erfüllen.
- **Angemessene Kosten.** Diese Bedingung setzt sich aus zwei Komponenten zusammen: Den Gesamtkosten (siehe Kapitel 9) und den Umweltauswirkungen. Nicht nur in Fahrzeugkategorien, in denen alternative Antriebe wirtschaftlicher als Verbrennungsmotoren sind, lohnt sich ein Technologiewechsel, sondern auch für Kategorien wo Mehrkosten entstehen, solange sie gut im Verhältnis mit den Umweltauswirkungen stehen. Diese Beurteilung kann zahlenbasiert erfolgen (TCO, eingesparte Emissionen), hat aber immer einen politischen Interpretationsraum.
- **Bereitstellung Tank- und Ladeinfrastruktur:** Es muss eine bedarfsgerechtere Ladeinfrastruktur realisiert werden. Sie muss im Vorfeld und standortspezifisch geplant werden. Netzbetreiber müssen grundsätzlich die benötigte Leistung an jedem Standort liefern (Stromversorgungsgesetz). Es kann aber sein, dass nicht nur der Hausanschluss verstärkt werden muss, sondern auch das Stromnetz seitens Netzbetreiber. Das bedingt eine Abstimmung und manchmal lange Bereitstellungszeiten.

Ein attraktives Marktangebot und entsprechend angemessene Anschaffungskosten dank Skalierungseffekten, einen planbaren und regulären Fahrzeugeinsatz, sowie eine hohe Fahrleistung und hoher Energieverbrauch sprechen für einen Technologiewechsel auf alternative Antriebe. Das ist zum Beispiel im Allgemeinen der Fall bei Personenwagen, Lieferwagen, Kehrlichtlastwagen, Linienbussen, sowie Kehrmaschinen.

Wenn hingegen diese Faktoren schwach ausgeprägt sind, dann ist es schwierig, auf alternative Antriebe zu wechseln. Beispiele dafür sind grosse Rasenmäher und Traktoren, Winterdienstfahrzeuge und Löschfahrzeuge der Feuerwehr.

EBP-Projekte aus der Praxis:

- **Stadt Uster:** Roadmap zur Elektrifizierung der Fahrzeugflotte von Uster ([EBP](#), 2023d)
- **Gemeinde Glarus:** Gesamtkonzept Elektromobilität, inkl. Roadmap Dekarbonisierung der kommunalen Flotte ([EBP](#), 2023e).
- **Gemeinde Embrach:** Begleitung Ausschreibung E-Kehrlichtlastwagen ([EBP](#), 2023f)
- **Autobus AG Liestal:** Umsetzungsplan Elektrifizierung der Buslinien ([EBP](#), 2024b)

11. Gesamt-Umweltbelastung im Strassenverkehr

Die Umweltbelastung von Strassenfahrzeugen umfasst alle Umweltwirkungen über den ganzen Lebenszyklus (Bereitstellung, Unterhalt, Betrieb und Recycling/Entsorgung von Infrastruktur, Energie und Fahrzeugen).

Verschiedene Indikatoren. Die Umweltbelastung unserer Mobilität umfasst die Versauerung von Böden und Gewässern, die Toxizität in Böden, Gewässer und für den Menschen, Emissionen (Klimagase, Schädigung der Ozonschicht, ionisierende Strahlung, Lärm, Feinstaub, Smogbildung) sowie die Inanspruchnahme von Ressourcen (Land-, Agrar- und Siedlungsfläche, Metalle, Energie, Süsswasser). Diese «Midpoint-Indikatoren» decken die Gesamt-Umweltbelastung ab. In Abbildung 21 wird exemplarisch der Gesamt-Ausstoss an Treibhausgasen dargestellt. Dabei werden die übrigen Klimagase (z. B. Methan und Lachgas) in CO₂-Äquivalenten umgerechnet.

Technologischer Fortschritt. Klassische Lebenszyklus-Inventare basieren auf Daten, und damit zwangsläufig auf der Vergangenheit. Als Grundlage für politische Entscheide wird versucht, den technologischen Fortschritt abzuschätzen und damit die künftige Umweltbelastung («prospective LCA»).

Einsatzprofile und Strommix. Die Umweltbelastung wird pro gefahrenen Fahrzeugkilometer berechnet. Zur Vergleichbarkeit gehen wir hier bei allen Autos von 160'000 km Lebensfahrleistung aus und davon, dass PHEV 50 % aller Kilometer elektrisch zurücklegen. Den Strommix haben wir gemäss BFE (2020b) gewählt. Für die Szenarien ZERO-E und ZERO-H2 wird unterlegt, dass die EU ihre Netto-Null-Ziele erreicht und der europäische Strommix im Jahr 2050 klimaneutral erzeugt wird.

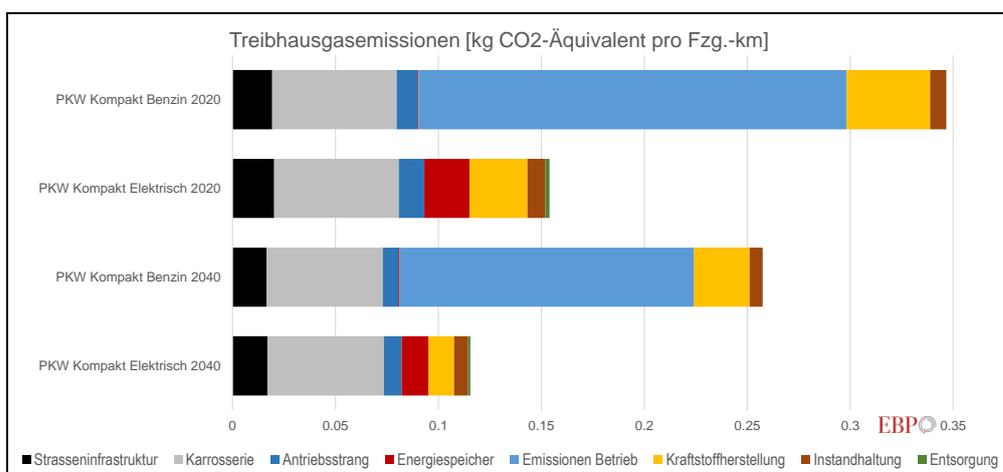


Abbildung 20 CO_{2eq}-Emissionen von Elektro- und Benzin-Personenwagen der Kompaktklasse 2020 und 2040, mit Strommix gemäss ZERO-E-Szenario. Datenquelle: EBP-Flottenmodell, BFE (2020b), PSI (2021).

