

Energie Kompass PSI

Orientierung für die Energiewende
#1 / 2025

Die Kurve kriegen

Eine Analyse der Zukunft des Personenverkehrs in der Schweiz – wie Netto-Null-Treibhausgasemissionen in der Mobilität möglich werden.



6
Fahrplan in
die Elektromobilität:
Herausforderungen
und Chancen

10
Elektrische Batterien,
Wasserstoff
oder synthetische
Kraftstoffe?

16
«Unser Wunsch an
die Leute ist:
Werdet multimodaler.»
Gespräch mit Regina Witter
und Peter Schmid

Editorial

Wie viele andere Länder weltweit, strebt auch die Schweiz an, bis Mitte dieses Jahrhunderts keine Treibhausgase mehr zu emittieren. Ein Ziel, das massive Auswirkungen auf das gesamte Energiesystem hat und die Grundlage für einen Grossteil unserer Forschung am PSI Labor für Energiesystemanalysen (LEA) bildet. Mit dem neu gestarteten PSI Energie-Kompass wollen wir nun zum Verständnis der Energiewende beitragen – durch fundierte Analysen und Einordnung.

Die Energiewende berührt so viele Aspekte unseres Lebens: von der Art und Weise, wie wir unsere Häuser und Unternehmen mit Strom versorgen, bis hin zur Art und Weise, wie wir uns fortbewegen, Waren produzieren und unsere Städte gestalten. Im PSI Energie-Kompass werden wir uns in jeder Ausgabe mit einem dieser Themen befassen und eine wissenschaftlich fundierte Analyse mit Schwerpunkt auf der Schweiz, aber auch mit allgemeiner Relevanz für viele andere Länder liefern. Unser Ziel ist es, den Leserinnen und Lesern das Wissen zu vermitteln, das sie benötigen, um gut informierte Entscheidungen im Zusammenhang mit der Energiewende zu treffen.

Diese erste Ausgabe befasst sich mit dem Personenverkehr. Dieser trägt wesentlich zu den Treibhausgasemissionen in der Schweiz bei, und die Nachfrage nach Mobilität wird mit der Bevölkerung weiter wachsen. Auf dem Weg zum Netto-Null-Ziel sind grosse Veränderungen im Personenverkehr erforderlich. Auf den folgenden Seiten gehen wir auf unsere Forschung zu diesen Veränderungen ein und untersuchen die Möglichkeiten, sie zu verwirklichen.

Wir liefern zunächst Hintergrundinformationen, um zu verstehen, wie wir am LEA Energiemodelle anwenden und Analysen durchführen. Dann befassen wir uns mit dem Übergang zu batterieelektrischer Mobilität und untersuchen die Ladeinfrastruktur sowie die Frage, wie sich Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe im Vergleich zu Batterien für Personewagen schlagen. Anschliessend bewerten wir die systemischen Auswirkungen und Kosten des Mobilitätswandels und untersuchen die Vorteile des Umstiegs vom eigenen Auto auf öffentliche Verkehrsmittel. In einem Interview hören wir die Perspektiven aus der Automobilindustrie und der Schweizer Bundesverwaltung. Wir schliessen diese Ausgabe mit einem Ausblick und offenen Fragen, die dringend geklärt werden müssen.

Die Grundlage für diese neue Publikation war der beliebte Energie-Spiegel, der 1999–2015 von unserem Labor veröffentlicht wurde. Wenn Sie den PSI Energie-Kompass auch in Zukunft erhalten möchten, abonnieren Sie ihn bitte. Wir sind gespannt auf Ihr Feedback per E-Mail an lea-info@psi.ch.

Wir freuen uns auf den Gedankenaustausch mit unseren Leserinnen und Lesern in den kommenden Jahren und wünschen Ihnen bei der Lektüre viel Spass!

Redaktionsteam

Labor für Energiesystemanalysen
Paul Scherrer Institut PSI

Inhalt

- 4 **Modellierung der Verkehrswende**
- 6 **Fahrplan in die Elektromobilität: Herausforderungen und Chancen**
- 8 **Energie tanken: Infrastruktur für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge**
- 10 **Elektrische Batterien, Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe?**
- 12 **Das Gesamtbild: systemische Auswirkungen und externe Kosten**
- 14 **Persönliche Mobilität neu denken: Umstieg vom Auto auf öffentliche Verkehrsmittel**
- 16 **«Unser Wunsch an die Leute ist: Werdet multimodaler.»**
Gespräch mit Regina Witter und Peter Schmid
- 19 **Ausblick: Netto-Null-Emissionen bei der persönlichen Mobilität realisieren**

Titelbild

Autobahn bei Nacht in Lavaux, Schweiz
Bild: Adobe Stock



Abonnieren Sie den PSI Energie-Kompass

Wenn Sie daran interessiert sind, unsere wissenschaftlich fundierten Analysen weiterhin in Papierform oder digital zu erhalten, können Sie den PSI Energie-Kompass unter folgendem Link kostenlos abonnieren:

www.psi.ch/de/lea/psi-energie-kompass



Modellierung der Verkehrswende

Wie kann die Schweiz ihre Energieziele erreichen? In unserem Modellierungsteam untersuchen wir systematisch die technologischen Optionen und ihre Auswirkungen auf Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt.

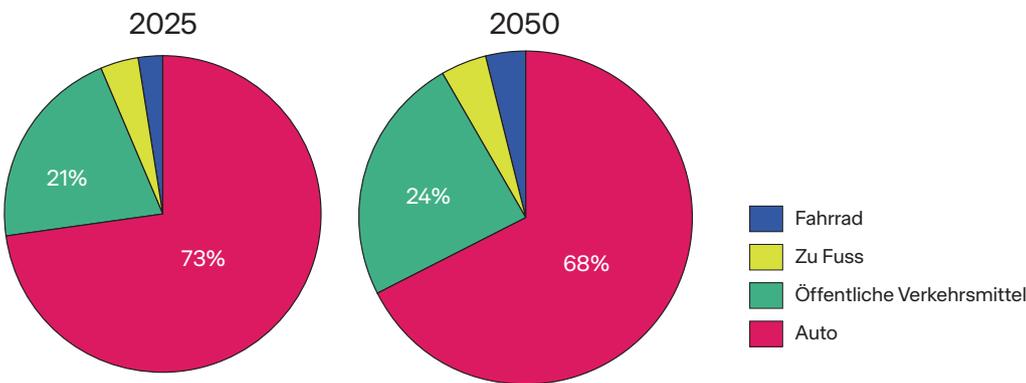


Abbildung 1: Modaler Split nach Personenkilometern in der Schweiz in den Jahren 2025 und 2050

Erwartete Verteilung der Verkehrsträger in den Jahren 2025 und 2050. Bis zum Jahr 2050 wird ein Anstieg der Gesamtfahrleistung von 129 auf 138 Milliarden Personenkilometer prognostiziert, während die Bevölkerung von 9 auf 10,4 Millionen ansteigt. Zusätzlich zu dem angenommenen Wachstum der Nachfrage nach öffentlichen Verkehrsmitteln geht ARE auch von einem Anstieg des Radverkehrs von 2,3% auf 3,8% der gesamten Personenkilometer aus.

(Quelle: Bundesamt für Raumentwicklung ARE)

Um die verschiedenen Optionen für unser Energiesystem zu untersuchen, erstellen wir sogenannte «Was-wäre-wenn»-Szenarien. Zum Beispiel haben wir mehrere Szenarien entwickelt, um zu zeigen, wie die Schweiz bis 2050 Netto-Null-Treibhausgasemissionen erreichen kann. Bei unserer Arbeit in diesem Bereich verwenden wir eines der detailliertesten computergestützten Energiemodelle, das Swiss TIMES Energy Systems Model (STEM). Dieses Modell umfasst das gesamte Schweizer Energiesystem heute und in der Zukunft. Szenarien können zwar eine wertvolle Unterstützung für Entscheidungsträger in Politik und Wirtschaft sein, es ist jedoch zu beachten, dass sie keine Vorhersagen sind.

