

VCS Verkehrs-Club der Schweiz

Szenarien fossilfreier Verkehr

Schlussbericht
Zürich, 29. Oktober 2020

Daniel Sutter, Hans-Jörg Althaus, Brian Cox, Lutz Ickert

Impressum

Szenarien fossilfreier Verkehr

Schlussbericht

Zürich, 29. Oktober 2020

VCS_Szenarien-fossilfreier-Verkehr_INFRAS_Schlussbericht-final-2.docx

Auftraggeber

VCS Verkehrs-Club der Schweiz

Aarberggasse 61, Postfach, 3001 Bern

Projektleitung

Stéphanie Penher, VCS

Autorinnen und Autoren

Daniel Sutter, Hans-Jörg Althaus, Brian Cox, Lutz Ickert

INFRAS, Binzstrasse 23, 8045 Zürich

Tel. +41 44 205 95 95

info@infras.ch

Begleitgruppe

Stéphanie Penher, VCS Zentralsekretariat

Anders Gautschi, VCS Zentralsekretariat

Martin Winder, VCS Zentralsekretariat

Ruedi Blumer, VCS Zentralvorstand

Gabi Petri, VCS Zentralvorstand

Raphael Fuhrer, VCS Zentralvorstand

Inhalt

Zusammenfassung	5
Glossar/Abkürzungen	11
1. Ausgangslage und Ziele	13
2. Systemgrenzen und Vorgehen	15
2.1. Systemgrenzen	15
2.2. Vorgehen	16
2.2.1. Szenario-Entwicklung	17
2.2.2. Grundmodell Wirkungsanalyse	19
2.2.3. Flotten-/Treibstoffmodell	25
2.2.4. Modell Verkehrsnachfrage	25
3. Beschreibung der Szenarien	28
3.1. Referenz	28
3.2. Fossilfrei 2050 (Basisszenario)	29
3.3. Fossilfrei 2040	34
3.4. Fossilfrei 2030	35
4. Ergebnisse Wirkungsanalyse	36
4.1. Referenz	36
4.2. Fossilfrei 2050 (Basisszenario)	39
4.3. Fossilfrei 2040	45
4.3.1. PTL Strategie («2040 PTL»)	45
4.3.2. Zusätzlicher Shift zu alternativen Antrieben («2040 Shift»)	47
4.3.3. Zusätzliche Reduktion Verkehrsnachfrage («2040 MIV minimal»)	50
4.4. Fossilfrei 2030	54
4.5. Weitere Wirkungen	59
4.5.1. Luftschadstoffemissionen	59
4.5.2. Lärm	61
4.5.3. Infrastruktur- und Flächenbedarf	62

4.6.	Wirkungen auf die Energieverfügbarkeit (Sektorkopplung)	64
4.6.1.	Entwicklung Strombedarf in den anderen Sektoren in der Schweiz	66
4.6.2.	Entwicklung Stromproduktion in der Schweiz	70
4.6.3.	Importbedarf für Strom	76
4.6.4.	Importpotenziale für PtL	78
5.	Ergebnisübersicht und Synthese	80
5.1.	Ergebnisübersicht: Vergleich der Szenarien	80
5.2.	Gesamtbeurteilung	89
5.3.	Massnahmen: Übersicht und Konkretisierung	91
5.4.	Schlussfolgerungen	100
Annex		103
Annex 1:	Entwicklung der Effizienz von Benzin und Diesel Personenwagen	103
Annex 2:	Beschreibung der Modellrechnungen	104
Annex 3:	Detailergebnisse Verkehrsnachfrage	142
Literatur		145

Zusammenfassung

Ausgangslage, Ziele und Vorgehen

Der Verkehr verursacht in der Schweiz knapp $\frac{1}{3}$ der gesamten Treibhausgasemissionen. Um die klimapolitischen Ziele zu erreichen ist der Verkehrssektor stark gefordert. Das Ziel des Bundesrats, Netto-Null bis 2050, kann nur erreicht werden, wenn der Verkehr weitestgehend oder ganz fossilfrei wird.

Ziel der vorliegenden Studie ist es deshalb, aufzuzeigen, wie der Landverkehr in der Schweiz fossilfrei werden kann, das heisst wie der Verkehr dann aussehen und wie der Weg dorthin erfolgen könnte. Dazu sollen verschiedene Szenarien definiert und deren Wirkungen analysiert werden. Zudem soll dargestellt werden, mit welchen konkreten Massnahmenpaketen die Ziele erreicht werden können. Die Studie zeigt keine Prognosen auf, sondern skizziert mögliche Szenarien: «Wenn die Mobilität in der Schweiz bis 20X0 fossilfrei werden soll, bräuchte es dazu die Massnahmen xy».

Die vorliegende Arbeit erfolgt modellbasiert. Berücksichtigt werden verkehrliche Wirkungen (Verkehrsnachfrage), Wirkungen auf die Fahrzeugflotte und Treibstoffe (Antriebstechnologie, Energiebedarf) und schliesslich auf den Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen.

Der Fokus der Studie liegt auf dem Strassen- und Schienenverkehr in der Schweiz. Der Luftverkehr sowie Schiffsverkehr werden nicht betrachtet. Untersucht werden der Personen- und der Güterverkehr. Der Schwerpunkt der Analyse liegt auf der Betriebsphase. Die Energiebereitstellung wird im Rahmen einer Vertiefungsanalyse zur Energieverfügbarkeit betrachtet.

Szenarien

Um die Treibhausgasemissionen im Verkehr im notwendigen Ausmass zu verringern und das Ziel eines fossilfreien Verkehrs zu erreichen, stehen folgende Stossrichtungen im Vordergrund:

a. Beeinflussung der Verkehrsnachfrage:

- Verringerung der Verkehrsnachfrage: Verkehrsvermeidung (weniger Fahrten, Tonnage), Verkürzung der Wege, Erhöhung der Auslastung der Fahrzeuge.
- Modale Verlagerung auf Verkehrsträger, die fossilärmer (fossilfrei) und klimaschonender sind (also v.a. vom MIV zum Fuss-, Veloverkehr oder ÖV).

b. Technologische Verbesserungen:

- Einsatz klimaschonenderer Technologien (bzw. fossilfreier Energieträger): Shift von Benzin/Diesel zu Elektroantrieben oder Gas; Shift von fossilen Treibstoffen zu biogenen oder synthetischen Treibstoffen (PtX).
- Erhöhung der Effizienz: Elektrifizierung (Hybride oder Elektrofahrzeuge), Reduktion der Masse, Optimierung von Motoren, Getriebe oder Fahrwiderstand.

Für die Ausarbeitung der Szenarien wird an allen genannten Punkten angesetzt und es werden entsprechende Massnahmen definiert. Folgende Tabelle zeigt die analysierten Szenarien. Es handelt sich um *Zielszenarien*, das heisst die Szenarien sind so ausgearbeitet, dass mit ihnen das Ziel eines fossilfreien Verkehrs bis zu einem bestimmten Zeitpunkt erreicht werden kann.

Szenario-Name	Grundidee
Referenz	Referenzszenario, basierend auf den aktuellsten Verkehrsperspektiven des Bundes (ARE 2016) sowie den neusten Flottenentwicklungsprognosen aus dem Handbuch Emissionsfaktoren, HBEFA (INFRAS 2020a).
Fossilfrei 2050	<i>Basisszenario</i> , basierend auf einem Set an technisch realisierbaren Massnahmen (die kriterienbasiert ausgewählt wurden) zur Erreichung der Fossilfreiheit bis 2050.
Fossilfrei 2040, PTL	Basiert auf Eckpunkten des Basisszenarios Fossilfrei 2050, aber ergänzt mit Umsetzung einer <i>umfassenden PTL-Strategie</i> zur Erreichung der Fossilfreiheit bis 2040.
Fossilfrei 2040, Shift	Ergänzend zum Basisszenario wird ein <i>zusätzlicher Shift zur Nutzung alternativer Antriebe</i> hinterlegt, sodass Verbrennungsmotoren weniger und strombetriebene (v.a. batterieelektrische) Fahrzeuge entsprechend mehr genutzt werden.
Fossilfrei 2040, MIV minimal	Ergänzend zum Basisszenario wird hier eine zusätzliche, <i>sehr hohe Reduktion der Verkehrsnachfrage</i> unterstellt. Dabei wird versucht, bei der Nachfragereduktion (v.a. MIV) und der modalen Verlagerung ans Maximum zu gehen. Zusätzlich wird ein maximaler Shift zur Nutzung alternativer Antriebe hinterlegt.
Fossilfrei 2030, MIV minimal	Dieses Szenario ist grundsätzlich identisch wie «Fossilfrei 2040, MIV minimal», d.h. basiert auch auf der gleichen, maximalen <i>Nachfragereduktion</i> . Zusätzlich wird, zur Erreichung der Fossilfreiheit 2030, bereits kurzfristig eine <i>massive PTL-Strategie</i> , verfolgt.

Ergebnisse

Verkehrsnachfrage

Im Referenzszenario nimmt die gesamte Verkehrsleistung zwischen 2018 und 2050 im Personenverkehr um 18%, im Güterverkehr um 33% zu. Diese Annahmen basieren auf den aktuellsten verfügbaren Verkehrsperspektiven des Bundes (ARE 2016) und stützen sich auf eine mittlere Bevölkerungsentwicklung gemäss BFS-Prognosen (ca. +20% von 2020 bis 2050).

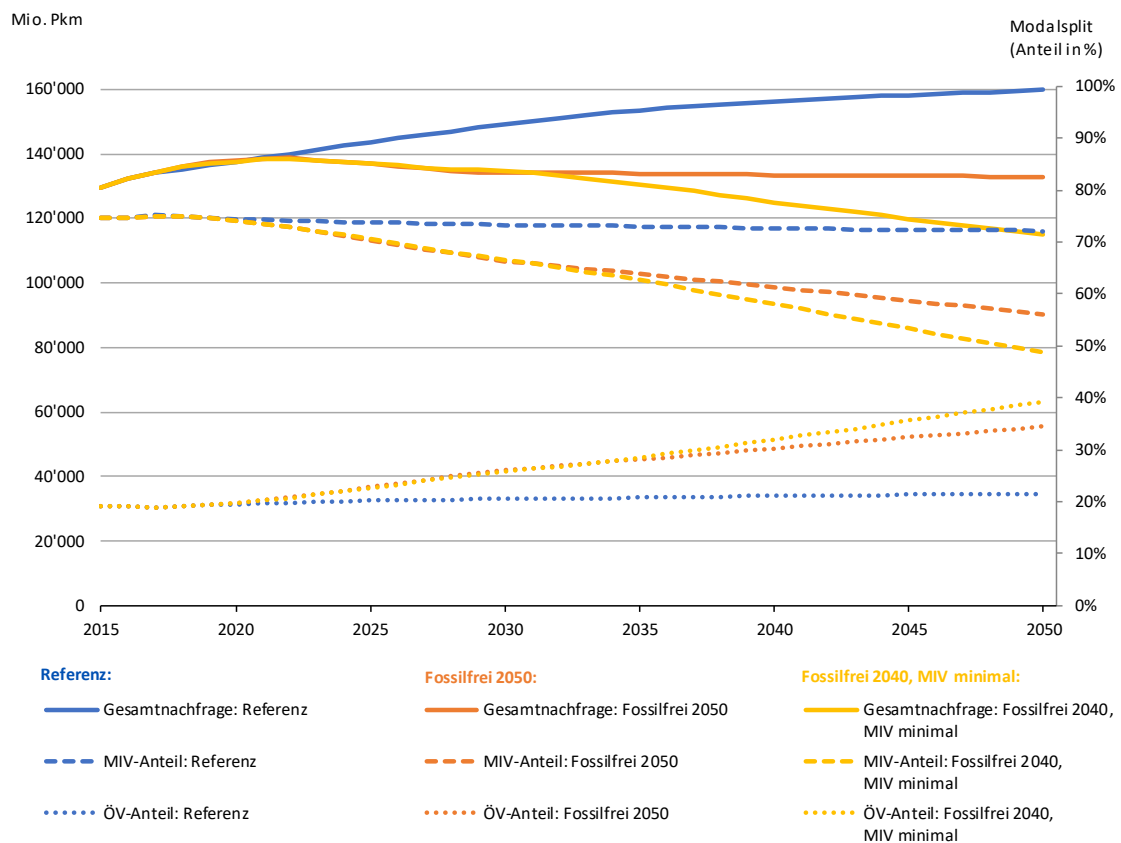
Im **Basisszenario**, das auf grundsätzlich technisch umsetzbaren Massnahmen basiert, ergibt sich eine Reduktion der gesamten Verkehrsnachfrage bis 2050 (vgl. mit 2018) um rund 2% im Personenverkehr (trotz rund 20% Bevölkerungswachstum). Folglich nimmt die Verkehrsnachfrage pro Kopf deutlich ab. Im Güterverkehr wird auch in diesem Szenario mit einer Zunahme gerechnet, allerdings nur noch um gut 20% bis 2050 gegenüber 2018 (statt +33% in der Referenz).

Eine erhebliche Verschiebung ergibt sich jedoch zwischen den verschiedenen Verkehrsmodi. Im **Basisszenario «Fossilfrei 2050»** reduziert sich die Nachfrage (pkm) im MIV von 2018 bis 2050 um 27%. Auf der anderen Seite steigt die Nachfrage im ÖV (Schiene und Strasse) im gleichen Zeitraum um 77% und im Fuss- und Veloverkehr (inkl. E-Bikes) um 48%. Folglich verschieben sich

die Modalsplitanteile sehr stark. Der ÖV-Anteil am (trimodalen) Modalsplit im motorisierten Verkehr steigt demnach von 19% im Jahr 2018 auf knapp 35% bis 2050.

Bei den beiden Szenarien «Fossilfrei 2040, PtL» und «Fossilfrei 2040, Shift» ist die gleiche Verkehrsnachfrage wie im Basisszenario «Fossilfrei 2050» hinterlegt.

Abbildung 1: Entwicklung Verkehrsleistung (pkm) und Modalsplit im Personenverkehr je Szenario
Die Sekundärachse zeigt die Entwicklung des Modalsplits (Anteil MIV und ÖV, trimodal)



Grafik INFRAS. eigene Berechnungen.

Für das Szenario «**Fossilfrei 2040, MIV minimal**» (und dann auch für das Szenario «Fossilfrei 2030, MIV minimal») wurde ein Szenario mit einer weiteren, maximalen zusätzlichen Verringerung der Verkehrsnachfrage im Personenverkehr skizziert – im Sinne eines Minimal szenarios. Dazu wären jedoch sehr substantielle Massnahmen notwendig, insbesondere zur Reduktion des MIV. Die Gesamtnachfrage im motorisierten Personenverkehr würde demnach bis 2050 um 15% zurückgehen (Verkehrsleistung vgl. mit 2018). Insbesondere der MIV würde massiv reduziert, um 45% bis 2050. Die Nachfrage im ÖV dagegen würde um 75% und im Fuss- und Veloverkehr um 69% steigen.

Auch im Güterverkehr ergibt sich in allen «Fossilfrei»-Szenarien ein Modalshift von der Strasse zur Schiene. Die Verkehrsleistung (tkm) auf der Strasse nimmt von 2018 bis 2050 um

12% zu, verglichen mit +29% im Referenzszenario. Der Schienengüterverkehr dagegen nimmt in der gleichen Zeit um 37% zu. Folglich steigt der Modalsplit im Basisszenario von 38% auf 43%.

Energiebedarf fossil und Treibhausgasemissionen

Die geforderte Reduktion der fossilen Treibstoffe wird erreicht durch eine Reduktion der Fahrleistung auf der Strasse, durch eine Elektrifizierung der Flotte, durch eine Verschiebung der Fahrleistungsanteile von Diesel- und Benzinfahrzeugen zu alternativ angetriebenen Fahrzeugen und, als ultima ratio, durch den Einsatz synthetischer Treibstoffe (PtL).

Der gesamte Energiebedarf des Verkehrs nimmt in allen «Fossilfrei»-Szenarien deutlich ab, was einerseits durch die Reduktion der Fahrleistungen und andererseits durch die effizientere Flotte bedingt ist. Der Effekt ist bis 2030 in allen «Fossilfrei»-Szenarien und Varianten ähnlich, da die Steuer- und die Reaktionsmöglichkeiten in dieser kurzen Zeit beschränkt sind und schon im Basisszenario weitestgehend ausgeschöpft werden. Die wichtigsten Ergebnisse zum Energiebedarf:

- **Fossilfrei 2050:** Reduktion des fossilen Treibstoffverbrauchs um ca. 40% bis 2030 und um ca. 60% von 2030 bis 2040. Verdoppelung des direkten Strombedarfs des Verkehrs bis 2030 und weitere Verdoppelung bis 2050. Nachfrage nach Wasserstoff steigt langsam bis 2050 auf etwa den doppelten Wert des Referenzszenarios. Relativ geringe Menge an PtL ab 2050.
- **Fossilfrei 2040, PtL:** Entwicklung wie «Fossilfrei 2050» aber im Jahr 2040 keine fossilen Treibstoffe mehr dafür grosse Mengen PtL, danach Abnahme der PtL bis 2050 um 75%.
- **Fossilfrei 2040, Shift:** Wie «Fossilfrei 2040 PtL», aber direkter Strombedarf steigt nach 2030 schneller und 2050 auf einen höheren Wert. Auch Wasserstoffbedarf steigt etwas höher. Dafür liegt die Nachfrage nach PtL in 2040 bei ca. $\frac{2}{3}$ des Wertes von «Fossilfrei 2040, PtL», danach Abnahme bis 2050 um 75%.
- **Fossilfrei 2040, MIV minimal:** Wie «Fossilfrei 2040 Shift», aber mit leicht abnehmendem direktem Strombedarf nach 2040 und einer um ca. 5 PJ tieferen Nachfrage nach PtL in 2040.
- **Fossilfrei 2030, MIV minimal:** Wie «Fossilfrei 2040, MIV minimal» aber Reduktion der fossilen Treibstoffe auf null im Jahr 2030 und dafür extrem grosse Mengen PtL im Jahr 2030, danach Abnahme bis 2050.

Sobald das Ziel der Fossilfreiheit erreicht ist, verursacht der Verkehr auch keine direkten, anrechenbaren CO₂-Emissionen mehr. Die Emissionen aus der Verbrennung von Bio- und synthetischen Treibstoffen werden nicht gezählt, da das entsprechende CO₂ in junger Vergangenheit der Luft entzogen wurde (durch Photosynthese oder einen technischen Prozess). Generell ist die Zielerreichung eines fossilfreien Verkehrs mit den Szenarien möglich.

Massnahmen

Die folgende Tabelle zeigt eine Kurzversion der Massnahmen, die gemäss vorliegender Studie zur Erreichung eines fossilfreien Verkehrs notwendig sind (zwingend, oder aber unterstützend). Eine detailliertere Beschreibung inkl. Konkretisierung der Massnahmen findet sich in Kapitel 5.3.

Szenario	Massnahmen (verglichen mit Referenz) mit Einfluss auf...	
	Technologie/Flottenmix	Verkehrsnachfrage
Fossilfrei 2050 (Basisszenario)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flottengrenzwerte für PW, LNF & SNF ▪ Maximalquoten für Verkauf von Neufahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (z.B. ab 2040 keine Verbrenner-PW-Neufahrzeuge) ▪ Quoten für ÖV-Busse (Verbrenner) ▪ Gewichts- und Leistungslimits (Flottengrenzwert) für Neufahrzeuge ▪ Finanzielle Belastung fossiler Treibstoffe ▪ Förderung Car-Sharing mit fossilfreien Fahrzeugen ▪ Bereitstellen von E-Ladestationen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erhöhung der Kosten für fossilen Verkehr (fossile Treibstoffe): z.B. CO₂-Lenkungsabgabe; Güterverkehr: CO₂-differenzierte LSVA ▪ Umfassende Förderung Fuss- & Veloverkehr ▪ Förderung ÖV (v.a. in Agglomerationen) ▪ Einschränkungen MIV (Reduktion Flächen, rigidere Parkplatz-Politik) ▪ Ausbau Sharing- & Pooling-Angebote & fossilfreie, multimodale Angebote ▪ Freizeit- und Arbeitsverkehr: weitere Massnahmen zur Verringerung und Verlagerung ▪ Arbeitsverkehr: weitere Massnahmen zur Verringerung & Verlagerung
Fossilfrei 2040	<p>PtL Wie Basisszenario, plus:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Weitere Verteuerung fossiler Treibstoffe, sodass ab 2040 teurer als PtL ▪ Umfassender Einsatz von PtL: Starke Förderung von PtL (Import, Produktion) → PtL-Strategie ▪ Beschränkung von grauen Importen fossiler Treibstoffe 	Wie Basisszenario
	<p>Shift Wie Basisszenario, plus:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Starke Einschränkung der Nutzung von PW & LNF mit Verbrennungsmotoren, um Shift zu E-Fahrzeugen zu forcieren → z.B. Fahr-/Nutzungsverbot ab 2040 	Wie Basisszenario
	<p>MIV minimal Wie «Fossilfrei 2040, Shift»</p>	<p>Wie Basisszenario, plus:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sehr starke (weitergehende) Erhöhung der Kosten für den fossilen Verkehr sowie generell den MIV bis 2040 ▪ Zusätzlicher massiver Ausbau des Angebots im Fuss-, Veloverkehr und ÖV
Fossilfrei 2030 (MIV minimal)	<p>Wie «Fossilfrei 2040, MIV Minimal», plus</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Vermeidung der Nutzung fossiler Treibstoffe schon 2030 (analog 2040) 	Wie «Fossilfrei 2040, MIV minimal»

Schlussfolgerungen

Aus den Analysen im vorliegenden Projekt lassen sich verschiedene Folgerungen ziehen:

- Fossilfreier Verkehr in der Schweiz ist machbar. Der Weg dahin ist allerdings sehr ambitioniert.
- *Fossilfreiheit im Verkehr bis 2050* kann erreicht werden. Allerdings sind die notwendigen Massnahmen umfassend und erfordern grosse zusätzliche Anstrengungen. Dank Massnahmen für

einen schnelleren und sehr starken Technologie-Shift hin zu fossilfrei betriebenen Fahrzeugen sowie sehr umfassenden Massnahmen im Bereich der Verkehrsnachfrage (Verringerung der Nachfrage und Verlagerung auf Fuss-, Veloverkehr und ÖV), kann das Ziel energie- und kosteneffizient erreicht werden. Allein mit verkehrlichen Massnahmen ist Fossilfreiheit bis 2050 allerdings nicht zu erreichen. Ebenfalls wichtig: Auch bis 2050 bleiben nur noch 30 Jahre – d.h. die Massnahmen müssen sehr rasch ergriffen und umgesetzt werden.

- *Fossilfreiheit im Verkehr bis 2040* ist technisch umsetzbar, bedarf aber massiver und rasch wirkender zusätzlicher Anstrengungen (z.B. massive Verteuerung der fossilen Treibstoffe oder Verbot des Einsatzes fossiler Treibstoffe). Parallel dazu müssen Strom und strombasierte Energieträger (PtL) in grossen Mengen bereitgestellt werden. Da ein substanzieller Teil der Verbrennerfahrzeuge, die in den nächsten 5-10 Jahren gekauft werden, bis weit über 2040 in der Flotte verbleibt, muss dessen Gebrauch beschränkt werden oder es müssen rasch grosse Mengen an PtL produziert werden können. Eine rasche und umfassende Initiierung einer PtL-Strategie wäre notwendig, damit im Ausland genügend PtL für den Schweizer Markt produziert würden. Allein mit verkehrlichen Massnahmen ist Fossilfreiheit bis 2040 nicht zu erreichen.
- *Fossilfreiheit im Verkehr bis 2030* ist kaum umsetzbar: Innert kürzester Zeit müsste sowohl der Technologie-Shift in maximal möglichem Tempo umgesetzt werden und zudem die Verkehrsnachfrage massiv sinken. So müsste die Nachfrage beim ÖV sowie Fuss- und Veloverkehr innerhalb von 10 Jahren um den Faktor 2 steigen, um den sonst verbleibenden fossil betriebenen MIV zu übernehmen. Diese Kapazitäten können v.a. im ÖV in dieser kurzen Zeit infrastrukturell nicht bereitgestellt werden. Ebenfalls ist es weder möglich, dass bis 2030 genügend strombetriebene Fahrzeuge im Markt sind, noch wird die benötigte hohe PtL-Menge verfügbar sein – beides vor allem aufgrund kurzfristig noch beschränkter Produktionskapazitäten.
- Die notwendigen Massnahmen zu einem fossilfreien Verkehr führen auch zu positiven Wirkungen auf *andere Umweltbereiche*, v.a. im Bereich der Luftschadstoffemissionen durch die Reduktion des Strassenverkehrs und durch die Elektrifizierung. In geringerem Ausmass sind auch beim Lärm sowie Flächenbedarf Verbesserungen zu erwarten.

Um die Klimaziele von Paris und die Schweizer Klimaziele zu erreichen, müssen im Verkehr grosse Anstrengungen vorgenommen werden. Fossilfreiheit im Verkehr zu erreichen ist zwar schwieriger als in anderen Branchen, aber dank der technologischen Entwicklung im Bereich strombasierter Technologien möglich. Bereits das Ziel Fossilfreiheit 2050 erfordert rasches Handeln und die Umsetzung griffiger Massnahmen. In den nächsten fünf Jahren müssen die wichtigsten Eckpunkte geregelt und Instrumente implementiert oder zumindest aufgelegt sein, damit der Verkehr in der verbleibenden Zeit fossilfrei werden kann.

Zur effizienten Erreichung dieses Ziels müssen sowohl Massnahmen umgesetzt werden, die auf Technologieebene ansetzen, als auch Massnahmen, die bei der Verkehrsnachfrage ansetzen.

Glossar/Abkürzungen

BEV	Batterieelektrische Fahrzeuge (battery electric vehicles)
CHF	Schweizer Franken
EU	Europäische Union
EV	Elektrofahrzeuge (electric vehicles) = BEV, PHEV und FCEV
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeuge (fuel cell electric vehicles) = BEV mit kleiner Batterie und Brennstoffzelle zur Umwandlung von Wasserstoff nach Strom an Bord
Fzkm	Fahrzeug-Kilometer (=Fahrleistung)
FVV	Fuss- und Veloverkehr
GV	Güterverkehr
LKW	Lastwagen (=SNF für Gütertransporte)
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge (Lieferwagen)
MFH	Mehrfamilienhäuser
MinÖSt	Mineralölsteuer
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MR	Motorrad
NEDC	= NEFZ: Neuer Europäischer Fahrzyklus (New European drive cycle): Entgegen dem Namen ist das der alte Fahrzyklus, der zur Messung des Verbrauchs und der Luftschadstoffe bei PW und LNF zur Anwendung kommt. Aktuell wird nach dem WLTP gemessen, die Grenzwerte für Neufahrzeugflotten in der Schweiz und der EU basieren aber noch auf dem NEDC.
NOx	Stickoxide
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr
ÖV-Busse	Wird synonym verwendet mit: Stadtbusse
PHEV	Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge (plug-in-hybrid vehicles)
PJ	Peta-Joule (Energieeinheit) 1 PJ = 1 Billiarde (10^{15}) Joule
pkm	Personenkilometer (= Masseinheit für die Verkehrsleistung im Personenverkehr)
PM10	Feinstaub mit einem Durchmesser unter 10 micro-meter
PtL	Synthetische flüssige Treibstoffe (power-to-liquid). In dieser Studie gehen wir immer davon aus, dass das CO ₂ , das für die Produktion benötigt wird, direkt aus der Luft oder aus der Verbrennung von Biomasse abgeschieden wird. In diesen Fällen verursacht die Verbrennung von PtL keine anrechenbaren CO ₂ -Emissionen. Würde das CO ₂ hingegen bei einem fossilen Kraftwerk oder bei einem Zementwerk abgeschieden, müsste die Emission bei der Verbrennung von PtL zumindest teilweise dem Verkehr zugeordnet werden.
PtX	Synthetische flüssige oder gasförmige Treibstoffe. Hier nur Kohlenwasserstoffe, in anderen Studien inkludiert der Begriff manchmal auch Wasserstoff aus Elektrolyse.
PV	Personenverkehr
PW	Personenwagen
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
tkm	Tonnenkilometer (= Masseinheit für die Verkehrsleistung im Güterverkehr)
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure: neuer Standardzyklus für Messung von Verbrauch und Schadstoffen bei PW und LNF

1. Ausgangslage und Ziele

Die Schweiz hat sich mit dem Pariser Klimaabkommen dazu bekannt, die globale Klimaerwärmung auf möglichst unter 1.5°C und maximal 2°C gegenüber der vorindustriellen Zeit zu begrenzen und dazu mit einer deutlichen Reduktion der Treibhausgasemissionen einen Beitrag zu leisten. Der Bundesrat hat im Sommer 2019 entschieden, dass die Schweiz bis 2050 klimaneutral wird, das heisst ihre Treibhausgasemissionen auf Netto-Null absenkt.¹ Über die Zwischenziele bis 2030 sowie die entsprechenden Massnahmen zur Zielerreichung wird aktuell im nationalen Parlament diskutiert. Im Vordergrund steht im aktuellen Vorschlag ein Reduktionsziel der Treibhausgasemissionen von -50%, wobei mindestens 37.5% der Reduktion im Inland erfolgen müssten, während die restlichen 12.5% im Ausland reduziert werden können (revidiertes CO₂-Gesetz, Stand Okt. 2020).

Der Verkehr verursacht in der Schweiz gemäss neusten Zahlen des Treibhausgasinventars für das Jahr 2018 (BAFU 2020) gut 32% der gesamten Treibhausgasemissionen (ohne internationalen Luftverkehr). Absolut gesehen liegen die Treibhausgasemissionen des Verkehrs damit in etwa gleich hoch wie vor 20 bis 30 Jahren. Zwar sinken die Verkehrsemissionen seit 2015 erstmals spürbar – die Treibhausgasemissionen des Verkehrs liegen aber immer noch sehr deutlich über dem geforderten Absenkpfad.

Um die klimapolitischen Ziele zu erreichen ist der Verkehrssektor in der Schweiz – wie auch international sehr stark gefordert. Das Ziel Netto-Null bis 2050 kann nur erreicht werden, wenn der Verkehr weitestgehend oder ganz fossilfrei wird. Dieser Pfad der Dekarbonisierung muss bereits kurzfristig eingeschlagen werden, basiert doch insbesondere der Strassenverkehr in der Schweiz immer noch zu einem überwiegenden Anteil auf fossilen Energieträgern. Der Umstieg auf fossilfreie Energieträger im Verkehr wird eine deutliche Umgestaltung des Verkehrs und dessen dominierenden Antriebstechnologien und Energieträger erfordern – eine Verkehrswende inkl. Energiewende.

Der VCS Schweiz hat das Ziel formuliert, dass die Mobilität in der Schweiz fossilfrei werden muss (vgl. Positionspapier «Verkehr ohne fossile Treibstoffe» 2018 (VCS 2018), Fachtagung «Fossilfreie Mobilität» im Oktober 2019; Zeithorizont 2050; DV VCS Schweiz im Juni 2019: Zeithorizont 2030). Daran anknüpfend hat der VCS an INFRAS den Auftrag für die Erarbeitung einer Studie erteilt, welche die Szenarien für einen fossilfreien Verkehr aufzeigt und quantitativ unterlegt.

¹ Dieses Reduktionsziel wird als ungenügend kritisiert, weil eine Beschränkung der Klimaerwärmung auf 1.5 °C nur dann wahrscheinlich ist, wenn die globale Emission von THG bis 2050 auf null reduziert wird und weil die Schweiz im Sinne der geteilten aber differenzierten Verantwortung aufgrund ihrer hohen Emission in der Vergangenheit deutlich mehr reduzieren müsste als der globale Durchschnitt.

Ziele

Ziel der vorliegenden Studie ist es, aufzuzeigen, wie der Landverkehr in der Schweiz fossilfrei werden kann, das heisst wie der Verkehr dann aussehen kann und wie der Weg dorthin erfolgen könnte. Um dieses übergeordnete Ziel zu erreichen, werden im Rahmen der Studie folgende Fragen beantwortet:

- Auf welche Weise bzw. unter welchen Szenarien kann ein fossilfreier Landverkehr erreicht werden?
- Welche Massnahmen und Rahmenbedingungen wären nötig, um eine fossilfreie Mobilität zu erreichen?
- Welche Wirkungen haben verschiedene Szenarien (im Sinne von Massnahmenpaketen) auf die Verkehrsnachfrage, den Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen? Welche (politischen) Instrumente helfen bei der Umsetzung der Massnahmen?

Die Arbeit soll quantitativ fundiert sein und erfolgt deshalb modellbasiert. Allerdings erlauben die verfügbaren Ressourcen nur eine grobe Modellierung, die punktuell Vereinfachungen vornehmen muss und gewisse Differenzierungen (z.B. räumlich) nicht erlaubt.

Berücksichtigt werden sowohl verkehrliche Wirkungen (Verkehrsnachfrage), als auch energetische Wirkungen (Antriebstechnologie) und schliesslich die Treibhausgaswirkung. Zudem werden Wirkungen im Energiesektor abgeschätzt, die sich insbesondere durch die Elektrifizierung ergeben (Sektorkopplung).

In der vorliegenden Studie steht die Darstellung des Wegs hin zu einer fossilfreien Mobilität in der Schweiz und die damit verbundenen Wirkungen im Vordergrund. Die Studie zeigt keine Prognosen auf, sondern skizziert mögliche Szenarien und macht «Wenn-Dann-Aussagen», wie zum Beispiel: «Wenn die Mobilität in der Schweiz bis 20X0 fossilfrei werden soll, bräuchte es dazu die Rahmenbedingungen bzw. Massnahmen xy».

2. Systemgrenzen und Vorgehen

2.1. Systemgrenzen

Im Folgenden sind die wichtigsten Eckpunkte und Systemgrenzen der vorliegenden Studie zu Szenarien für einen fossilfreien Verkehr dargestellt.

Inhaltliche Systemgrenzen:

- *Personen- und Güterverkehr auf Strasse und Schiene:* Inhaltlich liegt der Fokus auf dem Strassen- und Schienenverkehr in der Schweiz. Luftverkehr sowie Schiffsverkehr werden in der Studie nicht betrachtet. Untersucht werden aber sowohl der Personenverkehr, der in Bezug auf die Treibhausgasemissionen und den Energiebedarf die grösste Relevanz hat, als auch der Güterverkehr. Beim Strassenverkehr wird nachfrageseitig nebst dem motorisierten Verkehr auch der Fuss- und Veloverkehr betrachtet. Nicht berücksichtigt werden die Bereiche «Off-Road-Verkehr» (z.B. Landwirtschaft) und Militär.
- *Fokus auf Betrieb:* Der Schwerpunkt der Analyse liegt auf dem Betrieb («tank-to-wheel»). Die energetischen Vorketten («well-to-tank»: Energiebereitstellung, z.B. Stromproduktion) fliesen im Rahmen der Vertiefungsanalyse zur Energieverfügbarkeit (Sektorkopplung) mit ein.
- *Energiebedarf, Klimawirkung und Verkehrsnachfrage als zentrale Wirkungen:* Der Hauptfokus der Studie liegt auf der energetischen Wirkung (Energiebedarf nach Energieträger) sowie der Klimawirkung (Treibhausgasemissionen). Als Grundlage für diese Wirkungen ist zudem die Wirkung auf die Verkehrsnachfrage zentral.
Weitere wichtige Umweltwirkungen des Verkehrs werden weniger umfassend und lediglich qualitativ oder semi-quantitativ betrachtet: Flächenbedarf, Luftschadstoffemissionen, Lärm.
- *Schwerpunkt der Massnahmen:* Der Schwerpunkt der Studie liegt auf den beiden Aspekten Antriebstechnologie bzw. Flottenmix und Verkehrsnachfrage (wie viel Verkehr mit welchem Verkehrsmittel). Weitere aktuelle Zukunftsthemen der Mobilität stehen nicht explizit im Vordergrund dieser Arbeit (z.B. Digitalisierung/Automatisierung, Sharing, neue Angebotsformen), werden aber wo massnahmenseitig relevant mitberücksichtigt.
- *Fossilfrei vs. Netto-Null:* Die Studie orientiert sich am Ziel einer fossilfreien Mobilität (inkl. energetischer Vorketten z.B. für Stromproduktion). Nicht im Fokus steht dagegen eine «Netto-Null-Mobilität», bei der unterstützend Treibhausgasemissionen möglich wären.

Zeitliche Systemgrenzen:

- *Zeithorizont bis 2050, mit Zwischenschritten:* Die Analyse umfasst den Zeithorizont von heute bis, je nach Szenario, 2030 bis 2050 – den möglichen Zeitpunkten des Ziels einer klimaneutralen Schweiz.

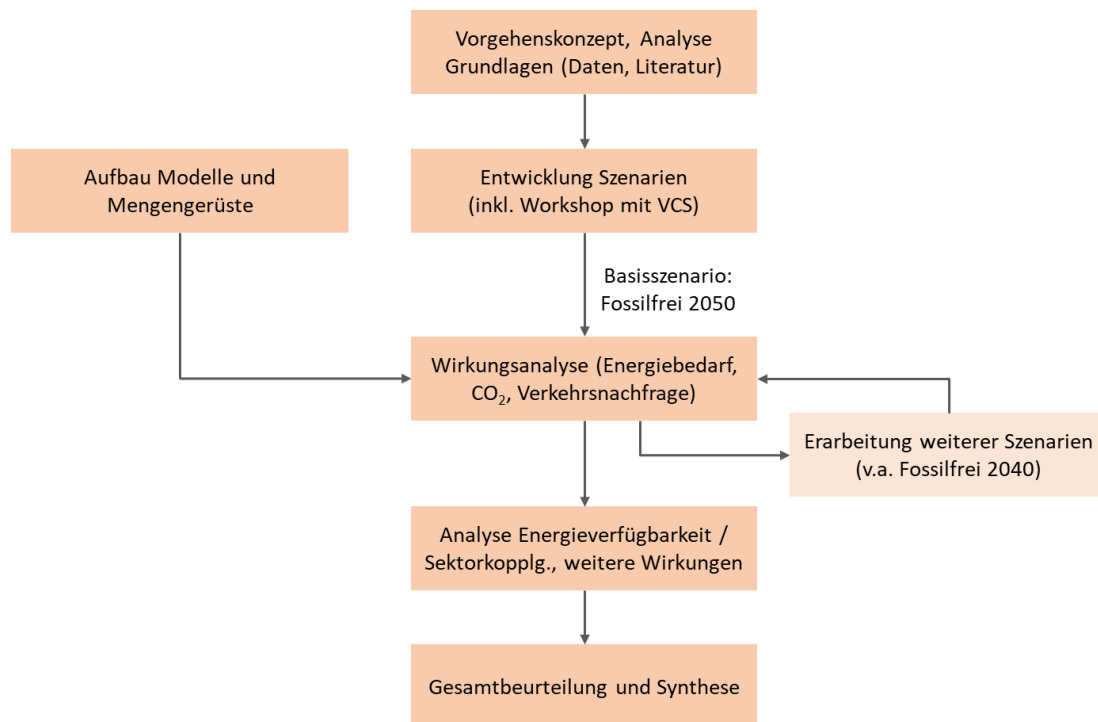
Räumliche Systemgrenzen:

- *Territorialprinzip*: Bezüglich des Betriebs von Fahrzeugen werden nur der Energieverbrauch und die Emissionen in der Schweiz berücksichtigt. Dies allerdings von Schweizer und ausländischen Fahrzeugen. Zur Beurteilung der Frage, ob der Strombedarf der Mobilität in den Szenarien überhaupt gedeckt werden kann, wird der Strombedarf der Herstellung von Wasserstoff und synthetischen Treibstoffen (PtL) allerdings einbezogen.

2.2. Vorgehen

Die folgende Abbildung zeigt in einer Übersicht das Vorgehen im vorliegenden Projekt zur Erarbeitung der Szenarien für einen fossilfreien Verkehr. Nach einer Analyse der Daten- und Literaturgrundlagen wurde das Vorgehenskonzept konkretisiert. Anschliessend wurden mögliche Szenarien für eine fossilfreie Mobilität entwickelt, wobei es vor allem darum ging für die beiden Stossrichtungen Verkehrsnachfrage und Technologie (vgl. unten) prioritäre Massnahmen zu sammeln. Daraus wurde ein Basisszenario formuliert, das später «Fossilfrei 2050» benannt wurde.

Abbildung 2: Vorgehen zur Erarbeitung des Projekts «Szenarien fossilfreier Verkehr»



Grafik INFRAS.

Parallel zur Erarbeitung der Szenarien wurden die Mengengerüste und Modelle aufgebaut. Im Bereich des Flotten-/Technologiemodells konnte weitgehend auf das bestehende Modell in HBEFA 4.1 (INFRAS 2020a) zurückgegriffen werden. Im Bereich der Verkehrsnachfrage wurde für den Personenverkehr – aufbauend auf anderen Anwendungen – ein Modell zur Erarbeitung von Zukunftsszenarien oder -prognosen entwickelt («Aggregierte Methode Personenverkehr» AMP, vgl. Kap. 2.2.4). Im Güterverkehr konnte auf ein analoges bestehendes Modell zurückgegriffen werden («Aggregierte Methode Güterverkehr» AMG).

Für das Basisszenario wurde schliesslich mit Hilfe der Modelle die Wirkungsanalyse (Wirkungen auf Verkehrsnachfrage, Flottenzusammensetzung, Energiebedarf und CO₂-Emissionen) durchgeführt. Nachdem sich zeigte, dass für das Erreichen eines fossilfreien Verkehrs bis 2040 (oder sogar 2030) noch viel grössere Anstrengungen notwendig sind, wurden ergänzend weitere Szenarien («Fossilfrei 2040» bestehend aus drei Subsznarien sowie «Fossilfrei 2030» skizziert und deren Wirkung ebenfalls analysiert.

Schliesslich wurden für alle Szenarien die Auswirkungen auf die Energieverfügbarkeit (Sektorkopplung) sowie weitere Wirkungen (Luftschadstoffe, Lärm) analysiert.

Schliesslich wurden für alle Szenarien eine Gesamtbeurteilung vorgenommen und Schlussfolgerungen formuliert.

2.2.1. Szenario-Entwicklung

Die Entwicklung der Szenarien orientiert sich an folgenden Eckpunkten:

- Bei den Szenarien handelt es sich um *Ziel-Szenarien*, die sich an einem vorgegebenen Ziel (Fossilfreiheit) orientieren – und dieses mit technisch machbaren Massnahmen zu erreichen versuchen. Es handelt sich um keine Prognosen.
- *Zielzustand/Zeithorizont*: Es wurden Szenariobetrachtungen für drei Zielzustände mit unterschiedlichem Zeithorizont durchgeführt: a) fossilfrei bis 2030, b) fossilfrei bis 2040, c) fossilfrei bis 2050. Die drei Zielzustände geben für die entsprechenden Szenarien das Ziel einer fossilfreien Mobilität in der Schweiz vor.
- *Referenzszenario*: Als Grundlage für die Analyse wird vorab ein Referenzszenario definiert, das die Referenzentwicklung («Business-as-usual») nach aktuellem Stand widerspiegelt. Das Referenzszenario stützt sich:
 - bei der Verkehrsnachfrage auf die neusten verfügbaren Verkehrsperspektiven des Bundes (ARE 2016). Diese wurden fortgeschrieben, indem die Prognosen der Verkehrsperspektiven (für 2018 bis 2050) an die neusten verfügbaren verkehrsstatistischen Daten (bis 2018) gekoppelt wurden.
 - bei der Flotten-Technologiezusammensetzung (bzw. Energiebedarf) auf die neuste Version des Handbuchs Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (INFRAS 2020a).

Für die Entwicklung des Basisszenarios wurde ein Mix von Massnahmen bestimmt (vgl. Kap. 3).

Für die Auswahl der Massnahmen wurden folgende Kriterien berücksichtigt:

- Kapazität/Verfügbarkeit von Technologien und Infrastrukturen (für Schweizer Markt)
- Umsetzungsdauer, möglicher Realisierungszeitpunkt (v.a. technisch)
- Realisierbarkeit (technisch, rechtlich)
- Effektivität/Zielbeitrag (v.a. Massnahmen mit hoher Wirkung)
- Vermeiden von Massnahmen mit Rebound- und anderen negativen Nebeneffekten

Bei der technischen Verfügbarkeit bzw. Umsetzbarkeit heisst dies zum Beispiel, dass die zeitlichen Aspekte eines politischen Entscheidungsprozesses (zur Planung und Einführung von Massnahmen) berücksichtigt werden oder dass die Massnahmen so formuliert sind, dass sie technisch grundsätzlich umsetzbar wären. Hingegen wird bei der Beurteilung der «technischen Realisierbarkeit/Umsetzbarkeit» die Akzeptanz nicht berücksichtigt. Bei der Auswahl der Massnahmen spielten generell Überlegungen zur Akzeptanz oder politischen Umsetzbarkeit keine Rolle.

Zur Unterstützung der Szenario-Entwicklung und der Auswahl der Massnahmen wurde auch ein Workshop mit dem VCS Schweiz durchgeführt. Aus dem definierten Massnahmenset ergab sich das Szenario «Fossilfrei 2050», für das in einer ersten Modellierungsrunde die Wirkungen analysiert wurden.

Nach der ersten Runde der Wirkungsanalyse wurde klar, dass für das Erreichen der Fossilfreiheit bis 2040 oder sogar 2030 weitergehende Massnahmen notwendig sind, die über die Massnahmen des Basisszenarios «Fossilfrei 2050» hinausgehen. Dazu wurden drei Subszenarien «Fossilfrei 2040» sowie ein Szenario «Fossilfrei 2030» erarbeitet.

Die erarbeiteten Szenarien sind aufbauend nach zunehmender Ambition des Ziels. Fossilfrei 2050 stellt die Basis dar, auf der die Szenarien von «Fossilfrei 2040» aufbauen. «Fossilfrei 2030» wird anhand der Ergebnisse von «Fossilfrei 2040» diskutiert.

Zur Quantifizierung der Szenarien wurde nicht für jedes Szenario eine eigene Modellrechnung vorgenommen. Insgesamt wurden vier Modellvarianten erstellt und berechnet (vgl. Tabelle 1: Referenz plus drei weitere Modellvarianten). Das Basisszenario «Fossilfrei 2050» sowie das erste Szenario von «Fossilfrei 2040» (PtL-Strategie) basieren auf der gleichen Modellvariante. Für «Fossilfrei 2040, Shift» wurde eine weitere Modellvariante berechnet und für «Fossilfrei 2040, MIV minimal» sowie «Fossilfrei 2030» eine letzte Modellrechnung durchgeführt.

Aus den Ergebnissen der Modellvarianten wird abgeleitet, was zusätzlich zu den modellierten Massnahmenwirkungen erforderlich wäre, um einen fossilfreien Verkehr in den jeweiligen Jahren zu erreichen.

Die einzelnen Szenarien sind im Kapitel 3 im Detail beschrieben.

Tabelle 1: Szenarien und Modellvarianten

Szenario: Name und Grundidee	Modellvariante/ Modellrechnungen
Referenz: Referenzszenario	Referenz
Fossilfrei 2050: Basisszenario	Fossilfrei, Basis
Fossilfrei 2040, PtL: Umsetzung PtL Strategie	Fossilfrei, Basis
Fossilfrei 2040, Shift: zusätzlicher Shift zu alternativen Antrieben	Fossilfrei, Shift
Fossilfrei 2040, MIV minimal: zusätzliche Reduktion Verkehrsnachfrage	Fossilfrei, MIV minimal
Fossilfrei 2030, MIV minimal: zusätzl. Reduktion Verkehrsnachfrage & PtL Strategie	Fossilfrei, MIV minimal

Tabelle INFRAS.