Abbildung 20 vergleicht Benzin- und Elektroautos der Kompaktklasse: Die zusätzliche Belastung durch die Herstellung und Entsorgung der Batterien wird bis 2040 merklich abnehmen. Unter der Annahme, dass die Stromerzeugung bis 2050 in Europa klimaneutral erfolgt, verbleiben die Infrastruktur sowie Bau und Rezyklierung des Fahrzeugs als wichtigste Umweltbelastungen.

Im April 2024 wurde die Euro-7-Verordnung vom Rat der Europäischen Union angenommen, welche Vorschriften zu Emissionsgrenzwerte für Autos, leichte und schwere Nutzfahrzeuge, sowie zur Haltbarkeit von Batterien festlegt (European Council, 2024b). In der Euro-7-Norm gibt es für alle Fahrzeugklassen strengere Grenzwerte für Partikelemissionen. Die Emissionsgrenzwerte für Autos und leichte Nutzfahrzeuge haben sich seit der Euro-6-Norm nicht verändert, aber es gibt neu strengere Anforderungen bei den festen Partikeln. Bei schweren Nutzfahrzeugen gibt es strengere Emissionsgrenzwerte, u.a. für Distickstoffoxid oder Formaldehyd, welche bisher noch nicht geregelt wurden.

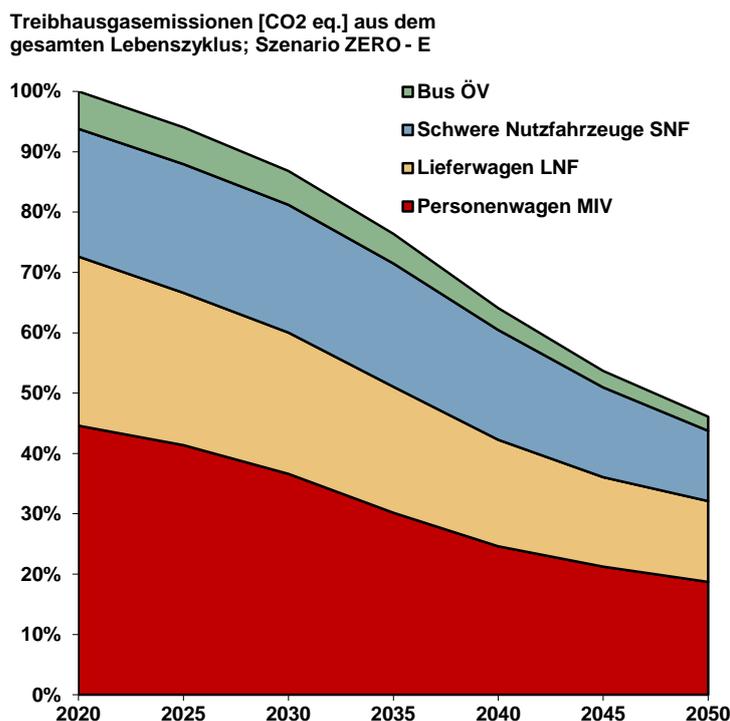


Abbildung 21 Entwicklung der Gesamtreibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus in einer Schweizer Gemeinde. Auch mit einem Fahrzeugbestand mit nahezu 100 % Elektrofahrzeuge (Szenario ZERO-E), lassen sich aufgrund der Vorkettenemissionen rund 50 % der Gesamtemissionen nicht vermeiden.

Auswirkungen des Rohstoffverbrauchs auf die Umwelt

In der Schweiz werden rund 7 Millionen Tonnen Material für die Mobilität beansprucht, wovon 88 % Treibstoff sind. Durch die Entwicklung in eine emissionsfreie Mobilität wird der Rohstoffverbrauch der Schweiz für die Mobilität stark sinken. Um eine emissionsfreie Mobilität zu erreichen, ist es notwendig, Rohstoffe für die Herstellung von Batterien zu gewinnen, was nicht ohne Umweltauswirkungen ist. Zum Beispiel wird bei der Gewinnung von Lithium, einem der wichtigsten Mineralien für Batterien, grosse Mengen Wasser aus Salzseen verdampft. Daher wird die Rückgewinnung seltener technischer Metalle eine wichtige Rolle spielen, um die Gesamt-Umweltbelastung weiter zu senken (BAFU, 2023).

12. Kreislaufwirtschaft und Recycling von Batterien

Der grosse Ausbau der Batterieproduktion, der durch die Elektromobilität befördert wird, bedeutet gleichzeitig auch Druck auf die Entsorgung von Altbatterien. Das Recycling hat als Alternative zur Batterieentsorgung auf Deponien in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen.

Mit dem Recycling von Batterien werden zwei Hauptziele verfolgt: Erstens, die Rückgewinnung kritischer Rohstoffe, was besonders für Länder wichtig ist, die nicht über natürliche Vorkommen der verwendeten Metalle verfügen und somit die Abhängigkeit von den Produktionsländern verringert und Preisschwankungen mildert (Fleischmann et al., 2023; Tankou et al., 2023). Zweitens, die Vermeidung von Umweltverschmutzung durch unsachgemässe Batterieentsorgung.

Die meisten Batterien benötigen die Mineralien Lithium, Kobalt, Nickel, Mangan und Graphit. Mit Ausnahme von Nickel werden all diese Mineralien als kritische Rohstoffe betrachtet, da sie von grosser wirtschaftlicher Bedeutung sind und ein Versorgungsrisiko darstellen können (Golroudbary et al., 2019; Navarro et al., 2022; Ren et al., 2023). Dieses Versorgungsrisiko ist unter anderem auf die Verfügbarkeit des Materials in nur wenigen Ländern zurückzuführen. Ein klares Beispiel dafür ist die Gewinnung von Kobalt, die zu mehr als 70 % in der Demokratischen Republik Kongo stattfindet, sowie die Gewinnung von Graphit, die zu mehr als 77 % in China erfolgt (USGS 2024a; 2024b).