Für die Analysen in diesem PSI Energie-Kompass verwenden wir eines unserer Netto-Null-Szenarien für das Jahr 2050. Unsere Eingabedaten zu den sozialen und wirtschaftlichen Parameter wie Bevölkerungswachstum und Bruttoinlandsprodukt (BIP) stammen von den Schweizer Bundesämtern. Unsere Analysen des Fahrzeugbestands stützen sich teilweise auf Daten zur Mobilitätsnachfrage des Bundesamts für Raumentwicklung (ARE). Das ARE geht davon aus, dass das Fahren von Personenwagen

ab etwa 2035 teurer wird, und zwar aufgrund einer Kombination aus Subventionen für den öffentlichen Nahverkehr und Massnahmen zur Kompensation der externen Kosten der privaten Autonutzung. Das Hauptszenario des ARE sieht daher eine Verlagerung von der Nutzung des privaten Autos auf den öffentlichen Verkehr vor (siehe Abbildung 1).

Trotz dieser Veränderung in der Wahl der Verkehrsmittel, die gemeinhin als Verkehrsverlagerung bezeichnet wird, nimmt die Zahl der Autos auf den Strassen im Basisszenario des ARE weiter zu. 2050 werden immer noch zwei von drei Kilometern mit dem Auto zurückgelegt. Dies ist zum Teil auf das erwartete Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum des Landes sowie auf die Vorliebe vieler Menschen für das Auto zurückzuführen.

In unseren Netto-Null-Szenarien haben wir den gleichen modalen Split wie im ARE-Szenario angenommen. Das heisst, die Schweizer Bevölkerung wird weiterhin in hohem Masse auf das eigene Auto angewiesen sein (siehe Abbildung 1). Sollte dies tatsächlich der Fall sein, wird der Übergang zu batterieelektrischer Mobilität noch entscheidender sein, um unsere Netto-Null-Ziele zu erreichen.



33%

Der prozentuale Anteil der Treibhausgasemissionen, der auf den Transportsektor in der Schweiz zurückzuführen ist.

77%

dieser Emissionen stammen aus dem Landverkehr, hauptsächlich aus dem Autoverkehr.

(Quelle: Bundesamt für Umwelt)



Fahrplan in die Elektromobilität: Herausforderungen und Chancen

Wenn die Schweiz ihr Netto-Null-Ziel erreichen will, muss der technologische Wandel auch beim Privatfahrzeug ankommen.

Die meisten Autos sind heute Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, die mit Diesel oder Benzin betrieben werden. Um bis 2050 einen Netto-Null-Ausstoss an Treibhausgasen zu erreichen, muss die Mehrheit der Autos mit einer alternativen Energiequelle betrieben werden (Abbildung 2). Zu den Alternativen gehören batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEVs), Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeuge und mit synthetischen Kraftstoffen betriebene Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren.

In vielen Teilen der Welt, auch in der Schweiz, hat der Übergang zur Elektromobilität bereits begonnen. Die Regierungen setzen Massnahmen um, um die Einführung von BEVs zu fördern, einschliesslich verschiedener finanzieller Vorteile für den Besitz von «sauberen» oder hocheffizienten Fahrzeugen. (Die

Gründe, warum Hersteller und Verbraucher BEVs gegenüber andere Antriebsarten bevorzugen, werden in der Kolumne «Elektrische Batterien, Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe?» erläutert.) Darüber hinaus verbietet die EU ab 2035 den Verkauf von neuen Benzin- und Dieselfahrzeugen, sofern sie nicht mit alternativen Kraftstoffen betrieben werden. Allerdings zögern viele Neuwagenkäuferinnen und -käufer den Umstieg hinaus und die Umstellung erfolgt nicht so schnell wie in unserem Netto-Null-Szenario vorgesehen. Obwohl BEVs technologisch bereit sind, gibt es derzeit mehrere Hindernisse für den Umstieg. Das erste Hindernis ist der Preis. Heute treiben teure Batterien die Anschaffungskosten von BEVs in die Höhe. Trotzdem sind BEVs hinsichtlich der Gesamtbetriebskosten wettbewerbsfähig mit Fahrzeugen

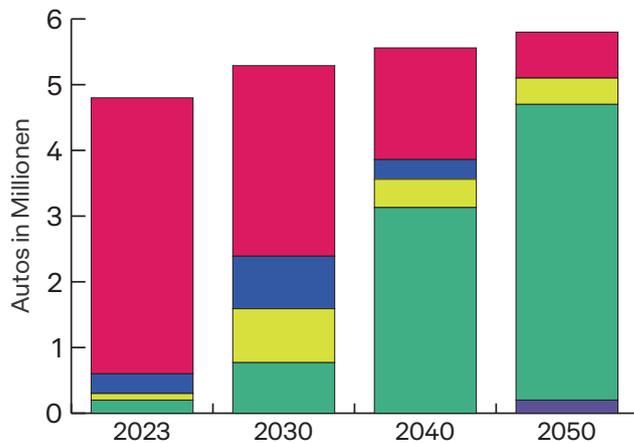


Abbildung 2: Mögliche Entwicklung der Schweizer Autoflotte zum Erreichen von Netto-Null-Treibhausgasemissionen bis 2050

Die Schweizer Autoflotte heute und ihre mögliche Entwicklung bis 2050, um Netto-Null-Treibhausgasemissionen zu erreichen. Es wird erwartet, dass die Gesamtzahl der Autos bis 2050 von 4,7 Millionen auf 5,9 Millionen steigen wird. Obwohl die Zahl der Autos steigt, ist die jährliche Fahrleistung pro Auto geringer als heute; im Durchschnitt werden Autos weniger gefahren. In einer Netto-Null-Gesellschaft müssen die verbleibenden Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (ICEVs) mit synthetischen Kraftstoffen betrieben werden, die Benzin und Diesel ersetzen können und einen viel kleineren CO₂-Fussabdruck haben.

(Quelle: PSI Labor für Energiesystemanalysen)

mit Verbrennungsmotor, wenn man Ausgaben wie Versicherung, Service, Reifen, Kraftstoff und die Anschaffungskosten berücksichtigt. Aber die meisten Menschen, die ein Fahrzeug kaufen möchten, gehen nicht von einer Lebenszykluskostenrechnung aus, was bedeutet, dass BEVs ohne irgendeine Form der Subventionierung immer noch als nicht wettbewerbsfähig wahrgenommen werden.

Ein zweites Hindernis sind Fehlinformationen über den geringen CO₂-Ausstoss und die Nachhaltigkeit von BEVs im Vergleich zu anderen Arten von Privatfahrzeugen, einschliesslich Bedenken hinsichtlich ihrer Batterien. Potenzielle Käuferinnen und Käufer könnten vom Kauf von BEVs abgehalten werden, wenn sie

0,2 Millionen

Die Anzahl der batterieelektrischen Fahrzeuge auf den Strassen der Schweiz im Jahr 2024, was 3% des gesamten Fahrzeugbestands entspricht.

(Quelle: Bundesamt für Statistik)

4,5 Millionen

Die prognostizierte Anzahl batteriebetriebener Elektroautos, die nach unserem Netto-Null-Szenario bis 2050 auf den Strassen der Schweiz benötigt werden. Dies würde 76% des zukünftigen gesamten Fahrzeugbestands entsprechen.

(Quelle: PSI Labor für Energiesystemanalysen)

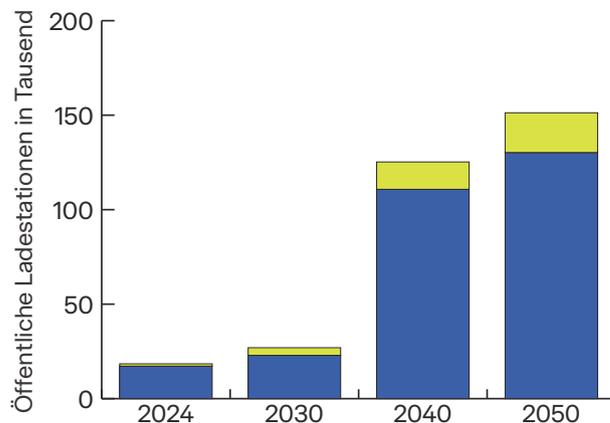
glauben, dass die Batterien als Giftmüll enden. Das Recycling wird eine entscheidende Rolle bei der Entschärfung beider Probleme spielen. Die EU strebt an, dass bis 2030 73% der Batterien von Elektroautos recycelt werden. Darüber hinaus gewinnen kobaltarme und völlig kobaltfreie Batterietechnologien an Fahrt und tragen dazu bei, die Nachfrage nach diesem seltenen, giftigen und oft unethisch gewonnenen Metall zu verringern.

Ein letztes, ebenso wichtiges Hindernis für die Einführung von BEVs ist die Sorge um die Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur, die wir im Folgenden näher untersuchen.