2.2.2. Grundmodell Wirkungsanalyse

Um die Treibhausgasemissionen im Verkehr drastisch zu verringern und um das Ziel eines fossilfreien Verkehrs zu erreichen, gibt es verschiedene Anknüpfungspunkte. Im Vordergrund stehen folgende beiden Stossrichtungen:

a. Beeinflussung der Verkehrsnachfrage:

- Verringerung der Verkehrsnachfrage: Verkehrsvermeidung (weniger Fahrten, Tonnage), Verkürzung der Wege, Erhöhung der Auslastung der Fahrzeuge.
- Modale Verlagerung auf Verkehrsträger, die fossilärmer (fossilfrei) und klimaschonender sind und bezüglich anderer relevanter Aspekte wie Flächenbedarf oder Lärm Vorteile aufweisen (also v.a. vom MIV zum Fuss-, Veloverkehr oder ÖV).

b. Technologische Verbesserungen:

- Erhöhung der Effizienz: Reduktion der Masse, Optimierung von Motoren, Getriebe oder Fahrwiderstand.
- Einsatz klimaschonenderer Technologien (bzw. fossilfreier Energieträger): Elektrifizierung (Hybride oder Elektrofahrzeuge), Shift von Benzin/Diesel zu Elektroantrieben oder Gas; Shift von fossilen Treibstoffen zu biogenen oder synthetischen Treibstoffen (PtX).

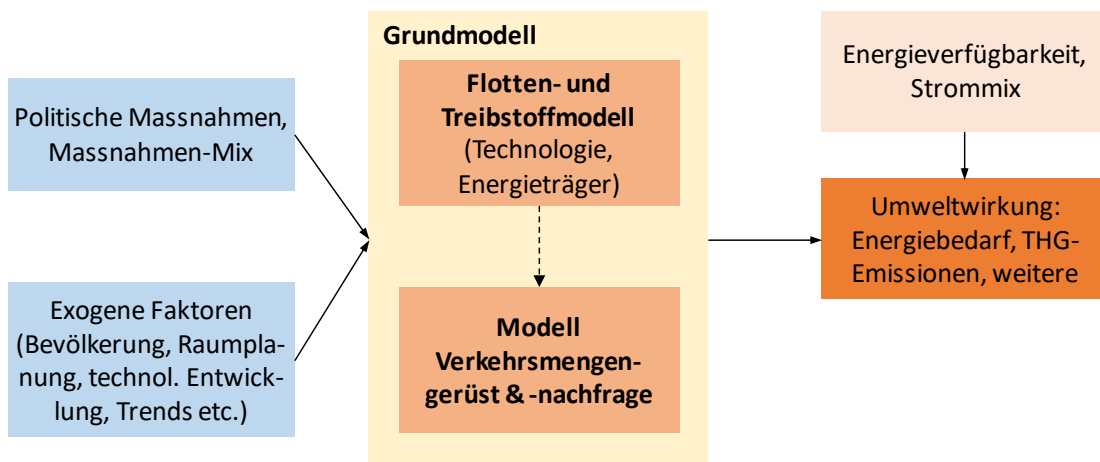
Im Rahmen der Studie wird an allen genannten Punkten angesetzt und entsprechende Massnahmen definiert und untersucht.

Die quantitative Wirkungsanalyse der Szenarien in der vorliegenden Studie basiert auf einem **Grundmodell**, mit dem Massnahmen und Wirkungen an allen genannten Stellschrauben analysiert und quantifiziert werden können. Das Grundmodell besteht aus zwei Teilmodellen (vgl. Abbildung 3):

- **Flotten- und Treibstoffmodell («Technologiemodell»):** Bottom-up-Modell, das aufgrund von Eigenschaften der künftigen Neufahrzeuge (spezifischer Energiebedarf pro km, Antriebstechnologie), deren Anteil in der künftigen Neufahrzeugflotte sowie aufgrund der bestehenden Flotte und der Lebensdauer aller Fahrzeuge den künftigen Fahrzeugbestand bestimmt. Zusammen mit den künftig verfügbaren Mengen an (alternativen) Treibstoffen können damit für jedes Fahrzeugsegment bzw. Verkehrsmittel (z. B. Personenwagen, schwere Nutzfahrzeuge, Personenfernverkehrszüge,...) die künftigen spezifischen (pro km) Werte für den Energiebedarf und die CO₂-Emissionen berechnet werden.
- **Modell Verkehrsmengengerüst und -nachfrage:** Aggregiertes Modell, das die Verkehrsnachfrage nach den einzelnen Verkehrsmitteln und Fahrzwecken umfasst und exogene Einflussfaktoren (Bevölkerungsentwicklung, Verkehrsmittelkosten, Infrastrukturangebot) und deren Wirkung abbilden kann.

Die beiden Teilmodelle sind in den folgenden Teilkapiteln noch genauer beschrieben.

Abbildung 3: Grundmodell für die Analyse der Wirkungen



Grafik INFRAS.

Vorgehen Modellierung

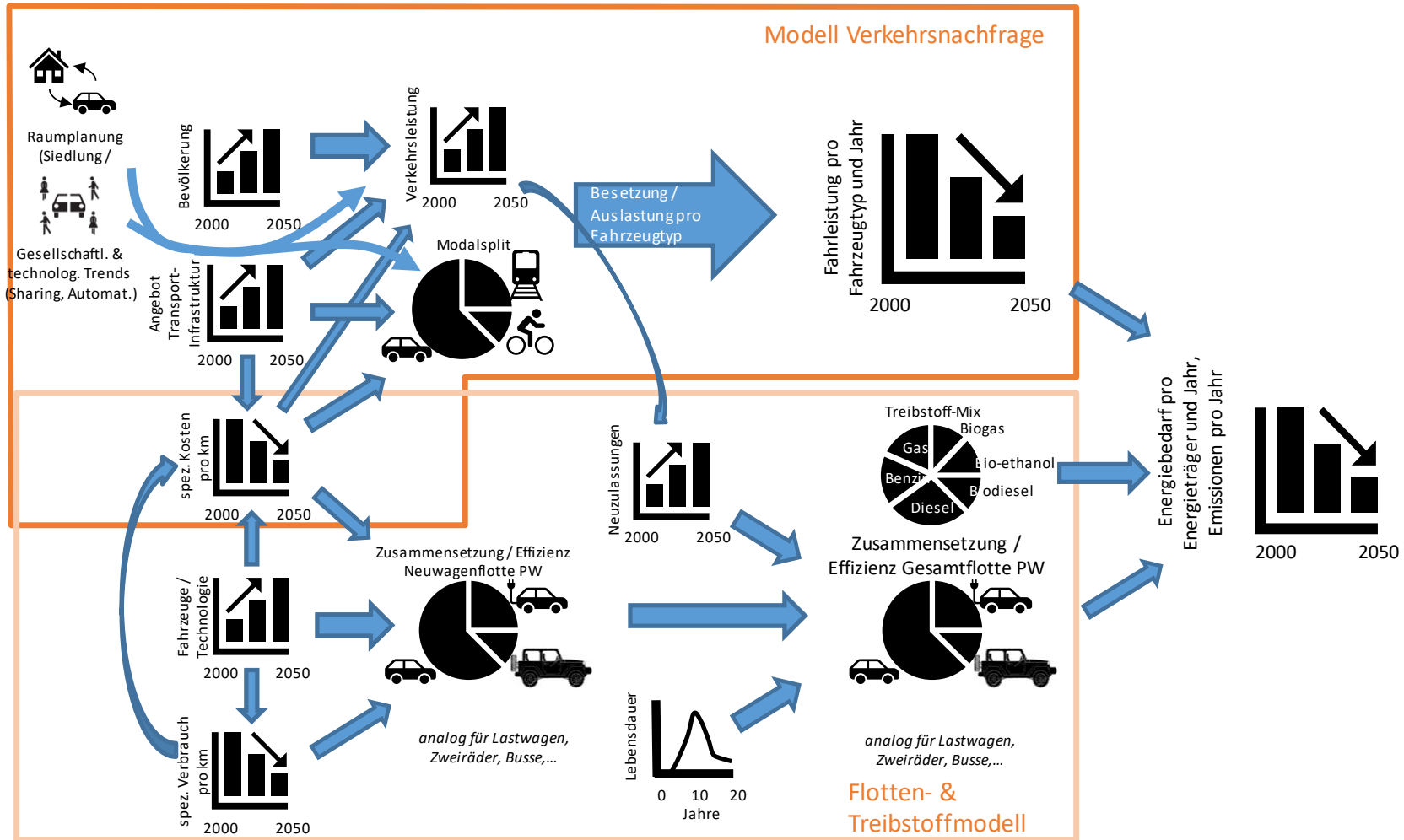
Basierend auf den definierten Szenarien mit den zugehörigen Massnahmen werden in Modellrechnungen (vgl. Kap. 2.2.3 und 2.2.4) die Auswirkungen auf die Verkehrsnachfrage und den Modalsplit sowie auf die Entwicklung der neu zugelassenen Fahrzeuge und schliesslich auf die Fahrzeugflotte und deren Nutzung modelliert. Damit ergibt sich für jedes Jahr in der Zukunft

eine spezifische Zusammensetzung und Nutzung der Fahrzeugflotte. Daraus wird für jeden eingesetzten Energieträger der Energieverbrauch des Verkehrs bis 2050 berechnet.

Berücksichtigt wird der Einsatz von fossilen und biogenen Treibstoffen, von Wasserstoff und Strom. Bei Biotreibstoffen wird berücksichtigt, dass deren Potenzial beschränkt ist, da nur abfallbasierte Biotreibstoffe zugelassen werden. In den Modellrechnungen nicht berücksichtigt werden strombasierte flüssige Treibstoffe (PtL), da diese (wenn verfügbar) 1:1 die fossilen flüssigen Treibstoffe ersetzen können, um das Ziel von fossilfreiem Verkehr zu erreichen.

Die gemäss diesen Modellrechnungen verbleibenden Nachfragen nach fossilen Treibstoffen in den Jahren 2050, 2040 und 2030 werden ausgewiesen und es werden Varianten zu deren Vermeidung aufgezeigt und diskutiert (Kap. 4).

Abbildung 4: Modellierung der Wirkungen – mit Hilfe der beiden Modelle Verkehrsnachfrage und Flotten-/Treibstoffmodell



Grafik INFRAS.

2.2.3. Flotten-/Treibstoffmodell

Wir nutzen das Flottenmodell des Handbuch Emissionsfaktoren (INFRAS 2020a). Es enthält die bestehende Fahrzeugflotte bis 2018, klassifiziert nach Segmenten (PW, LNF, SNF, MR, Stadtbusse, Reisebusse) sowie Alter, Treibstoff, Euro-Klassen und der Überlebenswahrscheinlichkeit über die Jahre. Ab 2018 werden die Anzahl Neuzulassungen mit deren Eigenschaften (Treibstoff, Effizienzsteigerung, Lebenserwartung, ...) spezifisch für die Szenarien modelliert. Auf Basis der jährlich neu hinzukommenden Fahrzeuge und der Fahrzeuge, die jedes Jahr aus dem Verkehr genommen werden, wird die Entwicklung (Anzahl, Zusammensetzung) der Flotte berechnet.

Die Modellierung der jährlichen Neufahrzeugflotte wird in den Modellrechnungen auf Basis der in den zugehörigen Szenarien angenommenen Massnahmen vorgenommen. Die Abschätzung basiert auf diversen Ad-hoc-Modellen, die z.B. die Anteile von bzw. die Effizienzentwicklung bei Fahrzeugen bestimmter Technologien berechnen. Dabei werden sowohl Bottom-up- als auch Top-down-Ansätze verwendet. Ebenfalls berücksichtigt wird die Verkehrsnachfrageentwicklung der jeweiligen Szenarien, da diese die künftige Anzahl Neufahrzeuge pro Jahr beeinflusst.

2.2.4. Modell Verkehrsnachfrage

Das Teilmodell Verkehrsnachfrage umfasst ein umfassendes Mengengerüst der Verkehrsnachfrage der relevanten Verkehrsmittel auf Strasse und Schiene (sowohl für den Personen- als auch den Güterverkehr) und kann verschiedene Nachfragewirkungen abbilden (durch exogene und endogene Einflussgrössen). Das Verkehrsmengengerüst basiert auf folgenden vier Stufen:

- *Verkehrsaufkommen*: Anzahl Wege (beim Personenverkehr) bzw. Tonnage (beim Güterverkehr)
- *Modalsplit*: Verteilung der Nachfrage auf die Verkehrsträger und Verkehrsmittel.
- *Verkehrsleistung/Weglängen*: Auf Basis der durchschnittlichen Weglänge wird aus den Wegen bzw. dem Güteraufkommen die Verkehrsleistung (pkm bzw. tkm) ermittelt
- *Fahrleistung/Auslastung*: Die durchschnittliche Auslastung im Personenverkehr (z.B. PW) und Güterverkehr (z.B. LKW) definiert die Fahrleistung (Fzkm) und beeinflusst damit auch den Energiebedarf. Die Fahrleistung ist in den vorliegenden Analysen primär im Strassenverkehr relevant.

Das Nachfragemodell ist beim Personenverkehr differenziert nach a) Verkehrszwecken (gemäss Mikrozensus Mobilität und Verkehr MZMV, BFS/ARE 2017) und b) nach drei Altersklassen (unter 20 Jahre, 20-64 Jahre, über 64 Jahre) aufgebaut.

Mit Hilfe dieser vier Stufen lässt sich die Verkehrsnachfrage in Verkehrsleistung (pkm, tkm) je Verkehrsmittel und schliesslich Fahrleistung (Fzkm) umrechnen. Die vier Stufen des Modells erlauben es, die Wirkungen von Massnahmen differenziert abzubilden:

- Massnahmen, die zu einer Vermeidung einer Fahrt führen, setzen an der ersten Stufe an (Verkehrsaufkommen).
- Wird der Modalsplit beeinflusst bzw. findet eine modale Verlagerung statt, wird dies in der zweiten Stufe abgebildet.
- Eine Verringerung der Verkehrsleistung ohne Vermeidung einer Fahrt wird durch veränderte Ziel- oder Routenwahl erreicht, die zu einer Verkürzung der Weglängen führt. Beispiele dafür sind die Wahl eines anderen Wohnorts oder andere Freizeitdestinationen. Diese Effekte werden in der dritten Stufe des Modells abgebildet.
- Bei einer konstanten Verkehrsleistung (pkm, tkm) kann die Verkehrsnachfrage im Sinne der Fahrleistung (Fzkm) dennoch sinken, wenn beispielsweise die Auslastung von LKW erhöht wird oder PW-Fahrten im Personenverkehr «gepoolt» werden.

Im Personenverkehr wurde für das vorliegende Projekt – basierend auf bestehenden Modellen – ein Nachfragemodell aufgebaut, das Abschätzungen für zukünftige Entwicklungen bzw. Szenarien ermöglicht. Dieses Modell namens «Aggregierte Methode Personenverkehr» (AMP) basiert auf der Analyse der langfristigen Entwicklungen (Nachfragereihen) des Personenverkehrs (Aufkommen und Leistung), die bis zum Jahr 2050 fortgeführt werden.

Das Teilmodell Verkehrsnachfrage – die «Aggregierte Methode Personenverkehr» (AMP) – stützt sich für den Ist-Zustand und die Ex-post-Daten auf die aktuellen Verkehrsstatistiken des BFS (Statistik PV-L: Leistungen des privaten Personenverkehrs auf der Strasse; und Statistik Öffentlicher Verkehr/OeV, BFS 2020a) sowie des Mikrozensus Mobilität und Verkehr ab (BFS/ARE 2017b).

Die Aggregierte Methode Personenverkehr AMP disaggregiert das BFS-Datenset auf der Ebene Aufkommen (jährliche Personen-Fahrten) und Verkehrsleistung (jährliche Pkm) auf Basis der Ergebnisse der Zeitreihen-Daten des Mikrozensus Mobilität und Verkehr (MZMV) für die Erhebungsjahre 2000, 2005, 2010 und 2015. Dieses vollständig disaggregierte Datenset wurde an den BFS-Eckreihen «kalibriert» (d.h. Struktur stammt aus MZV, abgestimmt auf die Eckdaten BFS). Das Datenset der Aggregierten Methode Personenverkehr AMP ist wie folgt disaggregiert:

Altersklassen	Fahrtzwecke	Modi
<ul style="list-style-type: none"> ▪ bis einschl. 19 Jahre ▪ 20 bis 64 Jahre ▪ 65 Jahre und älter 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Arbeiten ▪ Ausbildung, Schule ▪ Einkaufen ▪ Besorgungen & Inanspruchnahme von Dienstl. ▪ Geschäftliche Tätigkeit, Dienstfahrt ▪ Freizeitaktivität ▪ Anderes 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bahn ▪ Tram, Bus, Trolley ▪ neuer ÖV (ÖIV) ▪ Reiseкар ▪ Auto ▪ Motorrad, Kleinmotorrad ▪ Mofa ▪ E-Bike 45 ▪ E-Bike 25 ▪ Velo, FäG ▪ zu Fuss

Beim Güterverkehr bildet ein analoges, bereits verfügbares Modell – die «Aggregierte Methode Güterverkehr AMG» die Basis der Analysen. Eine zentrale Quelle bildeten zudem Die Ergebnisse der BAV-Studie «Beitrag des Güterverkehrs zur Erreichung der Schweizer Klimaziele» (INFRAS/ifeu 2018).

3. Beschreibung der Szenarien

Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der Szenarien, die in der vorliegenden Studie analysiert werden. In den folgenden Teilkapiteln sind die einzelnen Szenarien vertieft vorgestellt (inkl. Eckwerte). Es ist zu erwähnen, dass es sich dabei um Zielszenarien handelt, das heisst die Szenarien wurden so ausgearbeitet, dass mit ihnen das Ziel eines fossilfreien Verkehrs bis zu einem bestimmten Zeitpunkt erreicht werden kann.

Tabelle 2: Übersicht Szenarien

Szenario-Name	Grundidee
Referenz	Referenzszenario, basierend auf den aktuellsten Verkehrsperspektiven des Bundes (ARE 2016), sowie den neusten Flottenentwicklungsprognosen aus dem Handbuch Emissionsfaktoren, HBEFA (INFRAS 2020a).
Fossilfrei 2050	<i>Basisszenario</i> , basierend auf einem Set an technisch realisierbaren Massnahmen (die kriterienbasiert ausgewählt wurden) zur Erreichung der Fossilfreiheit bis 2050.
Fossilfrei 2040, PtL	Basiert auf Eckpunkten des Basisszenarios Fossilfrei 2050, aber ergänzt mit Umsetzung einer <i>umfassenden PtL-Strategie</i> zur Erreichung der Fossilfreiheit bis 2040.
Fossilfrei 2040, Shift	Ergänzend zum Basisszenario wird ein <i>zusätzlicher Shift zur Nutzung alternativer Antriebe</i> hinterlegt, sodass Verbrennungsmotoren weniger und strombetriebene (v.a. batterieelektrische) Fahrzeuge entsprechend mehr genutzt werden.
Fossilfrei 2040, MIV minimal	Ergänzend zum Basisszenario wird hier eine zusätzliche, <i>sehr hohe Reduktion der Verkehrsnachfrage</i> unterstellt. Dabei wird versucht, bei der Nachfragereduktion (v.a. MIV) und der modalen Verlagerung bis ans Maximum zu gehen. Zusätzlich wird ein maximaler Shift zur Nutzung alternativer Antriebe hinterlegt.
Fossilfrei 2030, MIV minimal	Dieses Szenario ist grundsätzlich identisch wie «Fossilfrei 2040, MIV minimal», d.h. basiert auch auf der gleichen, maximalen <i>Nachfragereduktion</i> . Zusätzlich wird, zur Erreichung der Fossilfreiheit 2030, bereits kurzfristig eine <i>massive PtL-Strategie</i> , verfolgt.

Tabelle INFRAS.

3.1. Referenz

Als Referenzszenario betrachten wir ein «Weiter-Wie-Bisher-Szenario. Das heisst, dass gegenüber dem Status quo keine neuen Massnahmen und Instrumente angenommen werden. Aufgrund der bestehenden Massnahmen (insbesondere durch den CO₂-Grenzwert von 95 bzw. 147 g/km für die Neufahrzeugflotte) und der erwarteten Entwicklung am Fahrzeugmarkt, wird bei den PW und bei den LNF im Referenzszenario ein deutlicher Shift zu Elektromobilität erwartet. Bei den SNF gehen wir in dem Szenario hingegen davon aus, dass:

- in der Referenzentwicklung die konventionellen Fahrzeuge effizienter werden,
- aufgrund der neuen Flottengrenzwerte für SNF in der EU vermehrt methanbetriebene Fahrzeuge auf den Markt kommen werden,

- aber den strombasierten Alternativen (Elektro- und Wasserstoff-LKW) kurz- und mittelfristig noch keine grosse Bedeutung zukommen wird (im Gegensatz zu den Fossilfrei-Szenarien).

Grundlagen für das Referenzszenario sind:

- Verkehrsnachfrage: neuste verfügbare Verkehrsperspektiven des Bundes (ARE 2016). Diese wurden leicht angepasst, indem die Prognosen der Verkehrsperspektiven (für 2018 bis 2050) an die neusten verfügbaren verkehrsstatistischen Daten (bis 2018) gekoppelt wurden.
- Flotten-Technologiezusammensetzung (bzw. Energiebedarf): stützt sich auf die neuste Version des Handbuchs Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (INFRAS 2020).

3.2. Fossilfrei 2050 (Basisszenario)

In diesem Szenario wird angenommen, dass rasch ein umfassendes Set von Massnahmen und Instrumente umgesetzt werden. Die Massnahmen zielen einerseits auf eine Reduktion der Verkehrsnachfrage (vor allem auf der Strasse) und auf eine Verschiebung des Modalsplit hin zu mehr ÖV. Andererseits wollen die Massnahmen auch die Effizienz der Fahrzeugflotte verbessern und die CO₂-Emissionen pro Fahrzeugkilometer reduzieren. Die Massnahmen wurden von INFRAS vorgeschlagen und in einem Workshop mit Vertreterinnen und Vertretern des VCS diskutiert, ausgewählt und priorisiert. Folgende Massnahmen wurden gewählt:

A. Verkehrliche Massnahmen

Für das Basisszenario wurden folgende Schwerpunkte der Massnahmen im Bereich Verkehrsnachfrage definiert (vgl. für die Auswahl der Massnahmen auch Kap. 2.2.1):

- Raum- und Verkehrsplanung (Siedlungs- und Stadtentwicklung nach innen)
- Kosten/Bepreisung des Verkehrs (v.a. des fossil betriebenen Verkehrs)
- Fuss-/Veloverkehr fördern
- ÖV fördern (differenziert, nicht flächig)
- Parkplatz-Politik
- Reduktion MIV-Infrastruktur in Städten und Agglomerationen (Ausnahme: Ladeinfrastruktur)

Die folgende Tabelle zeigt die ausgewählten Massnahmen für das Szenario «Fossilfrei 2050». Es sind dies jene Massnahmen, die basierend auf den im Kapitel 2.2.1 genannten Kriterien (v.a. technische Umsetzbarkeit, jedoch ohne Berücksichtigung der Akzeptanz) ausgewählt wurden. Ebenfalls dargestellt ist der Wirkungsmechanismus bzw. die Umsetzung der Massnahmen im Rahmen der Wirkungsanalyse (Modellierung) der Verkehrsnachfrage sowie die wichtigsten Quellen und Datengrundlagen für die Wirkungsanalyse.

Eine Konkretisierung der Massnahmen mit möglichen Umsetzungsvorschlägen und -instrumenten ist am Ende des Berichts in der Synthese im Kapitel 5.3 dargestellt.

Tabelle 3: Set konkreter Massnahmen für das Basisszenario «Fossilfrei 2050»

Massnahme	Umsetzung/Konkretisierung bei der Modellierung	Grundlagen, Quellen für Wirkungsanalyse
<p>Erhöhung (variable) Kosten für fossilen Verkehr: Substanzielle Verteuerung fossiler Treibstoffe für Personen- und Güterverkehr im Bereich von mind. 1 CHF/l (= gut 400 CHF/t CO₂). Entspricht Erhöhung variable Kosten PW von +$\frac{1}{3}$. Umsetzung z.B. über eine CO₂-Lenkungsabgabe oder beim Güterverkehr eine CO₂-differenzierte LSVA.</p>	<p>Mit Hilfe Preiselastizitäten: Verteuerung um +$\frac{1}{3}$ führt zu einem Rückgang der Nachfrage um ca. 5-10% (betrifft den MIV & alle Fahrzwecke; ist höher im Freizeitverkehr, tief bei Arbeit). Zusätzlich bewirkt die Massnahme einen Shift bei der Flotte (s. unten Teil B. Technologie).</p>	<p>BAFU 2020, Thalmann und Vilelle 2020 & 2019, Landis et al. 2019, Swiss Academies 2019, Swisclean-tec 2019, Ecoplan 2015, BFS 2019</p>
<p>Umfassende Förderung des Fuss- und Veloverkehrs: Infrastrukturausbau v.a. für Veloverkehr in Städten und Agglomerationen (z.B. Veloschnellverbindungen, Begegnungszonen); Priorisierung von Flächen zugunsten des Fuss-/Veloverkehrs.</p>	<p>Massiver Modalshift auf kurzen Fahrten. Kurze PW-Fahrten werden massiv auf FVV umgelagert (ca. 50% der kurzen Wege <2-3km). Zudem Verlagerung eines Teils der Mofa-/Motorrad-Fahrten auf E-Bikes (v.a. E-Bike 45).</p>	<p>BFS/ARE 2017b, INFRAS/Quantis 2020, AFV 2020, Stadt Zürich 2019</p>
<p>Förderung ÖV: fokussierter/differenzierter Angebotsausbau im öffentlichen Verkehr. Ausbau soll nicht flächig erfolgen, sondern v.a. in Agglomerationen (Ausbau ÖV-Angebot analog Kernstädten).</p>	<p>ÖV Bahn (lange Strecken) und ÖV Strasse (Tram, Bus für kurze Strecken) nimmt die vom MIV/PW verlagerten Fahrten auf.</p>	<p>BFS/ARE 2017b, SBB 2019, INFRAS/Quantis 2020, UBA 2019, ARE 2016, UBA 2016, INFRAS/ifeu 2018</p>
<p>Einschränkungen im MIV:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der MIV-Infrastruktur: in Städten und Agglomerationen Reduktion der MIV-Flächen und Umwidmung vom MIV zum Fuss-/Veloverkehr sowie zu Frei-/Grünräumen. ▪ Parkplatz-Politik: Reduktion Anzahl Parkplätze, höhere Bepreisung (flächig, d.h. in Städten, Agglomerationen und auf dem Land) 	<p>Substanzieller Teil der MIV-Fahrten wird aufgrund der höheren variablen Kosten sowie Förderung FVV & ÖV auf diese Verkehrsmittel verlagert. V.a. kurze Fahrten werden umfassend verlagert. Fahrtenlänge MIV/PW stabilisiert sich und sinkt danach um bis zu 10% bis 2050 (=Trendbruch).</p>	<p>BFS/ARE 2017b, INFRAS/Quantis 2020, UBA 2019, UBA 2016, INFRAS/ifeu 2018</p>
<p>Freizeit- und Einkaufsverkehr: weitere Massnahmen zur deutlichen Verringerung und modalen Verlagerung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Raumplanung als zentraler Anknüpfungspunkt (z.B. integrierte Standortwahl verkehrsentensive Einrichtungen) ▪ Bedarfsgerechte ÖV-, Fuss- und Veloverkehrs- und Sharingangebote ▪ Parkplatz-Management (Anzahl, Bepreisung) ▪ Förderung attraktiver Angebote (z.B. ÖV-Kombi-Angebote, Gepäcktransporte Ferien, Heimlieferdienste) ▪ Klimafreundliche City-Logistik 	<p>Verteuerung des Angebots auf der Strasse, Verknappung des Parkplatzangebots und v.a. die neuen Angebote für fossilfreie Mobilitätsformen führen zu Modalshift und Verkürzung der Wege: Verkehrszwecke Freizeit und Einkauf: deutlicher Rückgang der MIV-Fahrten (Verlagerung auf ÖV und FVV – ca. $\frac{1}{3}$ bis 2050) sowie leichter Rückgang der Fahrtenlänge</p>	<p>BFS/ARE 2017b, INFRAS/Quantis 2020, UBA 2019</p>

Massnahme	Umsetzung/Konkretisierung bei der Modellierung	Grundlagen, Quellen für Wirkungsanalyse
Arbeitsverkehr: weitere Massnahmen zur deutlichen Verringerung und modalen Verlagerung: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Förderung Homeoffice, virtuelle Sitzungen ▪ Förderung Shared Working Spaces (mit Ziel Pendlerfahrten zu vermeiden) ▪ Förderung virtueller Tools (z.B. Videokonferenzen) ▪ Verringerung Präsenzzeiten in (Hoch-)Schulen 	<p>Homeoffice führt zu einer Reduktion der Fahrtenzahl. Gesamtpotenzial von Homeoffice (gemäss Quellen) 25-50% aller Beschäftigten (an ca. 1-2 Tagen), davon wird aber bereits 10-20% genutzt. Zusatzpotenzial max. 10% aller Fahrten.</p> <p>Verringerung Präsenzzeiten an Hochschulen: Potenzial 10% bis max. 20%. Verkehrszweck Arbeit und Ausbildung: Rückgang der Wege/Fahrten.</p>	<p>INFRAS 2016, IWSB / KIT / SNZ 2016, FehrAdvice 2016, Ecoplan 2015, EBP, HSLU, KOF ETHZ 2014, Wehrli-Schindler 2012</p>
Ausbau & Förderung Sharing- und Pooling-Angebote: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausbau/Förderung Ride-Sharing (privat) ▪ Ausbau/Förderung Ride-Pooling (kommerzielle Anbieter) ▪ Ausbau/Förderung Car-Sharing ▪ Förderung fossilfreier, multimodaler Angebote 	<p>Sharing-Angebote bewirken v.a. Umsteigeeffekte vom MIV auf den ÖV & FVV, weil Sharing-Nutzende PW-Fahrten reduzieren & oft auf ein eigenes Fahrzeug verzichten.</p> <p>Pooling bewirkt v.a. Erhöhung der Auslastung. Allerdings ist Pooling nur z.T. Verlagerung nicht gepoolter MIV-Fahrten, auch Verlagerung vom ÖV.</p>	<p>IWSB / KIT / SNZ 2016, INFRAS 2016, Swiss Economics / HSLU 2018, Interface 2018, PTV Swiss AG, ETH Zürich, Rundum mobil AG 2011</p>
Raumplanerische Massnahmen für eine Siedlungsentwicklung nach innen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Integrierte Standortwahl Verkehrsintensive Einrichtungen (s.oben) ▪ Förderung autofreie Siedlungen/Haushalte ▪ Förderung gemischte Zonen Wohnen/Arbeiten 	<p>Keine direkte Umsetzung im Modell. Ist eine Rahmenbedingung, flankierend zu den oben genannten Massnahmen.</p>	-

Tabelle INFRAS.

Nicht Teil der Massnahmen des Basisszenarios Fossilfrei 2050 sind grosse, neue Verkehrsinfrastrukturen, wie z.B. Cargo Sous Terrain.

Für die einzelnen Massnahmen wurden im Rahmen der Modellierung teilweise noch vertiefte Überlegungen zum Potenzial und der Wirkung der Einzelmassnahmen angestellt und beigezogen (basierend auf den oben genannten Grundlagen/Quellen). Aus dem dargestellten Set an Massnahmen wurde mit Hilfe des Verkehrsnachfragemodells (Personenverkehr: Aggregierte Methode Personenverkehr AMP) die Gesamtwirkung abgeschätzt (vgl. zum Vorgehen Kap. 2.2.4)

Im Güterverkehr wurde keine eigene vertiefte Modellierung für die Verkehrsnachfrage vorgenommen. Stattdessen wurden weitgehend die Wirkungspotenziale bzw. Ergebnisse aus der Studie des BAV zum «Beitrag des Güterverkehrs zur Erreichung der Schweizer Klimaziele» (INFRAS/ifeu 2018) übernommen und mit den Erkenntnissen aus weiteren Quellen ergänzt (z.B. UBA 2019, UBA 2016, UBA 2016b, INFRAS/Quantis 2020). In der BAV-Studie wurden

verschiedene Klimaschutzszenarien berechnet – eines mit technischen Massnahmen und eines mit regulativen Massnahmen. Die Ergebnisse des Szenarios «Klimaschutz regulativ» bilden die Basis für die Wirkungen im Güterverkehr im vorliegenden Basisszenario «Fossilfrei 2050».

B. Technische Massnahmen

Im Bereich der technischen Massnahmen – die zu einer Veränderung der Flotte bzw. Technologie führen – werden folgende Massnahmen für das Basisszenario 2050 vorgeschlagen:

1. Flottengrenzwerte gemäss CO₂-Gesetz für PW, LNF und SNF (Stand Sept. 2020)
Wirken vor allem sehr kurzfristig, da vor 2025 kaum andere Massnahmen in Kraft sein werden. Wenn die anderen hier vorgestellten Massnahmen umgesetzt werden, werden die Grenzwerte der EU ab ca. 2030 deutlich unterschritten. Entsprechend wird diese Massnahme praktisch von 2., 3. und 4. abgelöst bzw. ergänzt.
2. Quoten für den Verkauf von Neufahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (Plug-in-Hybride gelten als 50% Verbrenner und 50% Alternative)
PW & LNF: 2030: <40% Verbrenner; 2040: 0% Verbrenner
LKW & Reisebusse: 2030: <65% Verbrenner; 2040: <42% Verbrenner; 2050: 0% Verbrenner
Motorräder: 2030: 0% Verbrenner.
3. Quoten für die Anschaffung von ÖV-Bussen
ÖV-Busse: 2025: <50% Verbrenner; 2040: 0% Verbrenner (die 50% in 2025 sind die Stadt- und Agglomerationsbusse, Rest sind Regionalbusse).
4. Verkauf von grossen/verbrauchsstarken Fahrzeugen wird nur mit Bedarfsnachweis erlaubt.
Es werden Gewichts- und Leistungslimits eingeführt (Flottengrenzwert).
Ab 2025 darf ein PW mit Verbrennungsmotor im Schnitt max. 1.5 t wiegen und 120 kW Leistung haben. BEV dürfen 300 kg schwerer sein, Leistung bei BEV nicht relevant.
Max. 10% der Neuwagen können bei einem Nachweis des Bedarfs aus den Grenzwertberechnung ausgenommen werden.
5. Fossile Treibstoffe verteuern/finanziell belasten (für Personen- und Güterverkehr): z.B. in der Form einer CO₂-Abgabe von ungefähr 400 CHF/t (ca. 1 CHF/Liter Treibstoff), gekoppelt an Rohölpreis (damit ein Preiszerfall nicht Wirkung kaputt macht) mit Rückverteilung an die Bevölkerung ab 2025. Beim Güterverkehr auch Umsetzung über CO₂-differenzierte LSVA möglich.
6. Car-Sharing mit fossilfreien Fahrzeugen wird gefördert. Ziel der Massnahme ist, dass insbesondere BEV möglichst intensiv genutzt werden. Dadurch kann relativ rasch ein grosser Anteil der gesamten Fahrleistung von fossilfreien Fahrzeugen erbracht werden.

Subsidiär dazu sind folgende weiteren Massnahmen nötig:

7. Bereitstellen von E-Ladestationen auf Autobahnen
8. Bereitstellen von E-Ladestationen in MFH für Mieter
9. Bereitstellen von öffentlich zugänglichen E-Ladestationen, z.B. in Parkhäusern
10. Fördern von nachhaltiger Stromproduktion
11. Fahrzeuge ausrüsten für Digitalisierung → Effekt ist bessere Verkehrslenkung/Auslastung.

Die technischen Massnahmen wirken auf die Neufahrzeugflotte (1 bis 4) und auf die Nutzung der Technologien in der Gesamtflotte (5, 6). Sie manifestieren sich im Flottenmodell wie folgt:

- Verkleinerung der Neuwagenflotte als Folge der Reduktion der Fahrleistung der Gesamtflotte (dies v.a. infolge der Massnahmen im Bereich Verkehrsnachfrage).
Durch die deutliche Reduktion der Jahresfahrleistungen auf Schweizer Strassen werden künftig weniger Fahrzeuge benötigt. Im Modell gehen wir davon aus, dass sich die Anzahl neu zugelassener Fahrzeuge pro Jahr parallel zu der Fahrleistung der entsprechenden Fahrzeugtypen entwickelt.
- Erhöhung Effizienz, v.a. bei fossil angetriebenen Fahrzeugen (Reduktion Verbrauch pro km)
 - Optimierung Motoren und Getriebe (inkl. rascher Hybridisierung und Reduktion Anteil 4x4) sowie Fahrwiderstände ab sofort für alle Fahrzeuge
 - Reduktion von Masse (kleinere Fahrzeuge/Leichtbau) und Leistung bei PW ab 2020².
- Kauf und Nutzung klimaschonenderer Technologien werden gestärkt, ohne sie finanziell zu fördern:
 - Shift von Benzin- und Diesel- zu Gas- und Elektrofahrzeugen (Batterie- und ggf. Brennstoffzellenfahrzeuge). Bei PW und LNF vor allem Shift zu BEV, bei LKW kurzfristig zu Erdgas und Brennstoffzellen, später zu Brennstoffzellen und BEV. Ab sofort, ab 2030 verstärkt.
 - Anteile von fossilen Technologien an der jährlichen Fahrleistung pro Fahrzeug wird gesenkt.
 - Shift von fossilen zu biogenen und später zu synthetischen Treibstoffen (PtX).

Alternativ zu den Massnahmen 2 und 4 könnten auch die CO₂-Flottengrenzwerte schrittweise weiter gesenkt werden. Allerdings müssten der Bonus für schwere Fahrzeuge in der Berechnung sowie die Anrechenbarkeit von synthetischen Treibstoffen eliminiert werden. Letzteres ist nötig, da die Anrechnung von PtL es ermöglicht, weiterhin ineffiziente Verbrennerfahrzeuge in Verkehr zu setzen, die langfristig den Bedarf nach flüssigen Kohlenwasserstoffen hochhalten.

² Masse und Leistung der PW könnten nach Beschluss der Massnahme bis 2024 auch steigen (Boliden kaufen, solange man noch darf). Im Modell gehen wir aber davon aus, dass die Importeure frühzeitig anfangen werden, sich auf das Ziel zuzubewegen.

Ebenfalls denkbar wäre, eine zusätzliche finanzielle Belastung von konventionellen Fahrzeugen (Malus) bzw. von Fahrzeugen mit hohem CO₂-Ausstoss.

Dieses Szenario («Fossilfrei 2050») wird in der Modellvariante «Fossilfrei, Basis» berechnet.

3.3. Fossilfrei 2040

Dieses Szenario basiert auf dem Szenario «Fossilfrei 2050». Um das Ziel bereits in 2040 zu erreichen, sind weitergehende Massnahmen nötig. Diese müssen sehr gezielt den Verbrauch von fossilen Treibstoffen angehen, da sonst eine Reduktion auf null nicht erreichbar ist. Darum steht eine weitere Verteuerung fossiler Treibstoffe ab 2030 im Vordergrund. Um die gewünschte Wirkung zu zeigen, müssten fossile Treibstoffe ab 2040 teurer sein als synthetische Treibstoffe (Power-to-liquid, PtL), damit man davon ausgehen kann, dass der fossile Verbrauch auf 0 zurückgeht. Da nicht klar ist, ob genügend PtL Treibstoffe verfügbar sein werden und wie teuer diese dann wären, muss zum Erreichen von fossilfreiem Verkehr ab 2040 gegebenenfalls zusätzlich ein Fahrverbot für konventionelle PW und LNF in Betracht gezogen werden (mit speziellen Ausnahmen), damit zumindest für den Schwerverkehr, bei dem flüssige Kohlenwasserstoffe als Treibstoff viel schwieriger zu ersetzen sein werden, genügend synthetische Treibstoffe zur Verfügung stehen.

Entsprechend wird zusätzlich zu den in «Fossilfrei 2050» genannten Massnahmen angenommen, dass auf dem Schweizer Markt ab 2040 keine fossilen Treibstoffe mehr zu konkurrenzfähigen Preisen verfügbar sein werden. Auch der Import für Eigenbedarf wird stark beschränkt, um zu verhindern, dass der Tanktourismus verstärkt wird und vermehrt fossile Treibstoffe für den Gebrauch in der Schweiz in den Nachbarländern getankt wird. Es sind grundsätzlich unterschiedliche Reaktionen auf diese Massnahme denkbar. Wir bilden diese in drei Varianten ab:

- a) **Power-to-Liquid-Strategie («Fossilfrei 2040, PtL»):** Der Bedarf an fossilen Treibstoffen wird ab 2040 1:1 durch PtL-Treibstoffe gedeckt. Dies erfolgt durch Umsetzung einer umfassenden PtL-Strategie in der Schweiz, mit der die verbleibenden Verbrennungsmotoren bis 2040 mit PtL betrieben werden. Die Verkehrsnachfrage (insgesamt und je Verkehrsmittel) ist in diesem Szenario unverändert wie im Basisszenario Fossilfrei 2050.

Diese Variante ist dann wahrscheinlich, wenn im Jahr 2040 PtL in grossen Mengen zu einem relativ günstigen Preis verfügbar sein wird. Das Szenario basiert auf der Modellrechnung «Fossilfrei, Basis».

- b) **Zusätzlicher Shift zu alternativen Antrieben («Fossilfrei 2040, Shift»):** Die Fahrleistungen von leichten Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren werden spezifisch reduziert. Dafür wird die Fahrleistung von leichten Fahrzeugen mit alternativen Antrieben (insbesondere

batterieelektrische Fahrzeuge BEV, z.T. Wasserstoff-Fahrzeuge) erhöht. Der verbleibende Bedarf an fossilen Treibstoffen wird durch PtL gedeckt. Insgesamt ist die Verkehrsnachfrage in diesem Szenario unverändert wie im Basisszenario Fossilfrei 2050.

Diese Variante ist wahrscheinlich, wenn PtL im Jahr 2040 so knapp ist, dass die Nutzung auf bestimmte Anwendungen (z.B. Schwerverkehr) beschränkt wird. Das Szenario basiert auf der Modellrechnung «Fossilfrei, Shift».

- c) **Zusätzliche Reduktion Verkehrsnachfrage (Fossilfrei 2040, MIV minimal):** Die Fahrleistungen insgesamt werden noch weiter reduziert als in a) und b). Dabei wird die Fahrleistung von konventionellen inländischen PW und LNF bis 2040 auf 0 reduziert. Dies bedeutet eine zusätzliche, sehr hohe (maximale) Reduktion der Fahrleistung auf der Strasse und ein zusätzlicher Shift auf Bahn, ÖPNV, Velo- und Fussverkehr. Der verbleibende Bedarf an fossilen Treibstoffen (für den Schwerverkehr und ausländische PW) wird durch PtL gedeckt.

Die sehr hohe zusätzliche Reduktion der Verkehrsnachfrage orientiert sich primär an den maximalen Reduktionspotenzialen beim PW-Verkehr. Diese Reduktion erfolgt durch eine weitere, sehr deutliche Verteuerung des (fossilen) Strassenverkehrs (z.B. durch eine massiv höhere CO₂-Abgabe), einen zusätzlichen massiven Ausbau des Fuss- und Veloverkehrsangebots (Infrastruktur) sowie des ÖV und einer weiteren Umwidmung von MIV-Flächen v.a. in Städten und Agglomerationen. Die modale Verlagerung vom MIV auf Schiene und Strasse sowie die Verkürzung der Fahrdistanzen liegt bei diesem Szenario beim absoluten Maximum. Im Bereich der Verkehrsnachfrage stellt das Szenario folglich ein Minimalszenario dar.

Diese Variante ist dann wahrscheinlich, wenn PtL im Jahre 2040 so knapp ist, dass die Nutzung auf bestimmte Anwendungen beschränkt wird. Sie dient dazu auszuloten, wieviel zusätzlich erreicht werden könnte durch eine maximale Reduktion der Fahrleistung bei PW. Das Szenario basiert auf der Modellrechnung «Fossilfrei, MIV minimal».

3.4. Fossilfrei 2030

Fossilfreier Verkehr wäre 2030 praktisch nur mit einem Verbot fossiler Treibstoffe ab 2030 zu erreichen. Die Reaktionen auf ein solches Verbot dürften prinzipiell ähnlich aussehen wie bei «Fossilfrei 2040, MIV minimal», müssten aber viel schneller und in viel grösserem Ausmass erfolgen.

In der Flotte 2030 wird es noch viel mehr Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren geben als 2040. Auch wird die Verkehrsnachfrage 2030 in den Reduktionsszenarien noch höher sein als 2040. Zudem wird die Produktionskapazität für PtL noch deutlich geringer sein als 2040, was bedeutet, dass die Preise für PtL noch viel höher liegen werden.

4. Ergebnisse Wirkungsanalyse

4.1. Referenz

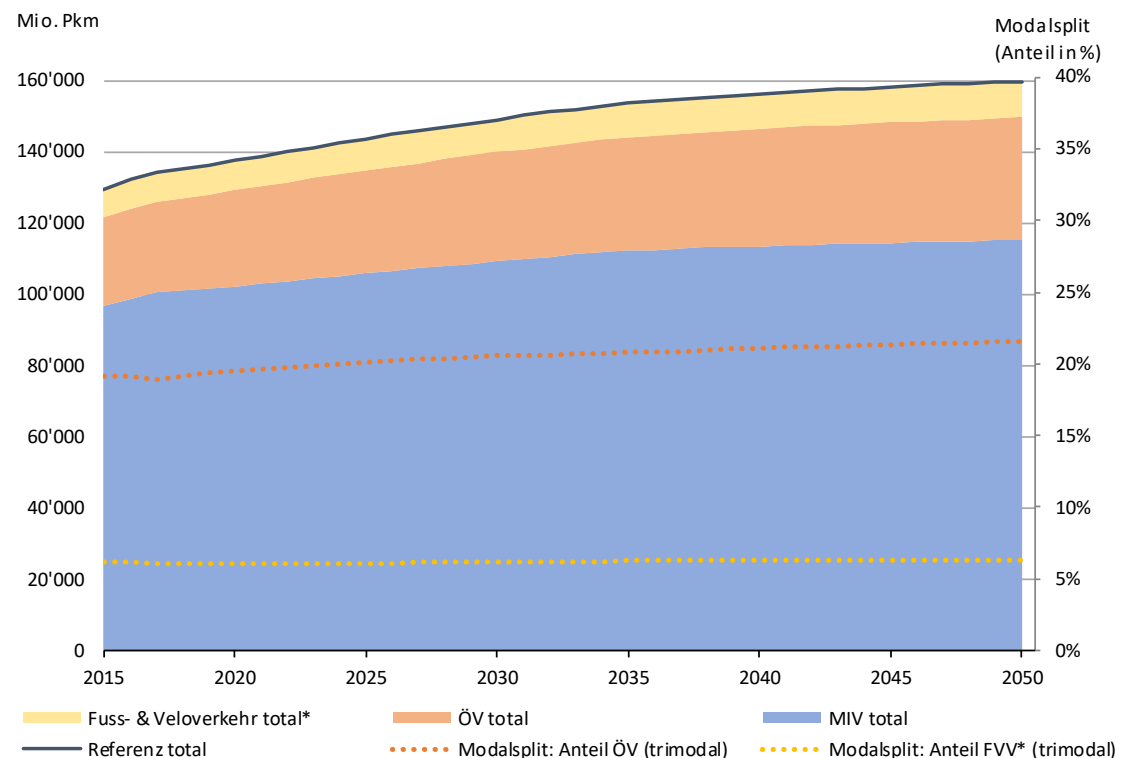
Das Referenzszenario bildet die erwartete «Business-as-usual»-Entwicklung der Verkehrsnachfrage und der Flottenzusammensetzung ab. Das Szenario stützt sich im Bereich der Verkehrsnachfrage auf die aktuellsten Verkehrsperspektiven des Bundes (ARE 2016) und bei der Flottenzusammensetzung auf das neuste Handbuch Emissionsfaktoren im Strassenverkehr (HBEFA 4.1). Das Referenzszenario bildet direkt die Ergebnisse der Modellvariante «Referenz» ab.