China ist heute der Hauptproduzent von Batterien, 85 % der Zellproduktion findet dort statt (IEA, 2024a). Diese Kapazität erklärt sich zum Teil durch die beherrschende Stellung bei der Veredelung der für Batterien benötigten Mineralien, wie etwa 50 bis 70 % des Lithiums und Kobalts (IEA, 2022). Darüber hinaus spielt auch der Besitz von Patenten eine Rolle für Chinas Produktionskapazität. Angesichts dieser Situation verstärken die USA und die EU die inländische Batterieproduktion durch neue Regelungen. Dazu zählen die neue EU-Batterieverordnung und der Inflation Reduction Act (IRA) in den USA. (European Council, 2023b; U.S. Department of the Treasury, 2023).

Die von der EU und den USA geförderten neuen Regulierungen zielen darauf ab, Rohstoffe, die in ihren Ländern nicht natürlich vorkommen, durch Batterierecycling zurückzugewinnen und für die heimische Batterieproduktion zu nutzen. Die neue EU-Regulierung setzt auch höhere Ziele für die Sammelquote von Batterien: Die Sammelquoten steigen laufend, obwohl sie vorerst nur für Gerätebatterien und Batterien für leichte Verkehrsmittel gelten. Ausserdem wurde eine Rückgewinnung von Lithium von 50 % bis 2027 und von 80 % bis 2031 aus Altbatterien festgelegt. Für Elektrofahrzeuge gelten ab 2031 Mindestwerte für den recycelten Anteil von Lithium (6 %), Kobalt (16 %) und Nickel (6 %) in Batterien (European Council, 2023b).

Die Batterieproduktion folgt momentan nicht den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft, was den Recyclingprozess beeinträchtigt. Durch die unterschiedlichen Designs und Zusammensetzungen der Batterien müssen ressourcenintensivere Recyclingmethoden angewendet werden, da effizientere Technologien mehr Standardisierung in den Batterien voraussetzen würden.

Das Ergebnis des Recyclingprozesses variiert je nach Technologie und Batterietyp. Die Wahl der Recyclingtechnologie hängt von der Menge und Qualität der zurückgewonnenen Materialien ab, sowie von den akzeptierten Umweltauswirkungen. Nicht alle Batterien sind gleichermassen attraktiv für das Recycling, da die Kostenwirksamkeit des Vorhabens von den enthaltenen Materialien abhängt. Dies ist eine komplexe Angelegenheit, da z.B. die Reduzierung der Verwendung von Kobalt zwar umweltfreundlich ist, weil dadurch der Kobaltabbau verringert wird, gleichzeitig wird aber das Batterierecycling weniger rentabel. Somit ist die Batterierecyclingindustrie stark abhängig von der zukünftigen Entwicklung der Batteriezusammensetzung, was noch immer mit einer gewissen Unsicherheit assoziiert ist.

Die heute am häufigsten angewandten Technologien für das Recycling sind die Pyrometallurgie und Hydrometallurgie. Obwohl das Direktrecycling derzeit eher selten angewendet wird, erhält es immer mehr Aufmerksamkeit. In der Schweiz wird die grösste installierte Recyclingkapazität für das Direktrecycling verwendet, hauptsächlich von den Unternehmen Librec und Kyburz. Das Unternehmen Batrec hingegen verwendet die Pyrometallurgie.

Beim direkten Recycling handelt es sich um einen physikalischen Prozess, bei dem die Kristallmorphologie der Kathode durch einen Regenerationsprozess erhalten bleibt (Li et al., 2023). Obwohl sich diese Technologie noch in der Entwicklung befindet, ist sie aufgrund der niedrigen Kosten und des geringen Energieverbrauchs für Batterien mit geringem oder billigem Metallgehalt attraktiv.

Die Pyrometallurgie ist ein Prozess, bei dem Batterien verbrannt werden, wobei Kupfer, Kobalt und Nickel als Legierung übrigbleiben. Dieser Prozess ist energieintensiv, erfordert eine Gasreinigung und ein zusätzliches Verfahren zur Rückgewinnung von Lithium, weshalb er z.B. für LFP-Batterien nicht sehr gut geeignet ist (Beaudet et al., 2020; Li et al., 2023).

Bei der Hydrometallurgie handelt es sich um einen Prozess, bei dem die verschiedenen Mineralien aus einer Batterie durch Auslaugung und Trennung sowie durch den Einsatz von Säuren einzeln gewonnen werden. Dieser Prozess erfordert eine vorherige Vorbehandlung, bei der eine schwarze Masse entsteht (Beaudet et al., 2020; Li et al., 2023). Diese schwarze Masse ist eine Mischung aus Anoden- und Kathodenpulver, die Graphit, Lithium und je nach Kathodenmaterial auch Kobalt, Nickel und Mangan enthält (Tanouk et al., 2023). Im Vergleich zur Pyrometallurgie zeichnet sich dieses Verfahren durch eine hohe Rückgewinnungsrate und -reinheit aus, was die Rückgewinnung in einem batteriewerten Material ermöglicht. Ausserdem erfordert das Produkt eines pyrometallurgischen Prozesses einen anschliessenden hydrometallurgischen Prozess, um die

Metalle separat zu gewinnen. Aus diesem Grund tendiert die geplante Recyclingkapazität zur Anwendung der Hydrometallurgie, insbesondere in den USA und in der EU.

Die Menge der durch Recycling zurückgewonnenen Materialien, die für die Produktion neuer Batterien zur Verfügung steht, hängt von den recycelbaren Batterien ab. Neben den wertvollen Mineralien stellt die Rückgewinnung der Kunststoffkomponenten, dem Elektrolyten und des Graphits eine Herausforderung dar, da diese kaum recycelt werden. Nichtsdestotrotz schätzt die Europäische Kommission, dass bis 2040 recyceltes Kobalt bis zu 51 % der EU-Nachfrage und recyceltes Nickel bis zu 42 % decken könnte (European Commission, n.d.).

13. Einsatz der Szenarien für Kantone, Städte, Energieanbieter und Parkhäusern

13.1 Kantonale Konzepte und Massnahmenpläne

Die Elektromobilität birgt sowohl Chancen wie auch potenzielle Risiken (de Haan, Zah et al. 2013, de Haan et al. 2009, de Haan, Peters et al. 2015). Kantone brauchen deshalb eine Strategie. In welchem Umfang wollen sie welche Elektromobilität unterstützen und fördern? Eine wichtige Grundlage dafür ist die Entwicklung der Fahrzeugzahlen, des Ladebedarfes und der erzielbaren CO₂-Reduktionen mittels kantonaler Szenarien.