Energie tanken: Infrastruktur für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge

Die Verfügbarkeit von Ladestationen ist eine wichtige Voraussetzung für Verbraucherinnen und Verbraucher, die den Kauf eines batteriebetriebenen Elektrofahrzeugs erwägen.





■ Öffentliche Schnellladestationen (>100 kW)
■ Öffentliche Ladestationen (7-100 kW)

Abbildung 3: Bedarf an öffentlicher Ladeinfrastruktur in der Schweiz

Die Mindestanzahl an öffentlichen Ladestationen, die benötigt wird, um das erforderliche Wachstum der batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge in unserem Netto-Null-Szenario zu bewältigen. Zusätzlich zu den öffentlichen Ladestationen benötigen wir bis 2050 über 1,6 Millionen Ladegeräte im privaten Bereich, um das Aufladen zu Hause zu ermöglichen. Das derzeitige öffentliche Standard-Ladegerät hat eine Leistung von 22 kW.

(Quelle: PSI Labor für Energiesystemanalysen)

Insgesamt geben zwei von drei Nicht-BEV-Besitzern den Zugang zur Ladeinfrastruktur als Haupthindernis für den Kauf eines BEV an.

Das Laden zu Hause spielt dabei eine grosse Rolle. Unter den ersten BEV-Besitzern installierte die Mehrheit eine private Ladestation. Heute hat sich der Zugang zu öffentlichen Ladestationen verbessert und der Anteil der Schweizer BEV-Besitzer mit privaten Ladestationen ist auf nur noch ein Drittel gesunken. Das Aufladen zu Hause mit einer privaten Ladestation ist bequem und kostengünstig, da die Stromtarife für Privathaushalte keine Gebühren für öffentliche Ladestationen beinhalten. Unsere Studie zeigt, dass die Bereitstellung von privaten oder öffentlichen Ladestationen in Wohngebieten, die nachts benutzt werden können, dazu beitragen kann, die BEV-Durchdringung zwischen 2040 und 2050 um 12 bis 20% zu erhöhen.

Neben dem Laden zu Hause ist auch das Laden unterwegs und tagsüber wichtig. Bei Autofahrern, die nicht zu Hause aufladen, ist die Akzeptanz von BEVs um 24% höher, wenn die öffentliche Infrastruktur in Nichtwohngebieten deutlich verbessert wird. Dazu gehören zum Beispiel Ladestationen in öffentlichen Parkhäusern, auf Parkplätzen von Einkaufszentren und an Autobahnen.

Abbildung 3 zeigt, dass die Anzahl der Ladestationen in der Schweiz deutlich erhöht werden muss, um die Einführung von BEVs zu unterstützen. Unserer Analyse zufolge benötigt jedes BEV eine Gesamtladepazität von etwa 5 kW, aufgeteilt in etwa 2 BEVs pro privatem Ladegerät und zwischen 25 und 30 BEVs pro öffentlichem Ladegerät. Das bedeutet, dass die Schweiz bis 2050 mehr als achtmal so viele reguläre öffentliche Ladestationen und sechzehnmal so viele öffentliche Schnellladestationen wie heute benötigen wird.

Die BEV-Ladeinfrastruktur muss an mehreren Fronten ausgebaut werden. Die Installation von Ladestationen für Privathaushalte ist nach wie vor ein Problem, zumal die meisten Menschen in der Schweiz ihre Wohnungen mieten, und Mieterinnen und Mieter in der Schweiz nicht das Recht haben, BEV-Ladestationen in ihren Gebäuden zu installieren. Öffentliche Ladestationen in Wohngebieten können dieses Problem entschärfen. Eine Kombination aus öffentlichen Ladestationen für unterwegs, in Gewerbegebieten und am Arbeitsplatz kann ebenfalls dazu beitragen, die Lücke zu schliessen.

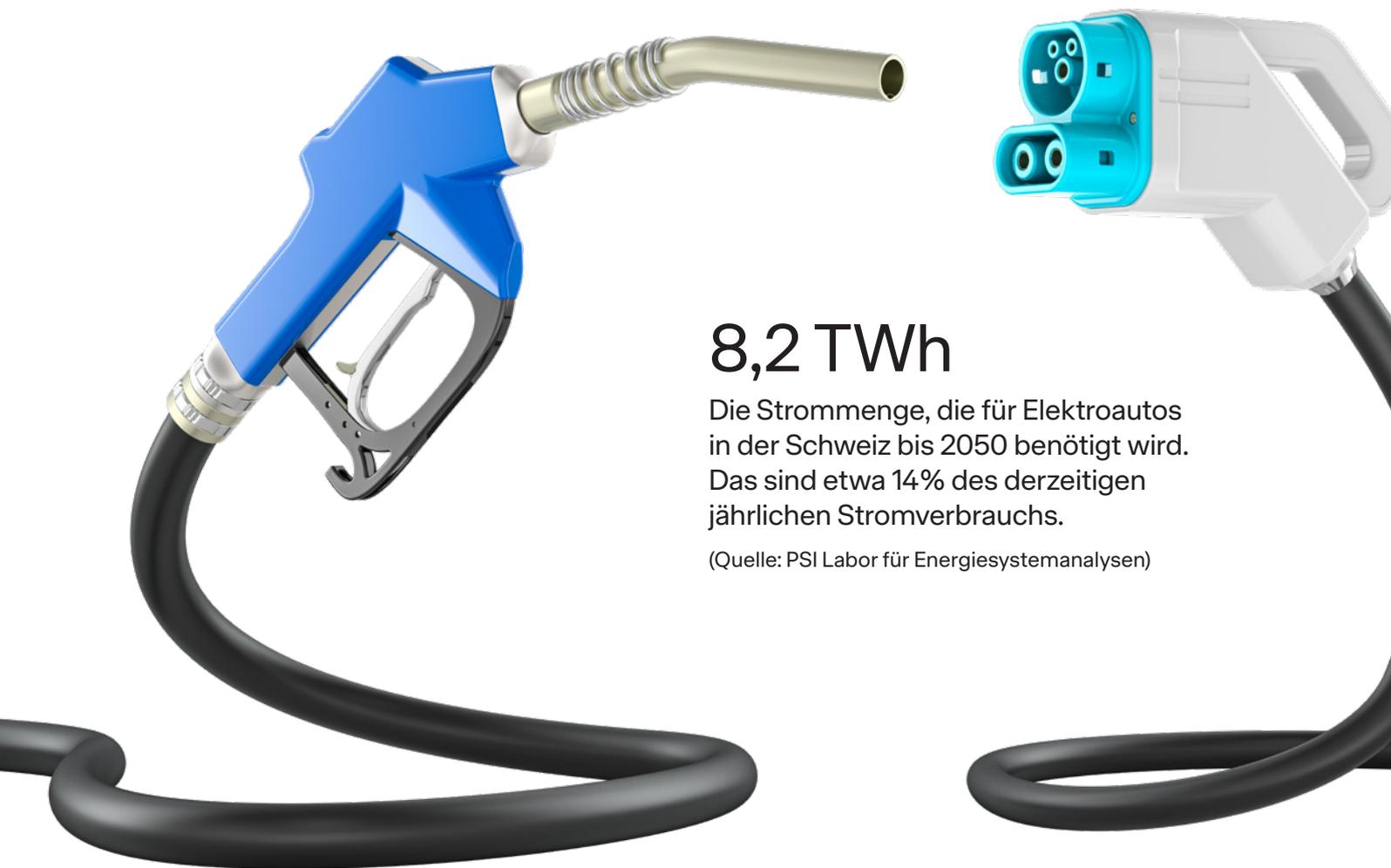
Diese Ergebnisse unterstreichen, wie wichtig die Ladeinfrastruktur ist, um mehr BEVs auf die Strasse zu bekommen. Wie wir noch sehen werden, könnte eine unzureichende Ladeinfrastruktur für BEVs zu kostspieligen Ineffizienzen führen.

Elektrische Batterien, Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe?

Batterie- oder Wasserstoffautos? Oder konventionelle Verbrennungsmotoren, die mit synthetischen Kraftstoffen betrieben werden, sogenannten <E-Fuels>? Was ist für den zukünftigen individuellen Strassenverkehr am sinnvollsten, um die Klimaziele zu erreichen?