Verkehrsnachfrage

Im Referenzszenario steigt die Verkehrsnachfrage aller Fahrzeugkategorien an. Die Verkehrsleistung (pkm) im Strassenverkehr nimmt von 2018 bis 2050 im MIV um 13% zu. Im ÖV beträgt die Zunahme im gleichen Zeitraum 33%, im Fuss- und Veloverkehr rund 24% (vgl. Abbildung 5).

Abbildung 5: Entwicklung Verkehrsleistung (pkm) im Personenverkehr – Referenzszenario

Die Sekundärachse zeigt die Entwicklung des Modalsplits (Anteil ÖV und FVV: Fuss-/Veloverkehr)



FVV: Fuss- und Veloverkehr. * Fuss- und Veloverkehr inkl. E-Bikes. ÖV total: ÖV Schiene und ÖV Strasse.

Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnungen.

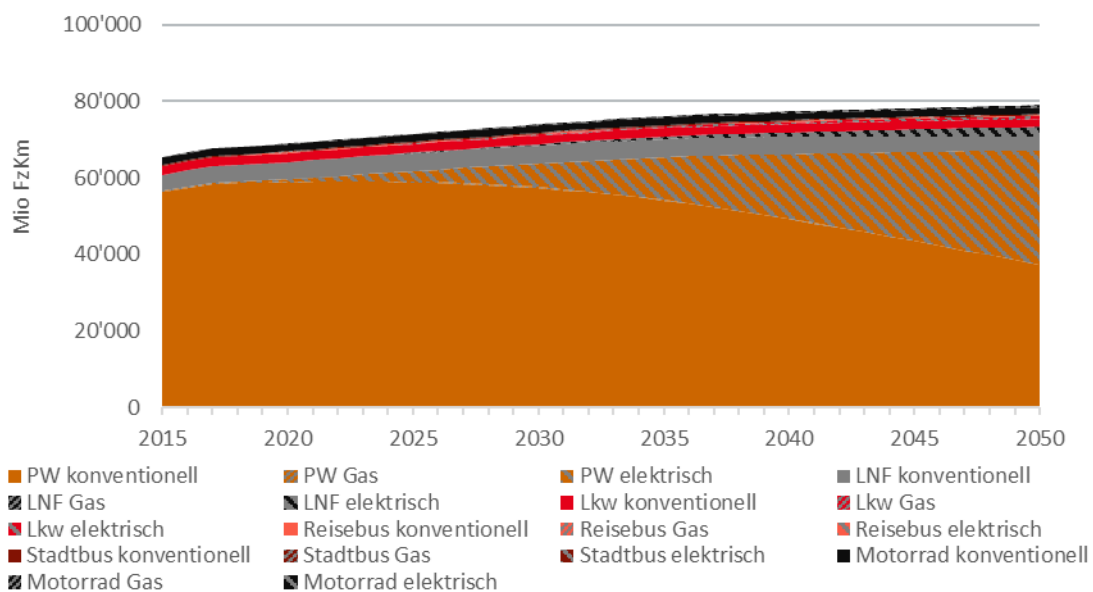
Der ÖV-Anteil steigt damit von 19% auf 21.5%, der Anteil des Fuss- und Veloverkehrs bleibt in etwa konstant (6.3% im Jahr 2050 gegenüber 6.0% im Jahr 2018). Die Entwicklung der Gesamtnachfrage im Personenverkehr sowie des ÖV- sowie Fuss- und Veloverkehrs-Modalsplits zeigt die Abbildung 5.

Im Güterverkehr wird gemäss Referenzszenario mit einem noch stärkeren Wachstum gerechnet: Bis 2050 soll die Güterverkehrsleistung (tkm) gegenüber 2020 um 33% zunehmen, wobei das Wachstum auf der Strasse mit 29% geringer ist als auf der Schiene (+40%).

Die Fahrleistung (Fzkm) nimmt in etwa parallel zur Verkehrsleistung zu. Die Abbildung 6 zeigt die Entwicklung der Fahrleistungen (Fzkm) des gesamten Strassenverkehrs, wobei die verschiedenen Fahrzeugkategorien (und Antriebsarten) differenziert dargestellt sind.

Die Fahrleistungen steigen bis 2050 in allen Fahrzeugkategorien deutlich an. Zu verzeichnen ist allerdings ein Shift in der Antriebstechnologie bei allen Fahrzeugkategorien, insbesondere auf E-Fahrzeuge (v.a. PW, LNF). Basis für die Referenzentwicklung der gesamten Verkehrsnachfrage sind die Verkehrsperspektiven 2040 des ARE mit der Projektion auf 2050 (ARE 2016). Die Fahrleistung (Fzkm) der PW steigt bis 2050 gegenüber 2020 um 13%. Bei den leichten Nutzfahrzeugen LNF (Lieferwagen) wird ein Anstieg von 36% prognostiziert und bei LKW geht ARE von +24% gegenüber 2020 aus.

Abbildung 6: Entwicklung der Fahrleistung (Fzkm) des Strassenverkehrs in der Schweiz in «Referenz»



«konventionell» beinhaltet Benzin- und Dieselfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können.

«Gas» beinhaltet Erdgasfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können.

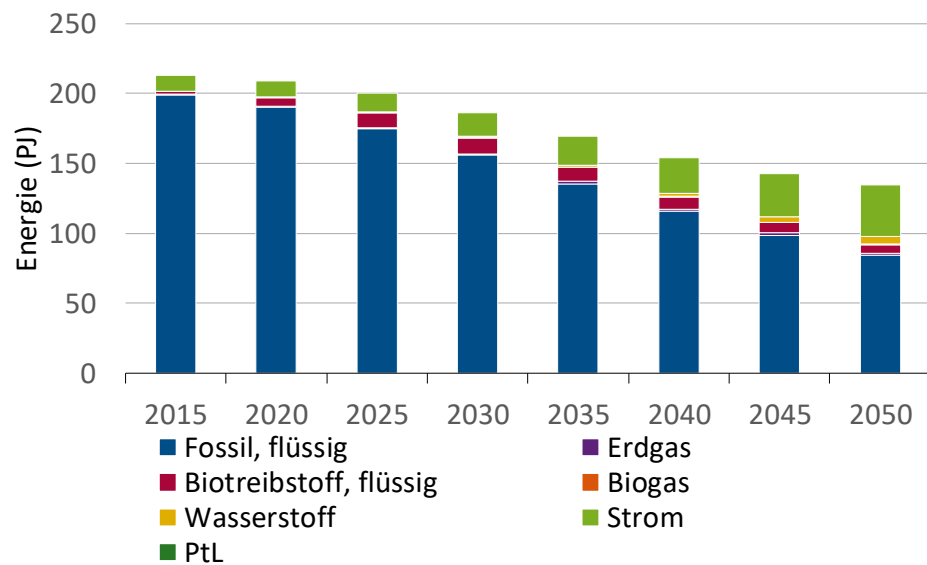
«elektrisch» beinhaltet Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge sowie Plug-in-Hybride

Grafik INFRAS. Quellen: INFRAS, ARE 2016.

Energiebedarf und CO₂-Emissionen

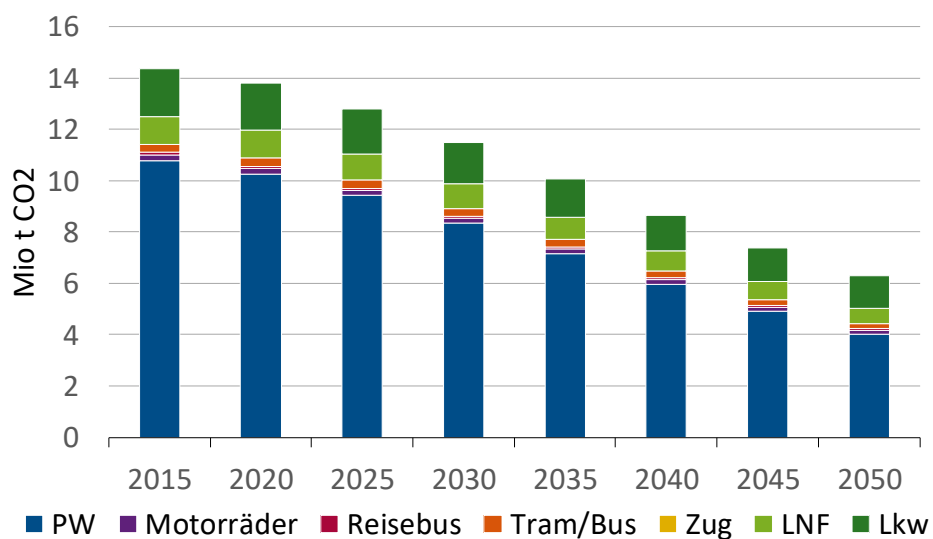
Die Entwicklung der Nachfrage nach diversen Treibstoffen ist in Abbildung 7 dargestellt. Abbildung 8 zeigt die resultierende CO₂-Emission des Verkehrs.

Abbildung 7: Entwicklung des Treibstoffbedarfs des Verkehrs in der Schweiz in «Referenz»



Grafik INFRAS.

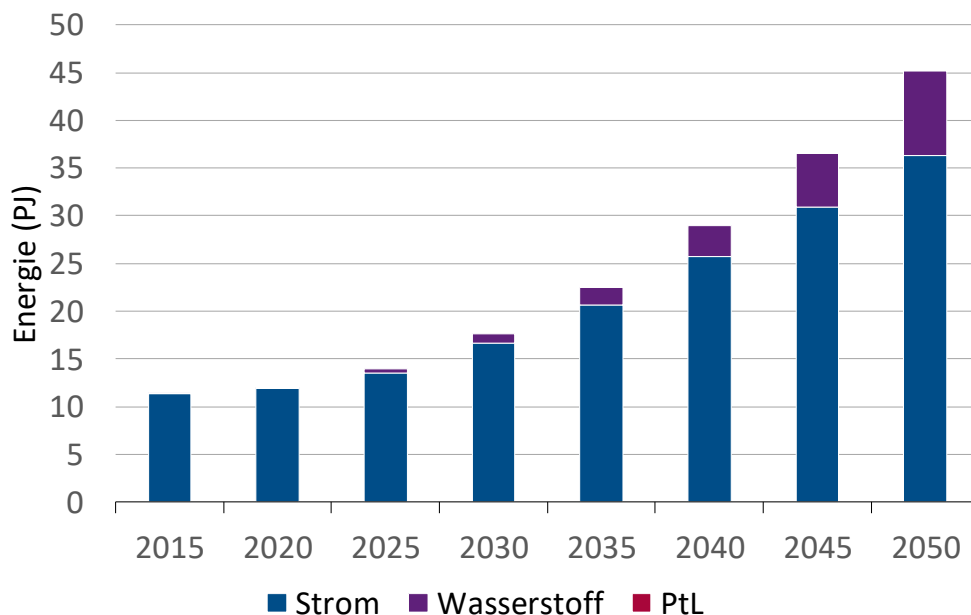
Abbildung 8: Entwicklung der CO₂-Emissionen des Verkehrs in der Schweiz in «Referenz»



Grafik INFRAS.

Unter Berücksichtigung der künftigen Energieeffizienz der Herstellung von Wasserstoff (65%, INFRAS 2020b; Öko-Institut 2019) kann man den totalen Strombedarf abschätzen, der direkt und indirekt durch den Verkehr ausgelöst wird. Die Entwicklung ist in Abbildung 9 dargestellt. 2050 würde also durch den Verkehr ein direkter und indirekter Strombedarf von 45 PJ entstehen, was knapp einem Viertel des heutigen Strombedarfs der Schweiz entspricht (206 PJ in 2019; BFE 2020).

Abbildung 9: Entwicklung des Strombedarfs des Verkehrs in der Schweiz in «Referenz»



Direkter Strombedarf ab Netz bzw. Ladesteckdose für Züge, Trams, Trolleybusse und BEV sowie indirekt verursachter Strombedarf durch Produktion von Wasserstoff und PtL.

Grafik INFRAS.

4.2. Fossilfrei 2050 (Basisszenario)

Verkehrsnachfrage

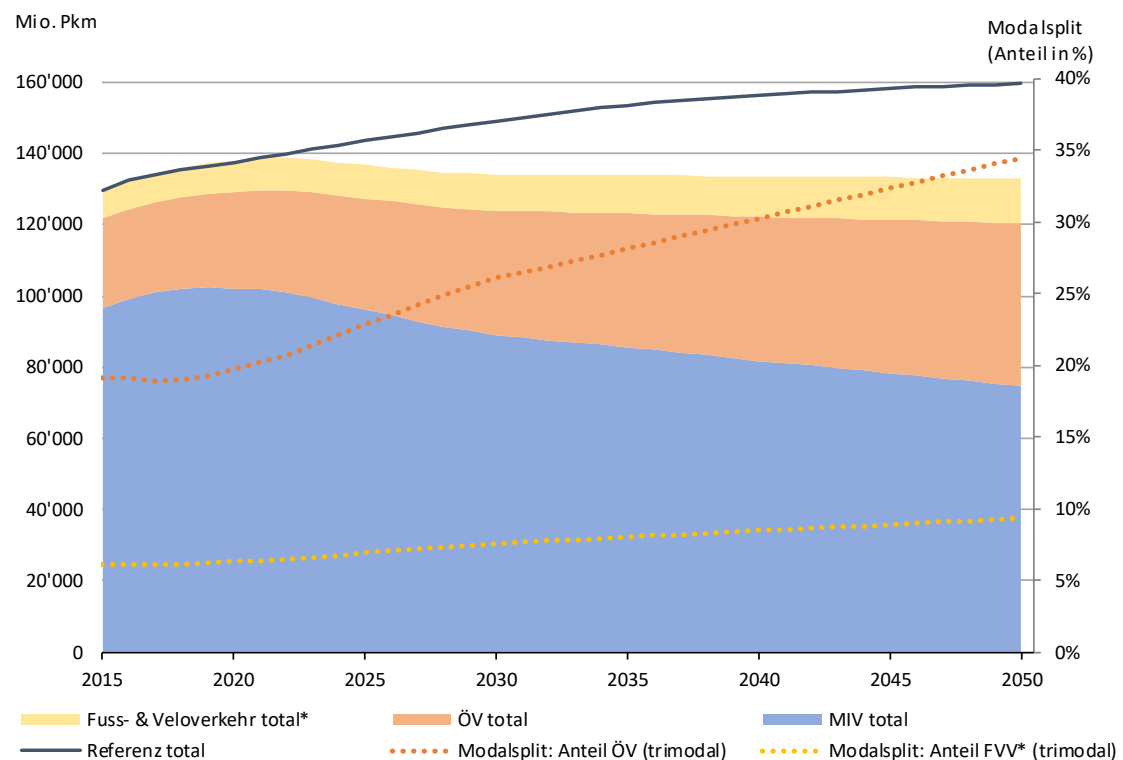
Im Basisszenario «Fossilfrei 2050» bleibt die Gesamtnachfrage im Personenverkehr – MIV, ÖV und Fuss-/Veloverkehr – bis 2050 in etwa auf dem gleichen Niveau wie 2018 bzw. nimmt leicht (-2%) ab. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in dieser Zeit die Bevölkerung gemäss zugrunde gelegter BFS-Prognose um rund 20% zunimmt (BFS 2020b). Im Vergleich zum Referenzszenario ist die gesamte Nachfrage über alle Verkehrsmodi im Personenverkehr 2050 allerdings 17% geringer. Nach einem Anstieg der gesamten Verkehrsleistung bis 2022 sinkt die Gesamtnachfrage

anschliessend leicht. Das Verkehrsaufkommen pro Kopf (Anzahl Wege pro Tag und Person) nimmt im Szenario «Fossilfrei 2050» von 2020 bis 2050 um 5% ab, nachdem es in den letzten 10-15 Jahren stetig zugenommen hat.

Der grösste Nachfragerückgang ergibt sich im Szenario «Fossilfrei, 2050» beim MIV – als Folge der strikten Massnahmen. Die Nachfrage (pkm) sinkt bereits ab 2020 und ist 2050 27% tiefer als 2018 bzw. liegt 2050 37% unterhalb des Referenzszenarios. Im ÖV steigt die Nachfrage bis 2050 sogar deutlich stärker – um 77% verglichen mit 2018, wobei die Bahn um 82% zunimmt und der ÖV Strasse um 55%. Beim Fuss- und Veloverkehr steigt die Verkehrsleistung (pkm) um 48%. Somit steigt der Anteil des ÖV an der Verkehrsleistung (pkm) von heute 19% auf rund 34% im Jahr 2050 an, der Modalsplit des Fuss- und Veloverkehrs von rund 6% auf 9.3%.

Abbildung 10: Entwicklung Verkehrsleistung (pkm) im Personenverkehr – Szenario «Fossilfrei 2050»

Die Sekundärachse zeigt die Entwicklung des Modalsplits (Anteil ÖV und FVV: Fuss-/Veloverkehr)



FVV: Fuss- und Veloverkehr. * Fuss- und Veloverkehr inkl. E-Bikes. ÖV total: ÖV Schiene und ÖV Strasse.

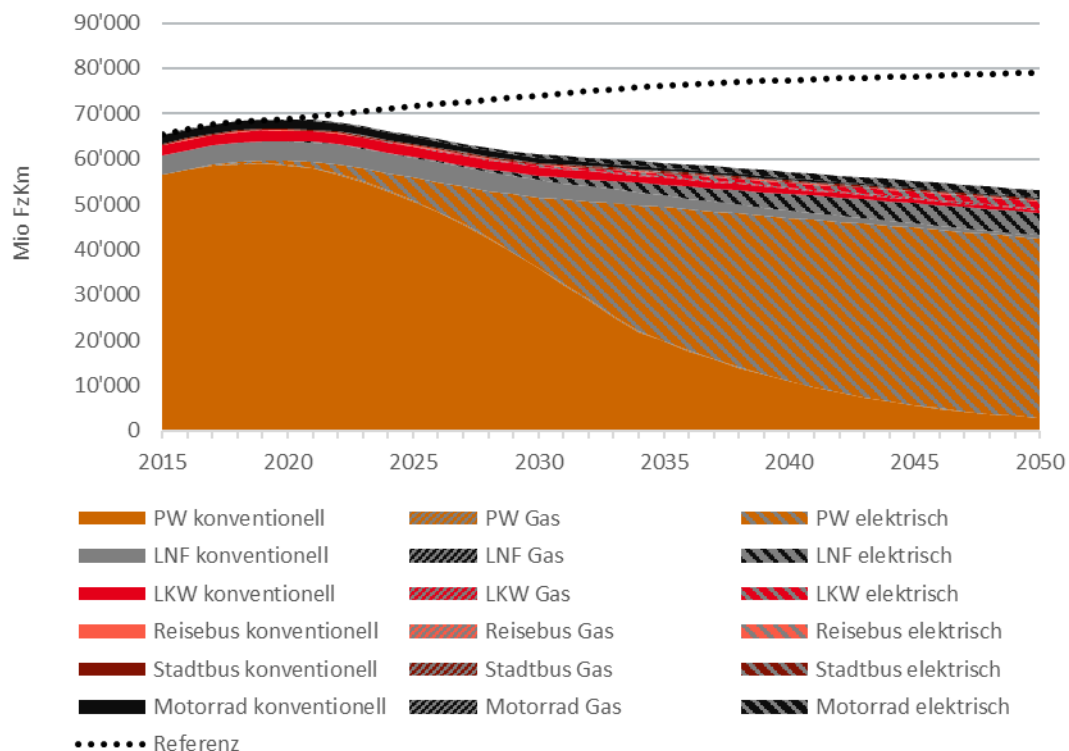
Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnungen.

Im Güterverkehr steigt im Szenario «Fossilfrei 2050» die Verkehrsleistung (tkm) bis 2050 immer noch um 22% an verglichen mit 2018. Allerdings ist die Zunahme geringer als im

Referenzszenario, d.h. die Verkehrsleistung 2050 ist 5% geringer als in der Referenz. Beim schweren Strassengüterverkehr (SNF) ist die Nachfrage 2050 13% geringer als im Referenzszenario, bei den LNF 6% geringer als in der Referenz. Weil eine Verlagerung von der Strasse auf die Schiene stattfindet, steigt die Verkehrsleistung beim Schienengüterverkehr bis 2050 um 37% an (vgl. mit 2018), und liegt 2050 4% über der Referenzentwicklung.

Die Fahrleistung (Fzkm) verändert sich in etwa parallel zur Verkehrsleistung, im Strassenverkehr noch leicht verstärkt aufgrund der leicht zunehmenden Auslastung. Die Abbildung 11 zeigt die Entwicklung der Fahrleistungen (Fzkm) des gesamten Strassenverkehrs, wobei die verschiedenen Fahrzeugkategorien (und Antriebsarten) differenziert dargestellt sind.

Abbildung 11: Entwicklung der Fahrleistung (Fzkm) auf der Strasse in «Fossilfrei 2050»



«konventionell» beinhaltet Benzin- und Dieselfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können.

«Gas» beinhaltet Erdgasfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können.

«elektrisch» beinhaltet Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge sowie Plug-in-Hybride

Grafik INFRAS.

Die Fahrleistung (Fzkm) im Strassenverkehr liegt 2050 im Szenario «Fossilfrei 2050» um einen guten Drittel unter dem Referenzszenario. Der überwiegende Teil der Fahrleistung im Strassenverkehr wird 2050 von nicht-fossilen bzw. elektrischen Fahrzeugen betrieben.

Die Fahrleistungen steigen bis 2050 in allen Fahrzeugkategorien deutlich an. Zu verzeichnen ist allerdings ein Shift in der Antriebstechnologie bei allen Fahrzeugkategorien, insbesondere auf E-Fahrzeuge (v.a. PW, LNF). Im Jahr 2050 werden lediglich gut 4'000 Mio. Fzkm – also deutlich weniger als 10% der Fahrleistung auf der Strasse – mit fossilen Treibstoffen zurückgelegt.

Energiebedarf und CO₂-Emissionen

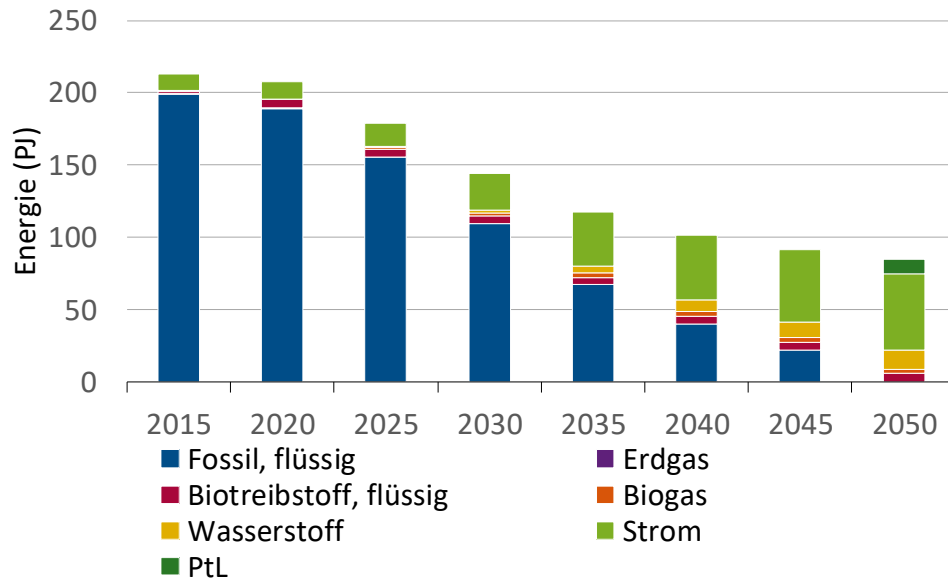
Dieses Szenario nutzt die Modellvariante «Fossilfrei, Basis», die sämtliche Massnahmen berücksichtigt, die in dem Szenario angenommen wurden. Wie im Annex 2 B gezeigt wird, werden gemäss diesem Szenario noch zusätzliche Massnahmen benötigt, um den Verkehr ab 2050 komplett fossilfrei zu betreiben. Im Vordergrund steht, fossile Treibstoff ab 2050 zu verbieten oder soweit zu verteuern, dass PtL günstiger sein wird. Auf solche Massnahmen sind folgende Reaktionen bzw. Kombinationen davon denkbar:

- Die gut 10 PJ, die als flüssige Kohlenwasserstoffe benötigt werden, werden mit synthetischen Treibstoffen (PtL) gedeckt.
- Die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren werden weniger eingesetzt und die dadurch wegfallende Fahrleistung wird durch Fahrzeuge mit alternativen Antrieben erbracht. Der verbleibende Bedarf an flüssigen Kohlenwasserstoffen wird durch PtL gedeckt.
- Die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren werden spätestens ab 2050 weniger eingesetzt und die wegfallende Fahrleistung wird nicht ersetzt. Der verbleibende Bedarf an flüssigen Kohlenwasserstoffen wird durch PtL gedeckt.

Da PtL 2050 mit hoher Wahrscheinlichkeit in grossen Mengen als Treibstoff in der Luftfahrt eingesetzt werden wird, dürften 10 PJ (entspricht ca. 293 Mio. Liter Diesel) problemlos zu vertretbaren Kosten verfügbar sein.

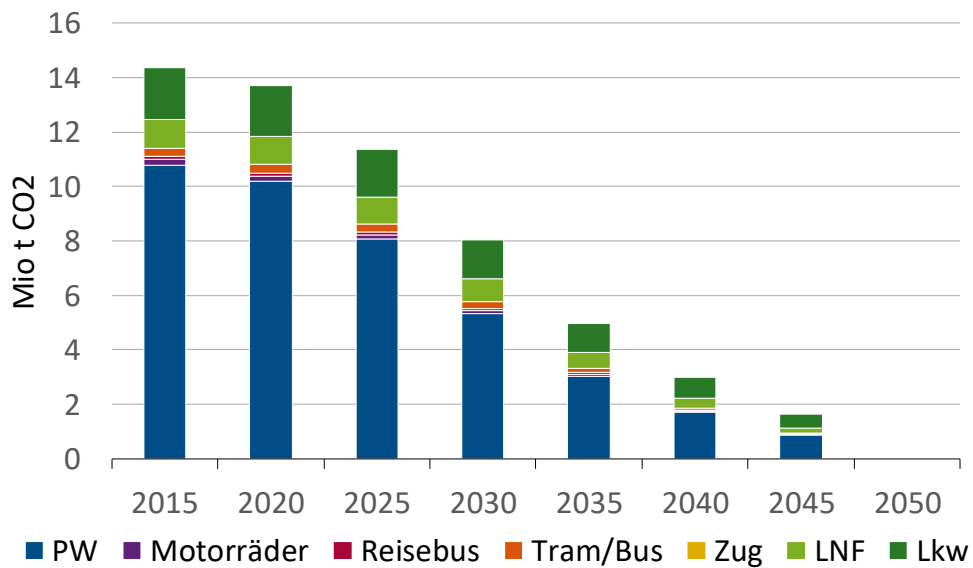
Auch die Fahrleistungen, die 2050 noch mit konventionellen Fahrzeugen erbracht werden (vgl. Tabelle 22), sind so gering, dass der Teil, der nicht mit biogenen Treibstoffen gedeckt werden kann, relativ einfach durch Fahrzeuge mit alternativen Antrieben erbracht werden könnte. Es darf also davon ausgegangen werden, dass jede der Varianten tatsächlich auch möglich sein wird.

Abbildung 12: Entwicklung des Treibstoffbedarfs des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei 2050»



Grafik INFRAS.

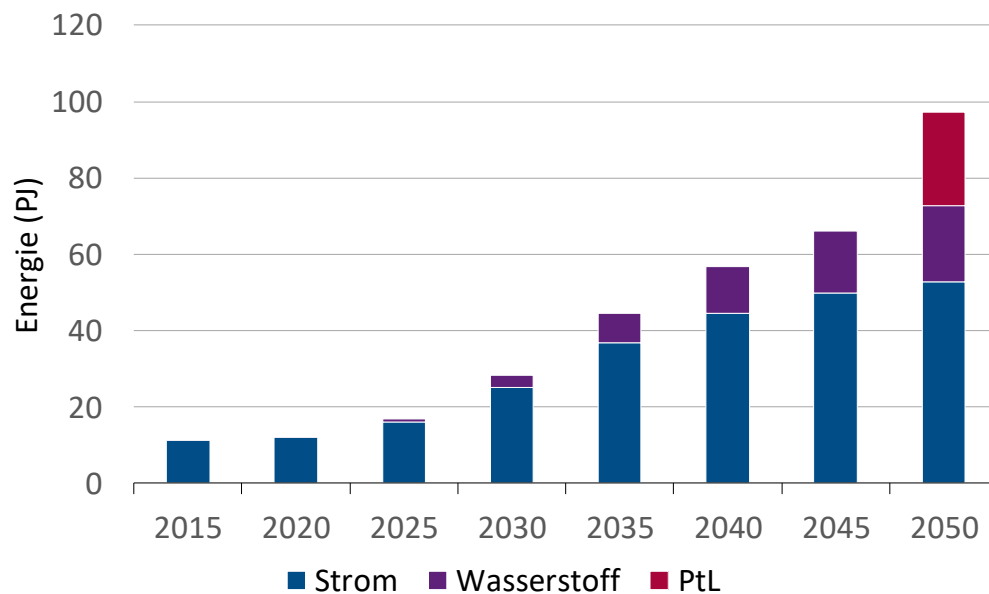
Abbildung 13: Entwicklung der CO₂-Emissionen des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei 2050»



Grafik INFRAS.

Unter Berücksichtigung der Energieeffizienz der künftigen Herstellung von Wasserstoff (65%; INFRAS 2020b; Öko-Institut 2019) und PtL (42.5%; INFRAS 2020b; Öko-Institut 2019) kann man den totalen Strombedarf abschätzen, der direkt und indirekt durch den Verkehr ausgelöst wird. Für die weitere Diskussion gehen wir davon aus, dass der verbleibende Bedarf an flüssigen Kohlenwasserstoffen vollständig durch PtL gedeckt wird, was im höchstmöglichen Strombedarf für dieses Szenario resultiert. Die Entwicklung ist in Abbildung 14 dargestellt. 2050 würde also durch den Verkehr ein direkter und indirekter Strombedarf von 97 PJ entstehen, was knapp der Hälfte des heutigen Strombedarfs der Schweiz entspricht (206 PJ in 2019; BFE 2020).

Abbildung 14: Entwicklung des Strombedarfs des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei 2050»



Direkter Strombedarf ab Netz bzw. Ladesteckdose für Züge, Trams, Trolleybusse und BEV sowie indirekt verursachter Strombedarf durch Produktion von Wasserstoff und PtL.

Grafik INFRAS.

4.3. Fossilfrei 2040

Wir betrachten 3 Varianten, wie der Landverkehr in der Schweiz bereits 2040 fossilfrei betrieben werden könnte. Tabelle 4 stellt die Varianten zusammen und zeigt auf, auf welchen Modellrechnungen sie beruhen.

Tabelle 4: Szenarien und Modellvarianten

Szenario, Variante	Modellvariante
Fossilfrei 2040, PtL	Fossilfrei, Basis
Fossilfrei 2040, Shift	Fossilfrei, Shift
Fossilfrei 2040, MIV minimal	Fossilfrei, MIV minimal

Tabelle INFRAS.

4.3.1. PtL Strategie («2040 PtL»)

Analog zu den Betrachtungen in 4.2, gehen wir davon aus, dass die ab 2040 benötigten Mengen an flüssigen Kohlenwasserstoffen durch PtL gedeckt werden. Bezüglich Flotten und Fahrleistungen gelten die Entwicklungen gemäss «Fossilfrei, Basis».

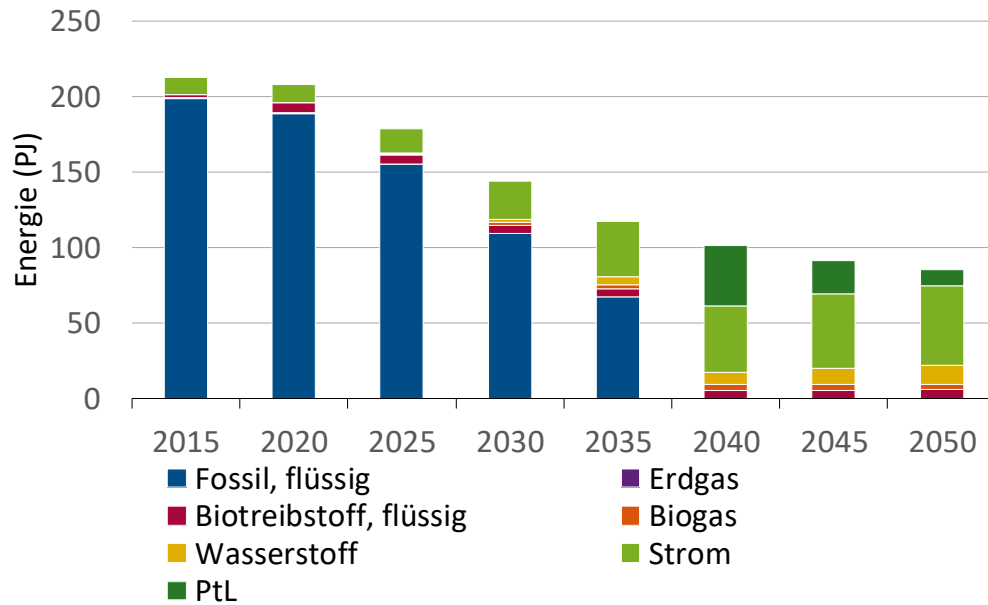
Verkehrsnachfrage

Beim Szenario «Fossilfrei 2040, PtL» ist die Verkehrsnachfrage (Verkehrs- und Fahrleistung) unverändert gegenüber dem Basisszenario «Fossilfrei 2050») und somit gleich wie in Abbildung 10 und Abbildung 11 (vgl. Kap. 4.2).

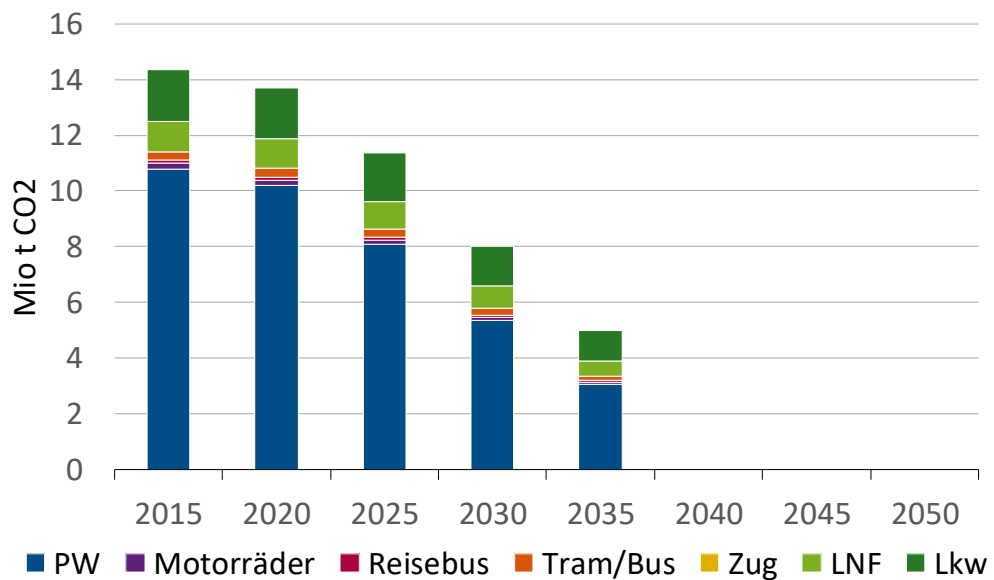
Energiebedarf und CO₂-Emissionen

2040 werden in diesem Szenario rund 40 PJ PtL benötigt, um auf fossilfreien Verkehr zu kommen. Diese Menge sinkt bis 2050 auf 10 PJ, da die konventionellen Fahrzeuge mehr und mehr aus der Flotte verschwinden. Es wird zwar erwartet, dass 2050 global relativ grosse Mengen an PtL für Luft- und ggf. Schiffsverkehr produziert werden. Die Produktion muss aber erst aufgebaut werden. Eine Nachfrage, die relativ früh und nur für wenige Jahre bestehen wird, ist kein guter Anreiz, um Produktionskapazität aufzubauen. Wenn man mit dieser Strategie den Verkehr in der Schweiz bis 2040 fossilfrei machen möchte, müsste wohl die PtL-Produktion im In- und Ausland aktiv gefördert werden. Da diese Produktion einen grossen Strombedarf verursacht, müsste auch die erneuerbare Stromproduktion noch stärker gefördert werden, als das schon ohne die grosse PtL-Nachfrage nötig wird (mehr dazu in Kapitel 4.6). Natürlich ist auch in diesem Bereich ein starker Nachfrage-Peak 2040, der rasch wieder abnimmt, nicht hilfreich.

Abbildung 15: Entwicklung des Treibstoffbedarfs des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei 2040, PtL»



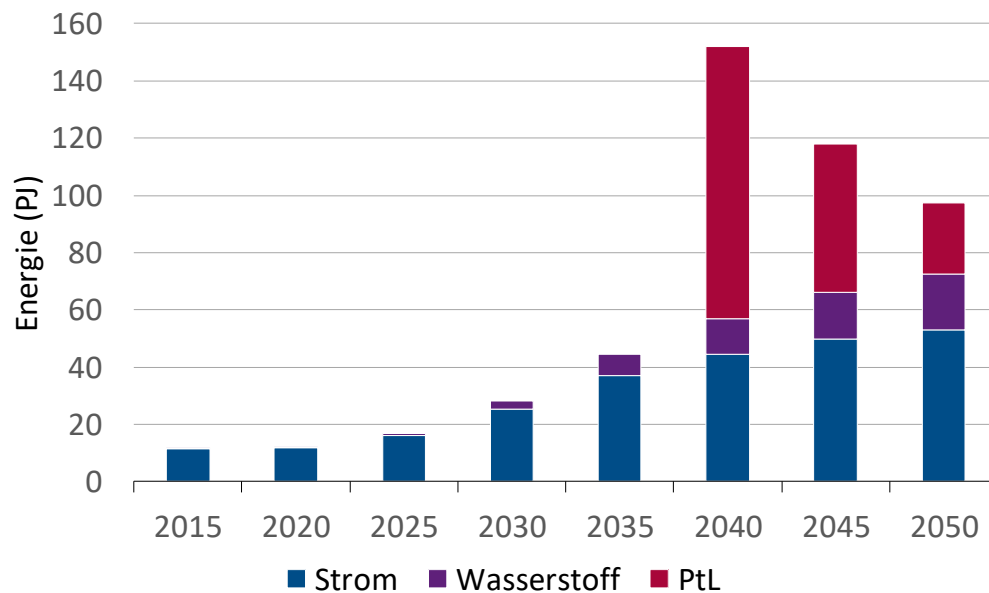
Grafik INFRAS.

Abbildung 16: Entwicklung der CO₂-Emissionen des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei 2040, PtL»

Grafik INFRAS.

Unter Berücksichtigung der künftigen Energieeffizienz der Herstellung von Wasserstoff (65%; INFRAS 2020b; Öko-Institut 2019) und PtL (42.5%; INFRAS 2020b; Öko-Institut 2019) kann man den totalen Strombedarf abschätzen, der direkt und indirekt durch den Verkehr ausgelöst wird. Die Entwicklung ist in Abbildung 17 dargestellt. 2040 würde also durch den Verkehr ein direkter und indirekter Strombedarf von 152 PJ entstehen, was rund drei Vierteln des heutigen Strombedarfs der Schweiz entspricht (206 PJ in 2019; BFE 2020).

Abbildung 17: Entwicklung des Strombedarfs des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei 2040, PtL»



Direkter Strombedarf ab Netz bzw. Ladesteckdose für Züge, Trams, Trolleybusse und BEV sowie indirekt verursachter Strombedarf durch Produktion von Wasserstoff und PtL.

Grafik INFRAS.

4.3.2. Zusätzlicher Shift zu alternativen Antrieben («2040 Shift»)

Basierend auf «Fossilfrei, Basis» werden in diesem Szenario die Fahrleistungen der konventionellen PW und LNF bis 2040 spezifisch weiter reduziert. Da die gesamte Fahrleistung dieser Fahrzeuge aber gegenüber «Fossilfrei, Basis» aber nicht reduziert werden, bedeutet das eine Erhöhung der Fahrleistung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. Treiber für die Entwicklung ist eine kontinuierliche Verteuerung der fossilen Treibstoffe auf ein Niveau, auf dem sie ab 2040 nicht mehr konkurrenzfähig sind zu PtL. Das Szenario basiert also auf der Modellvariante «Fossilfrei, Shift».

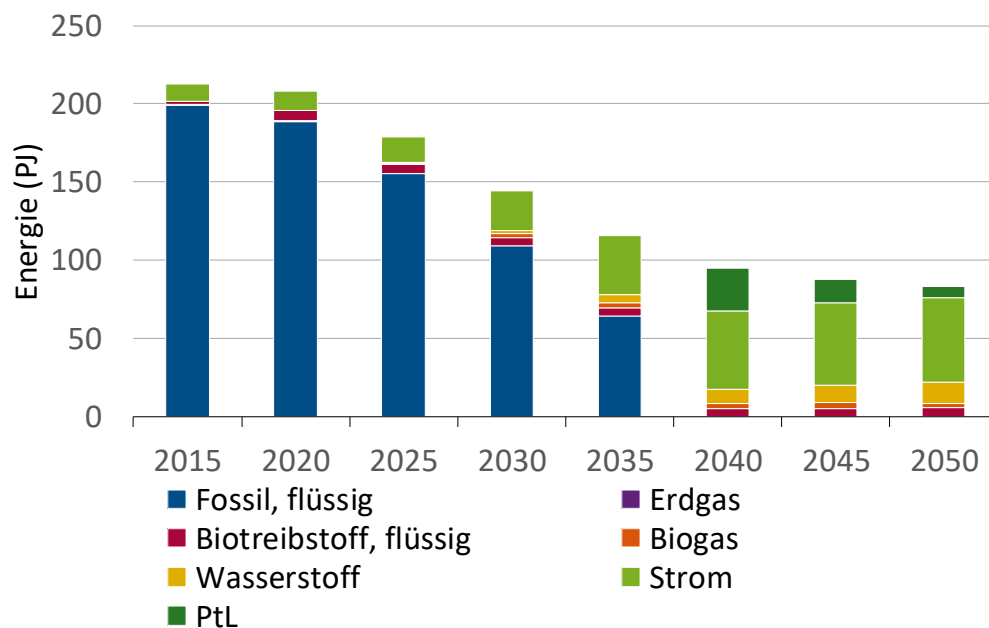
Verkehrsnachfrage

Auch beim Szenario «Fossilfrei 2040, Shift» ist die gesamte Verkehrsnachfrage (Verkehrs- und Fahrleistung) unverändert gegenüber dem Basisszenario «Fossilfrei 2050) und somit gleich wie in Abbildung 10 und Abbildung 11 (vgl. Kap. 4.2). Lediglich die Verkehrsleistung der verschiedenen Antriebstechnologien (z.B. BEV vs. Verbrennungsmotoren) verschiebt sich im Szenario Shift. Die gesamte Nachfrage (z.B. aller Personenwagen oder des gesamten Personen- und Güterverkehrs) bleibt jedoch unverändert, d.h. gleich hoch wie im Basisszenario.

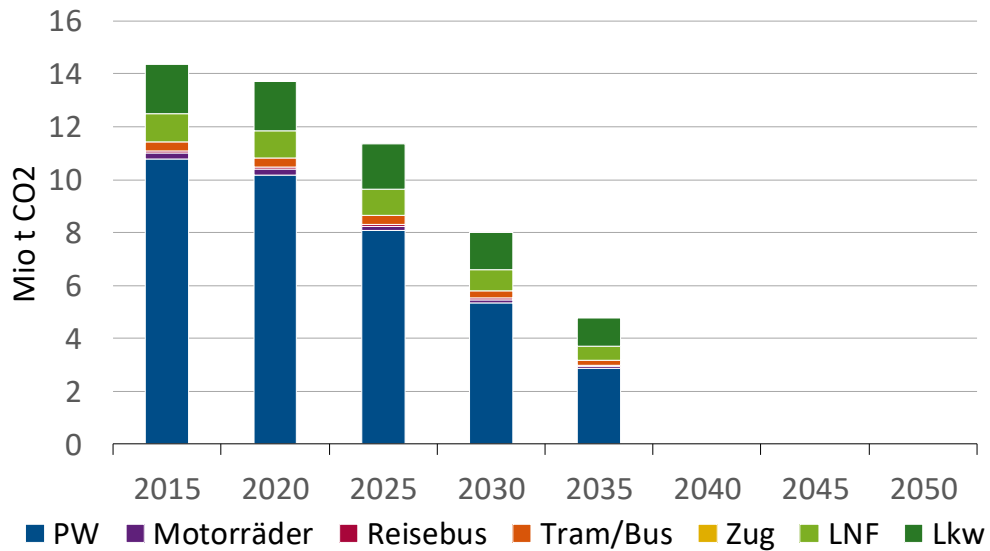
Energiebedarf und CO₂-Emissionen

2040 werden in diesem Szenario 27 PJ PtL benötigt, um alle fossilen Treibstoffe zu vermeiden. Durch den Shift der Fahrleistung von konventionellen PW und LNF zu alternativen Fahrzeugen nimmt der Strombedarf zwischen 2035 und 2040 stark zu.