Der **Kanton Thurgau** hat im Rahmen eines Elektromobilitätskonzeptes so wirkungsvolle Fördermassnahmen erarbeitet, dass er in Bezug auf Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen 2019 an der Spitze der Schweiz stand. (2018, EBP 2018e). Die **Kantone Basel-Stadt** (2018, EBP, 2018h), **Schaffhausen** (2019–2020, EBP, 2020a) und **St. Gallen** (2019, EBP, 2019c) haben jeweils im Rahmen eines Elektromobilitätskonzeptes wirkungsvolle Massnahmenlisten erarbeitet. Die **Kantone Basel-Stadt** ([Link](#), EBP, 2015e) und **Graubünden** ([Link](#), EBP 2015d) prüften bereits im Jahr 2015 die Chancen und Risiken der Elektromobilität und entsprechende Massnahmen.

13.2 Konzepte für Städte und Gemeinden

Viele wichtige Fragen werden auf der Ebene von Gemeinden entschieden. Mit den Gemeindeszenarien legen wir die Grundlage für die Berücksichtigung des künftigen Bedarfs an erneuerbarem Strom und Ladestationen.

Die Energiestadt **St. Moritz** erarbeitete einen Masterplan Elektromobilität und setzt nun in acht Bereichen Massnahmen um – eine echte Herausforderung angesichts der hohen Ansprüche des Tourismus und der harschen klimatischen Bedingungen! (**Masterplan Elektromobilität**, 2018–2019, EBP, 2019d).

Zwei **Energiestädte** definierten im Rahmen eines Konzepts Massnahmen, welche die Elektromobilität beschleunigen und wichtige Rahmenbedingungen setzen für einen positiven Beitrag der Elektromobilität zur Energiewende. (**Konzept für Elektromobilität und alternative Antriebssysteme, Elektromobilitätskonzept** 2019–2020, EBP, 2019e und 2019f).

Für die Elektrifizierung des Strassenverkehrs ist in Städten auch die Elektrifizierung von Busflotten (EBP 2018d; EBP 2020b) von hoher Priorität. Auch kann es sinnvoll sein, spezifisch die Elektrifizierung von Taxis zu fördern (EBP 2017f).

13.3 Geschäftsmodelle und Grundlagen für Energieversorger

Energieversorger können sich strategisch positionieren und attraktive Geschäftsfelder innerhalb der Elektromobilität identifizieren. Es werden neue Geschäftsmodelle entwickelt sowie Investitionsplanung und der

Ertragsentwicklung gerechnet. Für das öffentliche Ladegeschäft werden Standortevaluation erarbeitet. Grundlage hierfür ist der Ladebedarf je Ladetyp im Einzugsgebiet des Energieversorgers gemäss den Szenarien Elektromobilität.

ewl energie wasser luzern, energie wasser bern ewb und **SH POWER** haben aufgrund der Stromnachfrage und der zu erwartenden Anzahl Ladevorgänge an privaten und öffentlich zugänglichen Ladestellen ihr Rollout-Konzept für Ladestationen und ihre Verteilnetzplanung aktualisiert. (**Planungsgrundlagen für Marktaktivitäten und Verteilnetz**, 2018, [Link](#), EBP, 2018f).

AEW Energie AG hat aufgrund einer Marktanalyse die heutigen Geschäftsaktivitäten evaluiert, neue Geschäftsideen identifiziert und beurteilt und ein Dienstleistungsangebot für die Zukunft definiert. (**Strategie-Review Elektromobilität**, 2017–2018, [Link](#), EBP, 2018c).

13.4 Geschäftsmodelle für Tankstellenbetreiber, Parkhäuser und Verwalter von Immobilienportfolios

Tankstellenbetreiber stehen vor der Herausforderung, sich in Bezug auf die Elektromobilität strategisch zu positionieren, insbesondere, ob, wann und wie sie in diesen Markt einsteigen sollen. **Verwalter von Parkhäusern und Einstellhallen, sowie auch von Immobilienportfolios** generell benötigen intelligente Lösungen und Komplettlösungen für eine rechtzeitige Elektrifizierung der Parkplätze: Ladevorgänge erfolgen künftig grösstenteils zu Hause und ca. 70 % der Schweizer Wohnbevölkerung wohnt in Mehrfamilienhäusern. In Frage kommen diverse Ansätze für eine intelligente Ladeinfrastruktur. Die Elektromobilitätszenarien stellen in beiden Fällen eine zentrale quantitative Grundlage dar.

Die **Migrol** beabsichtigt, in das Ladegeschäft für Elektrofahrzeuge einzusteigen. Sie evaluierte in einem mehrstufigen Strategieprozess mögliche Geschäftsfelder und plante den Markteintritt inkl. Betriebskonzept, Finanzplanung und den Aufbau von Know-how. (**Markteintritt in das Ladegeschäft** der Elektromobilität, 2017–2018, [Link](#), EBP, 2018b).

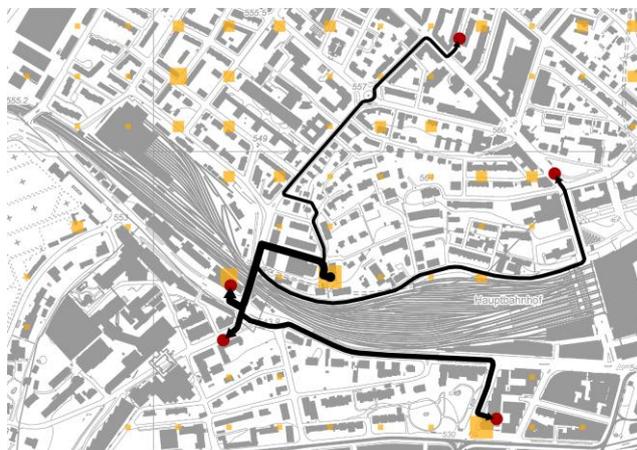


Abbildung 22 Das Routing (GIS-Analyse) bringt das potenzielle Ladeaufkommen vom Hektarraster auf die Ladestandorte. (Basiskarte: UP5, Amt für Geoinformation des Kantons Bern.

13.5 Anpassung kantonaler Motorfahrzeugsteuern

Kantonale Motorfahrzeugsteuern müssen sowohl einen stabilen Ertrag liefern als auch wirkungsvolle Anreize für energieeffiziente Neuwagen setzen. Die Tiefbau-, Strassenverkehrs- und Umweltämter der **Kantone Aargau, Basel-Landschaft, Bern, Luzern, Neuenburg, St. Gallen, Thurgau, Zug und Zürich** haben mit Hilfe der Szenarien Elektromobilität im Zeitraum 2009–2019 ihre Motorfahrzeugsteuern nachjustiert. Da die Anpassung der entsprechenden Gesetze und Verordnungen Zeit braucht, muss bereits heute das Ende von Vergünstigungen für Elektroautos konzipiert werden (Anpassung kantonaler Motorfahrzeugsteuern 2009–2019: [Link](#); EBP, 2017g, h, i).