Unsere Forschung zeigt: Wenn wir den Transportsektor so effizient und wirtschaftlich wie möglich dekarbonisieren wollen, sind BEVs die beste Option für Privatfahrzeuge. BEVs sind die energieeffizienteste, kostengünstigste und einsatzbereiteste der oben genannten Optionen. Darüber hinaus werden Wasserstoff und E-Kraftstoffe dringend für andere Zwecke als Personenwagen benötigt.

Schauen wir uns zunächst die Effizienz an. BEVs sind etwa 60 % effizient, betrachtet man die Energie, die sie von der Primärenergiegewinnung bis zum Rad verbrauchen. Wasserstoffautos haben einen Wirkungsgrad von etwa 25%, wenn man die Energie berücksichtigt, die bei der Wasserstoffproduktion durch Elektrolyse und beim Betrieb des Fahrzeugs als nicht nutzbare Wärme verloren geht. E-Kraftstoffe



8,2 TWh

Die Strommenge, die für Elektroautos in der Schweiz bis 2050 benötigt wird. Das sind etwa 14% des derzeitigen jährlichen Stromverbrauchs.

(Quelle: PSI Labor für Energiesystemanalysen)



werden aus Kohlendioxid, Wasser und Strom aus erneuerbaren Quellen hergestellt. Die mit E-Kraftstoffen betriebenen ICEVs erreichen nur einen Wirkungsgrad von etwa 10 %, was hauptsächlich auf die inhärente Ineffizienz von Verbrennungsmotoren und den energieintensiven Prozess der E-Kraftstoffherstellung zurückzuführen ist. Das bedeutet, dass ein Wasserstoffauto für die gleiche Strecke zweieinhalbmal so viel Strom und ein E-Fuel-Auto etwa sechsmal so viel Strom benötigt wie ein BEV. Die Verbraucher würden den höheren Strombedarf beim Tanken bemerken, da Wasserstoff und E-Fuels deutlich teurer sind als Strom für das direkte Aufladen der Batterien.

Wenn es um die Verringerung der Treibhausgasemissionen geht, ist die Zeit von entscheidender Bedeutung. BEVs sind bereits heute eine praktikable Alternative zu Benzin- und Dieselfahrzeugen. Dasselbe kann man von Wasserstoff-Brennstoffzellenautos oder E-Fuels nicht sagen: In der Schweiz ist nur ein Modell eines Wasserstoff-Brennstoffzellenautos verfügbar, die Zahl der Wasserstofftankstellen beträgt derzeit 17, und E-Fuels werden noch Jahre brauchen, um marktfähig zu werden.

Sowohl für Wasserstoff als auch für E-Fuels gibt es weitaus sinnvollere Anwendungen als die Betankung von Personenkraftwagen. In bestimmten Industriezweigen und in der Düngemittelproduktion gibt es

keine kohlenstoffarme Alternative zu Wasserstoff. E-Fuels werden nur in begrenzten Mengen zur Verfügung stehen und in der Luft- und Schifffahrt benötigt, also in Anwendungsfällen, in denen batterieelektrische Antriebe aufgrund des Gewichts der Batterien nicht machbar sind.

Bestimmte Einschränkungen könnten jedoch zu einer anderen Wahl der Technologie führen. Wenn die Autofahrerinnen und Autofahrer weiterhin Schwierigkeiten beim Zugang zur Ladeinfrastruktur haben, könnte der Bedarf an Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeugen steigen. Im Vergleich zum Umstieg auf BEVs wäre dies teurer und würde zusätzlichen Strom für die Wasserstoffproduktion erfordern. In Ländern mit einem viel geringeren Elektrifizierungsgrad und weniger zuverlässigen Stromnetzen könnte die Elektrifizierung der individuellen Mobilität unverhältnismässig teuer sein. Das bedeutet, dass der Ersatz von Benzin und Diesel durch E-Kraftstoffe in ICEVs eine wirtschaftlichere Option sein könnte. Dies wäre zwar insgesamt weniger effizient, aber aus der Perspektive des gesamten Energiesystems möglicherweise günstiger. Dies ist nur ein Beispiel dafür, dass die Mobilität im grösseren Kontext der Energiewende betrachtet werden muss, wie wir im Folgenden sehen werden.

Das Gesamtbild: systemische Auswirkungen und externe Kosten

Die Verschiebungen im Transportsektor werden zu erheblichen Veränderungen im gesamten Energiesystem führen.



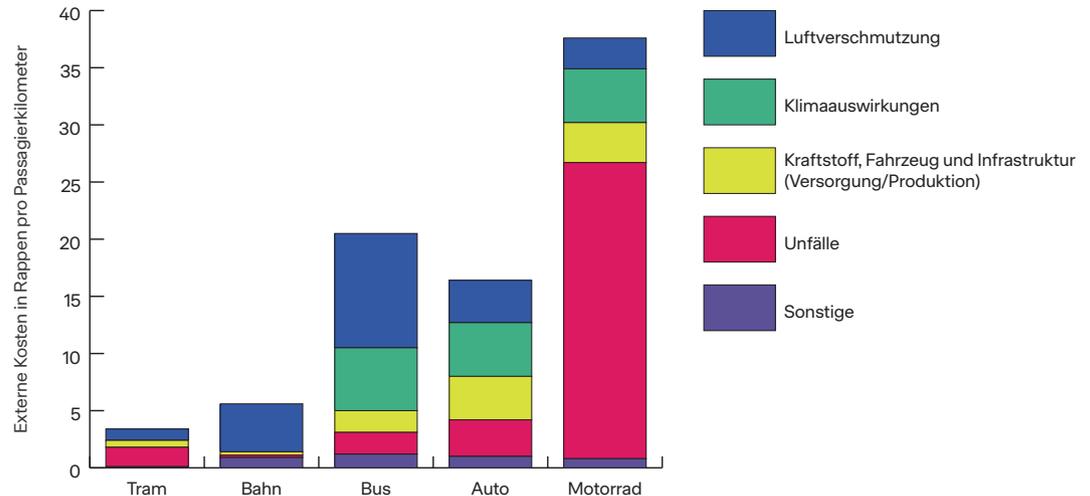
Eine dieser Veränderungen wird ein Anstieg der Stromnachfrage sein. Unsere Arbeit zeigt, dass die Elektroautos, die bis 2050 in der Schweiz unterwegs sind, etwa 8,2 TWh Strom pro Jahr zusätzlich verbrauchen werden. Das entspricht etwa einem Siebtel des heutigen Verbrauchs. Ein Teil dieser Nachfragerhöhung wird in anderen Bereichen ausgeglichen werden, etwa durch besser isolierte Gebäude. Insgesamt wird die Stromnachfrage jedoch steigen, was zum Teil auf die Elektrofahrzeuge zurückzuführen ist.

Wir schätzen, dass der jährliche Strombedarf der Schweiz bis 2050 von 60 auf 71 TWh steigen wird. Dieser Gesamtanstieg ist zwar nicht dramatisch, wird aber durch den geplanten Ausstieg aus der Kernenergie erschwert, die heute etwa 30% des Stroms in der Schweiz liefert. Der Ersatz dieser Kernkraftkapazität durch andere kohlenstoffarme Stromquellen stellt eine grössere Herausforderung dar als die Deckung der zusätzlichen Nachfrage durch BEVs, die vergleichsweise bescheiden bleibt. Um beiden Aspekten gerecht zu werden, muss die Schweiz den Ausbau der Photovoltaikkapazitäten in erheblichem Tempo fortsetzen und gleichzeitig andere kohlenstoffarme Energiequellen wie neue Wasserkraft, Windenergie und Müllverbrennung mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung in Betracht ziehen.

Abbildung 4: Externe Kosten der Personenbeförderung am Boden

Diese Grafik zeigt die externen Kosten ausgewählter Verkehrsmittel in der Schweiz, berechnet in Rappen pro Personenkilometer. Die vergleichsweise hohen externen Kosten von Bussen (hier: mit Dieselmotor) ergeben sich vor allem durch die geringe Auslastung (16% im Schnitt).

(Quelle: Ecoplan / INFRAS für ARE)



Die erfolgreiche Integration dieser kohlenstoffarmen Stromquellen wird zusätzliche Investitionen in stärkere Netze, höhere Speicherkapazitäten und Reservekraftwerke erfordern. Unser Analysemodell enthält keine detaillierte Darstellung des Stromnetzes. Daher ist zu beachten, dass die Integration zusätzlicher erneuerbarer Energien und Elektrofahrzeuge einige Einschränkungen der Netzinfrastruktur mit sich bringen kann, die noch nicht vollständig bewertet wurden.