Abbildung 18: Entwicklung des Treibstoffbedarfs des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei 2040, Shift»



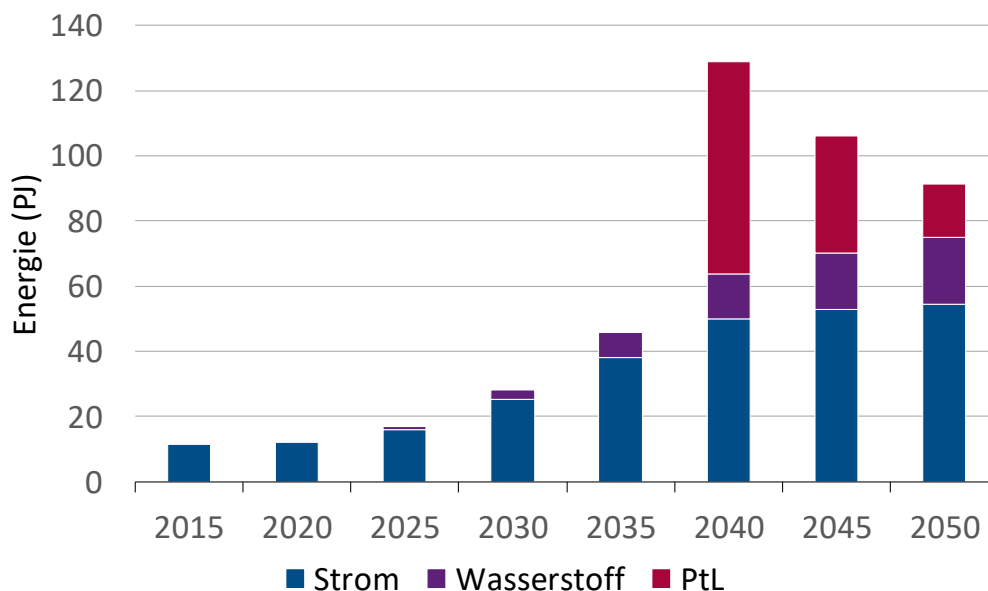
Grafik INFRAS.

Abbildung 19: Entwicklung der CO₂-Emissionen des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei 2040, Shift»

Grafik INFRAS.

Unter Berücksichtigung der Energieeffizienz der künftigen Herstellung von Wasserstoff (65%; INFRAS 2020b; Öko-Institut 2019) und PtL (42.5%; INFRAS 2020b; Öko-Institut 2019) kann man den totalen Strombedarf abschätzen, der direkt und indirekt durch den Verkehr ausgelöst wird. Die Entwicklung ist in Abbildung 20 dargestellt. 2040 würde also durch den Verkehr ein direkter und indirekter Strombedarf von 129 PJ entstehen, was rund 63% des heutigen Strombedarfs der Schweiz entspricht (206 PJ in 2019; BFE 2020).

Abbildung 20: Entwicklung des Strombedarfs des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei 2040, Shift»



Direkter Strombedarf ab Netz bzw. Ladesteckdose für Züge, Trams, Trolleybusse und BEV sowie indirekt verursachter Strombedarf durch Produktion von Wasserstoff und PtL.

Grafik INFRAS.

4.3.3. Zusätzliche Reduktion Verkehrsnachfrage («2040 MIV minimal»)

Das Szenario «Fossilfrei 2040, MIV minimal» basiert auf «2040 Fossilfrei, Shift», geht aber davon aus, dass die Fahrleistung von PW noch viel stärker reduziert wird als in den bisherigen Szenarien. Damit handelt es sich insbesondere nachfrageseitig um ein absolutes Minimalszenario. Im Bereich des Flottenmix geht das Szenario zudem davon aus, dass ab 2040 keine konventionellen PW und LNF mehr in der Schweizer Flotte sind (Nutzungsverbot). Bis 2030 ist das technisch realistische Potenzial zur Reduktion der Fahrleistung mit fossil betriebenen Fahrzeugen (sowie der gesamten Fahrleistung) bereits in der Basismodellrechnung («Fossilfrei, Basis») voll ausgeschöpft, weshalb es erst nach 2030 zu einer weiteren Reduktion kommt.

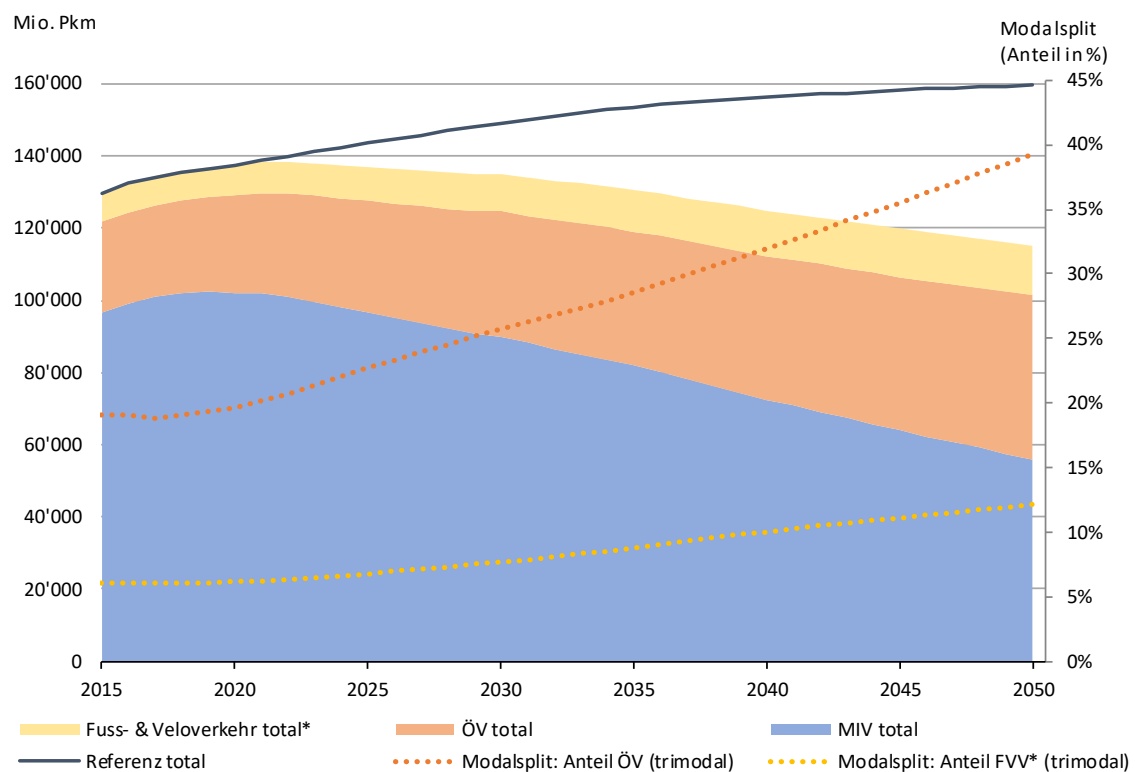
Verkehrsnachfrage

Im Szenario «Fossilfrei 2040, MIV minimal» sinkt die Gesamtnachfrage im Personenverkehr bis 2050 um 15% verglichen mit 2018. Im Vergleich zum Referenzszenario ist die Gesamtnachfrage im Personenverkehr 2050 28% geringer. Nach einem Anstieg der gesamten Verkehrsleistung bis 2022 sinkt die Gesamtnachfrage anschliessend massiv. Der grösste Nachfragerückgang ergibt sich im Szenario «Fossilfrei 2040, MIV minimal» beim MIV – als Folge der maximalen

Massnahmen. Die Nachfrage (pkm) sinkt bereits ab 2020 und ist 2050 45% tiefer als 2018 bzw. liegt 2050 51% unterhalb des Referenzszenarios.

Im ÖV steigt die Nachfrage bis 2050 deutlich stärker – um 75% verglichen mit 2018, wobei die Bahn um 82% zunimmt und der ÖV Strasse um 42%. Beim Fuss- und Veloverkehr steigt die Verkehrsleistung (pkm) um knapp 70%. Somit steigt der Anteil des ÖV an der Verkehrsleistung (pkm) von heute 19% auf rund 39% im Jahr 2050 an, der Modalsplit des Fuss- und Veloverkehrs von rund 6% auf 12%.

Abbildung 21: Entwicklung Verkehrsleistung (pkm) im Personenverkehr – Szen. «Fossilfrei 2040, MIV minimal»
Die Sekundärachse zeigt die Entwicklung des Modalsplits (Anteil ÖV und FVV: Fuss-/Veloverkehr).



FVV: Fuss- und Veloverkehr. * Fuss- und Veloverkehr inkl. E-Bikes. ÖV total: ÖV Schiene und ÖV Strasse.

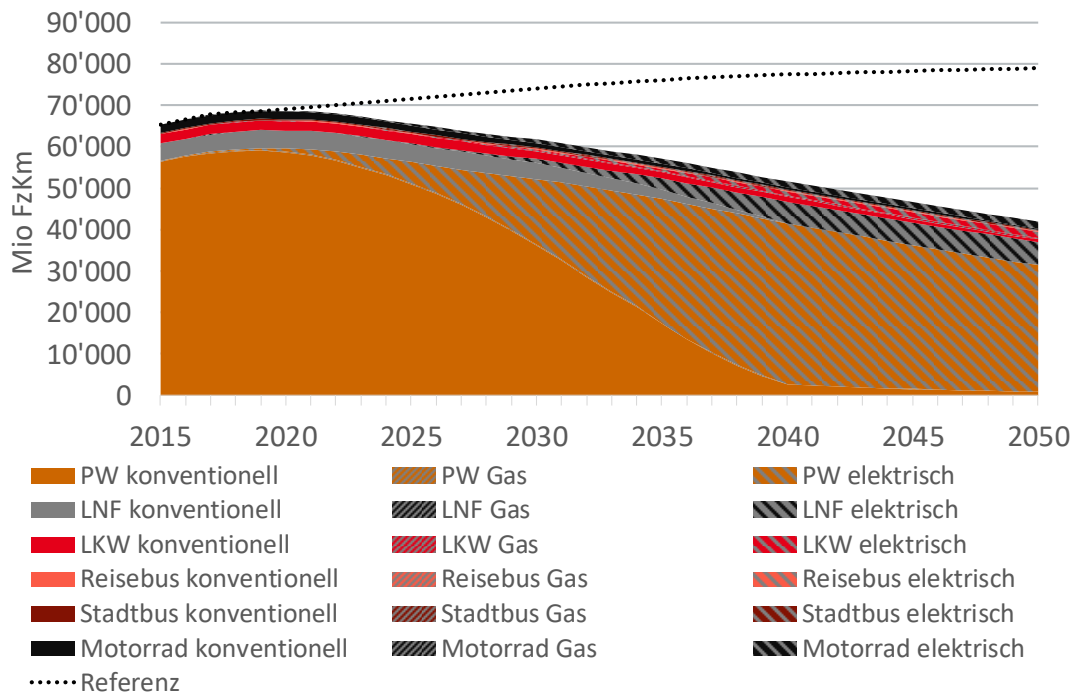
Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnungen.

Im Güterverkehr wird im Szenario «Fossilfrei 2040, MIV minimal» keine Veränderung vorgenommen, d.h. direkt auf die Ergebnisse des Basisszenarios «Fossilfrei 2050» zurückgegriffen.

Die Fahrleistung (Fzkm) verändert sich in etwa parallel zur Verkehrsleistung, im Strassenverkehr noch leicht verstärkt aufgrund der etwas zunehmenden Auslastung. Die Abbildung 22 zeigt die Entwicklung der Fahrleistungen (Fzkm) des gesamten Strassenverkehrs, wobei die

verschiedenen Fahrzeugkategorien (und Antriebsarten) differenziert dargestellt sind. Ab 2040 ist der Anteil der Fahrleistung mit fossil betriebenen Fahrzeugen minimal.

Abbildung 22: Entwicklung der Fahrleistung (Fzkm) auf der Strasse in «Fossilfrei 2040, MIV minimal»



«konventionell» beinhaltet Benzin- und Dieselfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können.
 «Gas» beinhaltet Erdgasfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können.
 «elektrisch» beinhaltet Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge sowie Plug-in-Hybride.

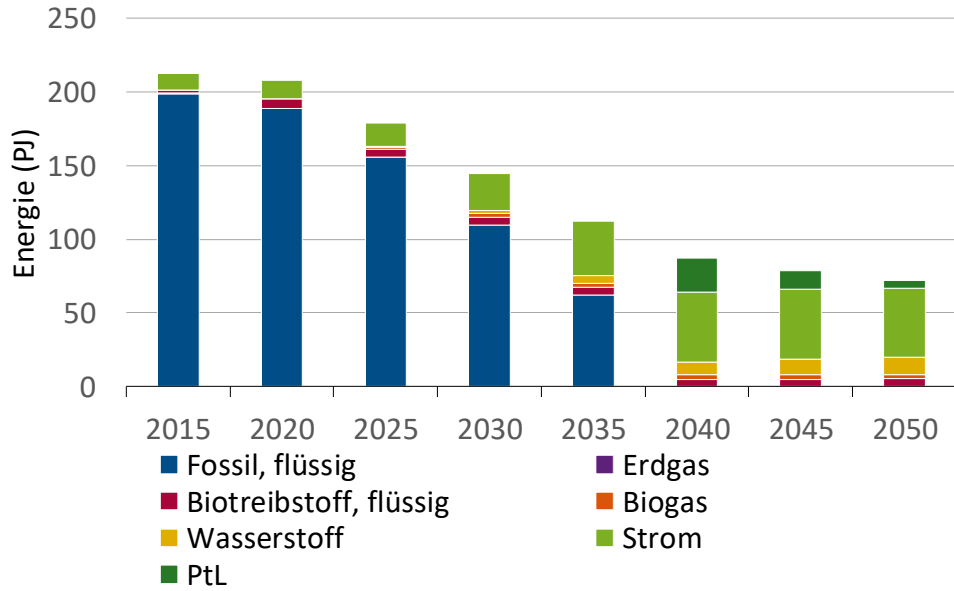
Grafik INFRAS.

Energiebedarf und CO₂-Emissionen

2040 werden in diesem Szenario 23 PJ PtL benötigt, um alle fossilen Treibstoffe zu vermeiden. Durch den Shift der Fahrleistung von konventionellen PW und LNF zu alternativen Fahrzeugen nimmt der Strombedarf zwischen 2035 und 2040 stark zu. Der Hauptunterschied gegenüber «Fossilfrei 2040, Shift» kommt von der reduzierten Fahrleistung bei den PW. Der nach wie vor beträchtliche Bedarf an flüssigen Kohlenwasserstoffen kommt einerseits vom Schwerverkehr, andererseits von den Plug-in-Hybriden, die nach wie vor in der Schweizer Flotte fahren, und von den ausländischen PW, die in der Schweiz unterwegs sind.

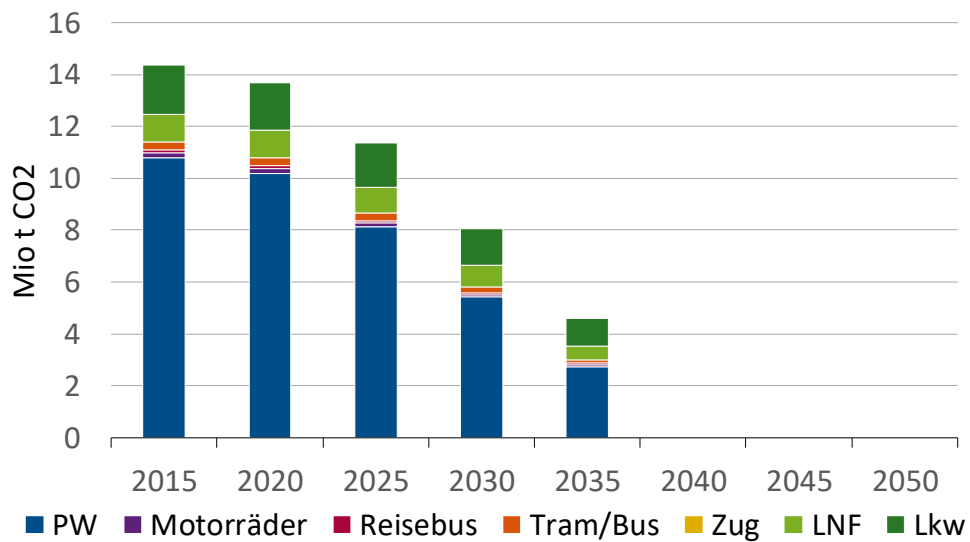
Ausländische konventionelle PW fahren 2040 in der Schweiz rund 2.7 Mia km. Plug-in-Hybride legen 2040 noch 7.9 Mia. km zurück. Verglichen mit den 41 Mia km, die alle PW zusammen in diesem Szenario 2040 noch zurücklegen, sind das 6% bzw. 19%.

Abbildung 23: Entwicklung des Treibstoffbedarfs des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei 2040, MIV minimal»



Grafik INFRAS.

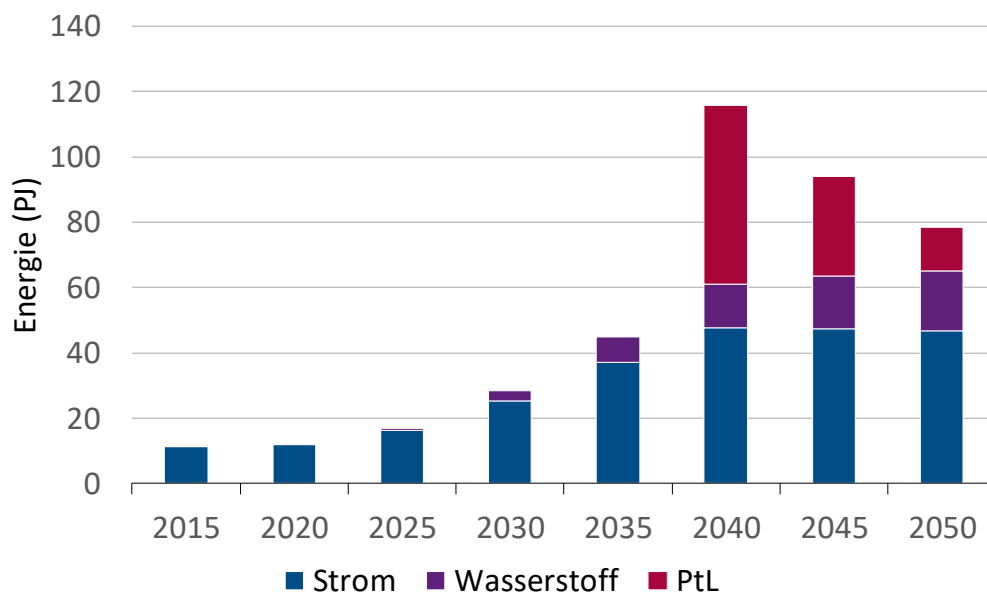
Abbildung 24: Entwicklung der CO₂-Emissionen des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei 2040, MIV minimal»



Grafik INFRAS.

Unter Berücksichtigung der künftigen Energieeffizienz der Herstellung von Wasserstoff (65%; INFRAS 2020b; Öko-Institut 2019) und PtL (42.5%; INFRAS 2020b; Öko-Institut 2019) kann man den totalen Strombedarf abschätzen, der direkt und indirekt durch den Verkehr ausgelöst wird. Die Entwicklung ist in Abbildung 25 dargestellt. 2040 würde also durch den Verkehr ein direkter und indirekter Strombedarf von 116 PJ entstehen, was rund 56% des heutigen Strombedarfs der Schweiz entspricht (206 PJ in 2019; BFE 2020).

Abbildung 25: Entwicklung des Strombedarfs des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei 2040, MIV minimal»



Direkter Strombedarf ab Netz bzw. Ladesteckdose für Züge, Trams, Trolleybusse und BEV sowie indirekt verursachter Strombedarf durch Produktion von Wasserstoff und PtL.

Grafik INFRAS.

4.4. Fossilfrei 2030

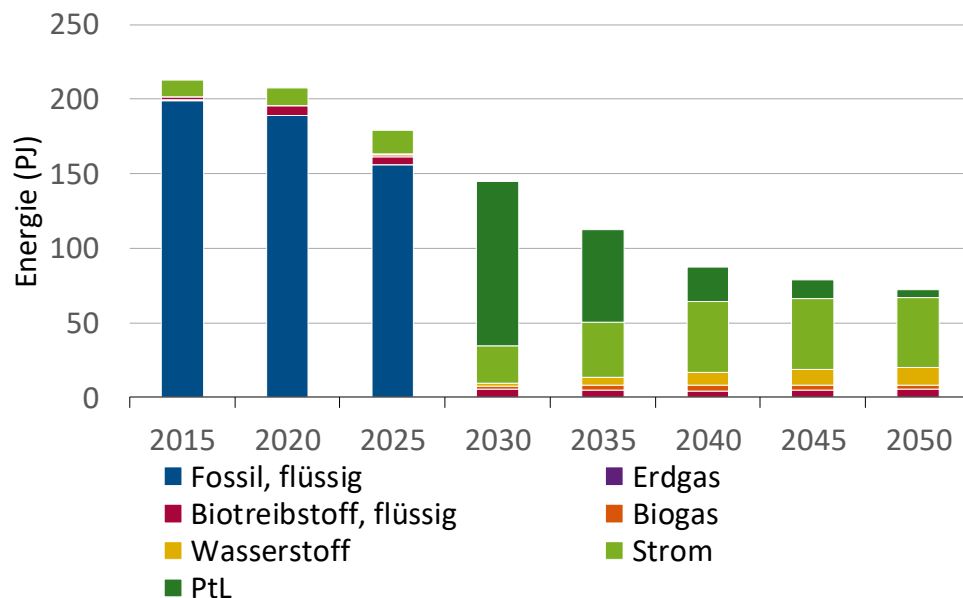
Die Analyse des Szenarios «Fossilfrei 2030» basiert auf den Resultaten der Modellrechnung «Fossilfrei, MIV minimal». Das bedeutet, dass die Fahrleistungen insbesondere beim MIV maximal verringert werden (Abbildung 22).

Die Nachfrage nach den verschiedenen Treibstoffen, die im Szenario «Fossilfrei 2040, MIV minimal» gezeigt wurden (Abbildung 23), gelten so auch in diesem Szenario als Basis. Für die Reduktion des fossilen Treibstoffbedarfs auf null im Jahr 2030 gäbe es prinzipiell zwei Möglichkeiten, die in den folgenden Kapiteln erörtert werden.

a. Ersatz durch PtL

Im Unterschied zu Abbildung 23 müsste der fossile flüssige Treibstoff bereits ab 2030 durch PtL ersetzt werden (Abbildung 26). Dazu wären 2030 110 PJ solcher synthetischen Treibstoffe (PtL) notwendig, um die dann noch durch konventionelle Fahrzeuge (Verbrenner) verbrauchten Treibstoffmengen (Benzin, Diesel) ersetzen zu können. Das entspricht über 3.1 Mia. Liter Diesel und läge im Bereich von 10-30% der optimistischsten Prognosen (AIREG 2020) für die globale Produktion von synthetischen Treibstoffen im Jahr 2030, die zudem v.a. für die Luftfahrt vorgesehen wären.

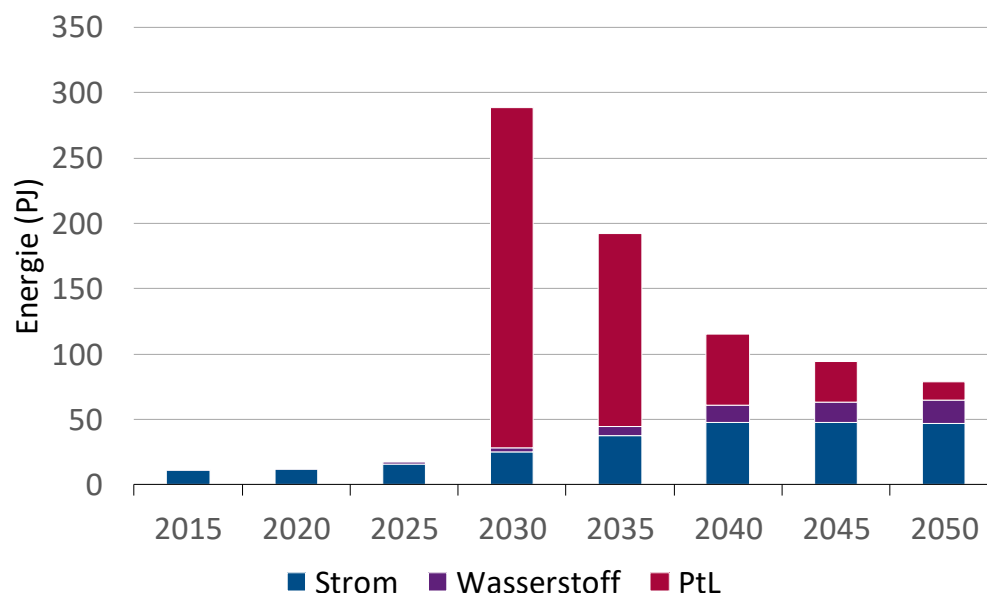
Abbildung 26: Entwicklung des Treibstoffbedarfs des Verkehrs in der CH in «Fossilfrei 2030, MIV minimal»



Grafik INFRAS.

Unter Berücksichtigung der Energieeffizienz der künftigen Herstellung von Wasserstoff (65%; INFRAS 2020b; Öko-Institut 2019) und PtL (42.5%; INFRAS 2020b; Öko-Institut 2019) kann man den totalen Strombedarf abschätzen, der direkt und indirekt durch den Verkehr ausgelöst wird. Die Entwicklung ist in Abbildung 25 dargestellt. 2030 würde also durch den Verkehr allein ein direkter und indirekter Strombedarf von 260 PJ entstehen, was rund ein Viertel mehr wäre als der gesamte heutige Strombedarf der Schweiz (206 PJ in 2019; BFE 2020). Der grösste Teil dieses Strombedarfs würde für die Herstellung des PtL benötigt: Die Herstellung dieser PtL-Menge benötigt eine Strommenge von über 205 PJ, was etwa dem heutigen Strombedarf der Schweiz (BFE 2020) entsprechen würde. Weitere Ausführungen dazu finden sich in Kapitel 4.6.

Abbildung 27: Entwicklung des Strombedarfs des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei 2030, MIV minimal»



Direkter Strombedarf ab Netz bzw. Ladesteckdose für Züge, Trams, Trolleybusse und BEV sowie indirekt verursachter Strombedarf durch Produktion von Wasserstoff und PtL.

Grafik INFRAS.

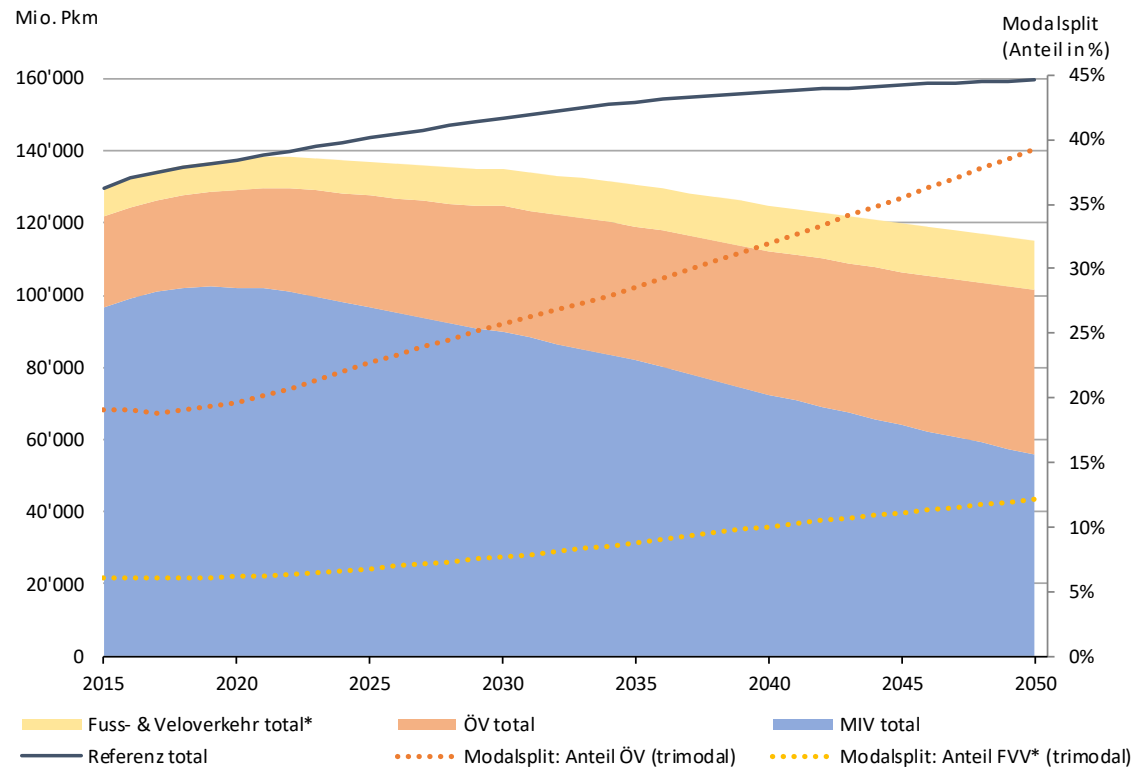
b. Weitere Reduktion der Fahrleistung

Die Verkehrsnachfrage des Szenarios «Fossilfrei 2030» ist analog wie beim Szenario «Fossilfrei 2040, MIV minimal», bei dem eine zusätzliche Reduktion der Verkehrs- bzw. Fahrleistung unterstellt ist.

Die Fahrleistung im Strassenverkehr 2030 ist in der Modellrechnung zu diesem Szenario gegenüber heute beim MIV um 12%, beim Güterverkehr um etwa 5% reduziert (vgl. Abbildung 28 sowie Abbildung 22 im Kap. 4.3.3 – Verkehrsnachfrage ist identisch wie im Szenario «Fossilfrei 2040, MIV minimal»). Zudem wurde die Fahrleistung der konventionellen Fahrzeuge durch die rasche Elektrifizierung noch weiter reduziert. Sie beträgt 2030 in der Modellrechnung 30% weniger als 2020 für MIV und fast 20% weniger beim Güterverkehr.

Abbildung 28: Entwicklung Verkehrsleistung (pkm) im Personenverkehr – Szen. «Fossilfrei 2030»

Die Sekundärachse zeigt die Entwicklung des Modalsplits (Anteil ÖV und FVV: Fuss-/Veloverkehr).



FVV: Fuss- und Veloverkehr. * Fuss- und Veloverkehr inkl. E-Bikes. ÖV total: ÖV Schiene und ÖV Strasse.

Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnungen.

In absoluten Zahlen werden 2030 aber in dieser Modellrechnung immer noch 36 Mia. Fzkm bzw. 59 Mrd. pkm mit konventionellen PW, 3.8 Mia km mit konventionellen LNF und 1.9 Mia. km mit konventionellen LKW zurückgelegt (vgl. Annex 2 D, Tabelle 29). Dies entspricht bei PW 69%, bei LNF 80% und bei Lkw 81% der totalen Fahrleistung im Jahr 2030 (Tabelle 30). Um ohne PtL bis 2030 fossilfreien Landverkehr zu erreichen, müssten die konventionellen Fahrleistungen um die entsprechenden Strecken reduziert werden. Ohne zusätzliche technologische Lösungen – sprich weitergehende Elektrifizierung – hiesse das: Wenn Fossilfreiheit bis 2030 erreicht werden will, müssten im Personenverkehr rund 59 Mrd. pkm von PW auf den ÖV sowie Fuss- und Veloverkehr verlagert werden. Das entspricht mehr als einer Verdoppelung (Faktor 2.2) der heutigen ÖV-Nachfrage bis 2030. Eine solche Nachfragesteigerung innerhalb zehn Jahren ist auf der bestehenden Infrastruktur sowie kurzfristigen Infrastrukturausbauten nicht abzuwickeln.

Eine weitergehende Elektrifizierung der Flotte ist aufgrund der oben genannten Gründe (kurzfristige Verfügbarkeit E-Fahrzeuge bis 2030, z.T. lange Lebensdauer von Fahrzeugen) bis 2030 nicht möglich. Das Szenario «Fossilfrei 2030» geht bereits vom bestmöglichen Fall aus.

Denkbar ist einzig noch, dass durch die Erhöhung der Jahresfahrleistung jedes einzelnen alternativ angetriebenen Fahrzeuges ein Teil der konventionellen Fahrleistung alternativ erbracht werden könnte. Da aber die Anteile an alternativen Fahrzeugen in der Flotte im Jahr 2030 bei PW um 20% und bei SNF im tiefen einstelligen Prozentbereich liegen, kann dieser Teil nicht sehr gross sein.

So müsste die Fahrleistung der PW innerhalb der nächsten 10 Jahre um rund 70% reduziert werden, damit fossilfreier Verkehr 2030 Realität werden könnte (bei gleichzeitiger massiver Zunahme der ÖV- und FVV-Nachfrage, vgl. oben). Gegenüber der Referenzentwicklung wäre das eine Reduktion um fast 75%. Allerdings hätte eine so massive Verringerung zur Folge, dass auch die Anzahl Neufahrzeuge pro Jahr sinken würde. Damit kämen wiederum weniger alternative Fahrzeuge in die Flotte und die alten, konventionellen Fahrzeuge würden 2030 noch einen grösseren Anteil der Fahrleistung ausmachen. Dies wiederum hätte zur Folge, dass die Fahrleistung noch weiter reduziert werden müsste.

Bei den LNF und LKW, die gemäss der Modellrechnung 2030 gut 10% und 17% des fossilen Energiebedarfs ausmachen, müsste bis 2030 gegenüber heute eine Reduktion der Fahrleistung um ca. 80% erreicht werden, um fossilfrei zu werden.

4.5. Weitere Wirkungen

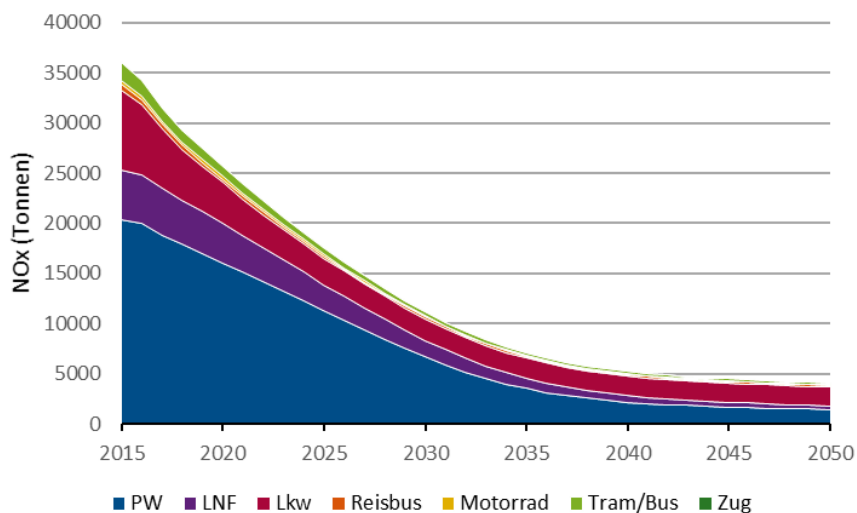
4.5.1. Luftschadstoffemissionen

Die Luftschadstoffemissionen sind direkt von der Fahrleistung sowie der Veränderung des Flottenmix (mittlerer Emissionsfaktor) abhängig. Für die Luftschadstoffemissionen wurden für alle Szenarien grobe quantitative Analysen durchgeführt (vgl. Annex 2 mit der Beschreibung der Modellrechnungen).

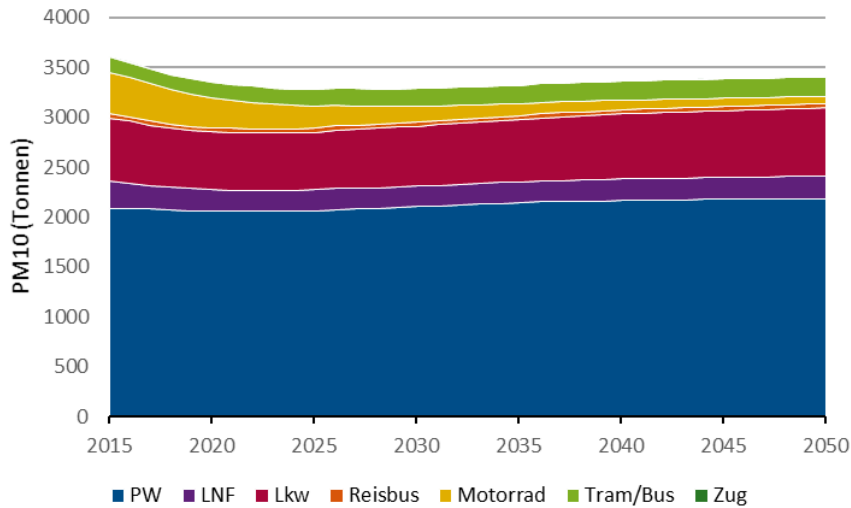
Es werden folgende Wirkungen der verschiedenen Szenarien auf die Luftschadstoffemissionen erwartet:

- **Referenzszenario:** Aufgrund der positiven Entwicklung der Fahrzeugflotte hinsichtlich der mittleren Feinstaubemissionen nehmen die NO_x-Emissionen deutlich ab. Die Elektrifizierung überkompensiert somit die Wirkung der steigenden Fahrleistung. Wie die Abbildung 29 zeigt, nehmen die NO_x-Emissionen bis 2050 von heute rund 30'000 Tonnen auf rund 4'000 Tonnen pro Jahr ab, insbesondere dank der Elektrifizierung der Flotte. Bei den Feinstaubemissionen wird eine Stagnation erwartet: Zwar nehmen auch hier die mittleren Emissionsfaktoren leicht ab. Dieser Effekt wird aber überkompensiert durch das Nachfragewachstum.

Abbildung 29: Entwicklung der NO_x-Emissionen (oben) und PM-Emissionen (unten) des Verkehrs in der Schweiz im Referenzszenario



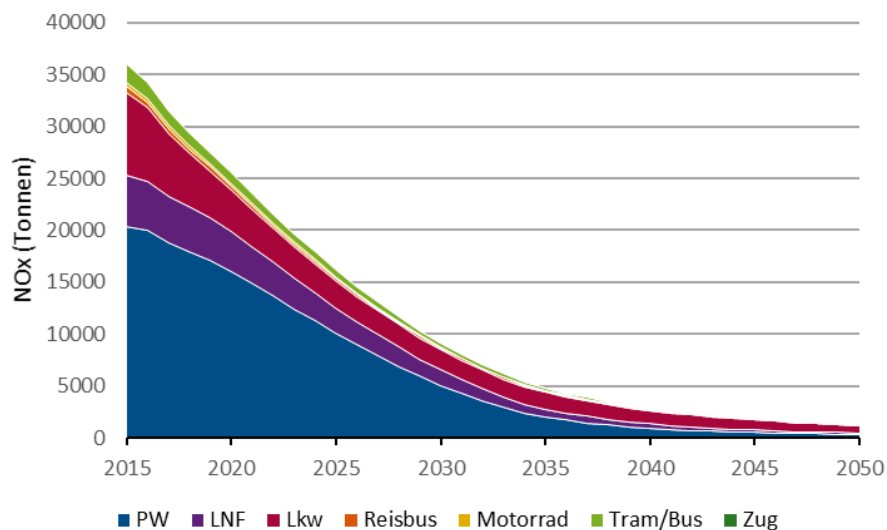
Grafik INFRAS.



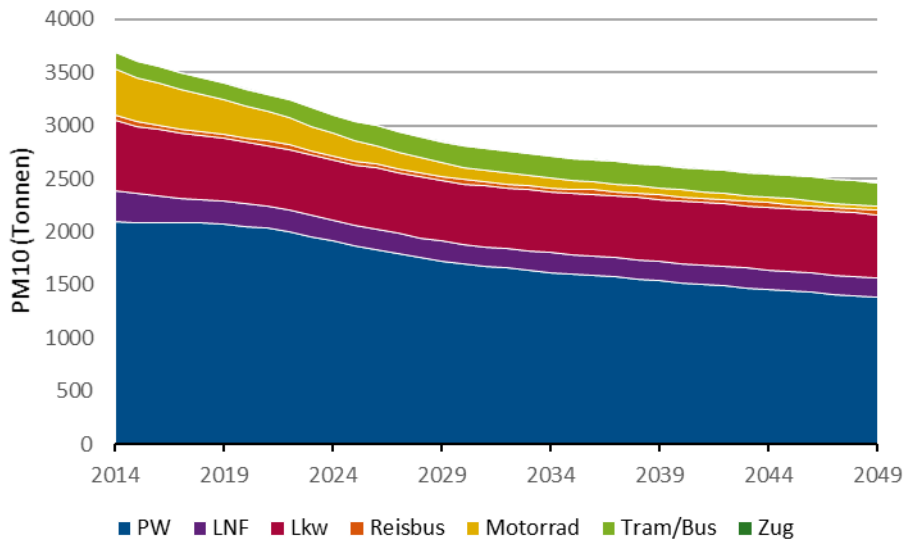
Grafik INFRAS.

- Fossilfrei 2050:** Die Emissionen entwickeln sich wie in Modellrechnung «Fossilfrei, Basis». Die Ergebnisse sind in Kapitel Annex 2 bei den Modellrechnungen dargestellt und diskutiert. Aufgrund der reduzierten Verkehrsnachfrage sowie dem höheren Anteil E-Fahrzeuge sinken die Emissionen der Luftschadstoffe (vgl. Abbildung 30).

Abbildung 30: Entwicklung der NO_x-Emissionen (oben) und PM-Emissionen (unten) des Verkehrs im Szenario «Fossilfrei 2050»



Grafik INFRAS.



Grafik INFRAS.

- **Fossilfrei 2040, PtL:** Das Szenario baut direkt auf dem Basisszenario «Fossilfrei 2050» auf. Entsprechend werden die Luftschadstoffemissionen relativ sein wie in «Fossilfrei 2050». Aufgrund der nochmals etwas schnelleren Verringerung des Einsatzes fossiler Treibstoffe, reduzieren sich die Luftschadstoffemissionen weiter im Vergleich zum Basisszenario.
- **Fossilfrei 2040, Shift:** Auch das Szenario «2040, Shift» basiert direkt auf dem Szenario «Fossilfrei 2050», weshalb die Luftschadstoffemissionen ähnlich hoch sind wie in «Fossilfrei 2050». Wie bei «Fossilfrei 2040, PtL» gilt auch hier, dass der verringerte Einsatz fossiler Treibstoffe die Luftschadstoffemissionen nochmals etwas verringert verglichen mit der Referenz.
- **Fossilfrei 2040, MIV minimal:** In diesem Szenario sind die geringsten Luftschadstoffemissionen zu erwarten: Einerseits ist die Verkehrsnachfrage (Fahrleistung) in diesem Szenario klar am tiefsten (v.a. beim Strassenverkehr), andererseits ist der Ersatz fossiler Treibstoffe schon maximal fortgeschritten. Wie in den anderen Szenarien ist die Reduktionswirkung beim NO_x sehr hoch und beim Feinstaub (PM10) aber etwas reduziert.

4.5.2. Lärm

Die Lärmemissionen werden hauptsächlich durch die Veränderung der Fahrleistung (Fzkm) beeinflusst. Zusätzlich spielt beim Strassenverkehr auch die zunehmende Elektrifizierung eine Rolle, weil E-Fahrzeuge geringere Motorenlärmemissionen haben. Allerdings spielt dieser Effekt nur bei tiefen Geschwindigkeiten bis ca. 30-40 km/h eine Rolle. Bei höheren Geschwindigkeiten dominiert das Rollgeräusch, welches unabhängig vom Motor ist.

Die Wirkung der Szenarien auf den Lärm (Lärmemissionen) wird grobquantitativ abgeschätzt. Es werden folgende Wirkungen der verschiedenen Szenarien auf den Lärm erwartet:

- **Referenzszenario:** Die Lärmemissionen werden in etwa gleich bleiben wie heute, weil sich die beiden Effekte a) Verkehrszunahme und b) zusätzliche Elektrifizierung in etwa aufheben dürften. Der motorisierte Verkehr nimmt um ca. 18% zu (MIV +14%, ÖV +33%). Die zunehmende Elektrifizierung der Strassenverkehrsflotte dagegen dämpft die Lärmemissionen.
- **Fossilfrei 2050:** In diesem Szenario werden die Lärmemissionen spürbar reduziert. Zum einen ist dies ein Effekt der reduzierten Verkehrsnachfrage (PW: -28%, gesamter motorisierter Verkehr: -6%), zum anderen eine Folge der leiseren strombetriebenen Fahrzeuge (EV), deren Anteil im Szenario «Fossilfrei 2050» nochmals deutlich zunimmt. Die Lärmreduktion durch Elektrofahrzeuge erfolgt primär bei tiefen Geschwindigkeiten bis ca. 30-40 km/h, d.h. vor allem in städtischen Gebieten. Die beiden Effekte (Verkehrsreduktion, Elektrifizierung) addieren sich und führen – insbesondere innerorts – zu einer spürbaren Reduktion des Lärms.
- **Fossilfrei 2040, PtL:** Die Lärmwirkung ist identisch wie beim Szenario «Fossilfrei 2050», weil die Fahrleistung identisch und auch der Anteil der E-Fahrzeuge unverändert ist.
- **Fossilfrei 2040, Shift:** In diesem Szenario wird die Lärmbelastung ebenfalls ähnlich sein wie in Fossilfrei 2050 bzw. Fossilfrei 2040, PtL. Weil in diesem Szenario der Anteil E-Fahrzeuge nochmals etwas höher ist, wird die Lärmemissionen in diesem Szenario ein wenig geringer sein als bei den vorherigen Szenarien.
- **Fossilfrei 2040, MIV minimal:** In diesem Szenario werden die Lärmemissionen nochmals deutlich geringer sein, weil die Fahrleistung des gesamten motorisierten Verkehrs um 21% unter dem Wert von 2018 liegt (PW: -47%, also fast eine Halbierung).

4.5.3. Infrastruktur- und Flächenbedarf

Der Flächenbedarf ist eine direkte Folge des Infrastrukturbedarfs. Der Infrastrukturbedarf wiederum hängt von der gesamten Verkehrsnachfrage (Fahrleistung) ab.

Die Wirkung der Szenarien auf den Infrastruktur- und Flächenbedarf wird qualitativ abgeschätzt. Es werden folgende Wirkungen der verschiedenen Szenarien auf den Infrastruktur- und Flächenbedarf erwartet:

- **Referenzszenario:** Aufgrund der weiteren Steigerung der Nachfrage (Fahrleistung) nimmt der Infrastrukturbedarf (für Aus- oder Neubauten) zu – für Verkehrswege und Abstellplätze. Der grösste Flächenbedarf ergibt sich insbesondere im öffentlichen Verkehr (Zunahme pkm um 31% von 2018 bis 2050) sowie mit Einschränkungen im MIV (Nachfragezunahme um 14%).
- **Fossilfrei 2050:** In diesem Szenario dürfte der Infrastruktur- und Flächenbedarf aufgrund der Reduktion der gesamten Verkehrsnachfrage (Verkehrsleistung) sinken. Allerdings ist nicht zu

erwarten, dass im überregionalen Verkehr Strassen aufgehoben werden. Immerhin wird aber der Flächenbedarf nicht weiter steigen. In Städten und Agglomerationen dagegen können MIV- bzw. Strassenflächen und Parkplätze zu Gunsten von Fahrrad und Fussgängern sowie Frei- und Grünflächen umgewidmet. Die Hauptwirkung im Vergleich zur Referenz liegt aber darin, dass der Ausbaubedarf auf der Strasse wegfällt. Andererseits nimmt der Infrastruktur- und Flächenbedarf für den Schienenverkehr zu. Weil der Schienenverkehr aber insgesamt deutlich flächeneffizienter ist als der Strassenverkehr, sinkt der Infrastruktur- und Flächenbedarf.

Gewisse zusätzliche Flächen werden für den Bau von Wasserstofftankstellen benötigt.