A1 Literaturverzeichnis

- ABB, 2024. ABB E-mobility und MAN demonstrieren erstmals Megawatt-Charging am eTruck. [Link](#).
- ACEA, 2024. Press release new car registrations for 2023. [Link](#).
- ARE, 2022. Schweizerische Verkehrsperspektiven 2050. Schlussbericht. Rapp, Prognos, PTV und Strittmatter Partner im Auftrag ARE, ASTRA, BAV, BAFU und BFE. Bern, 8. April 2022, 346 Seiten. Download von ARE-Website: [PDF](#) (33,2 MB)
- ARE, 2020. Nationales Personenverkehrsmodell (NPVM) 2017. [Link](#).
- Beaudet, A., Larouche, F., Amouzegar, K., Bouchard, P., & Zaghbi, K. (2020). Key challenges and opportunities for recycling electric vehicle battery materials. In Sustainability (Switzerland) (Vol. 12, Issue 14). MDPI. [Link](#).
- BAFU, 2024. CO₂-Statistik: Emissionen aus Brenn- und Treibstoffen. [Link](#).
- BAFU, 2023. Auswirkungen der Mobilität auf die Umwelt. [Link](#).
- BFE, 2024a. Verständnis Ladeinfrastruktur 2050 – Wie lädt die Schweiz in Zukunft?. [Link](#).
- BFE, 2024b. Kennzahlen zu den alternativen Antrieben bei Personenwagen. [Link](#).
- BFE, 2023. Auswirkungen der CO₂-Emissionsvorschriften für neue Personenwagen, Lieferwagen und leichte Sattelschlepper 2012 – 2021. [Link](#).
- BFS, 2023. Mobilitätsverhalten der Bevölkerung. Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2021. [Link](#)
- Boulouchos K, et al, 2021. Pathways to a net zero CO₂ Swiss mobility system: White Paper. ETH Zürich, Empa, PSI, EPFL, BFH und SUPSI für Swiss Competence Center for Energy Research – Efficient Technologies and Systems for Mobility (SCCER Mobility). Zürich, März 2021, 41 Seiten. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000481510>
- Bundesrat, 2023. Bundesrat beschliesst Aufhebung der Steuerbefreiung auf Elektrofahrzeugen. [Link](#).
- Bundesrat, 2022. Bundesrat legt nächste Schritte zur nachhaltigen Finanzierung der Verkehrsinfrastruktur fest. [Link](#).
- CATL, 2024. CATL Unveils Shenxing PLUS, Enabling 1,000-km Range and 4C Superfast Charging. [Link](#).
- de Haan P, Peters A, Semmling E, Marth H, Kahlenborn W, 2015. Rebound-Effekte: Ihre Bedeutung für die Umweltpolitik. EBP, Fraunhofer ISI und adelphi für Umweltbundesamt (UBA). Texte 31/2015, Forschungskennzahl 3711 14 104, ISSN 1862-4804, Desslau-Roßlau, Juni 2015, 112 Seiten. Download von UBA: [PDF](#) (2,6 MB)
- de Haan P, Zah R, Bernath K, Bruns F, 2013. Chancen und Risiken der Elektromobilität in der Schweiz. EBP und EMPA im Auftrag des Zentrums für Technologiefolgen-Abschätzungen der Akademien der Schweiz (TA Swiss). Download von vdf-Verlag: [PDF](#) (10,0 MB)
- de Haan P, et al, 2009. Energie-Effizienz und Reboundeffekte: Entstehung, Ausmass, Eindämmung. ETH Zürich IED-NSSI, für Programm Energiewirtschaftliche Grundlagen, Bundesamt für Energie. Zürich, 265 Seiten. Download von ETH-Bibliothek: [PDF](#) (5,1 MB)

- de Haan P, Müller M G, Peters A, Hauser A, 2007. Lenkungsabgaben zur Senkung des CO₂-Ausstosses der PKW-Neuzulassungen: Hintergrund, Mechanismen, Prognosen. Schlussbericht. ETH Zürich für BFE Energiewirtschaftliche Grundlagen. 154 Seiten. [PDF](#) (1,2 MB)
- EBP, 2024a. Gesamtkonzept erneuerbare Antriebe für die Stadt Luzern. [Link](#).
- EBP, 2024b. Umsetzungsplan Elektrifizierung der Buslinien. [Link](#).
- EBP, 2023a. Schnell-Ladehubs für E-LKWs in der Schweiz. Im Auftrag von BKW Smart Mobility. [Link](#).
- EBP, 2023b. Machbarkeitsstudie Ladeinfrastruktur Steffisburg. [Link](#).
- EBP, 2023c. Quantitative Analyse für VSE Verteilnetzstudie 2050. [Link](#).
- EBP, 2023d. Roadmap zur Elektrifizierung der Fahrzeugflotte von Uster. [Link](#).
- EBP, 2023e. Gesamtkonzept Elektromobilität für die Gemeinde Glarus. [Link](#).
- EBP, 2023f. Begleitung Ausschreibung E-Kehrlichtlastwagen. [Link](#).
- EBP, 2022. Netzausbau: Szenarien für die Zielnetzplanung von WWZ. [Link](#).
- EBP, 2020a. Chancen der Elektromobilität für den Kanton Schaffhausen. Im Auftrag des Kanton Schaffhausen, Baudepartement und Energiefachstelle. [Link](#)
- EBP, 2020b. Elektrobus-Strategie für den ländlichen Verkehr. EBP-Webseite: [Link](#)
- EBP, 2020c. Handlungsspielräume der Städte für eine klimaneutrale Mobilität. Im Auftrag der Städtekonferenz Mobilität. Download von SKM-CVM: [Link](#).
- EBP, 2019a. Bewertung und Priorisierung von Standorten für öffentliche Ladestationen. Im Auftrag von ewb. EBP-Webseite: [Link](#)
- EBP, 2019c. Elektromobilität im Kanton St. Gallen. Im Auftrag des Kanton St. Gallen, Tiefbauamt. EBP-Webseite: [Link](#)
- EBP, 2019d (nicht veröffentlicht). Masterplan Elektromobilität St. Moritz. Im Auftrag der Gemeinde St. Moritz.
- EBP, 2019e (nicht veröffentlicht). Konzept Elektromobilität und alternative Antriebssysteme. Im Auftrag einer Energiestadt.
- EBP, 2019f (nicht veröffentlicht). Elektromobilitätskonzept. Im Auftrag einer Energiestadt.
- EBP, 2018b (nicht veröffentlicht). Grundlagen für die Entwicklung von Geschäftsfeldern im Bereich Elektromobilität. Im Auftrag der Migrol.
- EBP, 2018c (nicht veröffentlicht). Elektromobilität: Marktanalyse und Review strategische Positionierung. Im Auftrag der AEW Energie AG.
- EBP, 2018f. Elektromobilität: Quantitative Planungsgrundlagen. Im Auftrag von ewl. EBP-Webseite: [Link](#)
- EBP, 2018h (nicht veröffentlicht). Grundlagen für ein Gesamtkonzept Elektromobilität Kt. Basel-Stadt. Kanton Basel-Stadt Amt für Umwelt und Energie.
- EBP, 2018i. Szenarien der Elektromobilität in der Schweiz – Update 2018. EBP-Grundlagen zu Energie und Mobilität. Download von der EBP-Website: [PDF](#) (0,8 MB)
- EBP, 2017a. Barometer Auto und Mobilität von morgen 2017. EBP-Grundlagenbericht, 4. Oktober 2017, 54 Seiten. Download von EBP-Website: [PDF](#) (2,0 MB)
- EBP, 2017g (nicht veröffentlicht). Entwicklung des Fahrzeugbestands, der Neuzulassungen und der Elektromobilität bis 2040. Prognose der Verkehrssteuererträge bis 2040 mitsamt Effekten des Bonussystems und den aktuellen Elektroauto-Steuererlassen. Kanton Zug.