Der Aufbau eines widerstandsfähigen und kohlenstoffarmen Elektrizitätssystems wird nicht nur von der inländischen Infrastruktur abhängen, sondern auch von der Fähigkeit der Schweiz, ihre Energiewende mit den anderen Ländern Europas, insbesondere den Nachbarländern, zu koordinieren. Eine stärkere Marktintegration würde die Versorgungssicherheit erhöhen und den Zugang zu einem breiteren und diversifizierteren Energiemarkt ermöglichen.

Wie viel wird es kosten?

Wir schätzen, dass die Energiewende die Einwohner der Schweiz bis 2050 durchschnittlich 530 Schweizer Franken pro Jahr kosten wird. Allerdings gibt es dabei eine grosse Bandbreite. Abhängig von Faktoren wie der nationalen Politik

in Bezug auf Energieimporte und der Bereitschaft der Verbraucher, sich auf neue Technologien einzulassen, deuten unsere Untersuchungen darauf hin, dass die Energiewende die Schweizer Bürgerinnen und Bürger zwischen 320 und 1390 Schweizer Franken pro Jahr kosten könnte. Darin enthalten sind Ausgaben im Transport- und Gebäudesektor sowie der weitere Ausbau der kohlenstoffarmen Stromversorgung.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass Klimaschutz höchstwahrscheinlich langfristig viel billiger ist als die Anpassung an den Klimawandel. Mit anderen Worten, diese Kosten sind fast sicher niedriger als die Kosten des «Nichtstuns». Die externen Kosten der Verbrennung fossiler Brennstoffe, das heisst die Kosten, die wir nicht direkt, sondern in Form von Schäden an der Umwelt und der menschlichen Gesundheit bezahlen, werden immer deutlicher.

Im Mobilitätssektor tragen die Treibhausgasemissionen am meisten zu diesen externen Kosten bei, gefolgt von den Luftschadstoffen. Insgesamt verursacht der Autoverkehr in der Schweiz externe Kosten in Höhe von fast 16 Milliarden Schweizer Franken pro Jahr, wie im jüngsten Bericht des Bundesamts für Raumentwicklung ARE über die externen Kosten des Verkehrs geschätzt wird (Ecoplan / INFRAS für ARE). Ein Vergleich

der verschiedenen Verkehrsmittel zeigt, dass die externen Kosten für elektrifizierte öffentliche Verkehrsmittel im Vergleich zu Personenwagen, aber auch zu öffentlichen Diesel-Bussen, wesentlich geringer sind. Die geschätzten externen Kosten von Autos belaufen sich auf über 16 Rappen pro Personenkilometer, während die Kosten von Zügen unter 6 Rappen pro Personenkilometer betragen. Abbildung 4 zeigt eine Aufschlüsselung dieser Kosten.

Schliesslich erlaubt die Reduktion der Treibhausgasemissionen im Bereich der individuellen Mobilität der Schweiz, kostspieligere Massnahmen zur Erreichung des Netto-Null-Ziels zu vermeiden, wie z.B. teure neue Technologien für den Güterverkehr, Renovierungen von schwierig zu sanierenden Gebäuden und zusätzliche Kohlenstoffabscheidung und -speicherung. Eine Möglichkeit, die externen Kosten im Bereich der persönlichen Mobilität zu senken, wäre die weitere Elektrifizierung des öffentlichen Verkehrs und parallel dazu die Mobilisierung einer Verkehrsverlagerung vom Auto auf das Fahrrad, das Gehen und den öffentlichen Verkehr. Der nächste Abschnitt befasst sich damit, wie dies erreicht werden könnte.

Persönliche Mobilität neu denken: Umstieg vom Auto auf öffentliche Verkehrsmittel

Das Erreichen von Netto-Null-Emissionen im Landverkehr erfordert eine erhebliche Verkehrsverlagerung – einen Wechsel vom Auto zu sogenannten «sanften Mobilitätsoptionen» oder zum öffentlichen Nahverkehr.



Obwohl Elektrofahrzeuge keine direkten Treibhausgasemissionen haben, sind sie mit ihrer Herstellung und ihrem Betrieb dennoch erhebliche Emissionen verbunden, wie Abbildung 5 zeigt. Um den gesamten Lebenszyklus von BEVs vollständig zu dekarbonisieren, werden Technologien zur Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS) und zur Entfernung von Kohlendioxid (CDR) benötigt. Heute sind diese Technologien jedoch noch unausgereift und teuer.

Sanfte Mobilitätsoptionen, einschliesslich E-Bikes, sind viel günstiger als Autos und können für kürzere Fahrten genutzt werden, um die Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Der öffentliche Nahverkehr ist eine kohlenstoffärmere Option für Strecken und Bedingungen, für die ein Fahrrad nicht ausreicht.

Um diese Verlagerung zu fördern, ist es wichtig, die Faktoren zu verstehen, die neben den Kosten die individuelle Verkehrsmittelwahl

beeinflussen. Dazu gehören Komfort, Gewohnheiten und vor allem die Reisezeit. Nichtmonetäre Faktoren sind in der Tat die Hauptgründe für die Wahl des Verkehrsmittels. Viele Menschen ziehen es vor, mit dem Auto zu fahren, weil sie es bequemer finden als öffentliche Verkehrsmittel. In der Schweiz ist für Autofahrerinnen und Autofahrer in der Regel die Reisezeit besonders entscheidend. Die Schweizerinnen und Schweizer wählen ihr Verkehrsmittel etwa viermal häufiger nach der Reisezeit als nach den Kosten aus.

Eine unserer Analysen integriert die Reisedauer und die Bewertung der Verbraucher – mit anderen Worten, wie lang ihre Fahrten sind und wie sehr sie sich wünschen, sie wären kürzer. Sie zeigt, dass eine Kombination aus etwas schnelleren öffentlichen Verkehrsmitteln

und leicht verlangsamten Autos auf mittleren und langen Strecken zwischen 2030 und 2050 eine um 5 bis 10 % höhere ÖV-Nachfrage fördern könnte. Der ÖV kann attraktiver gemacht werden, indem die Effizienz, die Frequenz und die digitale Integration (einschliesslich einer Vielzahl von Mobilitäts-Apps und -Diensten) verbessert werden. Eine Verkürzung der Fahrzeiten des öffentlichen Nahverkehrs in Kombination mit gezielten Massnahmen für unterschiedliche Reisedrecken könnte die Nutzung des öffentlichen Nahverkehrs fördern.

Der regulatorische Rahmen muss die geografischen und sozioökonomischen Unterschiede zwischen den Reisenden berücksichtigen, da diese Faktoren die Reaktionen auf Änderungen der Reisezeiten und -kosten beeinflussen.

Massnahmen zur Senkung der Fahrtkosten für den öffentlichen Nahverkehr, insbesondere für einkommensschwache Verbraucher mit einer höheren Preissensibilität, könnten dazu beitragen, diesen Personen den Umstieg auf andere Verkehrsträger zu erleichtern.

Schliesslich hätte diese Verkehrsverlagerung über die geringeren CO₂-Emissionen hinaus mehrere bedeutende Vorteile, wie zum Beispiel einen gesünderen Lebensstil und eine effizientere Nutzung des städtischen Raums. Wie wir im vorigen Artikel gesehen haben, sind die externen Kosten des Individualverkehrs für unsere Gesundheit und das Klima erheblich.