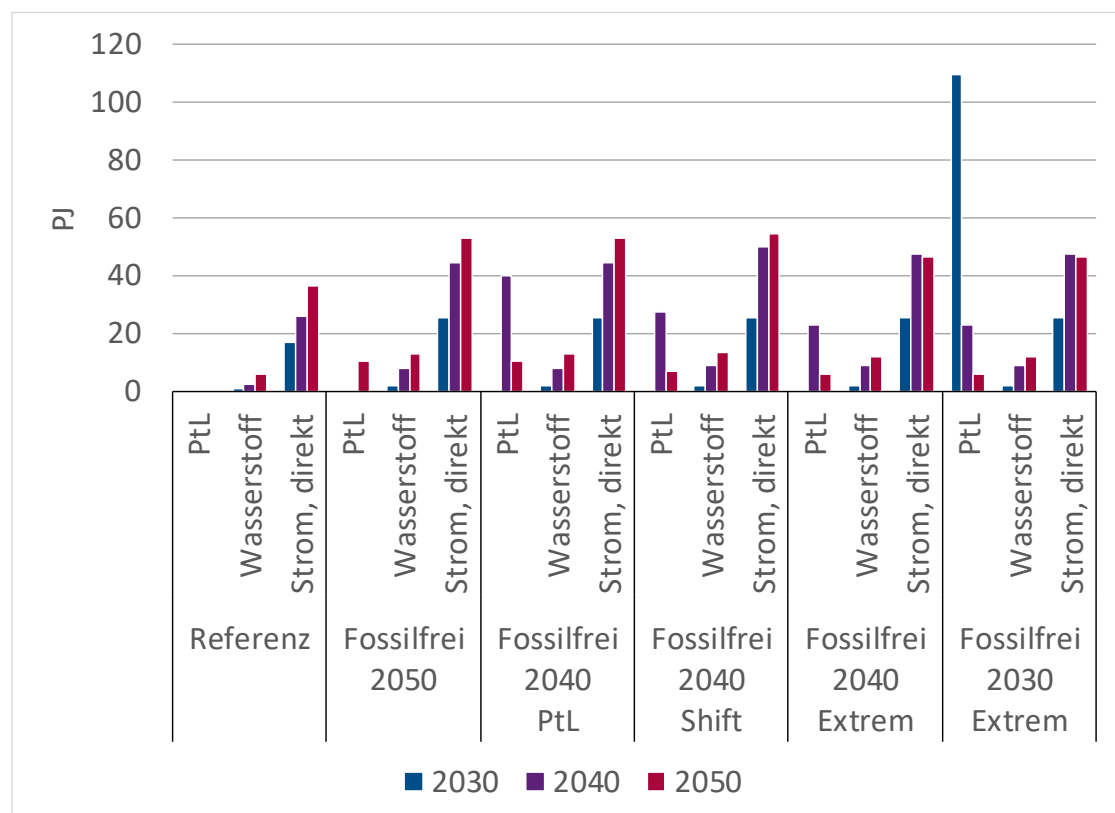
- **Fossilfrei 2040, PtL:** Die Wirkung auf den Infrastruktur- und Flächenbedarf ist in etwa identisch wie beim Szenario «Fossilfrei 2050», d.h. der Flächenbedarf sinkt gegenüber dem Referenzszenario.
- **Fossilfrei 2040, Shift:** Die Wirkung auf den Infrastruktur- und Flächenbedarf ist in etwa identisch wie beim Szenario «Fossilfrei 2050», d.h. der Flächenbedarf sinkt im Vergleich zum Referenzszenario. Gegenüber «Fossilfrei 2050» werden gewisse zusätzliche Flächen für Ladeinfrastrukturen benötigt.
- **Fossilfrei 2040, MIV minimal:** Bei diesem Szenario nimmt die Fahrleistung noch einmal deutlich ab, insbesondere beim MIV (-45% bis 2050 im Vergleich zu 2018). Entsprechend nimmt der Infrastruktur- und Flächenbedarf deutlich ab. Insbesondere in Städten und Agglomerationen wird der Flächenbedarf für die Strasseninfrastruktur dank Umwidmung – nicht nur zu Fuss- und Veloverkehr, sondern auch zu Frei- und Grünräumen – abnehmen. Beim ÖV wird der Flächen- und Infrastrukturbedarf aufgrund der erwarteten Nachfragesteigerung von 75% deutlich zunehmen.

4.6. Wirkungen auf die Energieverfügbarkeit (Sektorkopplung)

Die Dekarbonisierung des Verkehrs ist verbunden mit einer Erhöhung des Strombedarfs durch den Betrieb von Fahrzeugen oder durch die Herstellung von synthetischen Treibstoffen. Aber auch andere Sektoren werden in den nächsten Jahren im Zuge der Dekarbonisierung vermehrt auf Strom als Energieträger setzen. Da die Schweiz gleichzeitig aus der Kernenergie aussteigen wird, müssen so vermehrt erneuerbare (und CO₂-arme) Stromquellen erschlossen werden.

Aus den Szenarien wissen wir, wie sich der Strombedarf in den drei Szenarien des Verkehrssektors entwickeln könnte. Wir wissen auch, wie sich der Bedarf an Wasserstoff und an synthetischen Treibstoffen entwickeln könnte und was das für die Stromnachfrage bedeuten würde. Der Bedarf an Strom und strombasierten Treibstoffen in den Jahren 2030, 2040 und 2050 ist für alle Szenarien in Abbildung 31 zusammengestellt. Abbildung 32 zeigt den Strombedarf für den Betrieb der elektrischen Fahrzeuge sowie für die Produktion der strombasierten Treibstoffe. Das ist letztendlich der Strom, der insgesamt erzeugt werden muss, um den Schweizer Verkehr in den Szenarien fossilfrei zu gestalten.

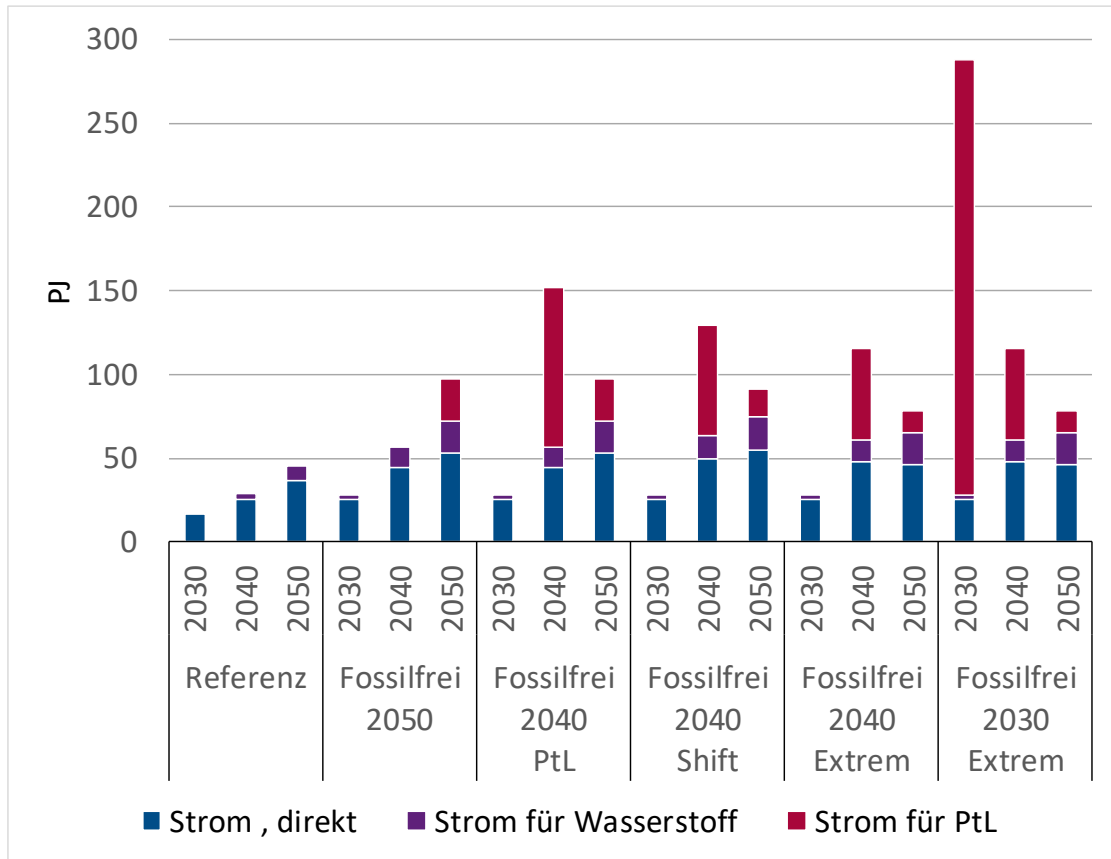
Abbildung 31: Bedarf an Strom und an strombasierten Treibstoffen in den Szenarien



Direkter Strombedarf ab Netz bzw. Ladesteckdose für Züge, Trams, Trolleybusse, BEV und PHEV sowie direkter Bedarf an Wasserstoff und PtL.

Grafik INFRAS.

Abbildung 32: Strombedarf für Betrieb elektrischer Fahrzeuge und Herstellung strombasierter Treibstoffe



Direkter Strombedarf ab Netz bzw. Ladesteckdose für Züge, Trams, Trolleybusse, BEV und PHEV sowie Strombedarf für die Produktion von Wasserstoff (H₂) und PtL.

Fossilfrei 2050 hat keinen PtL-Bedarf in 2030 und 2040, weil in diesem Szenario vor 2050 noch fossile Treibstoffe eingesetzt werden. Analog für den Bedarf in 2030 in den «Fossilfrei 2040» Varianten.

Grafik INFRAS.

In diesem Kapitel versuchen wir nun, folgende Fragen zu beantworten:

- Wie entwickelt sich der Strombedarf in den anderen Sektoren in der Schweiz bis 2050?
- Wie entwickelt sich die Stromproduktion in der Schweiz bis 2050 im Sommer-/Winterhalbjahr?
- Ist es realistisch, dass der allenfalls fehlende Strom bzw. die strombasierten Treibstoffe importiert werden können?

Diese Fragen können im Rahmen dieser Studie nicht im Detail modelliert werden. Es wird aber ein grobes Modell aufgebaut, das mit Inputs aus anderen Studien eine Abschätzung der Entwicklungen zulässt.

4.6.1. Entwicklung Strombedarf in den anderen Sektoren in der Schweiz

Da wir in dieser Studie im Verkehrssektor ein sehr ambitioniertes Ziel verfolgen, gehen wir auch für die anderen Sektoren davon aus, dass ambitionierte Klimaziele umgesetzt werden. Das bedeutet, dass fossile Wärme erzeugungsanlagen rasch durch Fernwärme und/oder Wärmepumpen ersetzt werden und dass auch Antriebe in der Industrie vollständig elektrifiziert werden. Gleichzeitig werden aber ambitionierte Energieeffizienzmassnahmen realisiert. Das beinhaltet u.a. die Wärmedämmung bei Gebäuden, effizientere Beleuchtung, effizientere Geräte etc.

Zur Abschätzung des Strombedarfs nach der (fast) vollständigen Elektrifizierung des Energiesystems (ohne Verkehr) gehen wir vom Gesamtenergie- und vom Strombedarf in 2018 aus. Beim Strombedarf schätzen wir das Reduktionspotenzial durch Effizienzsteigerung pro Verwendungszweck ab. Beim restlichen Energiebedarf schätzen wir zuerst das Einsparpotenzial durch Effizienzmassnahmen (ohne Elektrifizierung) sowie das Substitutionspotenzial durch biogene Energieträger ab. Weiter gehen wir davon aus, dass der verbleibende Energiebedarf mit Strom gedeckt wird, wobei wieder ein Effizienzgewinn entsteht; z.B. kann beim Ersatz von Ölheizungen durch Wärmepumpen mehr als 75% der Energie eingespart werden (ohne Berücksichtigung der Umgebungswärme).

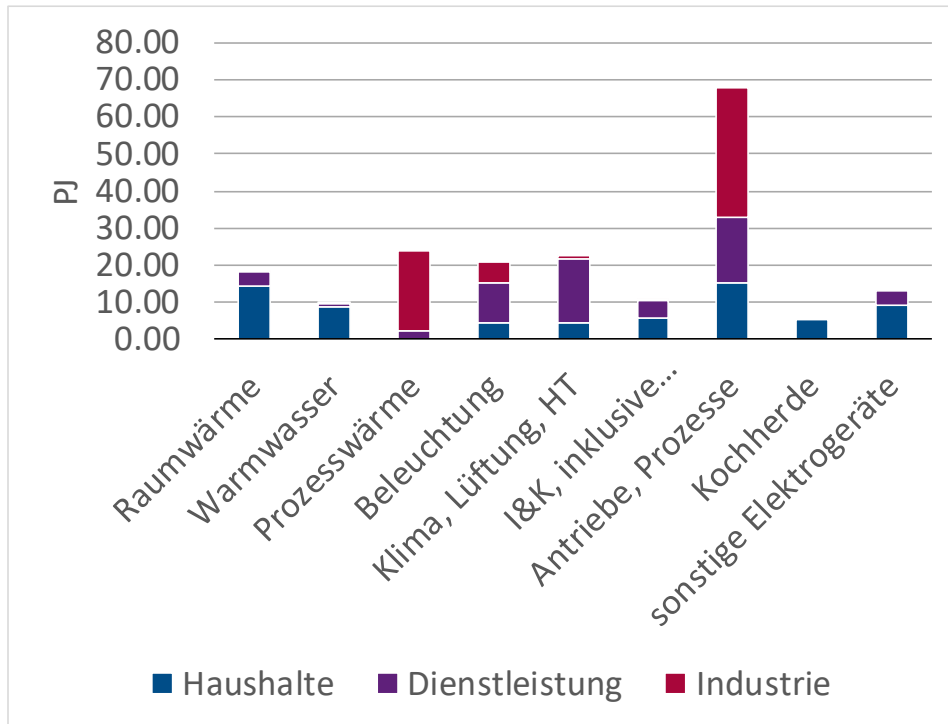
Dieses Vorgehen berücksichtigt nicht, dass die Bevölkerung in der Schweiz bis 2050 um rund 17% auf 10.2 Mio. ansteigen soll. Man kann das als implizite Berücksichtigung von Suffizienzeffekten betrachten. Allerdings muss auch gesagt sein, dass die Schätzung sehr grob ist und die Unsicherheit der Ergebnisse mindestens im Bereich von 20% liegt.

Ebenfalls nicht im künftigen Strombedarf mitgedacht ist die Produktion von strombasierten Flugtreibstoffen. Für diese gehen wir zu 100% von Importen aus.

Der Strombedarf in der Schweiz 2018 lag bei 204 PJ (Prognos, TEP, INFRAS 2019). Davon entfallen 12.3 PJ auf den Verkehrssektor, der Rest auf die anderen Sektoren. Abbildung 33 und Tabelle 5 zeigen den Strombedarf dieser Sektoren nach Verwendungszweck.

Der Strombedarf für Raumwärme, der noch zu einem grossen Teil von Direktheizungen stammt, kann durch den Einsatz von Wärmepumpen deutlich reduziert werden. Dasselbe gilt für die Bereitstellung von Warmwasser und Prozesswärme, wobei bei letzterer das Einsparpotenzial geringer ist. Durch den Ersatz von herkömmlichen Leuchtmitteln durch LED kann der entsprechende Energiebedarf stark reduziert werden. Bei Klima, Lüftung und Haustechnik sehen wir einen steigenden Bedarf bei den Haushalten, aber gleichzeitig ein Effizienzpotenzial im Dienstleistungssektor. Da der Dienstleistungssektor diese Verwendung dominiert, resultiert über alles ein mässiges Einsparpotenzial. Bei den übrigen Verwendungszwecken erwarten wir ein mässiges Einsparpotenzial durch Effizienzsteigerungen. Tabelle 5 zeigt die erwarteten Reduktionspotenziale der Verwendungszwecke auf.

Abbildung 33: Elektrizitätsverbrauch nach Verwendungszweck in der Schweiz 2018



Ohne Strombedarf des Verkehrs (12.3 PJ).

Grafik INFRAS. Quelle: Prognos, TEP, INFRAS 2019.

Abbildung 34 zeigt den Endenergiebedarf exkl. Elektrizität in 2018 nach Verwendungszweck. Hier handelt es sich primär um fossile Energieträger, die zur Wärmebereitstellung genutzt werden.

Tabelle 6 zeigt die Zahlen dazu sowie die geschätzten Reduktionspotenziale. Bei Raumwärme gehen wir davon aus, dass rund ein Drittel des heutigen Bedarfs durch bessere Wärmedämmung eingespart werden kann. Beim Warmwasser rechnen wir mit einem Einsparpotenzial durch Verwendung von wassersparenden Armaturen und Geräten. Bei der Prozesswärme sehen wir vor allem Potenzial durch Kaskadennutzung der Wärme sowie durch Wärmerückgewinnung.

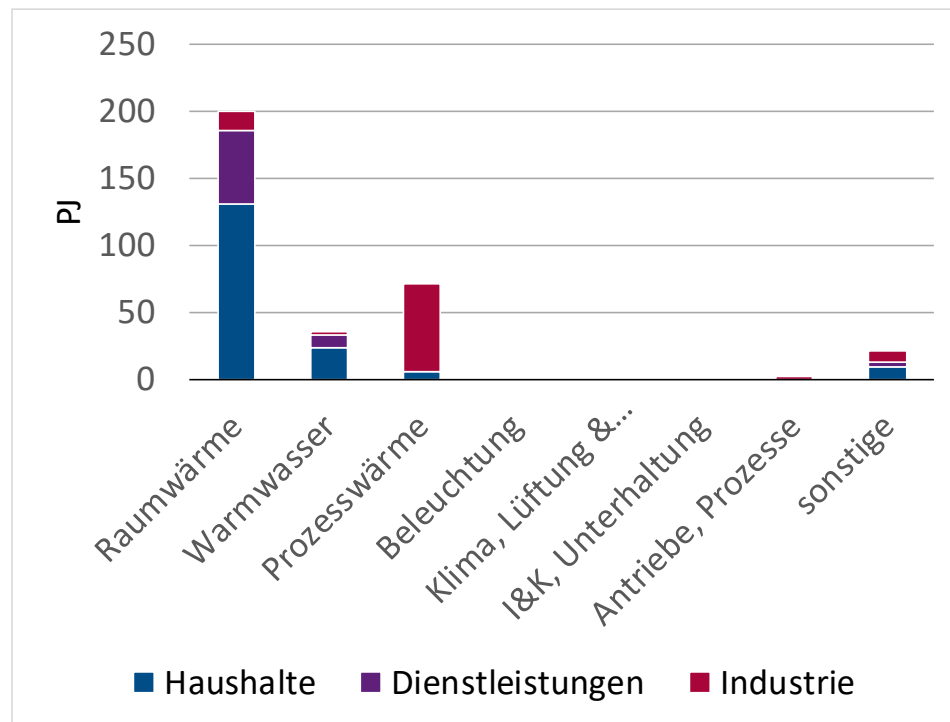
Tabelle 5: Elektrizitätsverbrauch 2018 und Reduktionspotenzial (in PJ)

Verwendungszweck	Haushalte	Dienstleistung	Industrie	Total	Reduktionspotenzial
Raumwärme	14.28	3.77	0.19	18.24	60%
Warmwasser	8.90	0.71	0.02	9.63	60%
Prozesswärme	0.00	2.19	21.51	23.70	30%
Beleuchtung	4.24	11.07	5.34	20.65	80%
Klima, Lüftung, HT	4.53	17.08	0.91	22.52	20%
I&K, inklusive Unterhaltung	5.81	4.59	0.68	11.09	10%
Antriebe, Prozesse	15.39	17.67	34.58	67.65	20%
Kochherde	5.13	0.00	0.00	5.13	20%
Sonstige	9.18	3.77	0.00	12.95	40%
Total	67.46	60.84	63.24	191.55	33%

Ohne Strombedarf des Verkehrs (12.3 PJ).

Tabelle INFRAS. Quelle: Prognos, TEP, INFRAS 2019 / Expertenschätzung (Reduktionspotenzial).

Abbildung 34: Endenergieverbrauch exkl. Elektrizität nach Verwendungszweck in der Schweiz 2018



Ohne Energiebedarf des Verkehrs (218 PJ).

Grafik INFRAS. Quelle: Prognos, TEP, INFRAS 2019.

Tabelle 6: Energiebedarf exkl. Elektrizitätsverbrauch 2018 und Reduktionspotenziale (in PJ)

Verwendungs- zweck	Haushalte	Dienstleistung	Industrie	Total	Red. durch Effizienz	Substitution Bioenergie	Red.potenzial Elektrifizierung
Raumwärme	130.88	55.24	14.38	200.50	70	20	70%
Warmwasser	23.11	10.28	2.44	35.83	10	10	50%
Prozess- wärme	5.52	0.00	65.31	70.84	35	30	50%
Beleuchtung	0.00	0.00	0.00	0.00			
Klima, Lüf- tung, HT	0.00	0.00	0.00	0.00			
I&K, inklusive Unterhaltung	0.00	0.00	0.00	0.00			
Antriebe, Prozesse	0.00	0.00	1.66	1.66			70%
Sonstige	0.00	0.00	7.62	7.62		1	30%
Total	159.52	65.52	91.42	316.46	115	61	65%

Tabelle INFRAS. Quelle: Prognos, TEP, INFRAS 2019 / Expertenschätzung (Reduktionspotenzial).

Das Substitutionspotenzial durch Bioenergie basiert auf der nachhaltig verfügbaren Biomasse für Energiezwecke in der Schweiz von rund 100 PJ. Dabei wird berücksichtigt, dass ein Teil der Bioenergie im Verkehr und in der Strombereitstellung verwendet wird.

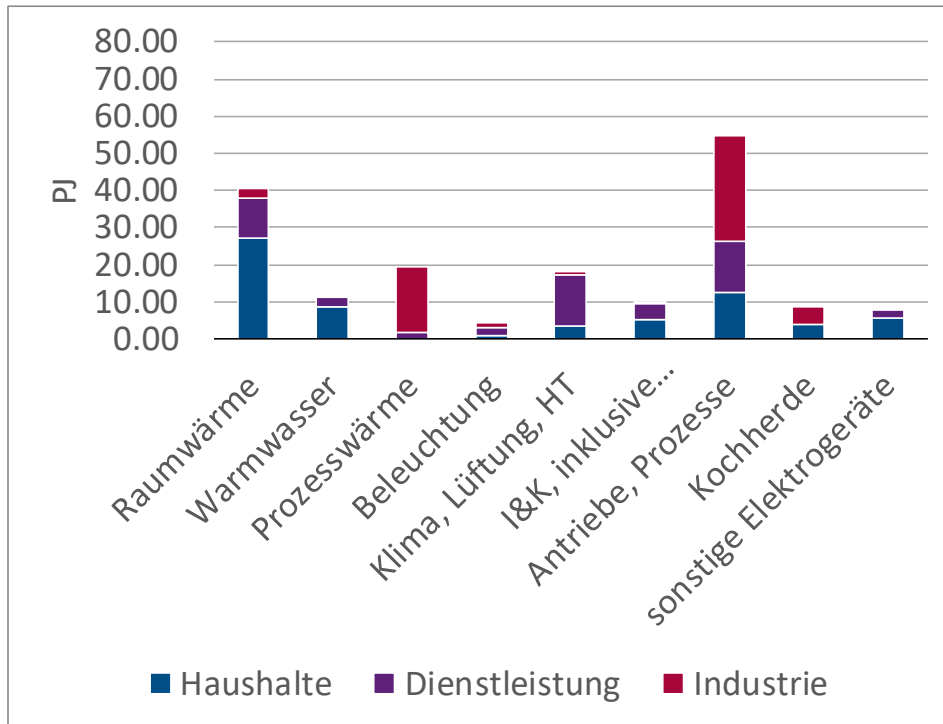
Die Reduktionspotenziale durch den Ersatz von fossilen Energieträgern durch Strom berücksichtigen, dass Strom zur Wärmebereitstellung in Wärmepumpen mit einer hohen Arbeitszahl genutzt wird. Bei Raumwärme wird zudem berücksichtigt, dass durch die angenommene gute Wärmedämmung das Temperaturniveau der Heizung (Vorlauftemperatur) niedrig gehalten werden kann, was die Wärmepumpe noch effizienter macht.

Wir gehen davon aus, dass diese Potenziale nur mit sehr ambitionierten Massnahmen und auf der Zeitachse frühestens bis 2050 erreicht werden können. Die relativ lange Transition ist vor allem bedingt durch die langen Renovationszyklen bei Gebäuden, die nur mit sehr hohen Zusatzkosten verkürzt werden könnten.

So ergibt sich 2050 bzw. nach der vollständigen Elektrifizierung des Energiesystems ein Strombedarf von 175 PJ/Jahr für alle Sektoren ausser Verkehr. Abbildung 35 zeigt die Aufteilung auf die Sektoren und Verwendungszwecke. Das Total entspricht 91% des Strombedarfs dieser Sektoren in 2018. Durch eine massive Effizienzsteigerung kann also der Mehrbedarf durch die Elektrifizierung überkompensiert werden.

Für die weiteren Schätzungen in diesem Projekt gehen wir davon aus, dass sich der Strombedarf von heute bis 2050 linear entwickelt. Somit liegt der Strombedarf der Schweiz exkl. Verkehr in 2030 bei 185 PJ, in 2040 bei 180 PJ und in 2050 bei 175 PJ.

Abbildung 35: Elektrizitätsverbrauch nach Verwendungszweck in der Schweiz 2050



Strombedarf bei vollständiger Umstellung des Energiesystems (ohne Verkehr) auf Elektrizität. Wir gehen davon aus, dass das frühestens 2050 erreichbar ist.

Ohne Strombedarf des Verkehrs (je nach Szenario).

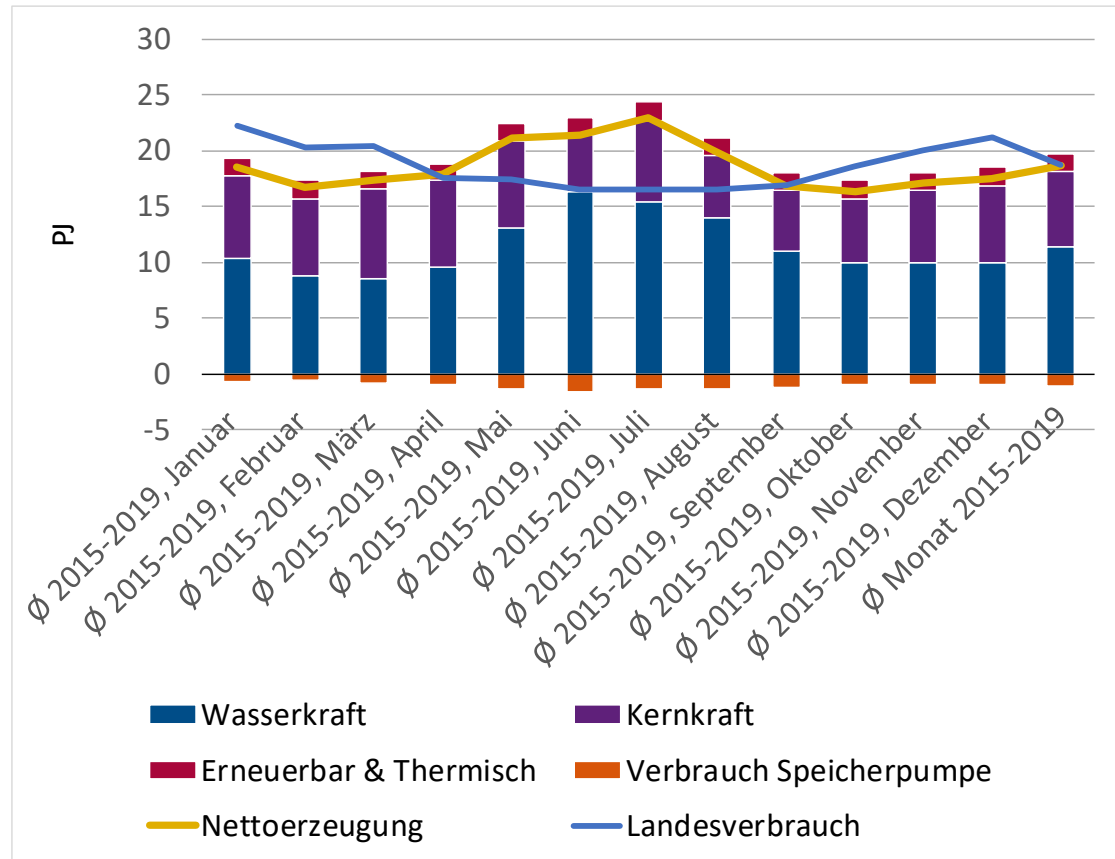
Grafik INFRAS. Quelle: eigene Schätzung.

Abbildung 35 zeigt, dass rund 40 PJ des Strombedarfs im Jahr 2050 für Raumwärme aufgewendet werden. Dieser Bedarf fällt vor allem im Winterhalbjahr an. Die übrigen Verwendungszwecke sind in erster Näherung unabhängig von der Jahreszeit. Auf dieser Basis lässt sich abschätzen, dass im Sommerhalbjahr der Bedarf rund 20 PJ tiefer liegt als die Hälfte des Jahresbedarfs und die Werte im Winterhalbjahr entsprechend 20 PJ höher.

4.6.2. Entwicklung Stromproduktion in der Schweiz

Die Inlandstromproduktion in der Schweiz lag gemäss der Schweizerische Elektrizitätsbilanz des Bundesamts für Energie im Durchschnitt der Jahre 2015 bis 2019 bei 237 PJ Brutto bzw. bei 223 PJ Netto. Die Differenz ist der Verbrauch der Pumpen bei Speicherkraftwerken. Das bedeutet, dass in einem durchschnittlichen Monat Netto 18.7 PJ und Brutto 19.7 PJ Strom erzeugt wurde. Diese Werte liegen sehr nahe an den Januar-Werten aus Abbildung 36.

Abbildung 36: Brutto- und Nettostromproduktion in der Schweiz im Durchschnitt der Jahre 2015-2019



Grafik INFRAS, Quelle BFE 2020.

Abbildung 36 zeigt, dass die Schweiz in einem durchschnittlichen Monat ziemlich genau gleich viel Strom produzierte (netto) wie sie verbraucht hat. Im Sommerhalbjahr lag die Produktion über dem Verbrauch, im Winterhalbjahr darunter.

Rund 36% der Inlandproduktion stammte aus der Kernkraft, die langsam auslaufen wird. Mit Mühleberg ist das erste KKW 2019 bereits ausser Betrieb gesetzt worden. Für die übrigen KKW gehen wir von einer Lebensdauer von 50 Jahren³ aus. Tabelle 7 zeigt die Annahmen zur Jahresproduktion und dem Jahr der Ausserbetriebsetzung.

³ Ausnahme Beznau 1: 53 Jahre damit Abschaltung gleichzeitig wie Beznau 2.

Tabelle 7: Ausserbetriebsetzung KKW

KKW	Jahresproduktion (PJ)	Jahr der Ausserbetriebsetzung
Mühleberg	8.99	2019
Beznau 1	8.79	2022
Beznau 2	8.79	2022
Gösgen	24.33	2029
Leibstadt	29.39	2034

Jahresproduktion aus durchschnittlicher Kernkraft-Produktion in den Jahren 2015-2019 (80.3 PJ), auf Werke allokiert gem. elektrischer Netto-Leistung.

Annahme: 50 Jahre Lebensdauer ausser Mühleberg (nach 47 Jahren ausser Betrieb gesetzt) und Beznau 1 (53 Jahre, damit gleichzeitig mit Block 2).

Tabelle INFRAS. Quelle: BFE 2020/eigene Annahmen.

Um den Wegfall dieser Produktion zu kompensieren, muss einerseits die Produktion mit Wasserkraft und andererseits die mit anderen Erneuerbaren erhöht werden. Im Vorentwurf zum neuen Energiegesetz (April 2020) nennt der Bundesrat Ziele für das Jahr 2050 von knapp 140 PJ für Wasserkraft und 87 PJ für die anderen Erneuerbaren.

Da Wasserkraft über die Jahre um den Zielwert von 140 PJ geschwankt hat, und überdies eine aktuelle Studie des BFE für das Ausbaupotenzial der Wasserkraft (BFE 2019a) einen Wert im selben Bereich angibt, gehen wir für die Zukunft in erster Näherung von einer konstanten Produktion von 140 PJ pro Jahr aus.

Für die anderen Erneuerbaren orientieren wir uns an den Potenzialen, die in neueren Studien für 2050 ausgewiesen werden, und gehen davon aus, dass diese Potenziale in logistischen Funktionen bis 2050 angenähert werden. Tabelle 8 stellt die Produktion in 2019 den Ausbauzielen des Bundesrates und den Potenzialen gemäss Literatur gegenüber. Ausserdem zeigt sie die realisierbare Potenzialgrenze, die in dieser Studie angenommen wird. Da das PV-Potenzial in den Studien stark schwankt und es bezüglich des Ausbaus aber sehr relevant ist, betrachten wir dafür 2 Szenarien. Für «PV hoch» wählen wir den tieferen Potenzialwert aus der Literatur, für «PV sehr hoch» wählen wir 60% des hohen Wertes. 100% des hohen Wertes scheint unrealistisch, da das bedeuten würde, dass jedes geeignete Dach und jede geeignete Fassade in der Schweiz mit PV ausgerüstet wäre. Dabei werden Aspekte wie Gestehungskosten oder auch Denkmalschutz nicht berücksichtigt. Abbildung 37 zeigt die Entwicklungen der Produktion von erneuerbarem Strom (ohne Wasserkraft) in der Schweiz gemäss unserer Schätzung in den Szenarien mit tiefem und hohem PV-Zubau. Abbildung 38 zeigt die daraus folgende Entwicklung der inländischen Stromproduktion unter Berücksichtigung der Ausserbetriebsetzung der KKW nach 50 Betriebsjahren.

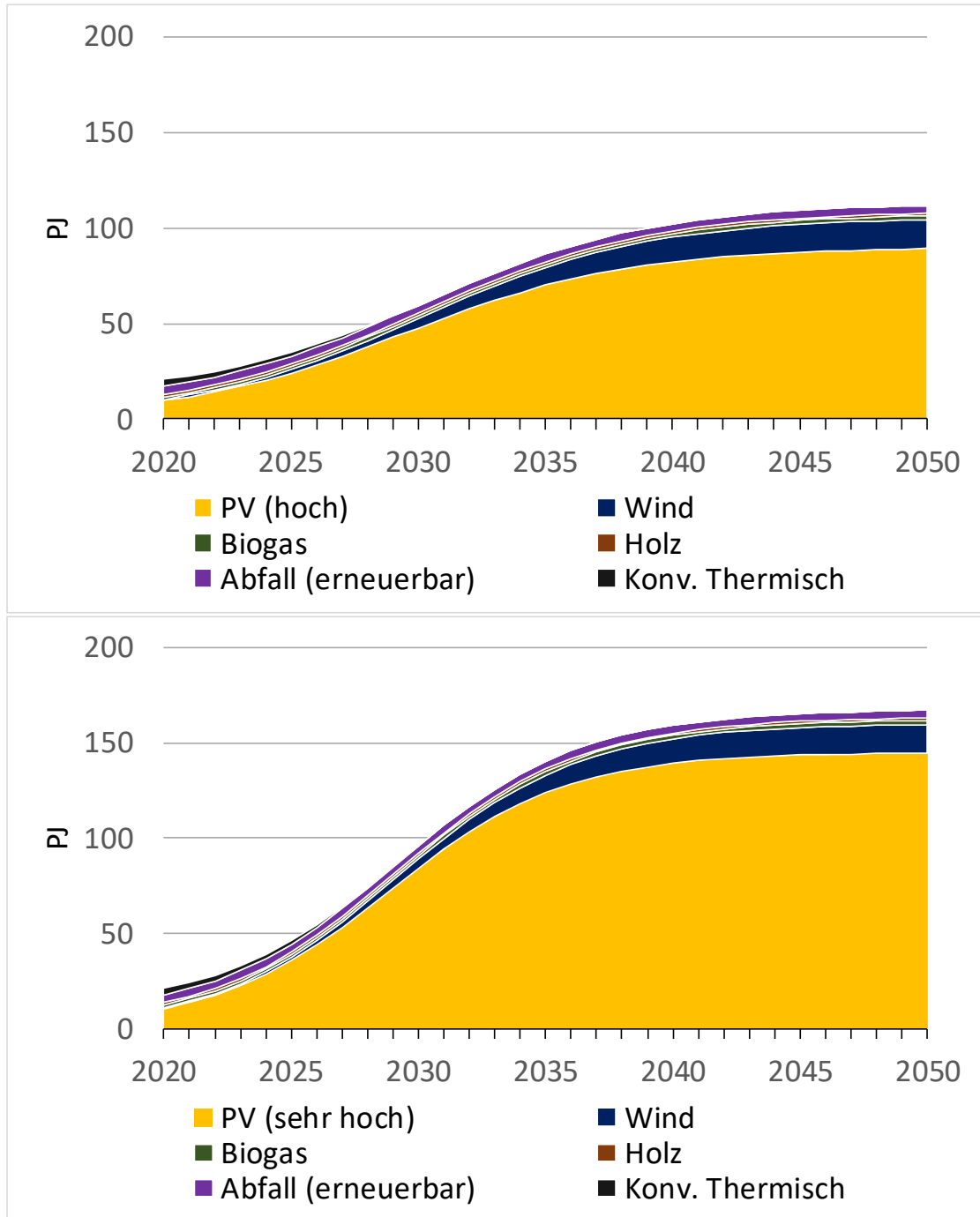
Heutige PV-Anlagen produzieren 76% des Stroms im Sommer und 26% im Winterhalbjahr⁴. Durch eine auf den Winterbetrieb optimierte Ausrichtung der PV-Module kann der Winteranteil auf 52% erhöht werden. Allerdings sinkt in diesem Fall der Gesamtertrag, sodass 17% mehr Leistung installiert werden müsste, was ökonomisch nicht erstrebenswert wäre. In einem realistischeren Szenario kann man mit einem Winterstromanteil von etwa 36% rechnen. Dies kann ohne zusätzliche Leistung erreicht werden, da sich der Mehrertrag im Winter und der Minderertrag im Sommer kompensieren (Basler & Hoffmann, 2019). Die in Abbildung 38 dargestellten Sommer- und Winterproduktionen wurden auf dieser Basis berechnet. Für alle Stromquellen ausser PV wird der Einfachheit halber angenommen, dass Sommer- und Winterproduktion gleich sind.

Tabelle 8: Erneuerbare Stromproduktion in 2019 und Potenziale in Literatur (in PJ)

Studie/ Quelle	Wasserkraft	Fotovoltaik (PV)	Wind	Biogas	Holz	Abfall (erneuerbar)
Produktion 2019						
Energiestatistik (BFE 2020)	146	7.83	0.53	1.34	1.13	4.24
Ausbauziel Bundesrat 2050						
Entwurf Energiegesetz	140			87		
Potenzialstudien (Fokus 2050)						
PSI / BFE (PSI 2017)		90	15.5			
Meteotest 2017 (Cattin et al. 2017)		90				
Sonnendach (BFE 2019b)		240				
BFE 2019a	130-135					
VSE 2020				4		
In dieser Studie verwendetes Potenzial 2050						
Vorliegende Studie	140	90 / 145	15.5	2.5	1.5	4

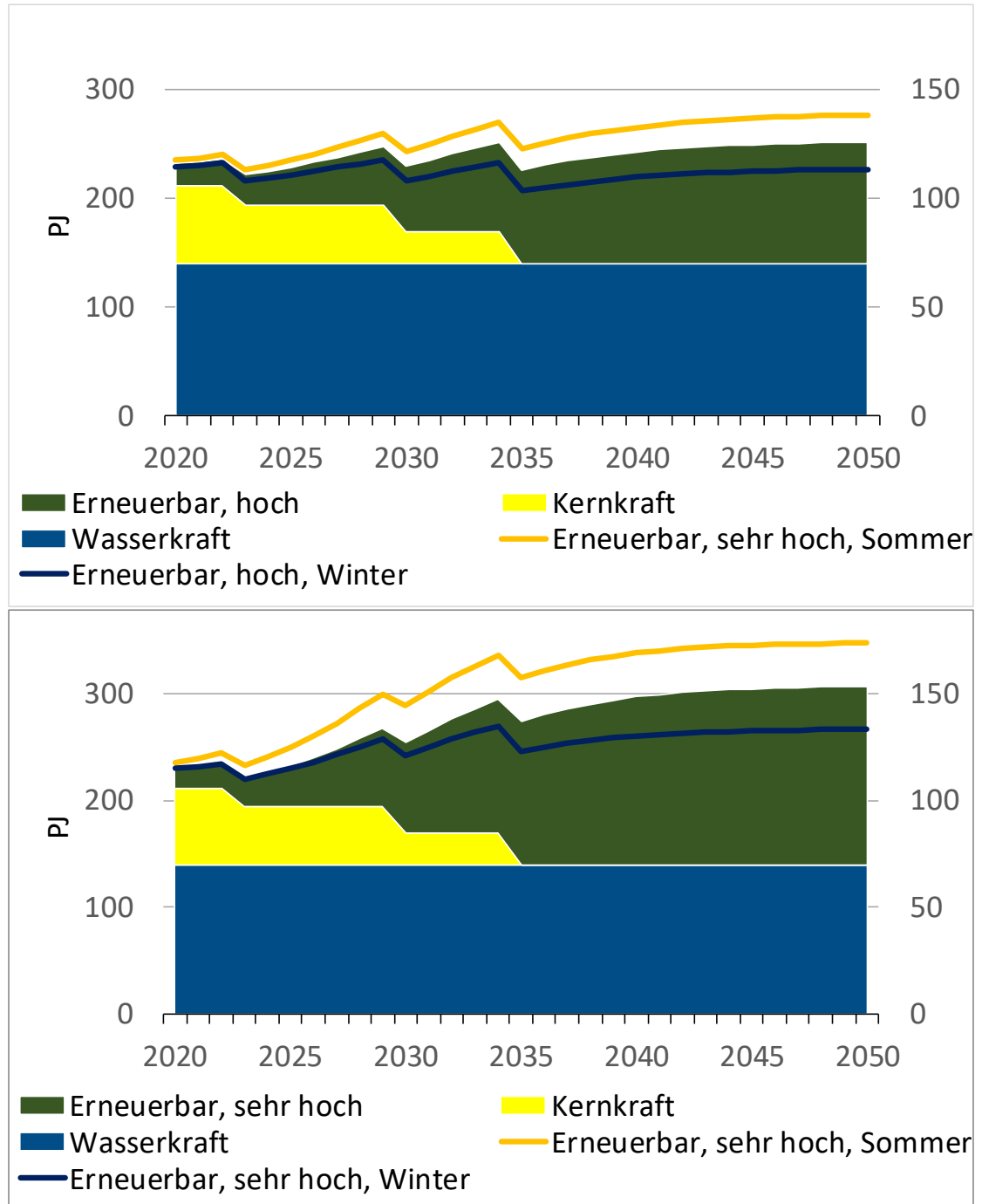
Tabelle INFRAS. Quelle: Diverse.

Abbildung 37: Ausbau erneuerbare Stromproduktion in der Schweiz, Szenario «PV hoch» (oben) und «PV sehr hoch (unten)



Grafik INFRAS, eigene Schätzung.

Abbildung 38: Entwicklung Stromproduktion in der Schweiz, Szenario «PV hoch» (oben) und «PV sehr hoch» (unten)



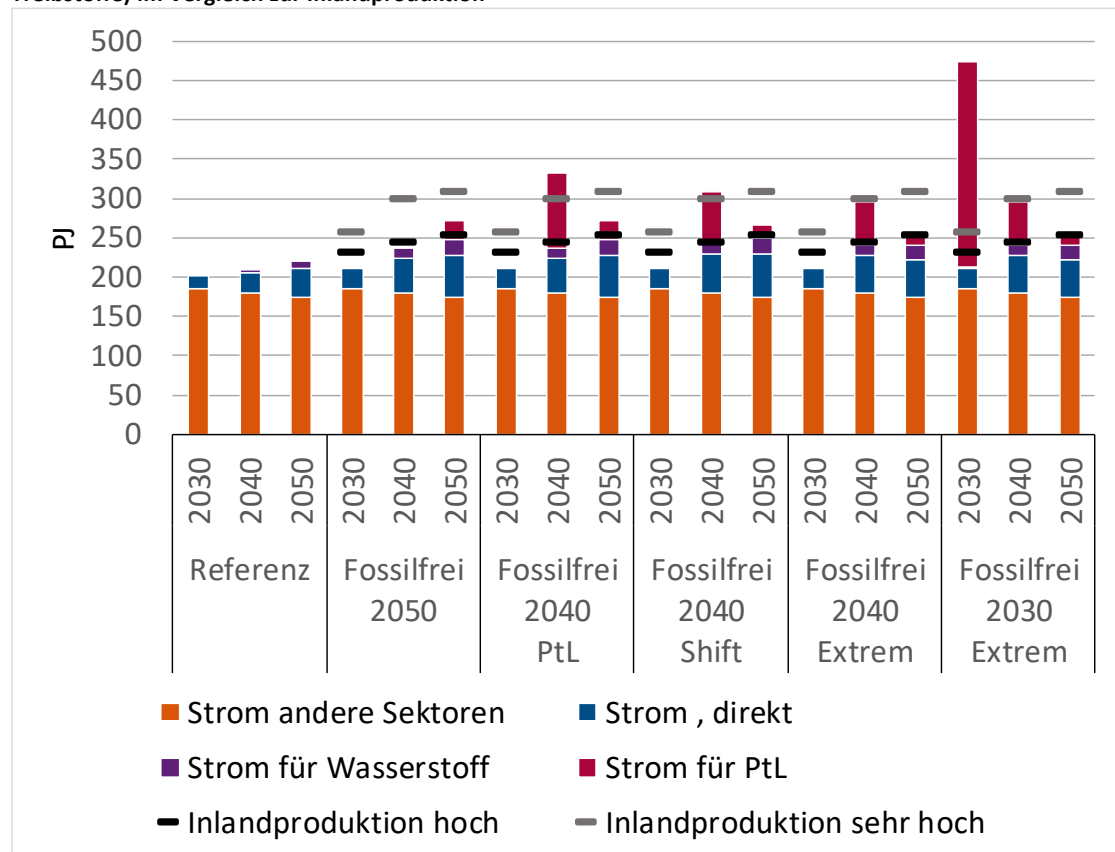
Flächen beziehen sich auf die Skala links, Linien auf die Skala rechts, die halb so hoch ist.

Grafik INFRAS, eigene Schätzung.

4.6.3. Importbedarf für Strom

Kombiniert man den Strombedarf des Verkehrs mit dem der übrigen Sektoren, ergibt sich ein Strombedarf inklusive der Herstellung strombasierter Treibstoffe gemäss Abbildung 39. In der Abbildung ebenfalls dargestellt sind die geschätzten Inlandproduktionen in den entsprechenden Jahren. Dabei ist zu betonen, dass diese Schätzung auf der Annahme basiert, dass ein sehr rascher und weitgehender Ausbau der erneuerbaren Energien stattfinden wird. Im Referenzfall lägen diese Werte wesentlich tiefer, wurden aber nicht abgeschätzt und sind darum auch nicht dargestellt.