- EBP, 2017h (nicht veröffentlicht). Aktualisierung der CO₂-Grenzen des Bonus-Malus-Systems für Personenwagen zur Gewährleistung der Ertragsneutralität für 2018 bis 2021. Kanton Basel-Landschaft, Finanzdirektion.
- EBP, 2017i (nicht veröffentlicht). Motorfahrzeug-Steuererträge bis 2035. Kanton St. Gallen, Strassenverkehrs- und Schifffahrtsamt.
- EBP, 2015e. Elektromobilität Region Basel: Massnahmenkonzept. Im Auftrag des Kantons Basel-Stadt, Amt für Umwelt und Energie, Basel. Direkter Download des Berichts: [Link](#) (1,1 MB)
- Electrive, 2024a. Votum vollendet: EU gibt sich strengere CO₂-Standards für Lkw und Busse. [Link](#)
- Electrive, 2024b. MAN plant Batterie-elektrischen Reisebus für 2025. [Link](#).
- EnergieSchweiz, 2023. Faktenblatt Gesamtkosten von Personenwagen (TCO). [Link](#).
- EnergieSchweiz, 2023. Gesamtkosten von Personenwagen (TCO). [Link](#).
- EnergieSchweiz, 2022: Fahr mit dem Strom. [Link](#).
- European Commission, n.d. Battery supply chain challenges. [Link](#).
- European Commission, 2020. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. [Link](#).
- European Council, 2024a. Heavy-duty vehicles: Council signs off on stricter CO₂ emission standards. [Link](#).
- European Council, 2024b. Euro 7: Council adopts new rules on emission limits for cars, vans and trucks. [Link](#).
- European Council, 2023a. Alternative fuels infrastructure: Council adopts new law for more recharging and refuelling stations across Europe. [Link](#).
- European Council, 2023b. Council adopts new regulation on batteries and waste batteries. [Link](#).
- Fleischmann, J., Hanicke, M., Horetsky, E., Ibrahim, D., Jautelat, S., Linder, M., Schaufuss, P., Torscht, L., & van de Rijt, A., 2023. Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular.
- Golroudbary, S. R., Calisaya-Azpilcueta, D., & Kraslawski, A., 2019. The life cycle of energy consumption and greenhouse gas emissions from critical minerals recycling: Case of lithium-ion batteries. *Procedia CIRP*, 80, 316–321. [Link](#).
- IEA, 2024a. Batteries and Secure Energy Transitions. International Energy Agency, Paris. [Link](#).
- IEA, 2024b. Global EV Outlook 2024. International Energy Agency, Paris. [Link](#).
- IEA, 2023. Global Hydrogen Review 2023. [Link](#).
- IEA, 2022. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. International Energy Agency, Paris. [Link](#).
- ISO, 2022. Road vehicles — Vehicle to grid communication interface (ISO 15118-20:2022). International Organization for Standardization. [Link](#).
- Kober T. et al, 2019. Perspectives of Power-to-X technologies in Switzerland: A White Paper. PSI, Empa, ETH Zürich, ZHAW, HSR, Universität Geneva and Universität Luzern für Joint Activity der Swiss Competence Centers for Energy Research (SCCER). Juli 2019, 41 Seiten, <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000352294>
- Li, J., Li, L., Yang, R., & Jiao, J., 2023. Assessment of the lifecycle carbon emission and energy consumption of lithium-ion power batteries recycling: A systematic review and metaanalysis. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 65). Elsevier Ltd. [Link](#).

- Marti, T., Sulzer, M., Rüdüsüli, M., & et al., 2022: Energieversorgung der Schweiz bis 2050. Zusammenfassung von Ergebnissen und Grundlagen (Studienbericht). In: Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen VSE (13.12.2022): «Energiezukunft 2050». Wege in die Energie und Klimazukunft der Schweiz. [Link](#)
- Navarro, R. P., Seidel, P., Lenz, L., Kolk, M., & Krug, A., 2022. European Battery Recycling: An Emerging Cross-Industry Convergence.
- PSI, 2021. Calculator-Version 1.3.9, available online <https://calculator.psi.ch/>
- Ren, Z., Li, H., Yan, W., Lv, W., Zhang, G., Lv, L., Sun, L., Sun, Z., & Gao, W., 2023. Comprehensive evaluation on production and recycling of lithium-ion batteries: A critical review. In Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 185). Elsevier Ltd. [Link](#).
- Tankou, A., Bieker, G., & Hall, D., 2023. Scaling up Reuse and Recycling of Electric Vehicle Batteries: Assessing Challenges and Policy Approaches.
- U.S. Department of the Treasury, 2023. Treasury Releases Proposed Guidance on New Clean Vehicle Credit to Lower Costs for Consumers, Build U.S. Industrial Base, Strengthen Supply Chains. United States of America Government. [Link](#).
- USGS, 2024a. Mineral Commodity Summaries 2024 - Cobalt. United States Geological Survey. [Link](#).
- USGS, 2024b. Mineral Commodity Summaries 2024 - Graphite. United States Geological Survey. [Link](#).
- UVEK, 2024. Nationale Daten-Infrastruktur Elektromobilität (DIEMO). Juni 2024. [Link](#).