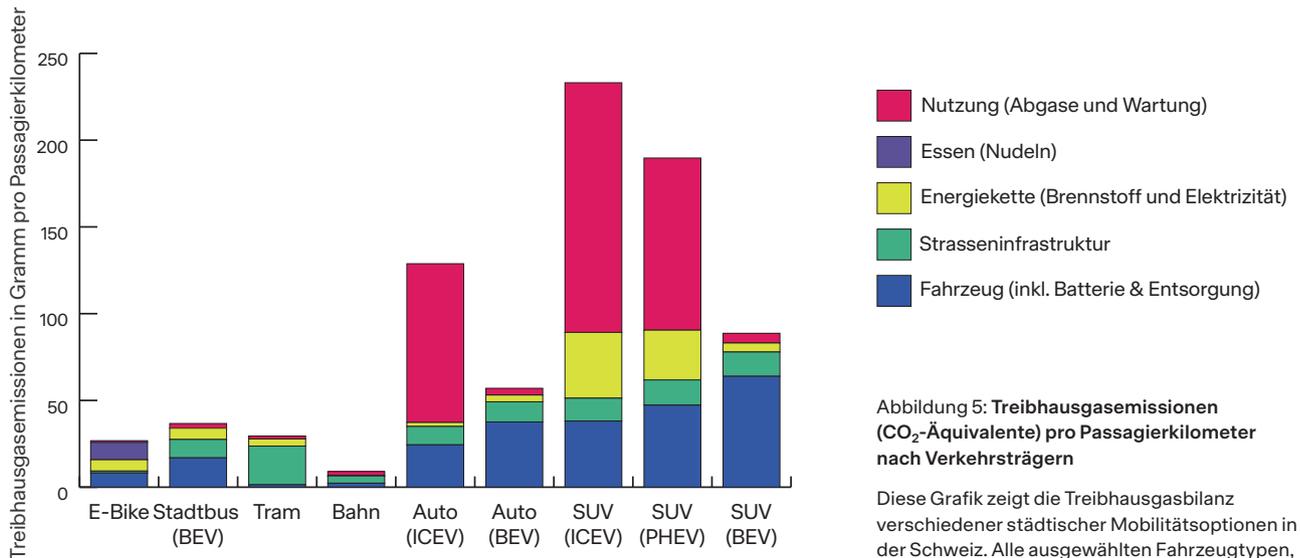


Abbildung 5: Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalente) pro Passagierkilometer nach Verkehrsträgern

Diese Grafik zeigt die Treibhausgasbilanz verschiedener städtischer Mobilitätsoptionen in der Schweiz. Alle ausgewählten Fahrzeugtypen, einschliesslich Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (ICEVs), batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEVs) und Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEVs), verursachen höhere Treibhausgasemissionen als öffentliche Verkehrsmittel. «Auto» bezieht sich auf einen Mittelklassewagen. BEVs verursachen während ihrer Lebensdauer geringere Treibhausgasemissionen als Fahrzeuge mit Benzin- oder Dieselantrieb, aber die Emissionen sind immer noch beträchtlich, insbesondere bei grossen BEV-SUVs. Der Auslastungsgrad des Stadtbusses und des Trams liegt bei 16% bzw. 29%, was dem Schweizer Durchschnitt entspricht.

(Quelle: PSI Labor für Energiesystemanalysen)

Wie viele Treibhausgasemissionen kann ich mit einem batteriebetriebenen Elektroauto einsparen?

Schauen Sie sich unseren [Calculator](https://calculator.psi.ch) an oder laden Sie eine Kopie des Tabellenkalkulationsmodells von [Mobitool](https://mobitool.ch) herunter, um den CO₂-Fussabdruck verschiedener Fahrzeuge zu vergleichen, die Auswirkungen des Aufladens von Elektrofahrzeugen mit Photovoltaikstrom von Ihrem eigenen Dach zu sehen und die Umweltvorteile der Wahl eines kleineren Autos zu berechnen. Sie können das Modell auch verwenden, um andere Belastungen als Treibhausgasemissionen zu überprüfen.

calculator: <https://calculator.psi.ch>

Mobitool: <https://mobitool.ch>

«Unser Wunsch an die Leute ist: Werdet multimodaler.»

Ein Gespräch mit Regina Witter und Peter Schmid

Als allererste Frage: Was für ein Transportmittel haben Sie als Letztes benutzt?

Regina Witter: Ich bin mit dem Zug zur Arbeit gefahren. Ich arbeite in Bern und wohne in Neuchâtel direkt beim Bahnhof. Ich würde aber lieber noch näher am Arbeitsort wohnen und mit dem Velo oder noch lieber zu Fuss zur Arbeit kommen.

Peter Schmid: Ich bin heute mit meinem voll elektrischen Geschäftsauto ins Büro gefahren. Ich könnte den Arbeitsweg auch mit dem Fahrrad bewältigen, es liegt aber in der Natur der Sache, dass ich als Elektromobilitätsspezialist mit dem Auto fahre.

RW: Klar ist die Elektromobilität, wenn es um die Dekarbonisierung des Verkehrs geht, ein Segen. Aber es besteht zugleich ein grosses Platzproblem, insbesondere in Städten, das dadurch noch nicht gelöst ist. Mit der wachsenden Bevölkerung in der Schweiz brauchen wir flächeneffiziente Lösungen wie den öffentlichen Verkehr.

Und wir brauchen Schnittstellen zwischen verschiedenen Transportmitteln. Wir beschäftigen uns viel mit sogenannten "Verkehrsdrehscheiben". Die Idee dahinter ist, verschiedene Transportmittel besser miteinander zu verknüpfen. Unser Wunsch an die Leute ist immer, werdet multimodaler und versucht jeweils diejenigen Transportmittel zu nutzen, die am besten geeignet ist. Aber wir Menschen sind ein wenig bequem. Wenn wir einmal im Auto sitzen, bleiben

wir meistens bis zum Zielort im Auto. Wir haben alle unsere Verhaltensweisen und verändern sie meistens nur schrittweise.

PS: Ich glaube auch, dass es in städtischen Agglomerationen eng für die individualisierte Mobilität wird. Vielleicht gibt es Alternativen dazu, sodass nicht mehr jeder selbst mit seinem eigenen Auto fährt, sondern etwa Mitfahrgelegenheiten oder autonom fahrende Services genutzt werden. Ich glaube, das wird noch einiges auf uns zukommen. Wenn wir vielleicht noch zwei Schritte zurückrudern: Mobilität ist ein Grundbedürfnis der Menschheit, und Mobilität wird insgesamt nie ganz klimaefizient oder klimafreundlich sein. Die Frage ist, was sind die besten Kompromisse? Das Elektrofahrzeug ist einfach eine bessere Alternative als der Verbrennungsmotor. Ist das Problem damit gelöst? Nein, es ist aber ein erster Schritt in die richtige Richtung.

Jetzt kamen schon ein paar Hindernisse zur Sprache, die dem Umstieg zur nachhaltigen Mobilität im Wege stehen. Sehen Sie noch andere Hindernisse, die aus dem Weg geräumt werden müssten, wenn es darum geht, auf Elektroautos oder den öffentlichen Verkehr umzusteigen?

PS: Zurzeit ist eines der grossen Themen die Ladeinfrastruktur im privaten Bereich. Leute, die in Mietwohnungen wohnen, haben oft keine Möglichkeit ihr Elektroauto dort zu laden. Das gilt auch für Laternenparkierer.

Was auch nicht hilft, ist das aktuelle Produktangebot. Es sind eher Premiumfahrzeuge, die sind tendenziell in der Anschaffung teurer. Günstigere Elektromodelle werden aber bald lanciert.

RW: 2018 hat der Bund die sogenannte «Roadmap Elektro-Mobilität» ins Leben gerufen, die heute 74 Organisationen aus allen Staatsebenen und dem Privatsektor umfasst. Alle sind sich einig, dass es überall die Möglichkeit geben soll, sein Auto zu laden – am Arbeitsort, unterwegs, aber vor allem auch im privaten Raum. Mieterinnen und Mieter in Mehrfamiliengebäuden haben es nicht einfach. Dazu hören wir immer von den Städten, dass es wegen des Platzmangels eine Herausforderung ist, Ladestationen im öffentlichen Raum zu installieren. Platz ist eine grundsätzliche Herausforderung, insbesondere beim privaten motorisierten Verkehr. Mehr Platz für Strassen und Parkplätze bedeutet weniger Platz für Menschen, die zu Fuss oder mit dem Fahrrad unterwegs sind, sowie für Begrünung. Es ist eine Interessensabwägung: Wie wird der knappe Platz in den Städten am Besten genutzt?

PS: Ich glaube, diese Verkehrsträger müssen intelligent zusammen vernetzt werden und zusammenspielen – dann sind spannende Modelle möglich. Es braucht Modellregionen, wo neue Ideen auf kleinerer Ebene ausprobiert werden können. Bei der AMAG bieten wir Firmen oder Wohnungsüberbauungen Mobilitätslösungen mit einer Auswahl an verschiedenen Fahrzeugen, wie Elektroautos, Fahrrädern oder Lastenfahrrädern,

an. Die bringen einen zur nächsten Einbindungsstufe des ÖV. Nach einer Evaluierung können Modellregionen erweitert werden.