Abbildung 39: Totaler Strombedarf der Schweiz in den Szenarien (inkl. Bedarf zur Herstellung strombasierter Treibstoffe) im Vergleich zur Inlandproduktion



Direkter Strombedarf ab Netz bzw. Ladesteckdose für Züge, Trams, Trolleybusse und BEV sowie indirekt verursachter Strombedarf durch Produktion von Wasserstoff (H₂) und PtL.

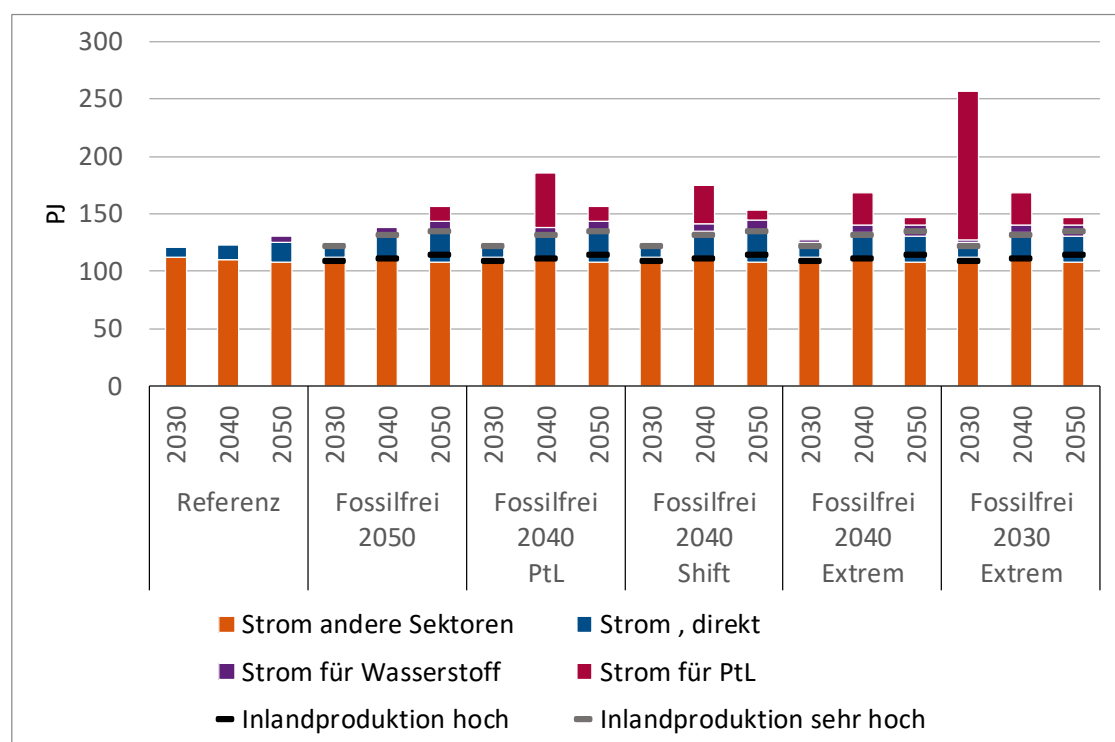
Schätzung der Inlandproduktion basiert auf der Annahme, dass ein sehr rascher und weitgehender Ausbau der erneuerbaren Energien stattfinden wird.

Grafik INFRAS.

Wie die Abbildung 39 zeigt, könnte der Strombedarf im Jahresdurchschnitt für alle Szenarien durch die Inlandproduktion gedeckt werden, wenn man davon ausgeht, dass die PtL-

Treibstoffe zum grössten Teil nicht in der Schweiz hergestellt, sondern importiert werden. Abbildung 40 zeigt, dass die Inlandproduktion im Winterhalbjahr noch ausreichen könnte, um den direkten Strombedarf zu decken. Für die Wasserstoff- und PtL-Produktion hingegen dürfte im Durchschnitt des Winterhalbjahrs hingegen nicht genügend inländischer Strom zur Verfügung stehen.

Abbildung 40: Totaler Strombedarf der Schweiz im Winterhalbjahr in den Szenarien (inkl. Bedarf zur Herstellung strombasierter Treibstoffe) im Vergleich zur Inlandproduktion im Winterhalbjahr



Direkter Strombedarf ab Netz bzw. Ladesteckdose für Züge, Trams, Trolleybusse und BEV sowie indirekt verursachter Strombedarf durch Produktion von Wasserstoff (H₂) und PtL.

Schätzung der Inlandproduktion basiert auf der Annahme, dass ein sehr rascher und weitgehender Ausbau der erneuerbaren Energien stattfinden wird.

Säulen beziehen sich auf die Skala links, Inlandproduktion auf die Skala rechts, die halb so hoch ist wie die links.

Grafik INFRAS.

Damit stellt sich vor allem noch die Frage, ob ein Import der benötigten Mengen an PtL-Treibstoffen für die Szenarien realistisch ist.

4.6.4. Importpotenziale für PtL

Wie in 4.6.3 gezeigt, müsste praktisch das gesamte PtL, das in den betrachteten Szenarien im Schweizer Verkehrssektor eingesetzt werden soll, importiert werden. Tabelle 9 fasst die entsprechenden Mengen zusammen.

Tabelle 9: Importbedarf für PtL-Treibstoffe in den Szenarien (in PJ bzw. Mio. l)

Szenario	2030		2040		2050	
	PJ	Mio. l	PJ	Mio. l	PJ	Mio. l
Fossilfrei 2050	0	0	0	0	10	293
Fossilfrei 2040, PtL	0	0	40	1'135	10	293
Fossilfrei 2040, Shift	0	0	28	779	6.9	195
Fossilfrei 2040, MIV minimal	0	0	23	652	5.6	159
Fossilfrei 2030, MIV minimal	110	3'103	23	652	5.6	159

Tabelle INFRAS. Quelle: Eigene Berechnung.

Die Produktion der 110 PJ PtL, die 2030 benötigt würden, braucht 260 PJ Strom. Das entspricht 72 TWh. Das wären rund 3-mal die im «PV sehr hoch»-Szenario prognostizierte PV-Produktion in der Schweiz im Jahr 2030. Bei einem Ertrag von 2000 kWh/kWp in Afrika und 6.4 m² Modulfläche pro kWp Leistung, würden für die Produktion des 2030 benötigten PtL im Schweizer Landverkehr 231 Mio. m² Solarmodule in Afrika benötigt. Das wären über 30% der globalen PV-Modulproduktion im Jahr 2018.

Mit maximal 40 PJ PtL könnte gemäss unseren Szenarien der Verkehr in der Schweiz 2040 fossilfrei werden. Dazu wären 26.4 TWh Strom nötig, der mit 84 Mio. m² PV-Modulen in Afrika produziert werden könnte. Diese Strommenge würde etwa $\frac{1}{3}$ des 2040 in der Schweiz produzierten PV-Stroms (im Szenario «PV sehr hoch») entsprechen.

Belastbare Quellen mit Prognosen für die künftige Produktion von PtL-Treibstoffen haben wir leider keine gefunden. Die meisten Studien zum Thema schätzen die mögliche Nachfrage und/oder befassen sich mit synthetischen Flugtreibstoffen. Alle Untersuchungen sind sich jedoch einig, dass sich die PtL-Produktion ohne starke Förderanstrengungen nicht entwickeln wird.

Die aireg spricht in einer Roadmap (AIREG 2020) von 10-40 Mio. Tonnen synthetischen Flugtreibstoffen, die bis 2030 global produziert werden könnten. Zu diesen Zahlen ist anzumerken, dass die aireg eine Lobbyorganisation für erneuerbare Energie in der Luftfahrt ist, die eine Förderung solcher Treibstoffe voranbringen will. Doch selbst im Vergleich zu diesen Zahlen scheint es sehr unwahrscheinlich, dass 2030 rund 3 Mio. Tonnen solcher Treibstoffe für den landbasierten Verkehr in der Schweiz zur Verfügung stehen könnten.

Das Öko-Institut kam 2019 im Rahmen der Initiative «Kopernikus-Projekte für die Energiewende» (Öko-Institut 2019) zu einem ganz anderen Schluss als die Aireg. Die Studie folgert, dass strombasierte Treibstoffe erst nach dem Jahr 2030 und bei hohen Treibhausgasminde-
rungszielen eine relevante Massnahme sein werden.

Die EU legt in ihrer «Hydrogen Strategy» (European Commission 2020) ein Produktionsziel von bis zu 10 Mio. Tonnen erneuerbarem Wasserstoff fest. Danach soll die Produktionstechnologie marktreif sein und bis 2050 im industriellen Massstab Anwendung finden. Nachdem der prognostizierte Bedarf der Industrie von ca. 8.5 Mio. t gedeckt ist, würden so 1.5 Mio. t für Anwendungen in der Mobilität verbleiben (Fraile et al. 2015). Die 1.5 Mio. t entsprechen einer Energie von 0.18 PJ. Das ist weniger als ein Drittel des Wasserstoffbedarfs im Verkehrssektor in der Schweiz im Referenzszenario. Der Bedarf in allen «Fossilfrei» Szenarien liegt 2030 eine Grössenordnung höher. Damit wäre bei Umsetzung der EU Hydrogen Strategy im Jahr 2030 kein europäischer Wasserstoff für die PtL-Produktion übrig.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Menge an PtL, die benötigt würde um 2030 den Schweizer Landverkehr fossilfrei zu machen, mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit nicht verfügbar sein wird. Hingegen ist es vorstellbar, dass die 2040 benötigte Menge (zu einem relativ hohen Preis) importiert werden könnte. Da aber auch dazu noch eine beträchtliche Unsicherheit besteht, sollte zum Erreichen von fossilfreiem Verkehr 2040 nicht auf die Szenarienvariante «PtL» gesetzt werden, sondern eher auf eine der anderen Varianten, die deutlich weniger PtL erfordern würden. Im Zeithorizont 2050 darf erwartet werden, dass die benötigte PtL-Menge zur vollständigen Deckung der verbleibenden Nachfrage nach flüssigen Kohlenwasserstoffen aus dem Schweizer Landverkehr am globalen Markt verfügbar sein wird.

5. Ergebnisübersicht und Synthese

5.1. Ergebnisübersicht: Vergleich der Szenarien

Nach der detaillierten Beschreibung der Wirkungen je Szenario im Kapitel 4 werden hier die Ergebnisse aller untersuchten Szenarien zusammenfassend gegenübergestellt. Allen Szenarien liegen jeweils Massnahmen und Grundannahmen zugrunde (vgl. Kap. 3). Diese folgende Tabelle fasst die Szenarien und deren Massnahmen nochmals zusammen.

Tabelle 10: Übersicht der analysierten Szenarien

Szenario	Massnahmen (verglichen mit Referenz) mit Einfluss auf...	
	Technologie/Flottenmix	Verkehrsnachfrage
Fossilfrei 2050 (Basisszenario)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flottengrenzwerte für PW, LNF und SNF ▪ Maximalquoten für Verkauf von Neufahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (z.B. ab 2040 keine Verbrenner-PW-Neufahrzeuge) ▪ Quoten für ÖV-Busse (Verbrenner) ▪ Gewichts- und Leistungslimits (Flottengrenzwert) für Neufahrzeuge ▪ Finanzielle Belastung fossiler Treibstoffe ▪ Förderung Car-Sharing mit fossilfreien Fahrzeugen ▪ Bereitstellen von E-Ladestationen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erhöhung der Kosten für fossilen Verkehr (fossile Treibstoffe) ▪ Umfassende Förderung Fuss- und Veloverkehr ▪ Förderung ÖV (fokussiert, v.a. in Agglomerationen) ▪ Einschränkungen MIV (Reduktion Flächen, rigidere Parkplatz-Politik) ▪ Ausbau Sharing- & Pooling-Angebote & fossilfreie, multimodale Angebote ▪ Freizeit- und Arbeitsverkehr: weitere Massnahmen zur Verringerung und Verlagerung ▪ Arbeitsverkehr: weitere Massnahmen zur Verringerung & Verlagerung
Fossilfrei 2040, PtL	Wie Basisszenario, plus: <ul style="list-style-type: none"> ▪ weitere Verteuerung fossiler Treibstoffe, sodass ab 2040 teurer als PtL ▪ Beschränkung von grauen Importen von fossilen Treibstoffen 	Wie Basisszenario
Fossilfrei 2040, Shift (zusätzlicher Shift auf alternative Antriebe)	Wie «Fossilfrei 2040, PtL», plus: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Starke Einschränkung der Nutzung von PW und LNF mit Verbrennungsmotoren ab 2040 	Wie Basisszenario
Fossilfrei 2040, MIV minimal (zusätzliche Reduktion Verkehrsnachfrage)	Wie «Fossilfrei 2040, PtL», plus: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbot der Nutzung von PW und LNF mit Verbrennungsmotoren ab 2040 	Wie Basisszenario, plus: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Weitere sehr starke Erhöhung der Kosten für fossilen Verkehr sowie den MIV generell ▪ Zusätzl. massiver Ausbau des Angebots im Fuss-, Veloverkehr und ÖV
Fossilfrei 2030, MIV minimal	Wie Fossilfrei 2040, MIV minimal	Wie Fossilfrei 2040, MIV minimal

Tabelle INFRAS.

In den folgenden Abschnitten werden die Verkehrsnachfrage, der Energiebedarf, die Treibhausgasemissionen sowie der Strombedarf zusammenfassend dargestellt und beschrieben.

Verkehrsnachfrage

Im Referenzszenario nimmt die gesamte Verkehrsleistung zwischen 2018 (neuste verfügbare statistische Daten) und 2050 im Personenverkehr um 18%, im Güterverkehr um 33% zu (vgl. auch Tabelle 11). Diese Annahmen basieren auf den aktuellsten verfügbaren Verkehrsperspektiven des Bundes (ARE 2016) und stützen sich auf eine mittlere Bevölkerungsentwicklung gemäss BFS-Prognosen. Folglich ist die Zunahme im Personenverkehr primär auf die Zunahme der Bevölkerung (ca. +20% von 2020 bis 2050) zurückzuführen.

Tabelle 11: Verkehrsnachfrage Personenverkehr (PW und Bahn/ÖV) – Vergleich der Szenarien

Szenario		2020	2030	2040	2050
Verkehrsnachfrage, in Mrd. pkm					
Referenz	MIV total	102.3	109.3	113.5	115.2
	ÖV total	26.9	30.6	33.0	34.4
	Fuss-/Velo*	8.3	9.2	9.8	10.1
Fossilfrei 2050 (Basisszenario) <i>sowie identisch:</i> Fossilfrei 2040, PtL Fossilfrei 2040, Shift	MIV total	102.1	88.9	81.8	74.6
	ÖV total	27.1	35.0	40.4	45.8
	Fuss-/Velo*	8.5	10.1	11.3	12.4
Fossilfrei 2040, MIV minimal	MIV total	102.1	89.9	72.4	56.0
	ÖV total	27.1	34.7	39.9	45.2
	Fuss-/Velo*	8.5	10.3	12.6	14.0
Verkehrsnachfrage, in % vgl. mit 2020 Referenz					
Referenz	MIV total	100%	107%	111%	113%
	ÖV total	100%	114%	123%	128%
	Fuss-/Velo*	100%	111%	119%	122%
Fossilfrei 2050 (Basisszenario) <i>sowie identisch:</i> Fossilfrei 2040, PtL Fossilfrei 2040, Shift	MIV total	100%	87%	80%	73%
	ÖV total	101%	130%	150%	171%
	Fuss-/Velo*	102%	122%	137%	150%
Fossilfrei 2040, MIV minimal	MIV total	100%	88%	71%	55%
	ÖV total	101%	129%	149%	168%
	Fuss-/Velo*	102%	125%	152%	169%

Tabelle INFRAS. * inkl. E-Bikes.

Im Bereich der Veränderung der Verkehrsnachfrage hin zu einer fossilfreien Mobilität wurde ein **Basisszenario** erarbeitet, das auf grundsätzlich technisch umsetzbaren Massnahmen basiert (ohne Berücksichtigung Akzeptanz). Dieses Massnahmen-Set bildet die Basis für das Basisszenario «Fossilfrei 2050» und auch alle anderen Szenarien bauen darauf auf. Den beiden Szenarien «Fossilfrei 2040, PtL» und «Fossilfrei 2040, Shift» ist die genau gleich Verkehrsnachfrage hinterlegt.

In diesem (Basis-)Szenario ergibt sich eine Reduktion der gesamten Verkehrsnachfrage bis 2050 (vgl. mit 2018) um rund 2% im Personenverkehr (trotz Bevölkerungswachstum). Folglich nimmt die Verkehrsnachfrage pro Kopf deutlich ab. Im Güterverkehr wird auch in diesem Szenario mit einer Zunahme gerechnet, allerdings nur noch um gut 20% bis 2050 gegenüber 2018 (statt +33% in der Referenz).

Eine erhebliche Verschiebung ergibt sich jedoch zwischen den verschiedenen Verkehrsmodi. Im **Basisszenario «Fossilfrei 2050»** reduziert sich die Nachfrage (pkm) im MIV von 2018 bis 2050 um 27%. Auf der anderen Seite steigt die Nachfrage im ÖV (Schiene und Strasse) im gleichen Zeitraum um 77% und im Fuss- und Veloverkehr (inkl. E-Bikes) um 48%. Folglich verschieben sich die Modalsplitanteile sehr stark. Der ÖV-Anteil am (trimodalen) Modalsplit im motorisierten Verkehr steigt demnach von 19% im Jahr 2018 auf knapp 35% bis 2050.

Auch im Güterverkehr ergibt sich beim Basisszenario ein Modalshift von der Strasse zur Schiene. Die Verkehrsleistung (tkm) auf der Strasse nimmt von 2018 bis 2050 um 12% zu, verglichen mit +29% im Referenzszenario. Der Schienengüterverkehr dagegen nimmt in der gleichen Zeit um 37% zu. Folglich steigt der Modalsplit im Basisszenario «Fossilfrei 2050» von 38% auf 43%.

Bei den beiden Szenarien «Fossilfrei 2040, PtL» und «Fossilfrei 2040, Shift» ist die gleiche Verkehrsnachfrage (gesamthaft und je Verkehrsträger) wie im Basisszenario «Fossilfrei 2050» hinterlegt.

Für das Szenario **«Fossilfrei 2040, MIV minimal»** (und dann auch für das Szenario «Fossilfrei 2030, MIV minimal») wurde ein Szenario mit einer weiteren, maximalen zusätzlichen Verringerung der Verkehrsnachfrage im Personenverkehr skizziert – im Sinne eines Minimalszenarios.⁵ Dazu wären jedoch sehr substanzielle Massnahmen notwendig, insbesondere zur Reduktion des MIV. Die Gesamtnachfrage im motorisierten Personenverkehr würde demnach bis 2050 um 15% zurückgehen (Verkehrsleistung vgl. mit 2018). Insbesondere der MIV würde massiv reduziert, um 45% bis 2050. Die Nachfrage im ÖV dagegen würde um 75% und im Fuss- und

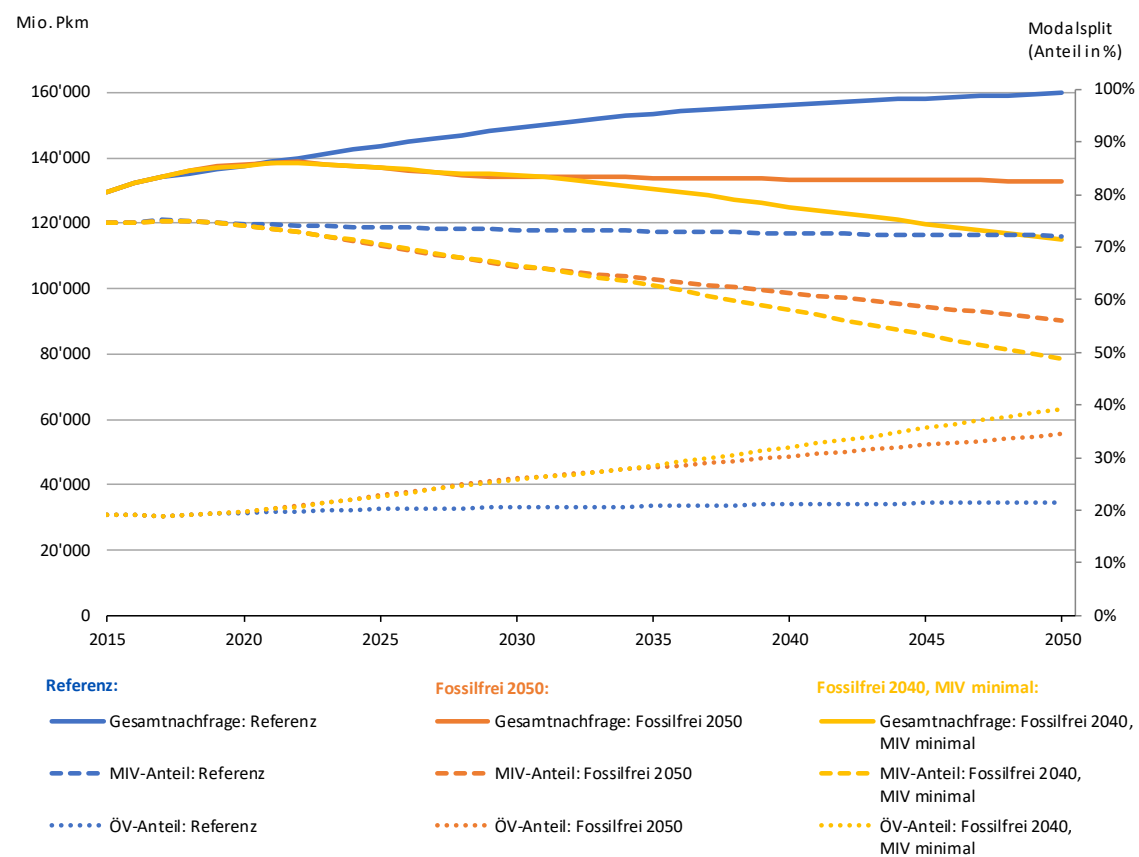
⁵ Keine zusätzliche Verringerung der Nachfrage wurde für dieses Szenario im Güterverkehr modelliert. Hier wird das weitere Reduktionspotenzial als deutlich beschränkter eingeschätzt.

Veloverkehr um 69% steigen. Im Güterverkehr wurde im Szenario «Fossilfrei 2040, MIV minimal» keine zusätzliche Veränderung der Verkehrsnachfrage unterstellt.

Die folgende Grafik zeigt die Entwicklung der Gesamtnachfrage sowie des Modalsplits im Personenverkehr im Referenzszenario sowie den beiden modellierten Verkehrsnachfrageszenarien (Basisszenario: «Fossilfrei 2050» sowie das Szenario «Fossilfrei 2040, MIV minimal»).

Abbildung 41: Entwicklung Verkehrsleistung (pkm) und Modalsplit im Personenverkehr je Szenario

Die Sekundärachse zeigt die Entwicklung des Modalsplits (Anteil MIV und ÖV, trimodal)



Grafik INFRAS, eigene Berechnungen.

Energiebedarf fossil und Treibhausgasemissionen

Die geforderte Reduktion der fossilen Treibstoffe wird erreicht durch eine Reduktion der Fahrleistung auf der Strasse, durch eine Elektrifizierung der Flotte, durch eine Verschiebung der Fahrleistungsanteile von Diesel- und Benzinfahrzeugen zu alternativ angetriebenen Fahrzeugen und, als ultima ratio, durch den Einsatz synthetischer Treibstoffe. Diese Effekte sind die Folge einer Reihe von Massnahmen, die in Kapitel 3 bzw. zusammenfassend in Tabelle 10

beschrieben sind. Hauptsächlich erhöhen die Massnahmen die Kosten der Nutzung fossiler Treibstoffe und schreiben den Importeuren von Fahrzeugen Quoten vor, die den Anteil von effizienten und alternativ angetriebenen Fahrzeugen in der Neufahrzeugflotte erhöhen.

Die Szenarien unterscheiden sich im Zieljahr für die Fossilfreiheit. Je früher das Ziel zu erreichen ist, desto rascher und stärker müssen die Massnahmen wirken. Allerdings braucht die Einführung neuer Massnahmen immer einige Jahre Zeit für den politischen Prozess. Auch kann nicht jede Massnahme beliebig früh und beliebig stark einsetzen. Zum Beispiel kann die globale Produktion von Batterien für Elektrofahrzeuge in den nächsten 5-10 Jahren nicht beliebig gesteigert werden, da zuerst die Produktionsanlagen projektiert und gebaut werden müssen, was mindestens 5 Jahre Zeit braucht. So lässt sich aufgrund der bekannten Pläne zum Bau von Batteriefabriken bereits heute sagen, dass im Jahr 2028 nicht mehr als 25 Mio. Elektro-PW produziert werden können (Benchmark Mineral Intelligence 2019). Bei einem globalen Markt von rund 100 Mio. PW in 2028 (BloombergNEF 2020) entspricht dies einem Anteil von 25% in der Neufahrzeugflotte. In der Modellvariante «Fossilfrei, Basis», die den Szenarien «Fossilfrei 2050» und den Varianten «PtL» und «Shift» von «Fossilfrei 2040» zugrunde liegt, gehen wir im Jahr 2028 von rund 35% BEV und in 2030 bereits von 47% BEV aus. So hohe Anteile sind nur möglich, weil die Kaufkraft in der Schweiz im internationalen Vergleich sehr hoch ist und weil durch die Reduktion der Fahrleistung auch die Anzahl Neufahrzeuge pro Jahr deutlich reduziert wird. In der Modellrechnung «Fossilfrei, MIV minimal» liegen die Anteile der BEV noch höher, weil hier die Fahrleistung und damit die Anzahl der Neufahrzeuge noch einmal reduziert wurden. Darum können in den Szenarien insbesondere die Maximalquoten für fossile Fahrzeuge nicht noch wesentlich rascher abgesenkt werden⁶. Die Kosten für fossile Treibstoffe hingegen können prinzipiell beliebig erhöht werden, was ab einer bestimmten Höhe aber praktisch nur noch Wirkung auf die Verkehrsnachfrage hat. Für den Zeitpunkt 2040 kann diese Massnahme, je nach Annahmen zur Verfügbarkeit und zum Preis von synthetischen Treibstoffen unterschiedliche Wirkungen zeigen, die in Varianten des Szenarios modelliert sind.

Der gesamte Energiebedarf des Verkehrs nimmt in allen «Fossilfrei»-Szenarien deutlich ab, was einerseits durch die Reduktion der Fahrleistungen und andererseits durch die effizientere Flotte bedingt ist. Der Effekt ist bis 2030 in allen Szenarien und Varianten ähnlich, da die Steuer- und die Reaktionsmöglichkeiten in dieser kurzen Zeit beschränkt sind und schon im Basisszenario weitestgehend ausgeschöpft werden. Tabelle 12 bis Tabelle 15 zeigen den Energiebedarf nach den relevanten Treibstoffkategorien.

⁶ bzw. nur in dem Umfang, in dem die Anzahl Neuzulassungen reduziert wird.

Tabelle 12: Energiebedarf fossil (inkl. Erdgas) – Vergleich der Szenarien

Szenario	2020	2030	2040	2050
Energiebedarf fossil, in PJ				
Referenz	190	156	116	84
Fossilfrei 2050 (Basisszenario)	189	109	40	0
Fossilfrei 2040, PtL	189	109	0	0
Fossilfrei 2040, Shift	189	109	0	0
Fossilfrei 2040, MIV minimal	189	110	0	0
Fossilfrei 2030, MIV minimal	189	0	0	0
Energiebedarf fossil, in % vgl. mit 2020 Referenz				
Referenz	100%	82%	61%	44%
Fossilfrei 2050 (Basisszenario)	99%	57%	21%	0%
Fossilfrei 2040, PtL	99%	57%	0%	0%
Fossilfrei 2040, Shift	99%	57%	0%	0%
Fossilfrei 2040, MIV minimal	99%	58%	0%	0%
Fossilfrei 2030, MIV minimal	99%	0%	0%	0%

Tabelle INFRAS.

- **Fossilfrei 2050:** Reduktion des fossilen Treibstoffverbrauchs um ca. 40% bis 2030 und um ca. 60% von 2030 bis 2040. Verdoppelung des direkten Strombedarfs bis 2030 und weitere Verdoppelung bis 2050. Nachfrage nach Wasserstoff steigt langsam bis 2050 auf etwa den doppelten Wert des Referenzszenarios. Relativ geringe Menge an PtL ab 2050.
- **Fossilfrei 2040, PtL:** Reduktion des fossilen Treibstoffverbrauchs um ca. 40% bis 2030 und auf null bis 2040. Verdoppelung des direkten Strombedarfs bis 2030 und weitere Verdoppelung bis 2050. Nachfrage nach Wasserstoff steigt langsam bis 2050 auf etwa den doppelten Wert des Referenzszenarios. Relativ viel PtL 2040, danach Abnahme bis 2050 um 75%.
- **Fossilfrei 2040, Shift:** Reduktion des fossilen Treibstoffverbrauchs um ca. 40% bis 2030 und auf null bis 2040. Verdoppelung des direkten Strombedarfs bis 2030 und weitere Verdoppelung bis 2040. Danach moderater Anstieg. Nachfrage nach Wasserstoff steigt langsam bis 2050 auf einen leicht höheren Wert als im Szenario «Fossilfrei 2040, PtL». Nachfrage nach PtL in 2040 bei ca. $\frac{2}{3}$ des Wertes vom Szenario «Fossilfrei 2040, PtL», danach Abnahme bis 2050 um 75%.
- **Fossilfrei 2040, MIV minimal:** Reduktion des fossilen Treibstoffverbrauchs um ca. 40% bis 2030 und auf null bis 2040. Verdoppelung des direkten Strombedarfs bis 2030 und weitere Verdoppelung bis 2040. Danach leichter Rückgang bis 2050. Nachfrage nach Wasserstoff steigt langsam bis 2050 auf knapp den doppelten Wert des Referenzszenarios. Nachfrage

nach PtL in 2040 ca. 5 PJ unter dem Wert vom Szenario «Fossilfrei 2040, Shift», danach Abnahme bis 2050 um 75%.

- **Fossilfrei 2030, MIV minimal:** Wie «Fossilfrei 2040, MIV minimal» aber Reduktion der fossilen Treibstoffe auf null im Jahr 2030 und dafür extrem viel PtL im Jahr 2030.

Tabelle 13: Strombedarf (direkt) – Vergleich der Szenarien

Szenario	2020	2030	2040	2050
Energiebedarf elektrisch, in PJ				
Referenz	14	17	26	36
Fossilfrei 2050 (Basisszenario)	12	25	45	53
Fossilfrei 2040, PtL	12	25	45	53
Fossilfrei 2040, Shift	12	25	50	54
Fossilfrei 2040, MIV minimal	12	25	48	47
Fossilfrei 2030, MIV minimal	12	25	48	47

Tabelle INFRAS.

Tabelle 14: Wasserstoffbedarf – Vergleich der Szenarien

Szenario	2020	2030	2040	2050
Energiebedarf Wasserstoff, in PJ				
Referenz	0.01	0.6	2.1	5.7
Fossilfrei 2050 (Basisszenario)	0.01	2.0	8.0	12.9
Fossilfrei 2040, PtL	0.01	2.0	8.0	12.9
Fossilfrei 2040, Shift	0.01	2.0	8.9	13.2
Fossilfrei 2040, MIV minimal	0.01	2.0	8.7	12.0
Fossilfrei 2030, MIV minimal	0.01	2.0	8.7	12.0

Tabelle INFRAS.

Tabelle 15: PtL-Bedarf – Vergleich der Szenarien

Szenario	2020	2030	2040	2050
Energiebedarf PtL, in PJ				
Referenz	0	0	0	0
Fossilfrei 2050 (Basisszenario)	0	0	0	10
Fossilfrei 2040, PtL	0	0	40	10
Fossilfrei 2040, Shift	0	0	28	7
Fossilfrei 2040, MIV minimal	0	0	23	6
Fossilfrei 2030, MIV minimal	0	110	23	6

Tabelle INFRAS.

Sobald das Ziel der Fossilfreiheit erreicht ist, verursacht der Verkehr auch keine direkten, anrechenbaren CO₂-Emissionen mehr. Die Emissionen aus der Verbrennung von Bio- und synthetischen Treibstoffen werden nicht gezählt, da das entsprechende CO₂ in junger Vergangenheit der Luft entzogen wurde (durch Photosynthese oder einen technischen Prozess). Tabelle 15 zeigt die anrechenbaren Emissionen in den Szenarien.

Tabelle 16: Treibhausgasemissionen – Vergleich der Szenarien

Szenario	2020	2030	2040	2050
Treibhausgasemissionen, in Mio. t CO₂				
Referenz	13.8	11.5	8.6	6.3
Fossilfrei 2050	13.7	8.0	3.0	0.0
Fossilfrei 2040, PtL	13.7	8.0	0.0	0.0
Fossilfrei 2040, Shift	13.7	8.0	0.0	0.0
Fossilfrei 2040, MIV minimal	13.7	8.1	0.0	0.0
Fossilfrei 2030, MIV minimal	13.7	0.0	0.0	0.0
Treibhausgasemissionen, in % vgl. mit 2020 Referenz				
Referenz	100%	83%	63%	46%
Fossilfrei 2050	99%	58%	22%	0%
Fossilfrei 2040, PtL	99%	58%	0%	0%
Fossilfrei 2040, Shift	99%	58%	0%	0%
Fossilfrei 2040, MIV minimal	99%	59%	0%	0%
Fossilfrei 2030, MIV minimal	99%	0%	0%	0%

Tabelle INFRAS.

Zusammenfassend kann man sagen, dass der Umbau der Fahrzeugflotte und die Energiebereitstellung für alle «Fossilfrei»-Szenarien jeweils eine grosse Herausforderung darstellt.

Der Entwicklungspfad der Flotten bedeutet, dass

- der Trend zu immer grösseren und schwereren Fahrzeugen in den nächsten Jahren gebrochen und umgedreht wird;
- die Anzahl Neufahrzeuge pro Jahr deutlich zurückgeht;
- die Anteile an effizienten Elektrofahrzeugen deutlich über den entsprechenden Anteilen an der globalen Fahrzeugproduktion liegen werden. Das bedeutet, dass es sich für die Fahrzeughersteller lohnen muss, die Schweiz prioritär mit alternativen Fahrzeugen zu beliefern.

Der direkte Strombedarf für die Elektrifizierung des Verkehrs wird in allen Szenarien (inkl. Referenz) stark steigen. Da aber bei einem ambitionierten Effizienz- und Suffizienzpfad damit gerechnet werden kann, dass in den anderen Sektoren der Strombedarf stabil bleibt oder sogar

zurückgeht, könnte die Bereitstellung von Strom aus erneuerbaren Quellen (v.a. Wasser und Solar) in allen Szenarien möglich sein. Eine Bedingung dazu ist aber, dass auch ein sehr ambitionierter Ausbaupfad vor allem bezüglich Photovoltaik verfolgt wird.

Durch die Einführung von Brennstoffzellenfahrzeugen, vor allem beim Schwerverkehr, entsteht in allen «Fossilfrei»-Szenarien eine ähnlich hohe Nachfrage nach Wasserstoff. Der Strombedarf, der durch die Wasserstoffproduktion ausgelöst wird, liegt 2050 in der Grössenordnung von 20 PJ oder fast 40% des direkten Strombedarfs der Mobilität in der Schweiz. Im Referenzszenario liegt der Wasserstoffverbrauch 2050 bei weniger als der Hälfte dessen in den «Fossilfrei»-Szenarien. Bei der angenommenen Produktionssteigerung von erneuerbarem Strom könnte die Wasserstoffproduktion aber in allen Szenarien mit inländischem Strom gedeckt werden. Allerdings wäre eine saisonale Speicherung dazu nötig. Möglicherweise wäre es effizienter, auf diese Speicherung zu verzichten und im Winter etwas Strom zu importieren.

Die Menge an PtL, die benötigt würde um 2030 den Schweizer Landverkehr fossilfrei zu machen, wird mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit nicht verfügbar sein. Hingegen ist es vorstellbar, dass die 2040 benötigte Menge (zu einem relativ hohen Preis) importiert werden könnte. Da aber auch dazu eine beträchtliche Unsicherheit besteht, sollte zum Erreichen von fossilfreiem Verkehr 2040 nicht auf die Szenarienvariante «PtL» gesetzt werden, sondern eher auf eine der anderen Varianten, die deutlich weniger PtL erfordern würden. Im Zeithorizont 2050 darf erwartet werden, dass die benötigte PtL-Menge zur vollständigen Deckung der verbleibenden Nachfrage nach flüssigen Kohlenwasserstoffen aus dem Schweizer Landverkehr am globalen Markt verfügbar sein wird.

5.2. Gesamtbeurteilung

Die folgende Tabelle zeigt eine zusammenfassende Gesamtbeurteilung der analysierten Szenarien entlang eines Kriteriensets aus Sicht der Autoren. Die Beurteilung basiert einerseits auf den quantitativen Ergebnissen der vorliegenden Studie (v.a. für die ersten vier Wirkungskriterien), andererseits auf einer Experteneinschätzung für weitere Kriterien, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht explizit vertieft wurden (v.a. Kosten, Infrastrukturbedarf).

Tabelle 17: Gesamtbeurteilung der Szenarien (kriterienbasiert)

Kriterien	Szenarien				
	Fossilfrei 2050	Fossilfrei 2040, PtL Strategie	Fossilfrei 2040, Shift	Fossilfrei 2040, MIV minimal	Fossilfrei 2030, MIV minimal
Zielerreichung: Fossilfreie Mobilität	Fast erreichbar ohne PtL.	Erreichbar mit erheblichen Mengen PtL (ca. 40 PJ).	Erreichbar mit Extra-Shift zu BEV und PtL (28 PJ).	Erreichbar mit massiver Nachfragereduktion und PtL (23 PJ).	Erreichbar nur mit massiver Nachfragereduktion und extrem viel PtL (110 PJ).
Weitere Umweltwirkungen					
Luft	++	++	++	++	++
Lärm	+	+	+(+)	++	++
Fläche	+	+	+	++	++
Strombedarf (direkt)	2050 max. 10% höher als in Referenz; in allen Szenarien ist ein sehr ambitionierter Ausbau der erneuerbaren Produktion (v.a. PV & Wind) in der Schweiz nötig, um trotz Stilllegung KKW den Bedarf zu decken.				
Infrastrukturbedarf*	Tank- und Ladeinfrastruktur für alle ähnlich; Parkplätze weniger für Szenario «MIV minimal», Stromproduktionsinfrastruktur (PV) wächst stark. Bedarf ÖV-Infrastruktur steigt in allen Szenarien stark. Dafür sinkt Bedarf Strasseninfrastruktur, v.a. bei «MIV minimal».				
Kosten*					
Betriebswirtschaftl. Kosten	Mittel, gewisse Verteuerung der Mobilität, bis 2030.	Hoch (PtL, Verteuerung fossiler Treibstoffe).	Hoch, Verteuerung fossiler Treibstoffe.	Hoch, starke Verteuerung der Mobilität.	Sehr hoch (PtL, rascher Flottenumbau, Verteuerung Mobilität).
Volkswirtschaftliche Kosten (externe Kosten, Infrastrukturkosten)	Reduktion externer Kosten; erhebliche Investitionen in FVV & ÖV, dafür MIV-Investitionen geringer.	erhebliche Reduktion externer Kosten; hohe Investitionen in PtL.	erhebliche Reduktion externer Kosten; substantielle Investitionen in PtL- & BEV-Infrastruktur.	grosse Reduktion externer Kosten; sehr hohe Investitionen in FVV und v.a. ÖV.	starke Reduktion externer Kosten; sehr hohe Investitionen in FVV und v.a. ÖV nötig sowie in PtL- & BEV-Förderung.

Tabelle INFRAS. * Experteneinschätzungen ohne vertiefte Analyse in der vorliegenden Studie.

Grundsätzlich ist die Zielerreichung eines fossilfreien Verkehrs mit den Szenarien unter den gegebenen Rahmenbedingungen möglich. Kritisch und unterschiedlich sind die Szenarien dagegen insbesondere bei der Umsetzbarkeit. Aufgrund der sehr grossen Eingriffstiefe der notwendigen Massnahmen bezüglich Verkehrsnachfrage einerseits und Flotten- bzw. Technologie-

entwicklung andererseits ist die Umsetzbarkeit aller Szenarien zumindest ehrgeizig – beim Szenario 2030 kaum gegeben.

Im Einzelnen lassen sich die betrachteten Szenarien folgendermassen beurteilen:

- **Fossilfrei 2050 (Basisszenario):** Dieses Szenario schneidet bzgl. Umsetzbarkeit klar am besten ab. Ein Vorteil dieses Szenarios ist zudem, dass mit den beiden Schwerpunkten Elektrifizierung und Verkehrsnachfrage praktisch Fossilfreiheit erreicht werden kann. Zur Deckung des Strombedarfs ist ein ambitionierter Ausbau der erneuerbaren Stromquellen im Inland (insbesondere on PV) notwendig. PtL ist nur in geringem Ausmass notwendig, sodass nicht in ein weiteres System investiert werden muss.
- **Fossilfrei 2040:** Fossilfreiheit im Verkehr bis 2040 ist technisch umsetzbar, bedarf aber massiver und rasch wirkender zusätzlicher Anstrengungen. Die PtL-Strategie ist technisch grundsätzlich machbar – erfordert aber einen raschen, maximalen und teuren Ausbau eines PtL-Produktionssystems inkl. erneuerbarer Energieproduktion im Ausland. Die benötigte PtL-Menge vollständig in der Schweiz zu produzieren ist keine Option, da nicht genügend erneuerbare Energie dafür bereitgestellt werden könnte. Bei dieser Strategie besteht das Risiko, dass die im Landverkehr genutzten PtL dann dafür im Luftverkehr nicht zur Verfügung stehen würden, was die Wirkung insgesamt zunichtemachen würde. Eine aggressive PtL-Strategie birgt auch die Gefahr, dass die umfassende Umstellung auf Elektroantriebe verzögert wird, weil in einer Übergangszeit noch länger auf Verbrennungsmotoren gesetzt wird⁷. Damit würde die Energieeffizienz des Verkehrs schlechter statt besser. Zusätzlich müssten bei allen Subszensarien 2040 die fossilen Treibstoffe bzw. der auf Kohlenwasserstoffen basierende Teil des Gesamtverkehrs (bei MIV minimal) massiv verteuert werden, damit sie bis 2040 durch fossilfreie Energieträger ersetzt werden.
- **Fossilfrei 2030:** Dieses Szenario ist kaum umsetzbar: Innert kürzester Zeit müsste sowohl der Technologie-Shift in maximal möglichem Tempo umgesetzt werden, und zudem die Verkehrsnachfrage massiv sinken. So müsste die Nachfrage beim ÖV sowie Fuss- und Veloverkehr innerhalb von 10 Jahren um mehr als den Faktor 2 steigen, um den sonst verbleibenden, fossil betriebenen MIV zu übernehmen. Diese Kapazitäten können v.a. im ÖV in dieser kurzen Zeit infrastrukturell nicht bereitgestellt werden. Ebenfalls ist es weder möglich, dass bis 2030 diese Mengen an strombetriebenen Fahrzeugen im Markt sind, noch wird die benötigte hohe PtL-Menge verfügbar sein – beides vor allem aufgrund kurzfristig noch beschränkter Produktionskapazitäten.

⁷ Dies ist vor allem dann der Fall, wenn bei den CO₂-Flottengrenzwerten PtX angerechnet werden kann (wie das im von den Eidgenössischen Räten beschlossenen revidierten CO₂-Gesetz vorgesehen ist).

5.3. Massnahmen: Übersicht und Konkretisierung

Im Rahmen der Auswahl der Szenarien wurden Massnahmen definiert, die den einzelnen Szenarien hinterlegt sind. In der Modellierung und Wirkungsanalyse wurden die verkehrlichen, energetischen und treibhausgasrelevanten Wirkungen der Szenarien ermittelt. Dabei konnten auch Erkenntnisse gewonnen werden, welche Massnahmen wie relevant zur Zielerreichung sind.

Im Sinne einer Synthese zuhanden der weiteren politischen Umsetzung werden im vorliegenden Kapitel für die drei Zeithorizonte 2050, 2040 und 2030 die Massnahmen aufgelistet, die gemäss vorliegender Studie zur Erreichung eines fossilfreien Verkehrs notwendig sind (zwingend, oder aber als unterstützende Massnahmen). Dabei werden die einzelnen Massnahmen weiter konkretisiert (Vorschläge zur Ausgestaltung, Umsetzungsinstrumente). Ebenfalls wird je Massnahme eine grobe Einschätzung der Wirkung vorgenommen, v.a. qualitativ, teilweise falls möglich auch quantitativ. Eine genaue Quantifizierung der Wirkung aller Einzelmassnahmen war im vorliegenden Projekt nicht vorgesehen. Der Fokus liegt auf der Quantifizierung der Wirkung von Szenarien mit ganzen Massnahmen-Sets.

Fossilfrei 2050

Um das Ziel eines fossilfreien Verkehrs in der Schweiz bis 2050 effizient zu erreichen, sind gemäss den Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit eine Reihe von Massnahmen notwendig, die in den folgenden beiden Tabellen dargestellt sind. Wichtig: Es reicht nicht nur, einen Teil der Massnahmen umzusetzen. Es sind alle – zumindest die als zwingend bezeichneten Massnahmen – zu realisieren. Eine detaillierte Priorisierung der Massnahmen wurden deshalb nicht vorgenommen. Es ist aber gekennzeichnet, welche Massnahmen wir – auf Basis der Ergebnisse der vorliegenden Analyse – als zwingend erachten, und welche unterstützend für die Zielerreichung wichtig sind. Die Massnahmen werden entsprechend ihrer primären Wirkung separat dargestellt: A) Fokus auf technologische Wirkung (Flottenmix) und B) Fokus auf die Verkehrsnachfrage.

A. Technologie/Flottenmix

Die folgende Tabelle zeigt die Massnahmen, die primär auf die Technologie/Flottenmix wirken.