A2 Technische Dokumentation Datensatz

Elektrofahrzeuge (auch Steckerfahrzeuge genannt) sind:

BEV Battery Electric Vehicles sind reine Elektrofahrzeuge mit extern aufladbarer Batterie, ohne internen Energieumwandler wie Verbrennungsmotor oder Brennstoffzelle.

PHEV Plug-in-Hybrid Electric Vehicles haben immer eine extern aufladbare Batterie und können rein elektrisch fahren, typischerweise 20 bis 80 km. Bei «parallelen PHEV» treibt ein Verbrennungsmotor direkt die Antriebsachse an. Bei «seriellen PHEV» treibt nur der Elektromotor die Räder an, ein kleiner, auf die Stromerzeugung optimierter Verbrennungsmotor mit Generator (oder eine Brennstoffzelle) kann zugeschaltet werden, um die Batterie des Elektromotors wieder aufzuladen.

REEV (Range Extended Electric Vehicles) sind serielle Plug-in-Hybride.

FCEV Fuel Cell Electric Vehicles sind Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeuge, die aus dem Energieträger Wasserstoff (H₂) in einer Brennstoffzelle Strom für ihren Elektroantrieb erzeugen. Aus Sicht der Fahrzeugtechnologie sind FCEV und PHEV sehr ähnlich. Kann die Batterie auch extern aufgeladen werden, ist das FCEV auch ein PHEV. FCEV brauchen immer eine separate H₂-Tankstelleninfrastruktur. H₂ lässt sich auf verschiedene Wege herstellen – ein FCEV ist dann ein «Elektroauto», wenn H₂ über Elektrolyse aus Strom erzeugt wird (und nicht aus Erdgas).

Keine Elektrofahrzeuge sind:

HEV Hybrid Electric Vehicles (Hybridfahrzeuge). Wie PHEV verfügen HEV zwar über eine Batterie, welche aber nur als temporärer Energiespeicher verwendet wird und (aus Kosten- und Gewichtsgründen) möglichst klein gehalten wird. Die Batterie lässt sich nicht extern aufladen (nur über den Verbrennungsmotor oder durch die Rückgewinnung von Bremsenergie), d. h. das Fahrzeug fährt ausschliesslich mit Benzin.

In der nachfolgenden Tabelle sind die in diesem Bericht gebräuchlichen Kategorisierungen der Fahrzeuge, sowie deren Grössenklassen aufgeführt.

Abk.	Fahrzeugkategorien	Fahrzeugarten gemäss ASTRA	Grössenkatgorie	Definition Grössenkatgorie
PW	Personenwagen	1: Personenwagen	Kleine PW	Alle PW mit Gesamtgewicht bis 1650 kg
		2: Schwere Personenwagen	Kompakte PW	Alle PW mit Gesamtgewicht zwischen 1650 kg und 1900 kg

			Mittelgrosse PW	Alle PW mit Gesamtgewicht zwischen 1900 kg und 2150 kg
			Grosse PW	Alle PW mit Gesamtgewicht über 2150 kg
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge	10: Leichter Motorwagen 30: Lieferwagen	LNF klein	Alle LNF Leergewicht bis 1735 kg
			LNF mittelgross	Alle LNF mit Leergewicht zwischen 1735 kg und 2585 kg
			LNF gross, geringe Fahrleistung	Alle LNF mit Leergewicht über 2585 kg und übrige ASTRA-Karosserieform-Codes (bzgl. Zeile unten)
			LNF gross, hohe Fahrleistung	Alle LNF mit Leergewicht über 2585 kg und ASTRA-Karosserieform-Codes 147, 151, 246 und 249*
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge	11: Schwerer Motorwagen 35: Lastwagen 36: Leichtes Sattelmotorfahrzeug 37: Schweres Sattelmotorfahrzeug 38: Sattelschlepper	SNF < 12 t	Alle SNF mit Gesamtgewicht bis 12 t
			SNF 12 – 26 t, geringe Fahrleistung	Alle SNF mit Gesamtgewicht zwischen 12 t und 26 t und übrige ASTRA-Karosserieform-Codes (bzgl. Zeile unten)
			SNF 12 – 26 t, hohe Fahrleistung	Alle SNF mit Gesamtgewicht zwischen 12 t und 26 t und ASTRA-Karosserieform-Codes 126, 139, 144, 150, 211–215, 226 und 231**
			SNF > 26 t	Alle SNF mit Gesamtgewicht über 26 t
BUS	Busse	20: Gesellschaftswagen 21: Kleinbusse	Kleinbusse < 5 t	Alle Busse mit Gesamtgewicht bis 5 t
			Reisebusse	Alle Busse mit Gesamtgewicht über 5 t ohne Linienbusse (s. Zeile unten)
			Linienbusse	Alle Busse mit Gesamtgewicht über 5 t und ASTRA-besonderem Verwendungszweck-

		Code 11 (Linienfahrzeug)
22: Gelenkbus	Gelenk- & Trolleybusse	Alle Busse mit Gesamtgewicht über 5 t und ASTRA- Fahrzeugarten-Code 22 und 24
24: Gelenk- trolleybus		

Tabelle 2: Zuordnung von ASTRA Fahrzeugarten zu Fahrzeugkategorien und Aufteilung in Grössenkategorien

* ASTRA-Karosserieform-Codes: Kasten (147), Kippbrücke (151), Brücke mit Verdeck und Hebebühne (246) und Kasten mit Hebebühne (249)

** ASTRA-Karosserieform-Codes: Fahrmischer (126), Kühlkasten mit Hebebühne (139), Klimatisierter Kasten mit Hebebühne (144), Kehrriechtabfuhr (150), Tank für Getränke (211), Tank für Milch (212), Tank für Teer / Bitumen (213), Tank für Treibstoffe (214), Tank für Wasser (215), Wechselaufbau (226) und Wechselladekipper Welaki (231)

Die untenstehende Tabelle spezifiziert die in diesem Bericht verwendete Kategorisierung der Antriebsarten, basierend auf den Treibstoffarten gemäss ASTRA.