Wie sehen Sie die Situation in unterschiedlichen europäischen Ländern, wie zum Beispiel in Norwegen oder in Deutschland? Was können wir von anderen Ländern lernen?

RW: In Norwegen gibt es starke Steuerergünstigungen für Elektrofahrzeuge. In der Schweiz haben wir aber eine ganz andere Ausgangslage mit dem hervorragenden öffentlichen Verkehrssystem. Kaum ein anderes europäisches Land hat so komfortable und pünktliche Züge.

PS: Norwegen ist ein Sonderfall. Dort wurde mit massiven Staatssubventionen die Elektromobilität vorangetrieben und es wird heute als das Beispielland genannt, wohl wissend, dass das in anderen Ländern nicht funktioniert.

Ein schlechteres Beispiel ist leider Deutschland. Deutschland hat massiv in die Elektromobilität investiert, mit Subventionen von bis zu 9000 Euro pro Elektrofahrzeug. Was ist passiert? Die Elektrofahrzeuge wurden zuerst in Deutschland zugelassen, die Subventionen dafür bezogen und die Elektrofahrzeuge wurden daraufhin nach Norwegen verkauft.

In Deutschland wurden auch Plug-in Hybride subventioniert. Firmen waren motiviert auf Plug-in Hybride umzustellen und haben die Subventionen abgeholt. Schlussendlich sind die wenigsten elektrisch gefahren und dann ist es natürlich sinnlos, ein Plug-in Hybrid Fahrzeug zu kaufen.

Es muss eine natürliche und marktgetriebene Entwicklung im Bereich der Elektromobilität geben. Was in der

Schweiz etwas schade ist, ist die fehlende Planbarkeit, wie zum Beispiel, dass seit dem Jahr 2024 Elektrofahrzeuge plötzlich nicht mehr von der Importsteuer befreit sind. Damit sendet man falsche Signale an die Industrie und an die Konsumenten. Das Gleiche gilt für die Diskussion des Verbrennerverbots 2035, die Interessenten an Elektroautos verunsichert.

Wie bringt man die Konsumenten am besten dazu, mitzuspielen?

PS: Wir wissen aus verschiedenen Studien, dass 83% jener Konsumenten, die ein elektrisches Auto fahren, nicht mehr zurück auf einen Verbrenner wechseln würden. Leider gibt es aber immer noch viel Fehlinformation zur Elektromobilität. Das ist auch der Ansatz, den wir verfolgen – die Leute wirklich aufklären: Ist ein Elektroauto ökologischer als ein Verbrennungsmotor? Was passiert mit den Batterien, wenn ich sie nicht mehr brauche? Da ist noch viel Aufklärung nötig.

Wie Herr Schmid erwähnt hat, laufen in der EU die Diskussionen über das Aus von Verbrenner-Neuzulassungen. Inwieweit sind diese Rahmenbedingungen für die Schweiz ausschlaggebend?

PS: Bis 2035 wird der Grossteil der angebotenen Fahrzeuge elektrisch sein. Soll mit staatlichen Regulierungen hart eingegriffen werden? Im Moment sieht es so aus, dass der Markt sich selbst reguliert. VW hat entschieden, dass die Marke elektrisch wird. Mercedes ebenso. BMW ist möglicherweise noch etwas technologieoffener. Ich glaube jedoch, der Markt wird dies regulieren, und da muss vermutlich von Seiten der Schweiz gar nicht gross eingegriffen werden.



Regina Witter

ist seit 20 Jahren als Verkehrs- und Raumplanerin in der Schweiz und im Ausland tätig. Seit 2019 arbeitet sie als stellvertretende Leiterin des Programms Agglomerationsverkehr im Bundesamt für Raumentwicklung (ARE). Mit dem Programm Agglomerationsverkehr unterstützt der Bund Kantone und Gemeinden bei der Finanzierung von Verkehrsinfrastrukturen, die mit der Siedlungsentwicklung abgestimmt sind.



Peter Schmid

ist seit über 30 Jahren in der Automobilindustrie in den Bereichen Marketing, Verkauf und Beratung in der Schweiz, Deutschland und den USA tätig. Er leitet das Kompetenz- und Beratungszentrum für Elektromobilität und neue Mobilität der AMAG im Circle am Flughafen Zürich.

RW: Grundsätzlich funktioniert es in der Schweiz gut, den Leuten zu erklären, was die positiven Anreize sind. Ein attraktives ÖV-Angebot bringt die Leute auch dazu den ÖV zu nutzen. Es geht vielleicht nicht ganz so schnell wie mit restriktiven Massnahmen, aber es ist nachhaltiger, weil es die Leute mittragen.

Muss der Autoverkehr in der Schweiz abnehmen oder ist es kein Problem, wenn er weiterhin wächst?

RW: Aufgrund des Platzbedarfes ist es sicherlich nicht problemlos. Schon heute beträgt die Verkehrsfläche ein Drittel der gesamten Siedlungsfläche. In den urbanen Räumen kommen wir an die Grenzen, und es ist deswegen ganz wichtig, Alternativen zu finden. Da ist es schon besorgniserregend, dass sich die Autoindustrie mehr in die Richtung von grossen SUVs, die viel Platz brauchen, entwickelt. Das geht gegen die Idee einer effizienten Flächennutzung. Ein bisschen helfen würde schon, wenn mehr Personen gemeinsam im Auto fahren würden. Heute liegt der durchschnittliche Besetzungsgrad im Arbeitsverkehr bei nur 1,09 Personen pro Auto und Weg, das ist sehr wenig.

Ich glaube, die entscheidende Lösung ist die Abstimmung von Verkehr und Raumentwicklung. Die Raumplanung kann vorgeben, wo und wieviel gebaut werden sollte, aber die Umsetzung liegt fast immer bei den Privaten. Es muss darauf hinauslaufen, dass es auch wirtschaftliche Interessen gibt, in den Städten in guter Qualität zu verdichten, damit die Leute auch wirklich gerne mit Velo und ÖV unterwegs sind und es nicht als Problem ansehen.

Es geht nicht darum, das Auto zu diabolisieren. Die Idee ist, je nach Raum zu schauen, welches Transportmittel

das geeignetste ist und vielleicht auch das schnellste. Am schnellsten im urbanen Raum ist das Velo – bis zu fünf Kilometer auf jeden Fall, und mit dem e-Velo sogar bis zu 15 Kilometer. Das wissen die meisten Leute vermutlich gar nicht.

Denken Sie, dass die derzeit umgesetzten oder angekündigten Massnahmen insgesamt ausreichen werden, um die Klimaziele im Verkehrsbereich zu erreichen?

RW: Aus meiner Sicht läuft es ein bisschen zu langsam. Wenn jeder seinen Schritt machen würde, jeder mal ab und zu den ÖV oder das Velo nehmen würde, dann wäre schon sehr, sehr viel geschafft.

PS: Ich sehe es ähnlich. Wir liegen wahrscheinlich ein bisschen hinter unserem Plan, aber ich denke nicht, dass man jetzt etwas ändern sollte oder kurzfristig ändern kann. Wenn es dann soweit ist, passen sich die Leute in der Schweiz an. Es ist zwar ein langsamer Prozess, aber in die richtige Richtung und damit deutlich nachhaltiger.

**Also in anderen Worten:
Das Zuckerbrot wird reichen und es braucht nicht die Peitsche.**

RW: Gewisse Regeln sind ja gesetzt. Fast alle Städte haben mittlerweile ein Parkraummanagement, es kann nicht einfach überall kostenfrei geparkt werden. Auch ein eigenes Auto zu besitzen ist in Städten nicht günstig, und es wird immer teurer. Sagen wir es so: Es braucht selbstverständlich klare Regeln, damit das Zusammenleben in der Gesellschaft funktioniert. Das betrifft

auch die Bereiche Verkehr und Raum. Trotzdem leben wir nach wie vor in einer Demokratie. Ich glaube, dass Zwang in der Schweiz nicht funktioniert und eher das Gegenteil von dem bewirkt, was man eigentlich will.

Herr Schmid, wenn Sie einen Wunsch für den Verkehrsbereich an die Schweizer Bundesverwaltung hätten, was wäre das?

PS: Wie ich erwähnt habe, wir brauchen Planbarkeit.

Und Frau Witter, was wünschen Sie sich von der Autoindustrie?