A. Technologie /Flottenmix: Massnahmen mit Hauptziel Beeinflussung der Technologie/Flottenmix			
Massnahme	Konkretisierung (Umsetzungsvorschläge, Instrumente)	Wirkungs- mechanismus	Wirkungs- höhe &-zeit
Zwingende Massnahmen			
CO ₂ -Flottengrenzwerte (für Neuwagenflotte PW, LNF, SNF) gemäss CO ₂ -Gesetz (Stand Sept. 2020)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Absenkpfad Grenzwerte gemäss revidiertem CO₂-Gesetz (Stand Sept. 2020) für PW, LNF und SNF (vgl. Abbildung 42) ▪ wirksam v.a. kurzfristig bis 2025, danach rückt untenstehende Massnahme in den Vordergrund 	Effizienzsteigerung Verbrenner, Erhöhung Anteile alternative Antriebe bei Neufahrzeugen	Hoch: ca. 1%/Jahr bis 2025 wirkt schon kurzfristig
Quoten für den Verkauf von Neufahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (PW, LNF, SNF) <i>oder</i> Verschärfung der CO ₂ -Flottengrenzwerte	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Maximalquoten für Anteil Verbrennungsmotoren (vgl. Kap. 3.2): <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gesetzlich definierter Absenkpfad ▪ Freiwillige Branchenvereinbarungen ▪ Verbot des Verkaufs von Verbrennungsmotoren und Plug-in-Hybride ab 2040 (reine Verbrenner schon früher) ▪ Absenkung der CO₂-Emission der Neufahrzeugflotte (PW) gemäss Abbildung 42 ▪ LNF/SNF analog PW 		Hoch: ca. 4% pro Jahr ab 2025 bis 2040, danach schwächer
Fossile Treibstoffe finanziell belasten/verteuern	z.B. CO ₂ -Abgabe, oder bei SNF auch LSVA inkl. CO ₂ -Aufschlag/CO ₂ -Differenzierung Vertiefung siehe unten, Tabelle Verkehrsnachfrage (Erhöhung der variablen Kosten für fossilen Verkehr) unterstützt obige Massnahmen.	Shift Fahrleistung von fossil nach alternativ	Mittel: wirkt v.a. zusammen mit obigen Massnahmen
Quoten für die Anschaffung von ÖV-Bussen mit Verbrennungsmotoren	<p>Massnahme ist v.a. auch wichtig im Sinne der Vorreiterrolle/Vorbild öffentl. Hand.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Vorgaben der öffentlichen Hand für die Beschaffung von Bussen ▪ Vorgaben der öffentlichen Hand bei der Ausschreibung von Angeboten im Regionalverkehr 	Erhöhung Anteile alternative Antriebe bei Neufahrzeugen	Gering: (max. 0.05% pro Jahr) Wirkung aber relativ zeitnah
Fördern von Car-Sharing mit fossilfreien Fahrzeugen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vorgaben der öffentl. Hand zur Elektrifizierung der Flotten von Sharing-Anbietern im Rahmen der Bereitstellung von Parkplätzen/Stellflächen für Sharing oder Erteilung von Konzessionen. 	Erhöht durchschnittliche Fahrleistung pro fossilfreien PW	Kurzfristig (2030) mittel; längerfristig weniger relevant

A. Technologie /Flottenmix: Massnahmen mit Hauptziel Beeinflussung der Technologie/Flottenmix			
Massnahme	Konkretisierung (Umsetzungsvorschläge, Instrumente)	Wirkungs- mechanismus	Wirkungs- höhe &-zeit
Unterstützende Massnahmen			
Verkauf von grossen/verbrauchsstarken Fahrzeugen nur mit Bedarfsnachweis erlaubt (Ziel: Verringerung von mittlerem Gewicht und Leistung der Fahrzeugflotte)	Massnahme nicht zwingend, wenn Flottengrenzwert streng genug ist (und der aktuelle Gewichtsbonus entfällt). Ausgestaltung: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kontinuierlicher Absenkpfad des maximal zulässigen Gewichts und/oder Leistung je Fahrzeugklasse (v.a. für PW). Oberhalb dieser Limits sind Bedarfsnachweise notwendig (für spezielle Anwendungsformen oder Räume wie Berggebiete) ▪ Alternativ: Einführung strikter Gewichts- und Leistungslimits (Flottengrenzwert) 	Effizienzsteigerung Verbrenner	Gering (<0.1% pro Jahr)
Bereitstellen von E-Ladestationen*	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vorgaben für die Bereitstellung von Ladeinfrastrukturen (zur Sicherstellung Zugang Ladestationen für Mieter) ▪ Ausrüstung von Parkplätzen mit Ladeinfrastrukturen (v.a. Parkhäuser, öffentlich zugängliche Parkplätze) ▪ Ausrüstung von Autobahnen mit E-Ladeinfrastrukturen (z.B. über Ausschreibungen) 	Hilft E-Mobil- teile an Neufahr- zeugflotte rasch zu erhöhen	Unterstüt- zend zu obi- gen Massn. Unklar wie stark es Ver- breitung der E-Fz. erhöht (auch viele andere Fak- toren)

Wirkungshöhe bezieht sich auf die Reduktion fossiler Treibstoffe in Bezug auf den gesamten Bedarf im Verkehrssektor.

* Die Kosten für die Errichtung und Nutzung der Ladeinfrastrukturen sollen dabei von den Nutzern getragen werden.

Tabelle INFRAS.

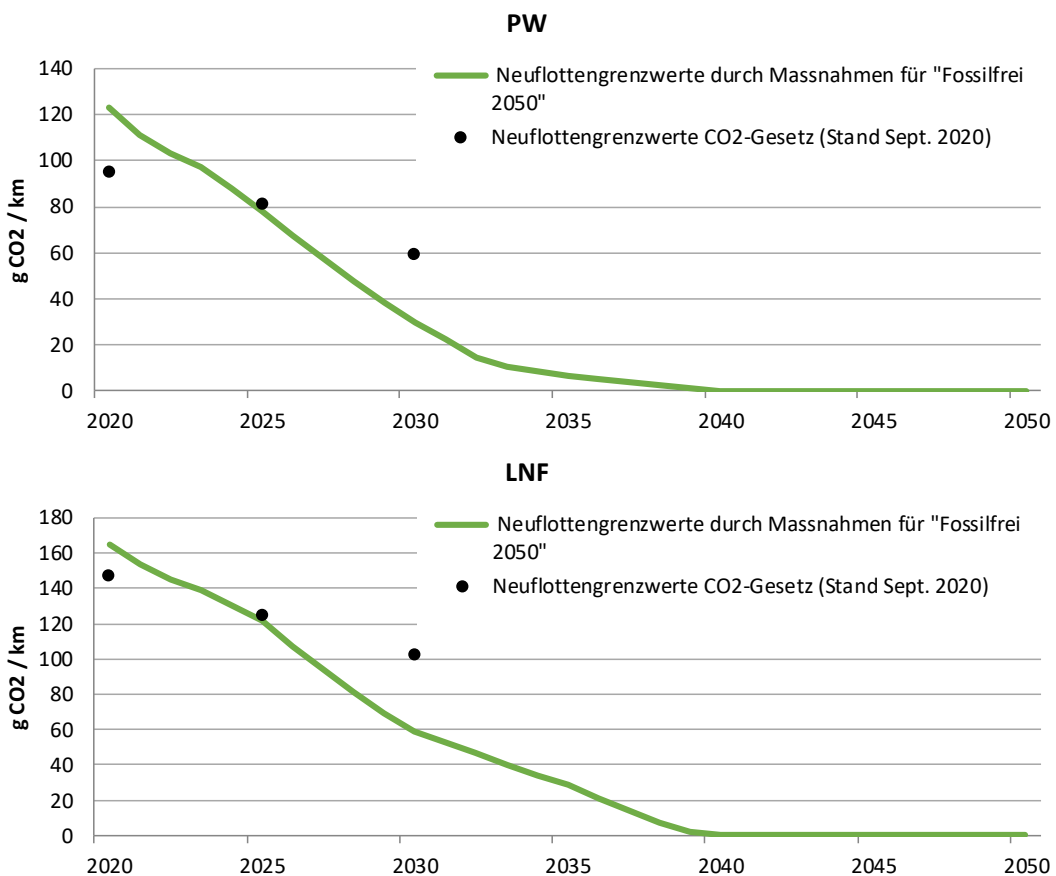
Da Personenwagen für rund $\frac{3}{4}$ des Energiebedarfs im Verkehrssektor verantwortlich sind, sind die Massnahmen bei diesen Fahrzeugen quantitativ am wichtigsten. Es ist aber auch ohne zusätzliche Massnahmen zu erwarten, dass sich bei den PW und den LNF in den nächsten 10 bis 30 Jahren der Trend zu Elektrofahrzeugen noch deutlich verstärken wird. Darum sind speziell auch Massnahmen wichtig, die auf eine Umstellung der SNF-Flotte zielen, die im Referenzfall nur sehr langsam und in einem geringen Ausmass vonstattengehen dürfte.

Mit dem Zeithorizont 2050 für fossilfreien Verkehr reichen Massnahmen, die auf Neuzulassungen wirken. Damit wird jedes Jahr nur weniger als 10% der bestehenden Flotte verändert. Darum wird, selbst bei massiven Verbesserungen bei der Neufahrzeugflotte, der Verbrauch der gesamten Flotte nur langsam sinken.

Abbildung 42 zeigt die Wirkung der für «Fossilfrei 2050» angesetzten Massnahmen (Quoten, Effizienzmassnahmen) bei PW und LNF auf die Entwicklung der CO₂-Emission der Neufahrzeugflotten. Im Rückkehrschluss lässt sich folgern, dass für dieses Szenario auch Flottengrenzwerte

gemäss der grünen Kurve vorgegeben werden könnten. Voraussetzung wäre dann aber, dass diese Ziele tatsächlich im Durchschnitt der gesamten Neuflotte⁸ eingehalten werden. Ein Durchsetzungsinstrument könnten Sanktionen sein, wenn diese genügend hoch und entsprechend wirksam sind. Auch wäre in dem Fall wichtig, dass die Anrechenbarkeit von PtL-Treibstoffen sowie der «Gewichts-Bonus» bei der CO₂-Berechnung abgeschafft würden, da diese beiden Punkte den Wechsel zu Elektromobilität und die Effizienzsteigerung bei den Verbrennungsmotorfahrzeugen verlangsamen.

Abbildung 42: Nötige Absenkung der Flottengrenzwerte im Vergleich zu Vorgabe CO₂-Gesetz (Stand 2020) für PW (oben) und LNF (unten)



Grüne Linie: Absenkpfad unter Berücksichtigung der Reduktion von Fahrleistungen im MIV gem. Szenario «Fossilfrei 2050»

Grafik INFRAS.

B. Verkehrsnachfrage

Die folgende Tabelle zeigt die Massnahmen, die primär die Verkehrsnachfrage beeinflussen.

⁸ Ohne Übergangsfristen, in denen der schlechteste Teil der Flotte nicht und BEV mehrfach gezählt werden.

B. Verkehrsnachfrage: Massnahmen mit Hauptziel Beeinflussung der Verkehrsnachfrage			
Massnahme	Konkretisierung (Umsetzungsvorschläge, Instrumente)	Wirkungshöhe	Zeitliche Umsetzung
Zwingende Massnahmen			
Erhöhung der (variablen) Kosten für den fossilen Verkehr	<p>Zentrale Push-Massnahme:</p> <ul style="list-style-type: none"> CO₂-Lenkungsabgabe: im Vordergrund steht eine CO₂-Lenkungsabgabe im Umfang von mind. 400 CHF/t CO₂ (bzw. ca. 1 CHF/l Treibstoff) <p>Alternative:</p> <ul style="list-style-type: none"> fahrleistungsabhängige Abgabe (Mobility Pricing) mit ökologischer Ausgestaltung (CO₂-differenziert) für PW und Lieferwagen (LNF) beim Güterverkehr auch LSVA mit Berücksichtigung der CO₂-Emissionen 	<p>Hoch</p> <p>Breite Reduktion der Nachfrage im MIV (fossil) von mind. 5-10% (im Freizeitverkehr höher)</p>	<p>Kurzfristig/ so rasch wie möglich (z.B. ab 2024/25)</p>
Umfassende Förderung Fuss- und Veloverkehr	<ul style="list-style-type: none"> Infrastrukturausbau für Fuss- und Veloverkehr in Städten & Agglomerationen: z.B. Veloschnellverbindungen, Begegnungszonen etc. mehr Finanzmittel (z.B. Agglomerationsprogramme), mehr Raum, höhere Priorität in der Planung (Planungsvorgaben) 	<p>Hoch</p> <p>Verlagerungspotenzial von kurzen MIV-Fahrten (und ÖV) hoch bis -15-25% MIV-Fahrten (<2-3km) (bei pkm weniger)</p>	<p>Kurzfristig/ ab sofort</p> <p>Wirkung erfolgt rasch</p>
Förderung ÖV	<ul style="list-style-type: none"> Angebotsausbau im ÖV in Städten und v.a. Agglomerationen (Ziel: Angebotsdichte in Agglos wie heute in Städten); dichtere und feinmaschigere Angebote bedingt mehr Finanzmittel Infrastrukturausbauten im Personenverkehr (z.B. Stadtbahnen) und Güterverkehr (z.B. Terminals, Anschlussgleise) – wenn Massnahmen zur zeitlichen Verlagerung der Nachfrage (Brechen der Spitzen) nicht ausreichen. Flexibilisierung der Angebote (z.B. mehr «on demand»), an Schnittstelle zum MIV (→ ÖIV) Finanzielle Förderung des Schienengüterverkehrs (weiterführen, verstärken) Punktueller Verbilligung ÖV (z.B. Jugendliche) 	<p>Hoch</p> <p>Zwar ist der ÖV bereits auf s. hohem Niveau in & zw. den Städten. Im weiteren Agglo-Raum gibt es aber viel Verlagerungspotenzial. Zunahme ÖV (PV) bis +2% pro Jahr bzw. +60-80% bis 2050</p>	<p>Kurzfristig/ ab sofort</p> <p>Angebotsausbauten wirken bereits innerhalb weniger Jahre; umfassende Wirkung erfolgt wohl erst ab 2030, wenn Infrastrukturen ausgebaut.</p>
Einschränkungen im MIV (Reduktion Flächen, rigidere Parkplatz-Politik)	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der MIV-Infrastruktur und Verringerung der Investitionsmengen für Strasse V.a. in Städten & Agglomerationen: Reduktion und Umwidmung von Flächen vom MIV zum Fuss- & Veloverkehr sowie zu Frei- und Grünräumen Parkplatz-Politik: Reduktion Anzahl Parkplätze (v.a. in Städten & Agglos), z.T. höhere Bepreisung (flächig) Beseitigung von Fehlanreizen im Steuersystem, z.B. Abschaffung Pendlerabzug 	<p>Mittel</p> <p>Ergänzend/flankierend zu obigen Massnahmen. Wirkung Einzelmassnahme nicht quantifizierbar.</p>	<p>Mittelfristig</p> <p>Parkplatzbewirtschaftung wirkt kurzfristig, Infrastruktur wirkt mittel-/langfr.</p>

B. Verkehrsnachfrage: Massnahmen mit Hauptziel Beeinflussung der Verkehrsnachfrage			
Massnahme	Konkretisierung (Umsetzungsvorschläge, Instrumente)	Wirkungshöhe	Zeitliche Umsetzung
Unterstützende Massnahmen			
Raumplanerische Massnahmen für eine Siedlungsentwicklung nach innen (Verkehr & Raum abgestimmt)	Ist eine zentrale und notwendige Rahmenbedingung, weniger eine eigene Massnahme. Beispiele konkreter Elemente: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verkehrsintensive Einrichtungen: Striktere Auflagen für Standortwahl (z.B. bzgl. Erschliessung ÖV), rigideres Parkplatz-Management (# Parkplätze, Bepreisung) ▪ Förderung von autofreien Siedlungen in Städten & Agglomerationen (Anreize & Regelungen in Bauordnungen, Gestaltungsplänen) 	Hoch Wirkung Einzelmassnahme nicht quantifizierbar. Unterstützt und fördert aber die Wirkungen der obigen Massnahmen	Mittelfristig Umsetzung kann/soll rasch erfolgen. Wirkung tritt aber verzögert ein.
Ausbau bzw. Förderung von Sharing- und Pooling-Angeboten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduzierte Parkplatztarife für Pooling-/ Sharing-Angebote ▪ Bereitstellung von Stellflächen für Parkplätze (Sharing, Pooling) ▪ Bestellung von Sharing-Angeboten durch öffentliche Hand (z.B. an multimodalen Hubs, ggf. mittels Konzessionierung) ▪ Förderung fossilfreier, multimodaler Angebote 	Mittel Wirkung Sharing erheblich, da Auto- besitz verringert (→ Modalshift). Wirkung Pooling geringer. Unterstützend für obige Massnahm., MIV-Abnahme im Bereich 5%-10%	Kurzfristig umsetzbar Wirkung tritt rasch ein
Weitere Massnahmen im Freizeit- und Einkaufsverkehr (verringern & verlagern)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Förderung von ÖV-, Fuss- und Veloverkehr- und Sharing-Angeboten bei Freizeit- und Einkaufsinfrastrukturen (z.B. ÖV-Kombiangebote, Lieferdienste, Gepäcktransporte) ▪ Förderung von effizienter, klimaschonender City-Logistik ▪ Massnahmen für verkehrsintensive Einrichtungen (VE): siehe oben. 	Mittel Theoret. Potenziale hoch, umsetzbar etwas reduziert. Reduktion Fahrten MIV: Freizeit ca. -1/3 Einkauf bis -20%	Kurz-/mittelfristig Wirkung tritt grösstenteils erst mittelfristig ein
Weitere Massnahmen im Arbeits- und Ausbildungsverkehr (verringern & verlagern)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bereitstellung von Shared Working Spaces (Unterstützung öffentliche Hand) ▪ Sensibilisierung bei Unternehmen und Branchen für Homeoffice ▪ Verringerung der Präsenzzeiten in höheren Schulen; parallel Förderung neuer Lernangebote (e-Learning) 	Mittel Gemäss Studien ist zusätzl. Potenzial bei Homeoffice bis -10% der Fahrten (MIV & ÖV) Schulen: ca. -10% (v.a. ÖV & FVV)	Mittelfristig Wirkung tritt schrittweise ein
Erhöhung der (variablen) Kosten für den gesamten motorisierten Verkehr	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Internalisierung externer Kosten, z.B. in einem Mobility Pricing bzw. einer fahrleistungsabhängigen Abgabe (km-Abgabe) ▪ Parkplatztarife (Erhöhung, evtl. Differenzierung) 	Mittel-hoch (je nach Ausmass) Abhängig von Erhöhung der Kosten	Umsetzung eher erst mittel- bis langfristig (ausser Parkplatztarife)

Tabelle INFRAS.

Fossilfrei 2040

Für die Erreichung eines Fossilfreien Verkehrs bis 2040 sind sämtliche oben für 2050 aufgeführten Massnahmen umzusetzen. Zudem sind zusätzlich eine Reihe von weitergehenden Massnahmen notwendig, insbesondere um die Nutzung fossiler Treibstoffe im Strassenverkehr maximal und rasch zu reduzieren – durch einen nochmals deutlich verstärkten Shift hin zu alternativen Antrieben (v.a. batterieelektrische Fahrzeuge) sowie den umfassenden Einsatz von PtL.

Technologie/Flottenmix und Verkehrsnachfrage			
Massnahme	Konkretisierung (Umsetzungsvorschläge, Instrumente)	Wirkungsmechanismus	Wirkungshöhe &-zeit
Zwingende Massnahmen			
Sämtliche für Fossilfrei 2050 notwendigen Massnahmen (vgl. oben), zudem:			
(Weitere) starke Verteuerung der Nutzung fossiler Treibstoffe bis 2040 (sodass diese bis 2040 teurer sind als PtL)	Umsetzungsmöglichkeiten: <ul style="list-style-type: none"> Starke Erhöhung einer CO₂-Abgabe auf fossile Treibstoffe: auf ca. 750 CHF/t CO₂ (bzw. ca. 2 CHF/l) damit Benzin/Diesel teurer als PtL Alternative: Nutzungsverbot für fossile Treibstoffe (oder: Importverbot) 	Verteuert Treibstoffe für MIV, ÖV und GV und führt zur Substitution von fossil durch PtX	Hohe Wirkung sobald PtX günstiger wird als fossile.
Umfassender Einsatz von PtL: starke Förderung von PtL (Import, Produktion) → PtL-Strategie	<ul style="list-style-type: none"> Import von PtL in grossen Mengen⁹ (auch mittels Finanzierung ausländ. Produktion) Achtung: Förderung reduziert PtL-Preis und schwächt die Verkehrsnachfragereduktion 	Sichert genügend PtX-Treibstoffe für die Substitution von fossilen Treibstoffen	Abhängig von übrigen Massnahmen. Massnahme allein hätte fast keine Wirkung
Unterstützende Massnahmen			
Verteuerung der Nutzung von PtL und PtG in PW und LNF (nicht aber für LKW) <i>oder</i> Fahrverbot für konventionelle PW und LNF ab 2040	<ul style="list-style-type: none"> Differenzierung der PtX-Preise für leichte und schwere Fahrzeuge Fahrverbot für konventionelle PW und LNF (damit PtL für LKW genutzt werden kann) Als Vorstufe: lokale Fahrverbote für konventionelle (Verbrenner) PW und LNF (und LKW) in Städten oder anderen sensiblen Gebieten (Low-Emission-Zones) Nötig, wenn 2040 nicht genügend PtL vorhanden ist 	Reduziert Nachfrage nach PtL und sichert Verfügbarkeit beim Schwerverkehr	Hohe Wirkung, reduziert PtL-Bedarf um 33%

⁹ Im Inland steht zu wenig erneuerbarer Strom zur Verfügung für signifikante Inlandproduktion.

Technologie/Flottenmix und Verkehrsnachfrage			
Massnahme	Konkretisierung (Umsetzungsvorschläge, Instrumente)	Wirkungs- mechanismus	Wirkungs- höhe &-zeit
Deutliche (weitergehende) Erhöhung der Kosten für den fossilen Verkehr sowie den MIV generell bis 2040	Erhöhung der variablen Kosten des MIV, um weitere Reduktion der Fahrleistung durch modale Verlagerung und Nachfragereduktion zu erreichen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Höhere Verkehrsabgaben für MIV, z.B. Mobility Pricing inkl. Internalisierung ext. Kosten ▪ Starke Erhöhung CO₂-Abgabe (siehe oben) – evtl. auch gekoppelt mit Mobility Pricing 	Weitere Verringerung MIV-Fahrten (Vermeidung & Verkürzung d. Fahrten) und Verlagerung auf Fuss-, Veloverkehr & ÖV	Hoch Reduktion MIV-Nachfrage (inkl. weiteren Mn) um bis -20-30%
Zusätzlicher massiver Ausbau des Angebots im Fuss-, Veloverkehr und ÖV	analog zu fossilfrei 2050, aber noch früher und noch umfassender: <ul style="list-style-type: none"> ▪ mehr finanzielle Mittel für Fuss- und Veloverkehrsinfrastrukturen sowie ÖV (v.a. in Agglomerationen) ▪ Priorität von Fuss- & Veloverkehr in Bezug auf Flächenallokation in dichten Räumen 	Unterstützt modale Verlagerung des MIV auf ÖV (v.a. längere Fahrten) und FVV (v.a. kurze Fahrten)	Hoch: Erhöhung ÖV- und FVV-Nachfrage bis 2040 um bis zu 50%.

Tabelle INFRAS.

Fossilfrei 2030

Einen fossilfreien Verkehr bis 2030 zu erreichen ist nur mit massiven Massnahmen möglich. Nebst den bereits für einen fossilfreien Verkehr 2050 und 2040 notwendigen Massnahmen sind kurzfristig sehr substanzielle Massnahmen notwendig. Faktisch muss die Nutzung fossiler Treibstoffe bis 2030 verboten werden – oder kurzfristig maximal verteuert. Dargestellt sind in der Tabelle die absolut zwingenden, zusätzlichen Massnahmen. Dazu kommen alle oben bei 2050 und 2040 erwähnten unterstützenden Massnahmen.

Technologie/Flottenmix und Verkehrsnachfrage			
Massnahme	Konkretisierung (Umsetzungsvorschläge, Instrumente)	Wirkungs- mechanismus	Wirkungs- höhe &-zeit
Zwingende Massnahmen			
Sämtliche für Fossilfrei 2040 notwendigen Massnahmen (vgl. oben), zudem:			
Vermeidung der Nutzung fossiler Treibstoffe bereits 2030 (analog 2040)	Umsetzungsmöglichkeiten bis 2030: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nutzungsverbot für fossile Treibstoffe 	Verteuert Treibstoffe für MIV, ÖV und GV und führt zur Substitution von Fossilien durch PtX	Hohe Wirkung sobald PtX günstiger wird als Fossile.

Technologie/Flottenmix und Verkehrsnachfrage			
Massnahme	Konkretisierung (Umsetzungsvorschläge, Instrumente)	Wirkungs- mechanismus	Wirkungs- höhe &-zeit
Massiver, sehr rascher Einsatz von PtL in grossen Mengen: → dringliche PtL-Strategie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Massive Förderung von Produktion von PtL im Ausland ▪ Achtung: Förderung reduziert PtL-Preis und schwächt die Verkehrsnachfragereduktion 	Sichert genügend PtX Treibstoffe für die Substitution von fossilen Treibstoffen	Massnahme ermöglicht raschen PtX-Einsatz, wirkt aber nur mit übrigen (obiger) Massn.
Rasche Bereitstellung der E-Fahrzeuge für Flottenumbau	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Starke, kurzfristige Förderung von E-Fahrzeugen (evtl. auch mit Förderbeiträgen, Erleichterung des Imports etc.) 	Rascher Shift im Flottenmix auf E-Fahrzeuge	Mittel, abhängig von Verfügbarkeit E-Fz.
Sehr starke Erhöhung der Kosten für den fossilen Verkehr sowie generell den MIV bis 2030	<p>Maximale und rasche Erhöhung der variablen Kosten des MIV, um weitere Reduktion der Fahrleistung durch modale Verlagerung und Nachfragereduktion zu erreichen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ höhere Verkehrsabgaben für den MIV, z.B. kurzfristig deutliche Erhöhung der Mineralölsteuer, Motorfahrzeugsteuern. Mittelfristig (ab ca. 2030) auch mittels Mobility Pricing inkl. Internalisierung externer Kosten. ▪ sehr starke Erhöhung einer CO₂-Abgabe, evtl. auch gekoppelt mit Mobility Pricing 	Rasche zusätzl. Verringerung MIV-Fahrten (Vermeidung & Verkürzung d. Fahrten) und Verlagerung auf Fuss-, Veloverkehr & ÖV	Hoch; allerdings erhöht sich Wirkung mit der Zeit. Reduktion MIV-Nachfrage (inkl. anderen Mn) um bis -10-20%
Massiver, kurzfristiger Ausbau des Angebots im Fuss-, Veloverkehr und ÖV	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Viel mehr finanzielle Mittel für Fuss- und Veloverkehrsinfrastrukturen sowie ÖV (v.a. in Agglomerationen) ▪ Priorität von Fuss- & Veloverkehr in Bezug auf Flächenallokation in dichten Räumen 	Unterstützt modale Verlagerung des MIV auf ÖV (v.a. längere Fahrten) und FVV (v.a. kurze Fahrten)	Hoch; allerdings erhöht sich Wirkung mit der Zeit. +20-30% ÖV- & FVV-Nachfrage bis 2030

Tabelle INFRAS.

5.4. Schlussfolgerungen

Fazit

Aus den Analysen im vorliegenden Projekt lassen sich verschiedene Folgerungen ziehen:

- Fossilfreier Verkehr in der Schweiz ist machbar. Der Weg dahin ist allerdings sehr ambitioniert.
- *Fossilfreiheit im Verkehr bis 2050* kann erreicht werden. Allerdings sind die notwendigen Massnahmen umfassend und erfordern grosse zusätzliche Anstrengungen. Die Analyse zeigt, dass das Ziel durch eine Kombination von Massnahmen im Bereich Technologie/Flottenmix und im Bereich der Verkehrsnachfrage erreichbar ist. Dank Massnahmen für einen schnelleren und sehr starken Technologie-Shift hin zu fossilfrei betriebenen Fahrzeugen sowie sehr umfassenden Massnahmen im Bereich der Verkehrsnachfrage (Verringerung der Nachfrage und Verlagerung auf Fuss-, Veloverkehr und ÖV), kann das Ziel energie- und kosteneffizient erreicht werden. Allein mit verkehrlichen Massnahmen ist Fossilfreiheit bis 2050 allerdings nicht zu erreichen. Ebenfalls wichtig: Auch bis 2050 bleiben nur noch 30 Jahre – das heisst, die Massnahmen müssen sehr rasch ergriffen und umgesetzt werden.
- Im Vordergrund zur Erreichung eines *fossilfreien Verkehrs bis 2050* stehen insbesondere folgende Massnahmen:
 - Massnahmen mit Einfluss auf *Technologie/Flottenmix*: Flottengrenzwerte im Strassenverkehr, Quoten zur Verringerung von Verbrennerfahrzeugen in der Neufahrzeugflotte, finanzielle Belastung fossiler Treibstoffe.
 - Massnahmen mit Einfluss auf *Verkehrsnachfrage*: Erhöhung Kosten fossiler Treibstoffe, massive Förderung des Fuss- und Veloverkehrs, Förderung des ÖV (v.a. im Agglomerationsraum), Massnahmen zur Einschränkung des MIV, v.a. mittels Parkplatz-Politik, Verkehrsmanagement und reduziertem Ausbau der Strasseninfrastrukturen, Förderung von Sharing-Angeboten und Massnahmen zur Reduktion des Arbeitsverkehrs, raumplanerische Massnahmen zur Förderung der Siedlungsentwicklung nach innen sowie einer besser abgestimmten Entwicklung zwischen Raum und Verkehr (z.B. autofreie Siedlungen, gemischte Zonen Wohnen/Arbeiten, Standortwahl verkehrsintensive Einrichtungen).
- *Fossilfreiheit im Verkehr bis 2040* ist technisch umsetzbar, bedarf aber massiver und rasch wirkender zusätzlicher Anstrengungen (z.B. massive Verteuerung der fossilen Treibstoffe oder Verbot des Einsatzes fossiler Treibstoffe). Parallel dazu müssen Strom und strombasierte Energieträger (PtL) in grossen Mengen bereitgestellt werden. Da ein substanzieller Teil der Verbrennerfahrzeuge, die in den nächsten 5-10 Jahren gekauft werden, bis weit über 2040 in der Flotte verbleiben, muss deren Gebrauch beschränkt werden oder es müssen rasch grosse Mengen an PtL produziert werden können, wobei die Kosten ebenfalls zu

berücksichtigen sind. Allein mit verkehrlichen Massnahmen ist Fossilfreiheit bis 2040 nicht zu erreichen. Gegenüber dem schon ambitionierten Ziel 2050 müsste eine deutlich beschleunigte Reduktion der Nutzung von Verbrennungsmotoren erreicht werden. Um die Nutzung fossiler Treibstoffe bis 2040 auf null zu bringen, muss die Nutzung de facto verboten werden, z.B. über eine Abgabe, die fossile Treibstoffe teurer macht als PtL (oder einem tatsächlichen Nutzungsverbot fossiler Treibstoffe). Eine rasche und umfassende Initiierung einer PtL-Strategie wäre notwendig, damit im Ausland genügend PtL für den Schweizer Markt produziert würden.

Eine zusätzliche, maximale Reduktion der Verkehrsnachfrage bis 2040 reicht nicht zur Erreichung der Fossilfreiheit bzw. bringt nicht mehr als ein zusätzlicher Shift zu alternativen Antrieben und dürfte zudem eine deutlich geringere Akzeptanz haben.

- *Fossilfreiheit im Verkehr bis 2030* ist kaum umsetzbar: Die Hauptgründe liegen darin, dass die heutige Neuwagenflotte immer noch mehrheitlich aus Verbrennungsmotorfahrzeugen besteht. Ein grosser Teil davon müsste dann 2030, also lange vor dem technischen Lebensende der Fahrzeuge, praktisch ausser Verkehr gesetzt werden. Vor allem aber können bis 2030 nicht die notwendigen Mengen an alternativen Fahrzeugen (v.a. batterieelektrische Fahrzeuge) bereitgestellt werden, weil die Produktionskapazitäten erst am Hochlaufen sind. Ein Ersatz aller 2030 benötigten fossilen Treibstoffe mit PtL würde riesige Mengen an PtL erfordern, die so bis dann kaum hergestellt werden können. Auch eine Verlagerung der verbleibenden fossilen MIV-Nachfrage auf den ÖV sowie Fuss- und Veloverkehr ist kapazitätsseitig nicht umsetzbar, weil deren Nachfrage bis 2030 um einen Faktor 2 zunehmen müsste.
- Es ist wichtig zu beachten, dass die meisten angedachten Massnahmen und Instrumente auf die inländische Fahrzeugflotte oder die Verkehrsnachfrage im Inland abzielen. Ein nicht unerheblicher Teil der Verkehrsnachfrage auf der Strasse und somit der Treibhausgasemissionen wird aber durch *ausländische Fahrzeuge* verursacht. Um das Ziel eines fossilfreien Verkehrs möglichst umfassend zu erreichen, sind auch Massnahmen notwendig, welche die ausländischen Fahrzeuge einbeziehen (gilt z.B. für eine KM-Abgabe, eine CO₂-Abgabe, (teilweise) oder räumlich abgegrenzte Nutzungsverbote von Verbrennungsmotoren).
- Die notwendigen Massnahmen zu einem fossilfreien Verkehr führen auch zu positiven Wirkungen auf *andere Umweltbereiche*. Insbesondere im Bereich der Luftschadstoffemissionen ergeben sich durch die Reduktion des Strassenverkehrs und durch die Elektrifizierung deutlich positive Effekte. In geringerem Ausmass sind auch beim Lärm sowie Flächenbedarf Verbesserungen zu erwarten.

Um die Klimaziele von Paris und die Schweizer Klimaziele zu erreichen, müssen im Verkehr grosse Anstrengungen vorgenommen werden. Fossilfreiheit im Verkehr zu erreichen ist zwar

schwieriger als in anderen Branchen, aber dank der technologischen Entwicklung im Bereich strombasierter Technologien möglich. Bereits das Ziel Fossilfreiheit 2050 erfordert rasches Handeln und die Umsetzung griffiger Massnahmen. In den nächsten fünf Jahren müssen die wichtigsten Eckpunkte geregelt und Instrumente implementiert oder zumindest aufgegleist sein, damit der Verkehr in der verbleibenden Zeit fossilfrei werden kann.

Zur effizienten Erreichung dieses Ziels müssen sowohl Massnahmen umgesetzt werden, die auf Technologieebene ansetzen, als auch Massnahmen, die bei der Verkehrsnachfrage ansetzen.

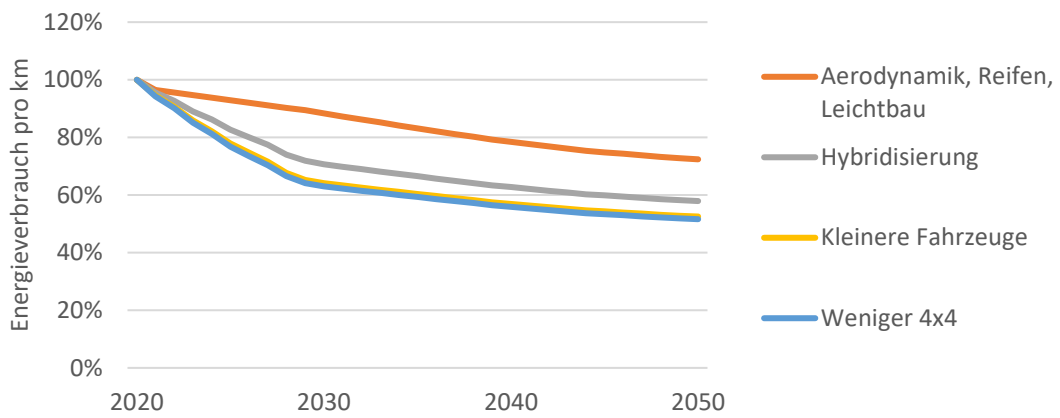
Ausblick und Vertiefungsbedarf

- Mit der vorliegenden Studie konnte eine quantitative Basis geschaffen werden, wie ein fossilfreier Verkehr in der Schweiz aussehen würde. Mit Hilfe verschiedener Szenarien wurden verschiedene Wege zur Fossilfreiheit im Verkehr – mit unterschiedlichem Zeithorizont – dargestellt. Den Szenarien liegen verschiedene Massnahmen zugrunde, ohne dass aber die Wirkungen der Einzelmassnahmen im Detail vertieft wurden. Zur detaillierten Wirkung von einzelnen Massnahmen oder Instrumenten wären bei Bedarf weitere Vertiefungen notwendig (wobei dazu teilweise auch schon Studien vorliegen).
- Der gewählte Ansatz mit verschiedenen Szenarien führt zu *keiner* Prognose und sagt nichts über die Realisierungswahrscheinlichkeit der Szenarien aus. Die Szenarien und deren Wirkungen zeigen aber gut auf, welche Schritte notwendig wären und welche verkehrlichen Wirkungen, Energie- und Klimawirkungen resultieren. Ebenfalls kann deutlich gemacht werden, in welchem Szenario welcher Bedarf je Energieform ist, insbesondere der Strombedarf.
- Kein Fokus lag in der vorliegenden Studie auf den Kosten der Umsetzung der analysierten Szenarien. Im Rahmen der Gesamtbeurteilung wurde lediglich eine grobe qualitative Einschätzung vorgenommen. Für einen vertieften Vergleich der Szenarien wäre umfassendere Kenntnisse der Kosten notwendig. Entsprechend besteht hier Vertiefungsbedarf.
- Nur am Rande betrachtet wurden die Folgerungen für die Verkehrsinfrastruktur. Aufgrund der in allen Fossilfrei-Szenarien reduzierten MIV-Nachfrage wird der Ausbaubedarf bei der Strasseninfrastruktur sinken. Andererseits steigt der Ausbaubedarf vor allem beim Fuss- und Veloverkehr, beim ÖV sowie insbesondere bei der Bereitstellung von (Lade-)Infrastruktur für alternative Antriebsformen. Wie gross der veränderte Infrastrukturbedarf ist, müsste ebenfalls in weiteren Analysen vertieft werden.

Annex

Annex 1: Entwicklung der Effizienz von Benzin und Diesel Personewagen

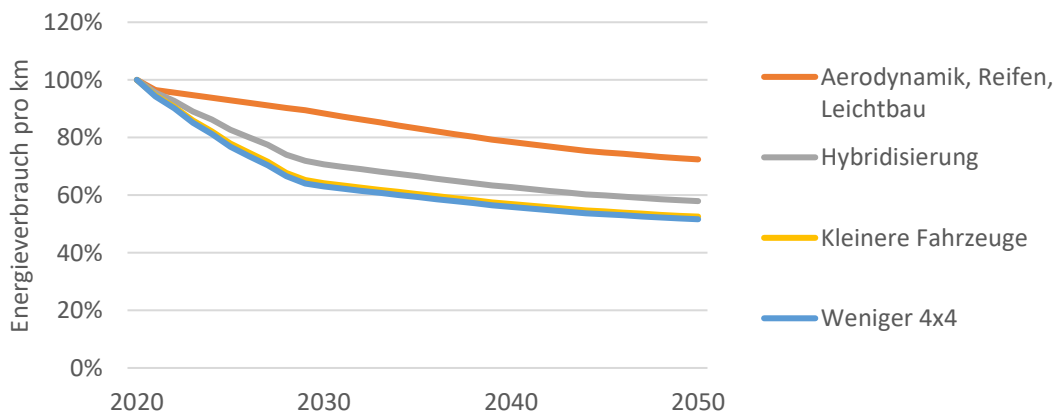
Abbildung 43: Entwicklung der Effizienz von Benzin Personenwagen in der Schweizer Neufahrzeugflotte



Effekte sind von oben nach unten kumuliert. Die Blaue Linie zeigt also die totalen Effizienzgewinne durch Aerodynamik, Reifen, Leichtbau, Hybridisierung, kleinere Fahrzeuge und weniger 4x4

Grafik INFRAS

Abbildung 44: Entwicklung der Effizienz von Diesel Personenwagen in der Schweizer Neufahrzeugflotte



Effekte sind von oben nach unten kumuliert. Die Blaue Linie zeigt also die totalen Effizienzgewinne durch Aerodynamik, Reifen, Leichtbau, Hybridisierung, kleinere Fahrzeuge und weniger 4x4

Grafik INFRAS.

Annex 2: Beschreibung der Modellrechnungen

A. Referenz

A.1 Technologie/Flottenmix

Im Modell werden die inländische Flotte und die ausländischen Fahrzeuge, die in der Schweiz unterwegs sind, separat modelliert. Im Referenzfall unterscheiden sich diese Flotten und deren Entwicklungen praktisch nur darin, dass bei den ausländischen PW der Dieselanteil höher und dafür der Benzinanteil tiefer liegt. Im Weiteren wird die Entwicklung der inländischen Flotte genauer beschrieben.

Die Anzahl neuzugelassener Fahrzeuge pro Jahr steigt mit der Entwicklung der jährlichen Fahrleistungen der Fahrzeugtypen (Abbildung 45).

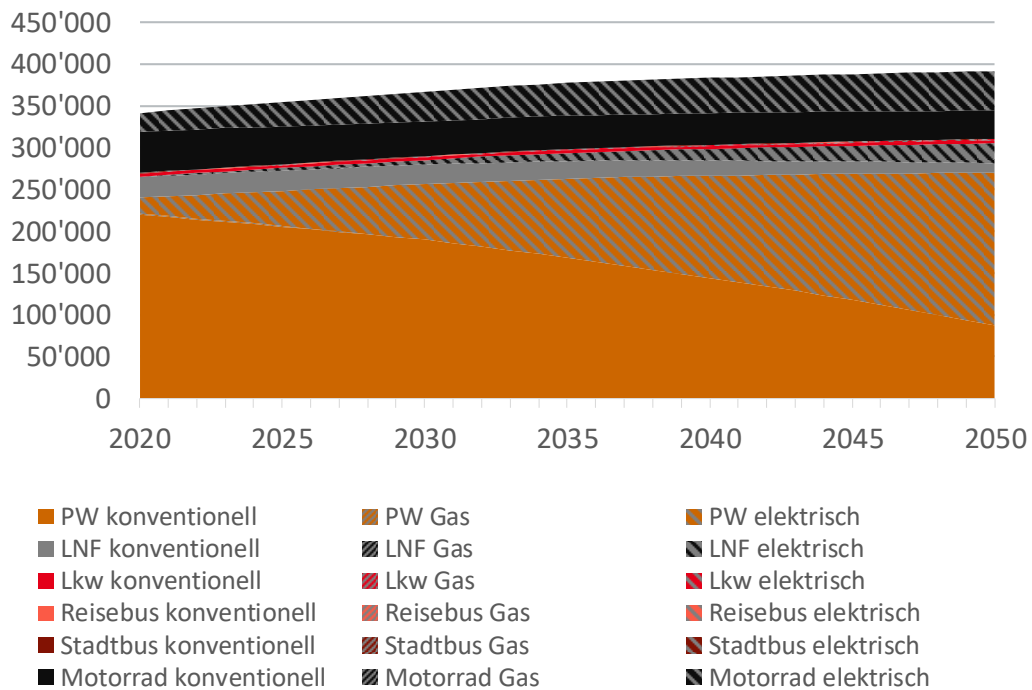
Die Einführung von batterieelektrischen Fahrzeugen (battery electric vehicles, BEV) und Plug-in-Hybriden (plug-in-hybrid vehicles, PHEV) ist v.a. bei den PW und den LNF relevant. Sie verläuft in etwa parallel zur globalen Entwicklung der Marktanteile dieser Fahrzeuge (rund 25% in 2030) an der Neuwagenflotte. Treiber ist einerseits der CO₂-Grenzwert für Neufahrzeugflotten, andererseits sind es early adopters, die solche Fahrzeuge nachfragen. Limitierend sind v.a. das Angebot (Produktionskapazität und angebotene Modelle), die Preise sowie die Reichweitenangst (auch im Zusammenhang mit als ungenügend wahrgenommener Ladeinfrastruktur). Bis 2050 steigt der Anteil auf rund 78% der Neuwagenflotte (Abbildung 45). Ab 2025 - 2030 gehen wir für viele Anwendungen von Kostenäquivalenz für Elektro- und konventionelle Fahrzeuge aus. Auch die Reichweite wird mit über 400 km im durchschnittlichen BEV für die allermeisten Nutzer ausreichend sein. Bei den SNF dürften BEV erst recht spät in relevanter Anzahl in die Flotte kommen und auch dann insgesamt nur etwa 16% der Neufahrzeuge ausmachen.

Brennstoffzellenfahrzeuge (fuel cell electric vehicles, FCEV) sind teurer und weniger effizient als BEV und werden das auch in Zukunft bleiben. Entsprechend kommen sie nur dort zum Einsatz, wo BEV relevante Nachteile haben. Bei den PW wird das in einem kleinen Segment erwartet (7.5% in 2050) wo die Reichweite von Batteriefahrzeugen auch in Zukunft nicht ausreichen wird, bzw. wo zu schwere Batterien mitgeführt werden müssten. Bei SNF wären FCEV den BEV mittelfristig in vielen Bereichen überlegen, doch kommen FCEV aufgrund zu hoher Kosten auch langfristig nicht in grossem Stil (8% in 2050) zum Einsatz.

Bei den neu zugelassenen Personenwagen (PW) und leichten Nutzfahrzeugen (LNF) mit Verbrennungsmotoren werden **ambitionierte Effizienzsteigerungen** durch Verbesserung des Rollwiderstands und der Aerodynamik, durch Leichtbau und durch eine Hybridisierung der Antriebe angenommen. Trotz negativer CO₂-Vermeidungskosten wird davon ausgegangen, dass Schweizerinnen und Schweizer **auch in Zukunft keine kleineren, leichteren Fahrzeuge mit**

geringerer Motorisierung kaufen werden. Auch wird der aktuelle Trend zu Allradfahrzeugen nicht gewendet. Treiber für die technische Effizienzsteigerung sind die durchschnittlichen CO₂-Emissionen der Neufahrzeuge, die bei PW aktuell bei über 135 g CO₂/km liegen, ab 2020 aber 95 g CO₂/kg erreichen müssten. Abbildung 46 zeigt die Entwicklung der CO₂ Emission der Neuwagenflotte (PW) im Vergleich zu den Grenzwerten für 2020 Trotz der Vorgabe und der Androhung von Strafen bei Nichterreichen, werden die CO₂-Grenzwert der Neuwagenflotte, die ab 2020 gelten, erst ca. 2027 erreicht.

Abbildung 45: Entwicklung der Anzahl Fahrzeuge in der Schweizer Neufahrzeugflotte in «Referenz»



«konventionell» beinhaltet Benzin- und Dieselfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können.
 «Gas» beinhaltet Erdgasfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können.
 «elektrisch» beinhaltet Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge sowie Plug-in-Hybride

Grafik INFRAS.

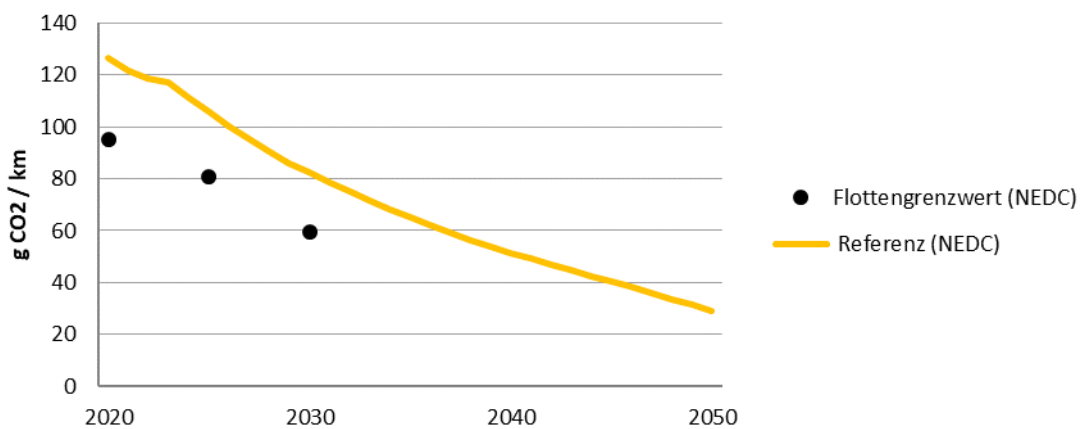
Bei den schweren Nutzfahrzeugen (SNF) wird ebenfalls eine Effizienzsteigerung angenommen, wobei der Absenkpfad der Neuwagenflotte der EU als Treiber betrachtet wird. Allerdings werden die Ziele der EU in der Schweiz erst mit einigen Jahren Verspätung erreicht.