Abk.	Antriebsarten	Treibstoffarten gemäss ASTRA
ICE_B	Verbrennungsmotor mit Benzin (inkl. Mildhybrid und Gas-Fahrzeuge) (Internal Combustion Engine)	B: Benzin C: Benzin / elektrisch J: Ethanol K: Benzin / Ethanol G: Gas (CNG / LPG) L: Flüssiggas (LPG) N: Erdgas (CNG) Y: Gas / Benzin (CNG, LPG)
ICE_D	Verbrennungsmotor mit Diesel (inkl. Mildhybrid) (Internal Combustion Engine)	D: Diesel F: Diesel / elektrisch
PHEV	Plug-in Hybride (Plug-in-Hybrid Electric Vehicle)	R: Benzin-Plugin-Hybrid S: Diesel-Plugin-Hybrid
BEV	Batterie-Elektrofahrzeuge (Battery Electric Vehicle)	E: Elektrisch O: Elektrisch (Oberleitung)
FCEV	Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeuge (Fuel Cell Electric Vehicle)	W: Wasserstoff X: Wasserstoff / Elektrisch

Tabelle 3: Zuordnung von ASTRA Treibstoffarten zu Antriebsarten

A3 Bottom-up-Modellierung des Strassenverkehrs

Die EBP-Modelllandschaft der Electric and Hydrogen Mobility Scenarios Switzerland basiert auf einer Reihe von Modellen und Datengrundlagen des Bundes. Die Modelle werden einerseits für die ganze Schweiz sowie mit Hilfe der EBP synPop auch für alle Gemeinden und Kantone gerechnet.

Sim.car

Detaillierte Modellierung des schweizerischen Neuwagenmarktes für die Jahre 2020 bis 2050. Für jedes Jahr wird eine synthetische Flotte aller Neuwagenmodelle jeglicher Antriebsformen erstellt, mit Leistungsdaten und Neuverkaufspreisen. Die eingesetzte Mikrosimulation «sim.car» wurde erstmals an der ETH Zürich eingesetzt und seither weiterentwickelt (de Haan, 2007). Sie verwendet Treue-Raten (Markentreue, Modellsegmenttreue, Treibstofftyptreue und Antriebstyptreue), welche in der BAM-Befragung erhoben werden (EBP, 2017a).

EBP synPop

Für die Modellierung des Strassenverkehrs kommt der EBP synPop eine zentrale Bedeutung zu. Die EBP synPop ist eine synthetische Population der Schweiz, welche alle Haushalte, Unternehmen und Gebäude modelliert.

Sie basiert auf einer Hochrechnung der Stichproben des Mikrozensus Mobilität und Verkehr (MZMV) sowie der Haushaltsbudgeterhebung für alle Haushalte (HABE) in der Schweiz. Mithilfe aktueller Daten zum Strassenfahrzeugbestand (IVZ vom ASTRA) und der Verkehrsmodellierung NPVM (ARE) kann der Fahrzeugbestand und die Fahrleistung für jede Gemeinde bis 2050 modelliert werden (siehe Abbildung 23). Durch die gemeindespezifische Fortschreibung der Wohnbevölkerung, des Modalsplits, der Fahrleistung pro Fahrzeug sowie der Fahrzeugbelegung kann der Motorisierungsgrad (Anzahl Fahrzeuge pro 1'000 Einwohner), sowie die Entwicklung der Neuzulassungen und des Fahrzeugbestandes bis 2050 modelliert werden.

EBP ist bestrebt, immer die neusten Echtdatensätze und Prognosen seitens der Bundesämter zu verwenden. EBP benutzt Grunddatensätze vom BFS zu Bevölkerung, Haushalten und Gebäude (STATPOP, STATENT, GWS), sowie kommunales Steueraufkommen (Seco). Die EBP synPop EBP ist auf Mobilität und Konsumverhalten spezialisiert und wurde im Rahmen von Projekten zur Prognose des Lade- und Ladestationsbedarfs für die Elektromobilität schon mehrfach eingesetzt.

Der wichtige Mehrwert der EBP synPop liegt in der intelligenten Kombination verschiedener Datensätze mithilfe von Zuordnungs-Algorithmien. So können beispielsweise Autobesitz einzelnen Haushalten und Firmen zugeordnet oder der Personenwagen-Bestand einer Gemeinde unter Berücksichtigung von örtlichen Faktoren, Einkommenskategorie und Konsummuster verteilt werden.

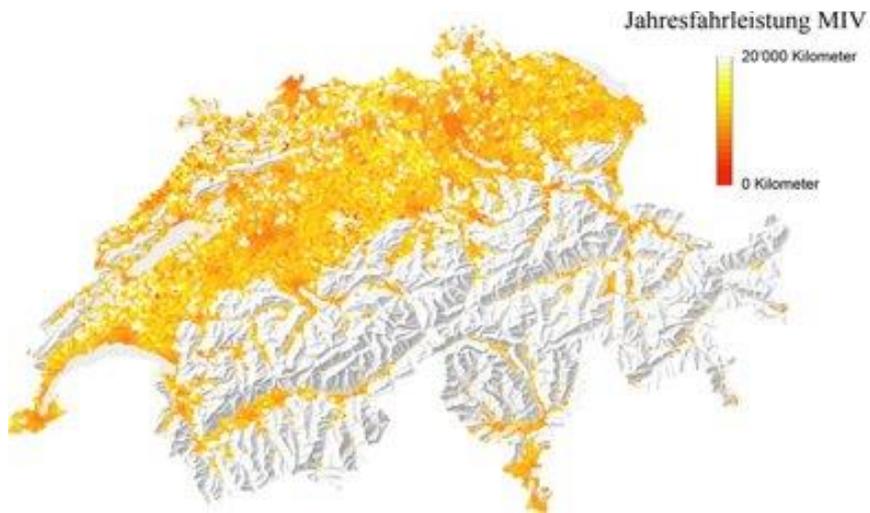


Abbildung 23 Jahresfahrleistung MIV aggregiert je Parzelle (100 x 100 m) der EBP synPop.