RW: Ich fände es gut, wenn mehr kleinere Autos vermarktet würden. Ich frage mich auch, inwieweit zum Beispiel AMAG sich für Car Sharing einsetzen könnte. Eben nicht nur an jeden Besitzer und jede Besitzerin ein eigenes Auto verkaufen, sondern ein Modell anbieten, in dem mehrere Leute zusammen ein Auto benutzen würden. Wenn sich Car Sharing durchsetzen würde, ginge das aber wohl gegen Ihre Geschäftsidee, mehr Autos zu verkaufen.

PS: Natürlich wäre dies gegen die Ursprungsgeschäftsidee, nur wie heisst der Spruch? Wer nicht mit der Zeit geht, geht mit der Zeit. Da braucht es Alternativen, die neu aufgestellt werden müssen. Jede Transformation braucht eine Lernphase, aber die ist dringend nötig, weil einfach so weiter gehen, wie es in den letzten Jahrzehnten gelaufen ist, geht nicht.



Ausblick: Netto-Null-Emissionen bei der persönlichen Mobilität realisieren

Von den Herstellern bis zu den politischen Entscheidungsträgern, von den Wohnbaugesellschaften bis zu den Kommunalverwaltungen, von den Mietern bis zu den Hauseigentümern – jeder kann dazu beitragen, dass der Übergang zur nachhaltigen Mobilität gelingt.

Eine Einigung darüber, wie die Zukunft aussehen soll, ist der erste Schritt zu koordinierten Massnahmen. In dieser Ausgabe des PSI Energie-Kompass stellen wir Forschungsergebnisse vor und zeigen Herausforderungen auf, die dies belegen:

- Die umfassende Einführung von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen ist der einfachste und effizienteste Weg, um im Mobilitätssektor Netto-Null-Treibhausgasemissionen zu erreichen.
- Die systemischen Auswirkungen und Kosten des Mobilitätswandels sind im Vergleich zu den externen Kosten eines Weiter-wie-bisher-Szenarios überschaubar.

- Die Verlagerung auf andere Verkehrsträger und die zunehmende Multimodalität sind mit ökologischen und wirtschaftlichen Vorteilen verbunden.

Es bleiben offene Fragen. Weitere Forschung muss sich mit Aspekten wie der Akzeptanz neuer Technologien durch die Verbraucher, den Auswirkungen der Digitalisierung, der begrenzten Rationalität und der Verkehrsverlagerung befassen. Viele Aspekte des individuellen Ladeverhaltens bleiben unklar. Auch die Frage, wie genau die Stromversorgung gesichert werden kann, muss noch geklärt werden. Ein weiterer Bereich, der dringend Antworten erfordert, ist das Thema Recyc-

ling und Kreislaufwirtschaft, insbesondere wenn es um BEV-Batterien geht.

Die Förderung der individuellen Mobilität im Rahmen der Energiewende erfordert einen ganzheitlichen Ansatz – einen Ansatz, der Technologie, Infrastruktur und Verhaltensänderungen sorgfältig ausbalanciert, um eine kohlenstoffarme Gesellschaft aufzubauen, die sowohl gerecht als auch widerstandsfähig ist. Im Labor für Energiesystemanalysen bringen wir diesen Ansatz in unsere gesamte Forschung ein, mit dem Ziel, fundierte Entscheidungen zu unterstützen. Wir freuen uns darauf, Ihnen in kommenden Ausgaben weitere ausführliche Analysen vorzustellen.

Impressum

PSI Energie-Kompass — Orientierung für die Energiewende

Ausgabe #1/2025
ISSN 3042-7185

Herausgeber
Paul Scherrer Institut PSI
Forschungsstrasse 111
5232 Villigen PSI

Redaktionsteam
Christian Bauer, Vinh Dang,
Carolyn Kerchof, Russell McKenna
und Kannan Ramachandran

**Zusätzlich beteiligte Forscher
dieser Ausgabe**
Sandro Luh, Romain Sacchi

Redaktionelle Unterstützung
Melissa Catoja, Martina Gröschl

Übersetzung deutsche Ausgabe
Christian Bauer,
Intermundos GmbH (Deutschland)

Übersetzung französische Ausgabe
Romain Sacchi, Catherine Riva

Layout
Monika Blétry

Fotos
Adobe Stock ausser
Seite 3: Paul Scherrer Institut PSI,
Seite 17: ETH Zürich /
Michel Büchel (Regina Witter),
AMAG (Peter Schmid)

**Der PSI Energie-Kompass ist auf
Deutsch, Französisch und Englisch
verfügbar. Sie können ihn hier
kostenlos abonnieren: [www.psi.ch/
de/lea/psi-energie-kompass](http://www.psi.ch/de/lea/psi-energie-kompass)**

Energiesystemanalyse bei PSI
Das Labor für Energiesystemanalysen
(LEA) betreibt ganzheitliche,
analytische Forschung zu verschie-
denen Energietechnologien und
-systemen, einschliesslich nuklearer,
fossiler und erneuerbarer Energien.
Unsere Aufgabe ist es, heraus-
fordernde Forschung zu betreiben,
die die Entscheidungsfindung
unterstützt, Kapazitäten aufbaut, das
Bewusstsein schärft und die Aus-
bildung in der Energiesystemanalyse
fördert.

PSI Labor für Energiesystemanalysen
www.psi.ch/de/lea
lea-info@psi.ch

Folgen Sie uns auf LinkedIn
 [@PSI Laboratory
for Energy Systems
Analysis \(LEA\)](https://www.linkedin.com/company/psi-laboratory-for-energy-systems-analysis-lea)

In dieser Ausgabe zitierte Publikationen

«Modellierung der Verkehrswende» und «Fahrplan in die Elektromobilität: Herausforderungen und Chancen»

Bundesamt für Raumentwicklung ARE. (2022). *Schweizerische Verkehrsperspektiven 2050: Entwicklung Personenverkehr*.

Panos, E., Kannan, R., Hirschberg, S., & Kober, T. (2023). An assessment of energy system transformation pathways to achieve net-zero carbon dioxide emissions in Switzerland. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 157 (18 pp.). DOI: 10.1038/s43247-023-00813-6

«Energie tanken: Infrastruktur für Elektrofahrzeuge»

Luh, S., Kannan, R., McKenna, R., Schmidt, T. J., & Kober, T. (2023). How, where, and when to charge electric vehicles – net-zero energy system implications and policy recommendations. *Environmental Research Communications*, 5(9), 095004 (30 pp.). DOI: 10.1088/2515-7620/acf363

GFS.Bern. TCS-Barometer E-Mobilität 2023. *Alltagstauglichkeit statt Image-Überlegungen: Elektrische Fortbewegung bleibt im Trend*.

«Elektrische Batterien, Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe?»

Sacchi, R., Bauer, C., Cox, B., & Mutel, C. (2022). When, where and how can the electrification of passenger cars reduce greenhouse gas emissions? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112475 (12 pp.). DOI: 10.1016/j.rser.2022.112475

Sacchi, R., Bauer, C., & Cox, B. L. (2021). Does size matter? The influence of size, load factor, range autonomy, and application type on the life cycle assessment of current and future medium- and heavy-duty vehicles. *Environmental Science and Technology*, 55(8), 5224-5235. DOI: 10.1021/acs.est.0c07773

«Das Gesamtbild: systemische Auswirkungen und externe Kosten»

Ecoplan / INFRAS. *Externe Effekte des Verkehrs 2021: Umwelt-, Unfall-, und Gesundheitseffekte des Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehrs*. Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Bern. 2024.

«Persönliche Mobilität neu denken: Umstieg vom Auto auf öffentliche Verkehrsmittel»

Bundesamt für Statistik BFS & Bundesamt für Raumentwicklung ARE. (2021). *Mobilitätsverhalten der Bevölkerung: Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2021*.

Luh, S., Kannan, R., McKenna, R., Schmidt, T. J., & Kober, T. (2024). Quantifying the impact of travel time duration and valuation on modal shift in Swiss passenger transportation. *Applied Energy*, 356, 122412 (26 pp.). DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.122412

Luh, S., Kannan, R., Schmidt, T. J., & Kober, T. (2022). Behavior matters: a systematic review of representing consumer mobility choices in energy models. *Energy Research and Social Science*, 90, 102596 (23 pp.). DOI: 10.1016/j.erss.2022.102596

Forschung gefördert durch: Innosuisse, über die Swiss Competence Centers for Energy Research (SCCER); das Bundesamt für Energie; das Bundesamt für Umwelt; das Volkswagen Group Sustainability Council und der Energy System Integration Plattform des PSI.