Auch bei Fahrzeugen mit Elektromotoren wird angenommen, dass eine Effizienzsteigerung durch technische Verbesserungen erfolgen wird. Allerdings gehen wir davon aus, dass diese kompensiert wird durch eine künftig weniger energiesparende Nutzung. Grund für diese

Annahme ist, dass kurzfristig diese Fahrzeuge mehrheitlich von umweltbewussten Menschen genutzt werden, längerfristig aber von einem Durchschnitt der Bevölkerung.

Der Einsatz von Biotreibstoffen wird gegenüber heute noch leicht steigen (trotz der geplanten Aufhebung der Befreiung von der MinÖSt). Auf den Einsatz von strombasierten Kohlenwasserstoffen (PtL) wird verzichtet, weil solche Treibstoffe viel teurer sein werden als Fossile.

Abbildung 46: Entwicklung der Durchschnitts- CO₂ Ausstoss der Schweizer PW Neufahrzeugflotte in «Referenz»

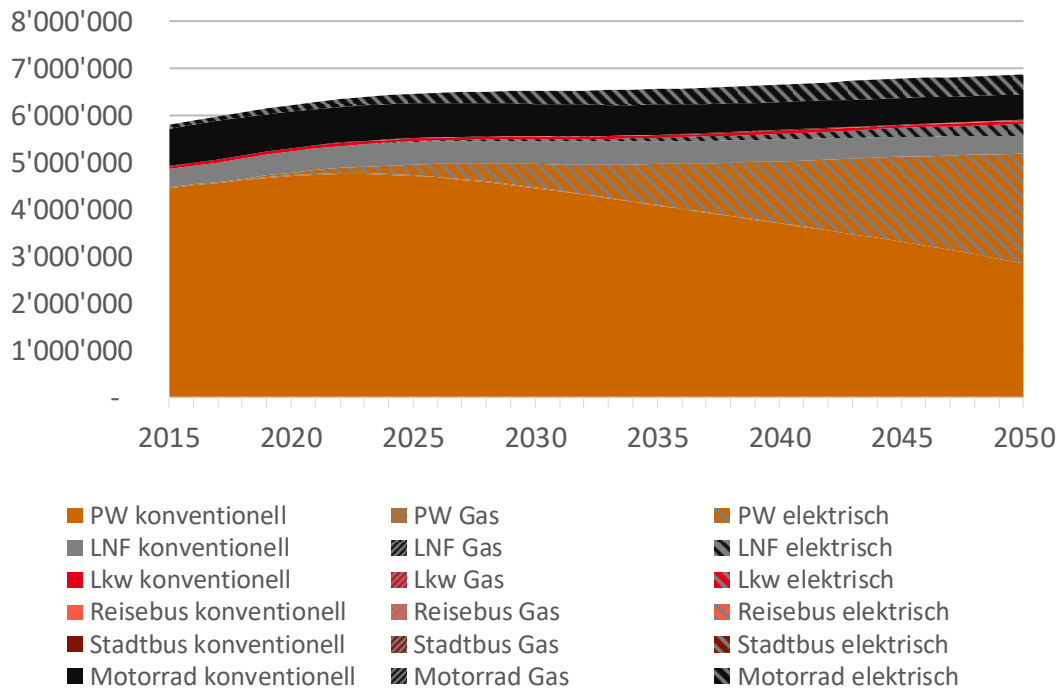


Es bestehen in der Schweiz zurzeit keine weiteren Grenzwerte als die 95 g CO₂/km, die ab 2020 von der Neufahrzeugflotte eingehalten werden müsste. Die Flottengrenzwerte für 2025 und 2030 gelten für die EU und mit dem revidierten CO₂-Gesetz dann auch für die Schweiz.

Grafik INFRAS.

Abbildung 47 zeigt die Entwicklung der Anzahl Fahrzeuge im Bestand. Der Vergleich der Anteile der Technologien zeigt, dass der Bestand den Neuzulassungen etwa 10 Jahre hinterherhinkt. Das kommt daher, dass jährlich nur etwa 10% des Bestandes als Neufahrzeuge dazu kommen während etwas weniger als 10% der Fahrzeuge im Bestand aus dem Verkehr gezogen werden.

Abbildung 47: Entwicklung der Anzahl Fahrzeuge in der Schweizer Flotte in «Referenz»



«konventionell» beinhaltet Benzin- und Dieselfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können.
 «Gas» beinhaltet Erdgasfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können.
 «elektrisch» beinhaltet Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge sowie Plug-in-Hybride.

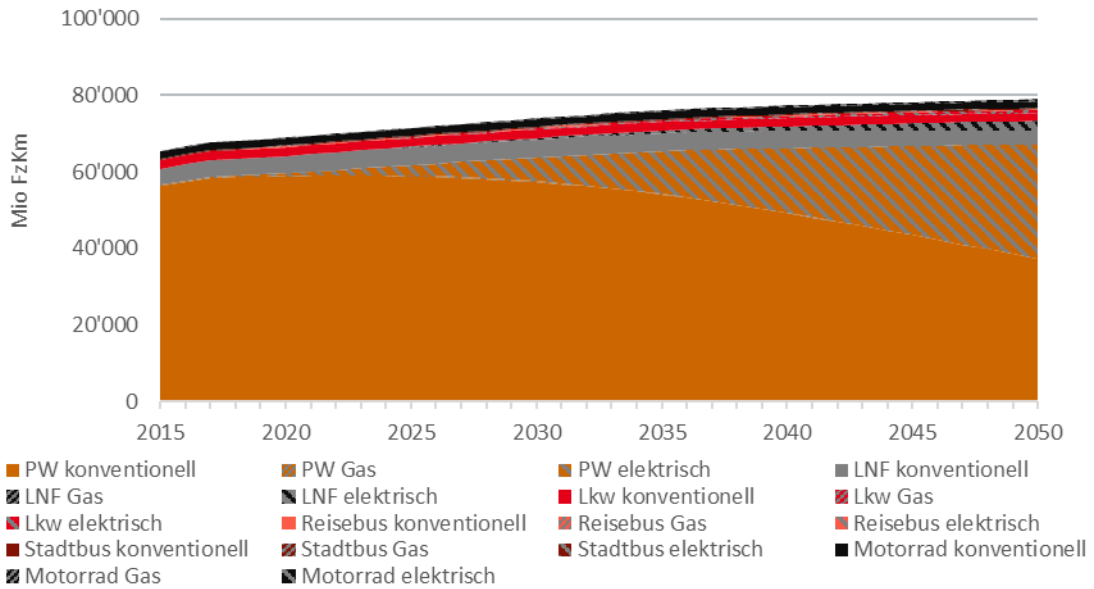
Grafik INFRAS.

A.2 Verkehrsnachfrage

Die Fahrleistungen in allen Modi steigen bis 2050 deutlich an. Basis für diese Entwicklung sind die Verkehrsperspektiven 2040 des ARE mit der Projektion auf 2050 (ARE 2016). Die Fahrzeug-km mit PW steigt bis 2050 gegenüber 2020 um 13%. Bei LNF wird ein Anstieg von 37% prognostiziert und bei LKW geht ARE von +24% gegenüber 2020 aus. Die Verkehrsperspektiven gehen von einem BIP-Wachstum von 2020 bis 2050 um 36% aus. Die Bevölkerung soll gemäss dieser Grundlage um 17% auf 10.2 Mio. Einwohnerinnen und Einwohner steigen. Die aktuellen Annahmen des BfS zur Entwicklung der Bevölkerung liegen bei sehr ähnlichen Werten. Die Entwicklung des BIP hingegen wird aus heutiger Sicht deutlich positiver gesehen. Gemäss den im Juni 2020 publizierten Werten geht das SECO nun davon aus, dass das BIP 2050 um über 60% höher liegen wird als in 2020¹⁰. Entsprechend könnte sich der Güterverkehr noch deutlich stärker erhöhen als in der Prognose von ARE, wenn die Entkoppelung vom BIP nicht gelingt.

¹⁰ https://www.seco.admin.ch/dam/seco/de/dokumente/Wirtschaft/Wirtschaftspolitik/Wachstum/szenarien_bip-entwicklung_ch.xls.download.xls/szenarien_bip-entwicklung_ch.xls; Zugriff 25.08.2020

Abbildung 48: Entwicklung der Fahrleistung der in der Schweiz in «Referenz»



«konventionell» beinhaltet Benzin- und Dieselfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können.

«Gas» beinhaltet Erdgasfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können.

«elektrisch» beinhaltet Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge sowie Plug-in-Hybride.

Grafik INFRAS. Quellen: INFRAS, ARE 2016.

Tabelle 18: Entwicklung der Fahrleistung (Fzkm), «Referenz», in Mia. Fzkm

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
PW	59.63	61.75	63.69	65.33	66.15	66.71	67.12
LNF	4.53	4.83	5.13	5.43	5.72	5.96	6.17
LKW	2.30	2.40	2.50	2.60	2.71	2.79	2.86
Reisebus	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16
Stadtbus	0.30	0.32	0.33	0.35	0.36	0.36	0.37
Motorrad	2.04	2.11	2.18	2.23	2.26	2.28	2.29
Tram/Trolleybus	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08
Zug	0.24	0.25	0.27	0.27	0.28	0.28	0.29

Tabelle INFRAS. Quelle: ARE 2016.

Tabelle 19: Anteil der Fahrleistung (Fzkm) mit konventionellen Fahrzeugen in «Referenz»

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
PW	99%	95%	90%	83%	74%	65%	55%
LNF	99%	97%	93%	87%	79%	70%	60%
LKW	99%	96%	90%	83%	78%	75%	73%
Reisebus	100%	100%	100%	100%	99%	98%	97%
Stadtbus	97%	94%	89%	83%	76%	67%	58%
Motorrad	94%	90%	85%	81%	77%	75%	72%
Tram/Trolleybus	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Zug	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

«konventionell» beinhaltet Benzin- und Dieselfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können. Als Treibstoffe für diese Fahrzeuge kommen prinzipiell fossile, biogene oder synthetische Kohlenwasserstoffe in Frage.

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Berechnung.

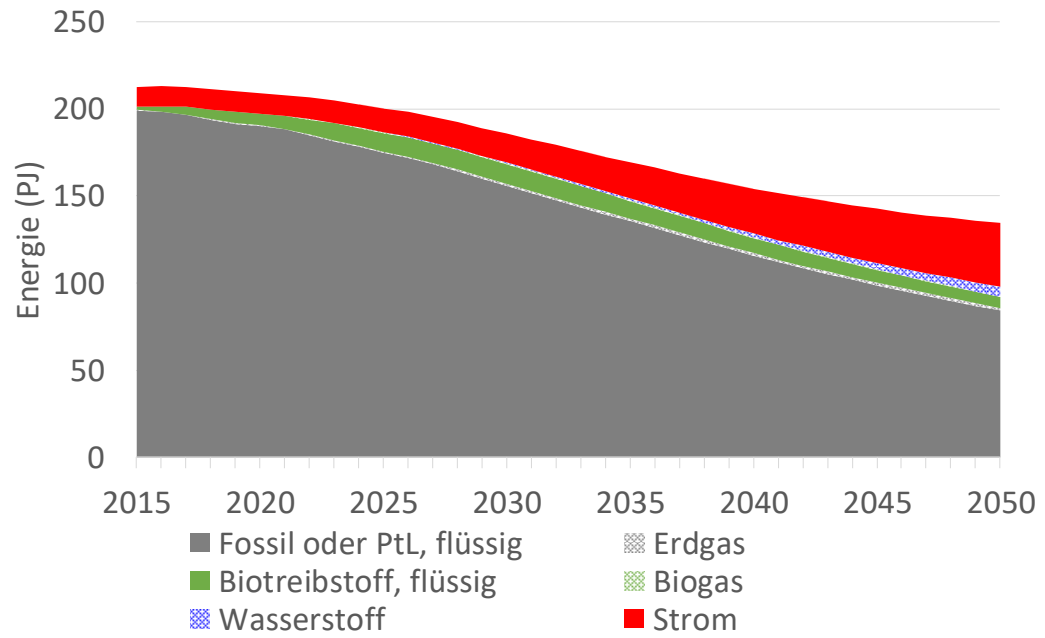
Die Entwicklung der Verkehrsleistung (pkm, tkm) ist im Detail im Kapitel 4.1 des Hauptteils dargestellt (sowie im Annex 3).

A.3 Energiebedarf

Der Energiebedarf des landbasierten Verkehrs nimmt im Referenzszenario trotz deutlich steigender Fahrleistung in allen Modi signifikant ab. Der Hauptgrund dafür ist die Einführung von batterieelektrischen PW, die rund 3-Mal energieeffizienter sind als konventionelle PW und 2050 einen beträchtlichen Teil der Fahrleistung erbringen. Entsprechend ist deutlich zu sehen, dass in Zukunft weniger fossile Treibstoffe und mehr Strom benötigt werden. Die Menge an Biotreibstoffen geht mit der Zeit zurück, weil wir von einer maximalen Beimischung von 7% ausgehen. Dies ist der Anteil, der gemäss Dieselnorm ohne spezielle Deklaration zulässig ist und ohne technische Anpassung in jedem Fahrzeug verwendet werden kann. Erdgas und Biogas spielen eine sehr untergeordnete Rolle. Sie kommen, wie auch der Wasserstoff, vor allem bei LKW zum Einsatz.

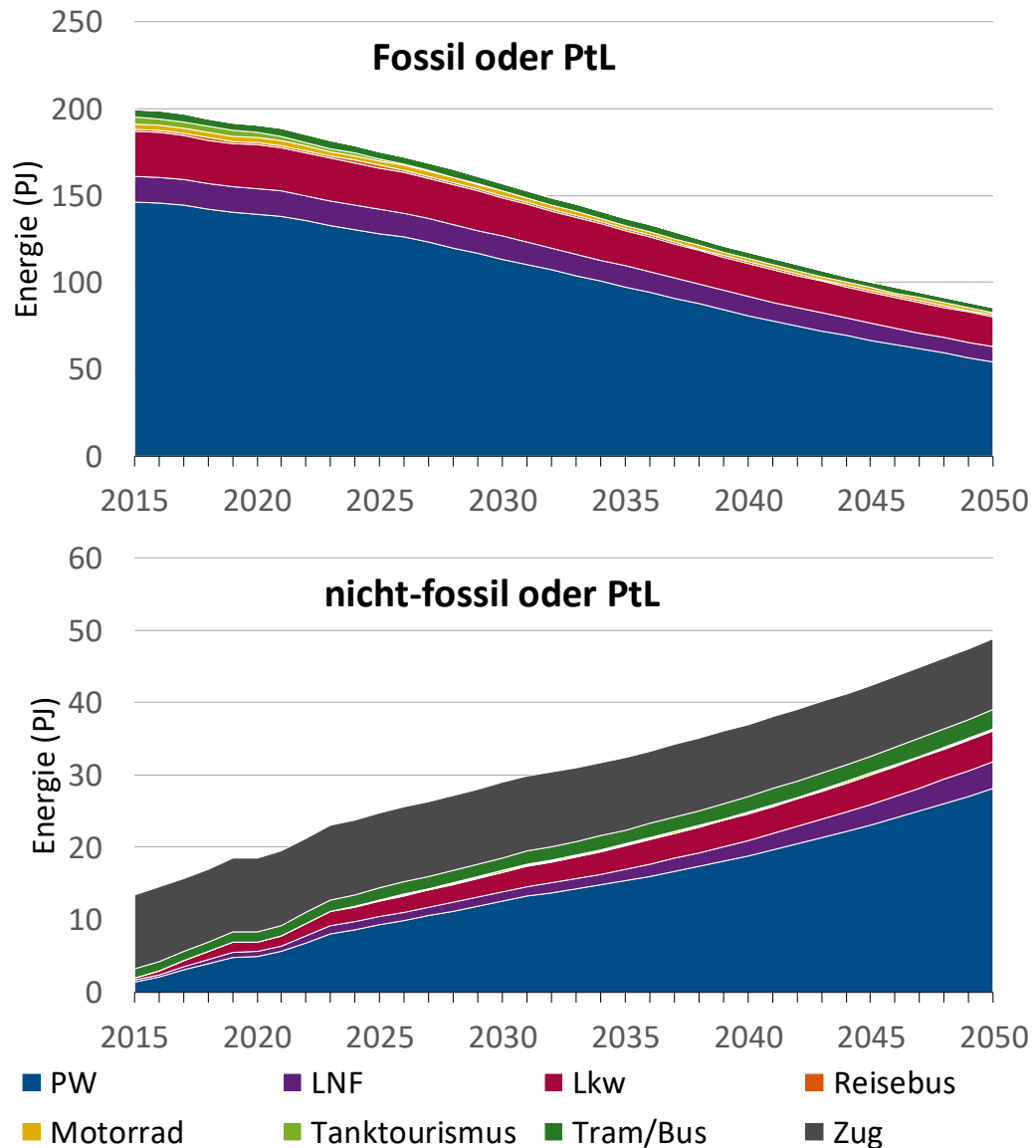
Der Energiebedarf von Zügen nimmt leicht ab, weil die Effizienzsteigerung grösser ist als der Mehrbedarf durch den Anstieg der Fahrleistung.

Abbildung 49: Entwicklung des Treibstoffbedarfs des Verkehrs in der Schweiz in «Referenz»



Grafik INFRAS.

Abbildung 50: Entwicklung des Treibstoffbedarfs des Verkehrs in der Schweiz in «Referenz»



Im Referenzszenario gehen wir davon aus, dass keine PtL eingesetzt werden. Entsprechend zeigt die obere Grafik die Entwicklung des fossilen und die untere diejenige des nicht-fossilen Treibstoffes.

Grafik INFRAS.

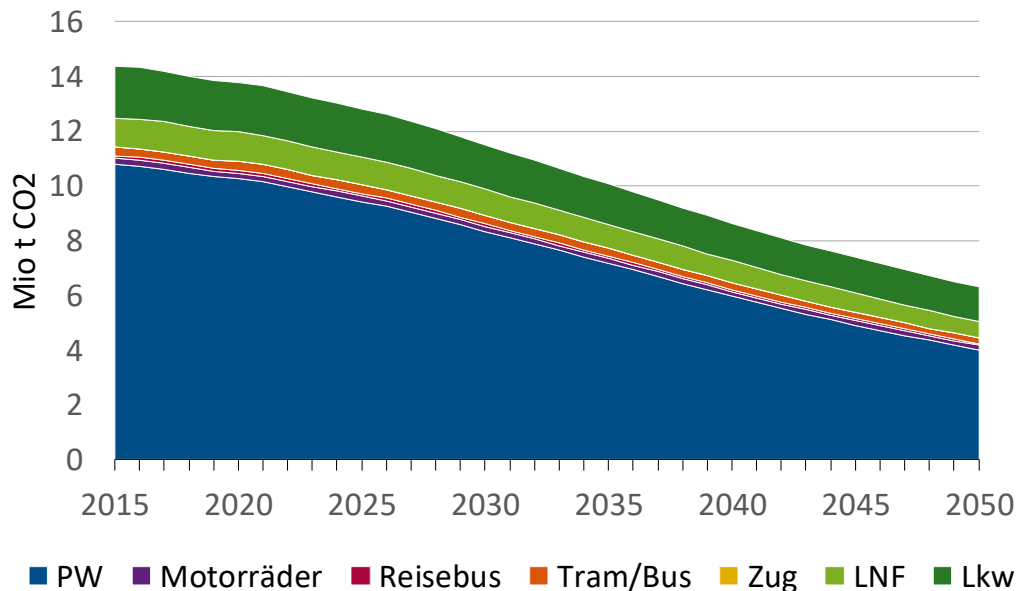
A.4 CO₂-Emissionen

Mit der Abnahme des fossilen Treibstoffbedarfs nimmt auch die CO₂-Emission des landbasierten Verkehrs in der Schweiz bis 2050 auf 46% von 2020 ab. Obwohl der Beitrag der PW am

meisten abnimmt, ist diese Fahrzeugkategorie auch 2050 noch die relevanteste bez. CO₂-Emissionen.

Das THG Reduktionsziel der Schweiz bis 2030 liegt bei -50% gegenüber 1990. Dreiviertel davon sollen im Inland reduziert werden. Im Szenario «Referenz» würde ohne Einsatz von PtL bis 2030 im Verkehr eine Reduktion von 8% gegenüber 1990 erreicht, was das Ziel der Schweiz (37.5% über alle Sektoren) deutlich verfehlen würde.

Abbildung 51: Entwicklung der CO₂-Emissionen des Verkehrs in der Schweiz in «Referenz»



Unter Annahme, dass keine PtL eingesetzt werden. Bei vollständigem Ersatz von fossilen Treibstoffen durch PtL, würde die ausgewiesene Emission auf null sinken.

Grafik INFRAS.

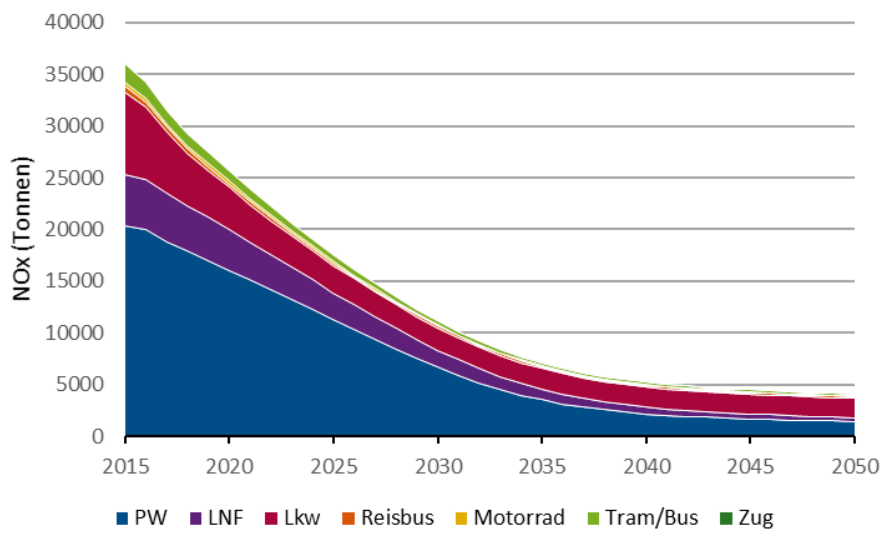
A.5 Luftschadstoffemissionen

Mit der Reduktion der konventionellen Fahrzeuge und deren Fahrleistung sinken die Stickoxidemissionen des Verkehrs massiv (Abbildung 52). Zu dieser Reduktion trägt ebenfalls bei, dass die älteren Fahrzeuge der heutigen Flotte, die teilweise sehr hohe spezifische NO_x-Emissionen pro km verursachen, kontinuierlich aus dem Verkehr gezogen und durch sauberere Fahrzeuge ersetzt werden.

Auch die Emission von Feinstaub (PM10) geht zurück, aber nicht im selben Ausmass. Das hängt damit zusammen, dass Abrieb von Strasse, Reifen und Bremsen einen grossen Teil dieser Emission ausmachen und dass dieser Abrieb auch bei Elektrofahrzeugen relevant ist.

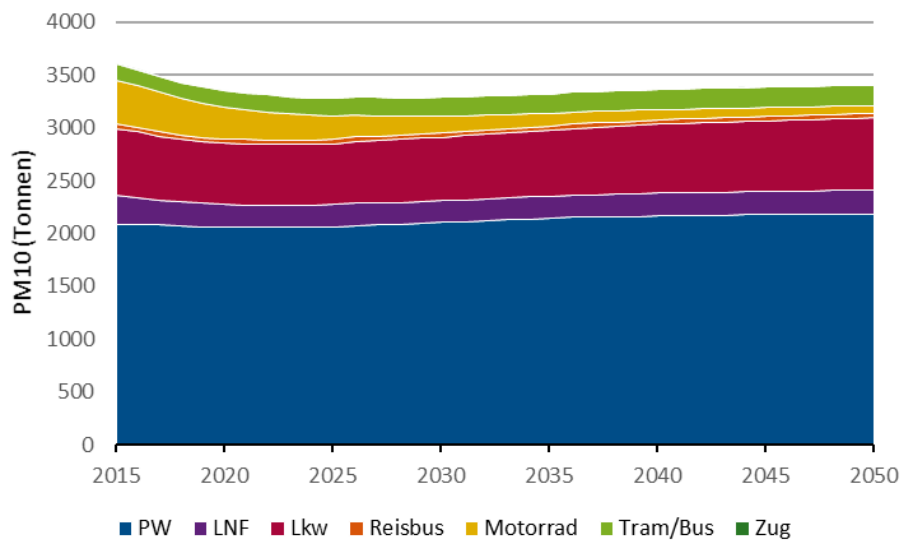
Elektrofahrzeuge verursachen zwar weniger Bremsabrieb, weil sie statt mit Bremscheiben mit dem Elektromotor bremsen können und dabei Energie zurückgewinnen. Dafür ist der Reifenabrieb tendenziell höher, weil beim Anfahren ein höheres Drehmoment zur Verfügung steht und damit mehr Kraft auf die Strasse übertragen werden kann. Diese Effekte dürften sich etwa aufheben. Darum gehen wir für alle Antriebsoptionen von denselben Emissionen für den Abrieb aus.

Abbildung 52: Entwicklung der NO_x-Emissionen des Verkehrs in der Schweiz in «Referenz»



Grafik INFRAS.

Abbildung 53: Entwicklung der PM₁₀-Emissionen des Verkehrs in der Schweiz in «Referenz»



Grafik INFRAS.

B. Fossilfrei, Basis

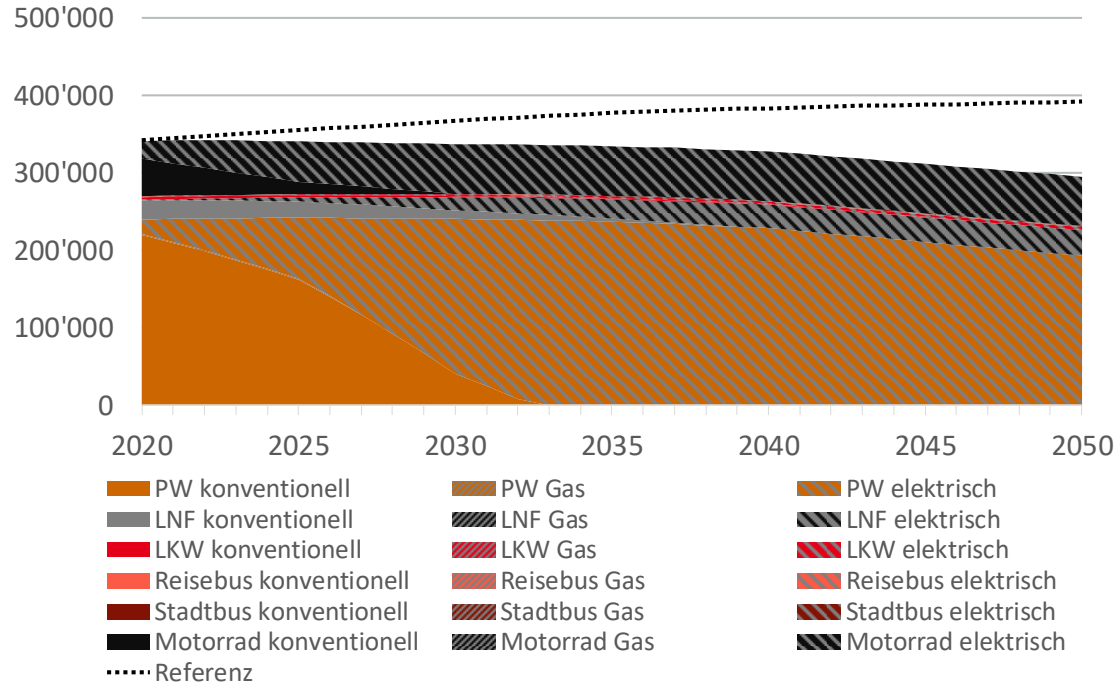
In dieser Modellrechnung werden die Massnahmen des Szenarios «Fossilfrei 2050» operationalisiert. Sie dient ebenfalls als Basis für das Szenario «Fossilfrei 2040, PtL».

B.1 Technologie/Flottenmix

Im Modell werden die inländische Flotte und die ausländischen Fahrzeuge, die in der Schweiz unterwegs sind, separat modelliert. In «Fossilfrei, Basis» unterscheiden sich diese Flotten und deren Entwicklungen darin, dass bei den ausländischen PW der Dieselanteil höher und dafür der Benzinanteil tiefer liegt. Zudem steigt der Anteil Elektrofahrzeuge in der ausländischen Neufahrzeugflotte langsamer bzw. später als in der Schweizer Flotte. Grund dafür ist, dass ausländische Fahrzeuge in der Schweiz mehrheitlich im Langstreckenverkehr unterwegs sind und dass in dem Segment insbesondere BEV noch Nachteile gegenüber den konventionellen Fahrzeugen haben. Insgesamt unterstellen wir aber auch in der ausländischen Flotte eine sehr rasche und tiefe Elektrifizierung. Im Weiteren wird die Entwicklung der inländischen Flotte genauer beschrieben.

Abbildung 54 zeigt, dass sich aufgrund der Massnahmen die Anzahl Neufahrzeuge pro Jahr verringert. Dies ist eine Reaktion auf die Reduktion der Fahrleistungen. Die Abbildung zeigt auch, dass bei PW und LNF eine sehr rasche Elektrifizierung stattfindet. Die kurzfristige Elektrifizierungsrate kann nur so hoch sein, weil die Anzahl Neufahrzeuge pro Jahr zurückgeht. Grund dafür ist, dass die absolute Anzahl an BEV aufgrund der globalen Batterieproduktionskapazität beschränkt ist.

Abbildung 54: Entwicklung der Anzahl Fahrzeuge in der Schweizer Neufahrzeugflotte in «Fossilfrei, Basis»



«konventionell» beinhaltet Benzin- und Dieselfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können.

«Gas» beinhaltet Erdgasfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können.

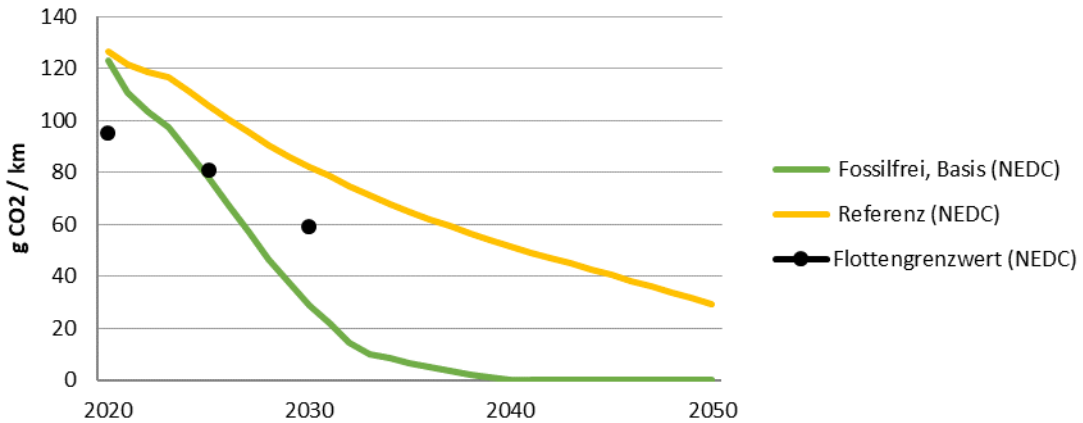
«elektrisch» beinhaltet Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge sowie Plug-in-Hybride.

Grafik INFRAS.

Ab 2033 kommen nur noch elektrifizierte PW in die Schweizer Flotte. Ab 2040 werden auch keine PHEV mehr dazu kommen. Bei LNF und LKW dauert es noch etwas länger, bis keine konventionellen Fahrzeuge mehr neu zugelassen werden.

Neben der raschen Elektrifizierung geht die Modellrechnung auch von einer Reduktion des Energiebedarfs von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren aus. Die kommt zustande über technische Massnahmen sowie über eine Reduktion der durchschnittlichen Fahrzeugmassen und Grösse. Abbildung 55 zeigt die Entwicklung der CO₂-Emission der Neufahrzeugflotte im Vergleich zum Referenzszenario und den Grenzwerten in der Schweiz bzw. in der EU.

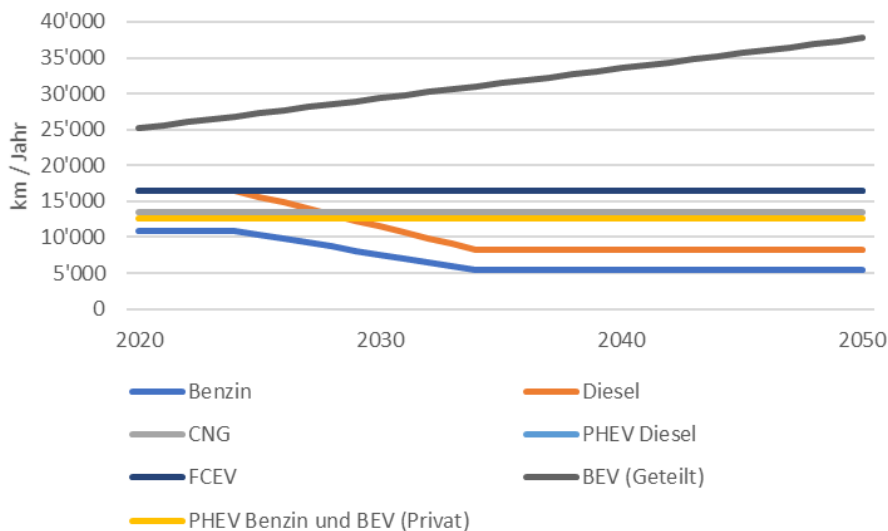
Abbildung 55: Entwicklung der Durchschnittseffizienz der in der Schweizer Neufahrzeugflotte in «Fossilfrei, Basis»



Grafik INFRAS.

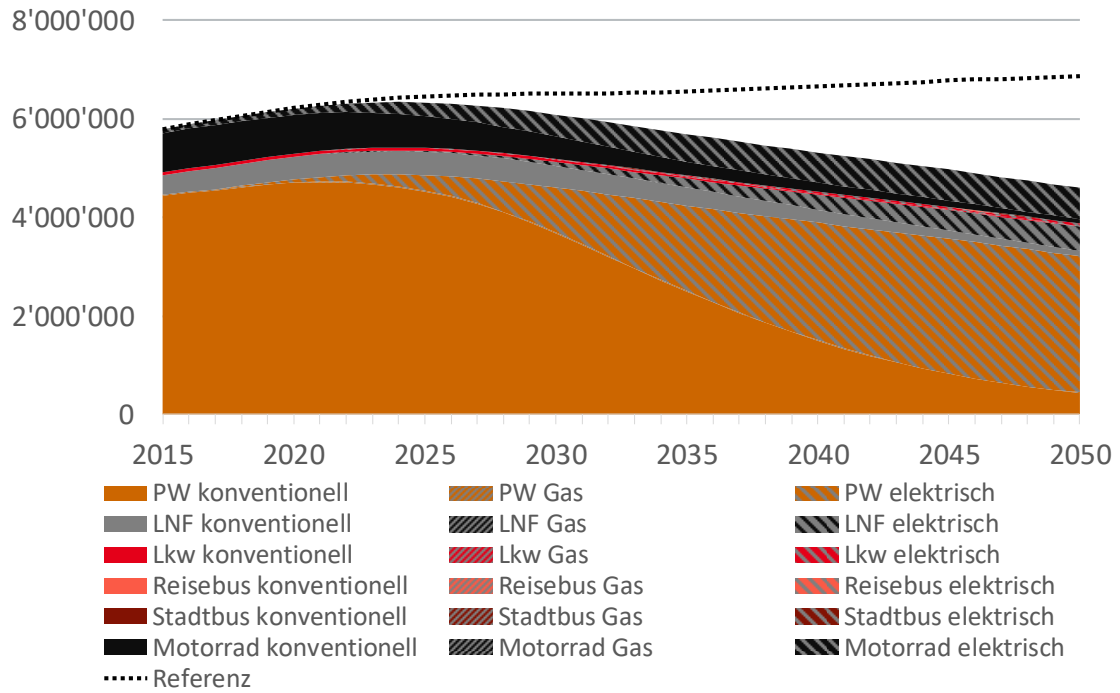
Aufgrund von der Preiserhöhung auf Treibstoffe werden die konventionellen Fahrzeuge mit der Zeit weniger gefahren. Wir unterstellen eine Halbierung der Jahreskilometer pro Diesel- und Benzinfahrzeug zwischen der Einführung der Massnahmen in 2024 und 2034. Gleichzeitig gehen wir davon aus, dass durch die entsprechende Massnahme die BEV, die als Car-Sharing Fahrzeuge eingesetzt werden, in Zukunft noch viel stärker genutzt werden. Bis 2050 unterstellen wir eine Jahresfahrleistung von gut 35'000 km, was ehrgeizig, aber möglich ist (Basis Infos Mobility und andere Sharing-Anbieter). Abbildung 56 zeigt die Annahmen für alle Antriebstypen.

Abbildung 56: Entwicklung der Fahrleistung pro Personenwagen in der Schweizer Flotte in «Fossilfrei, Basis»



Grafik INFRAS.

Abbildung 57: Entwicklung der Anzahl Fahrzeuge in der Schweizer Flotte in «Fossilfrei, Basis»



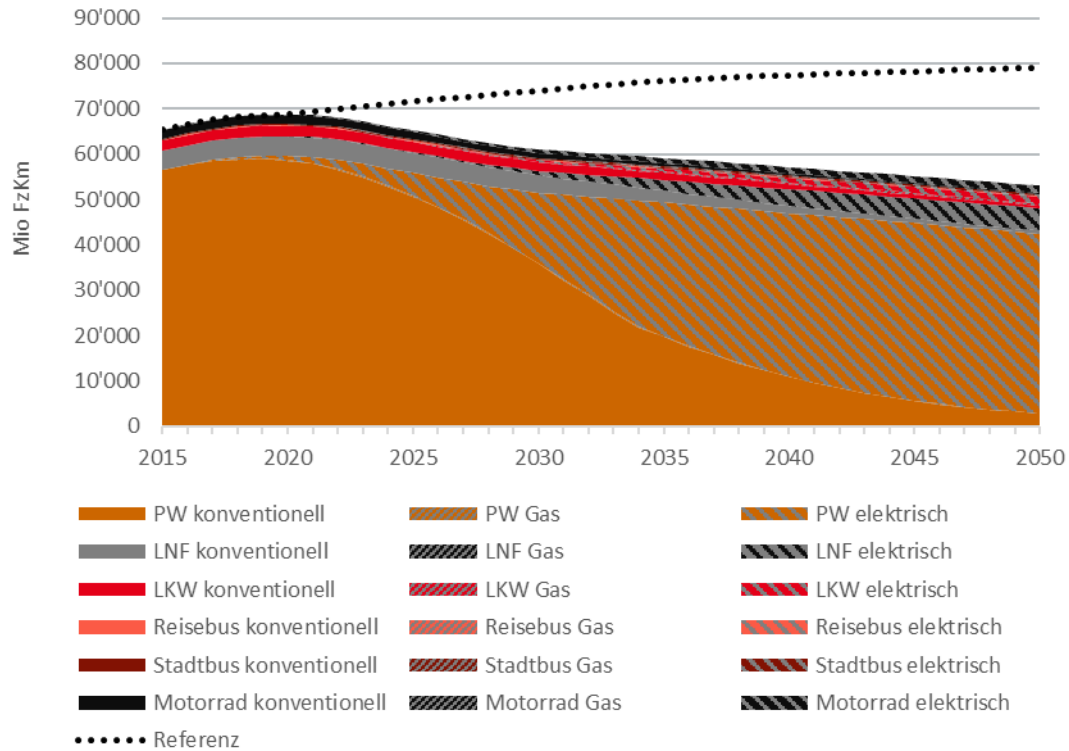
«konventionell» beinhaltet Benzin- und Dieselfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können.
 «Gas» beinhaltet Erdgasfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können.
 «elektrisch» beinhaltet Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge sowie Plug-in-Hybride.

Grafik INFRAS.

B.2 Verkehrsnachfrage

Die detaillierte Entwicklung der Verkehrsleistung (pkm, tkm) des Basisszenarios «Fossilfrei 2050» ist im Kapitel 4.2 des Hauptteils dargestellt (sowie in Annex 3).

Abbildung 58: Entwicklung der Fahrleistung in der Schweiz in «Fossilfrei, Basis»



«konventionell» beinhaltet Benzin- und Dieselfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können.

«Gas» beinhaltet Erdgasfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können.

«elektrisch» beinhaltet Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge sowie Plug-in-Hybride.

Grafik INFRAS.

Tabelle 20: Fahrleistung (Fzkm) «Fossilfrei, Basis», in Mia. Fzkm

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
PW	59.50	55.91	51.48	49.34	47.00	44.76	42.48
LNF	4.35	4.56	4.77	5.01	5.25	5.44	5.61
LKW	2.32	2.35	2.38	2.43	2.47	2.51	2.54
Reisebus	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.16	0.16
Stadtbus	0.30	0.34	0.39	0.40	0.41	0.43	0.44
Motorrad	2.02	1.93	1.82	1.82	1.82	1.81	1.81
Tram/Trolleybus	0.06	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09
Zug	0.24	0.27	0.30	0.31	0.33	0.35	0.37

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Berechnung.

Tabelle 21: Fahrleistung (Fzkm) «Fossilfrei, Basis» im Vergleich zu «Referenz»

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
PW	100%	91%	81%	76%	71%	67%	63%
LNF	96%	94%	93%	92%	92%	91%	91%
LKW	101%	98%	95%	93%	91%	90%	89%
Reisebus	100%	99%	99%	99%	100%	102%	103%
Stadtbus	101%	109%	116%	116%	115%	117%	119%
Motorrad	99%	91%	83%	81%	80%	79%	79%
Tram/Trolleybus	101%	109%	116%	116%	116%	117%	119%
Zug	101%	105%	110%	114%	119%	124%	128%

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Berechnung.

Tabelle 22: Fahrleistung (Fzkm) mit konventionellen Fahrzeugen in «Fossilfrei, Basis», in Mia. Fzkm

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
PW	58.6	50.7	35.7	19.6	10.9	5.6	2.9
LNF	4.3	4.4	3.8	2.5	1.6	1.0	0.6
LKW	2.3	2.2	1.9	1.5	1.1	0.8	0.6
Reisebus	0.14	0.14	0.13	0.11	0.09	0.06	0.04
Stadtbus	0.29	0.29	0.24	0.16	0.084	0.040	0.017
Motorrad	1.9	1.6	1.1	0.7	0.50	0.36	0.24
Tram/Trolleybus	0	0	0	0	0	0	0
Zug	0	0	0	0	0	0	0

«konventionell» beinhaltet Benzin- und Dieselfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können. Als Treibstoffe für diese Fahrzeuge kommen prinzipiell fossile, biogene oder synthetische Kohlenwasserstoffe in Frage.

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Berechnung.

Tabelle 23: Anteil der Fahrleistung (Fzkm) mit konventionellen Fahrzeugen in «Fossilfrei, Basis»

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
PW	99%	91%	69%	40%	23%	12%	7%
LNF	99%	96%	80%	51%	31%	18%	11%
LKW	99%	94%	81%	63%	46%	33%	25%
Reisebus	100%	98%	89%	75%	57%	39%	23%
Stadtbus	96%	84%	61%	39%	20%	9%	4%
Motorrad	94%	81%	58%	39%	27%	20%	13%
Tram/Trolleybus	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Zug	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

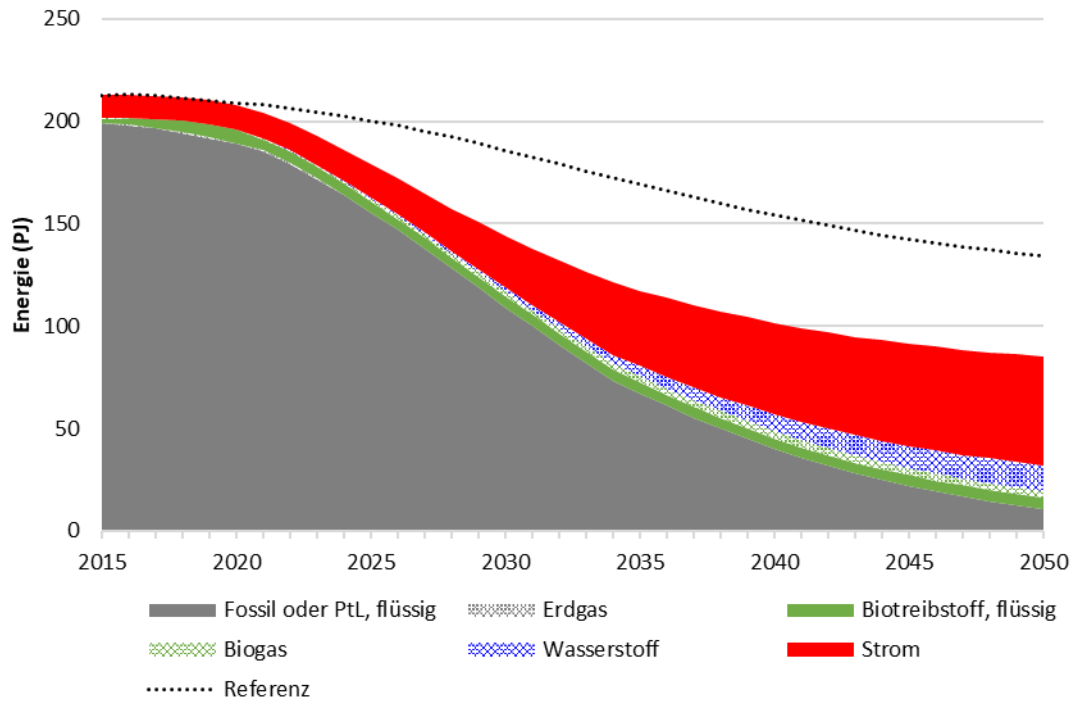
«konventionell» beinhaltet Benzin- und Dieselfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können. Als Treibstoffe für diese Fahrzeuge kommen prinzipiell fossile, biogene oder synthetische Kohlenwasserstoffe in Frage.

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Berechnung.

B.3 Energiebedarf

Der Energiebedarf des landbasierten Verkehrs sinkt durch die Referenzentwicklung und die zusätzlichen Massnahmen in dieser Modellrechnung zwischen 2020 und 2050 um 59%. Zudem ist ein deutlicher Shift von fossilen Treibstoffen zu Strom (52.9 PJ in 2050) und Wasserstoff (12.9 PJ in 2050) zu beobachten. Das Potenzial an flüssigen Biotreibstoffe wird sehr rasch vollständig ausgenutzt. 2050 verbleibt eine Nachfrage nach 10.4 PJ flüssigen Kohlenwasserstoffen, die nicht durch Biotreibstoffe gedeckt werden kann. Das entspricht ungefähr 5% des fossilen Treibstoffbedarfs von 2020 oder 293 Mio. Liter Diesel. Gut die Hälfte davon wird von PW verbraucht, rund ein Drittel von LKW und der Rest von den anderen Fahrzeugklassen (Abbildung 60).

Abbildung 59: Entwicklung des Treibstoffbedarfs des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei, Basis»

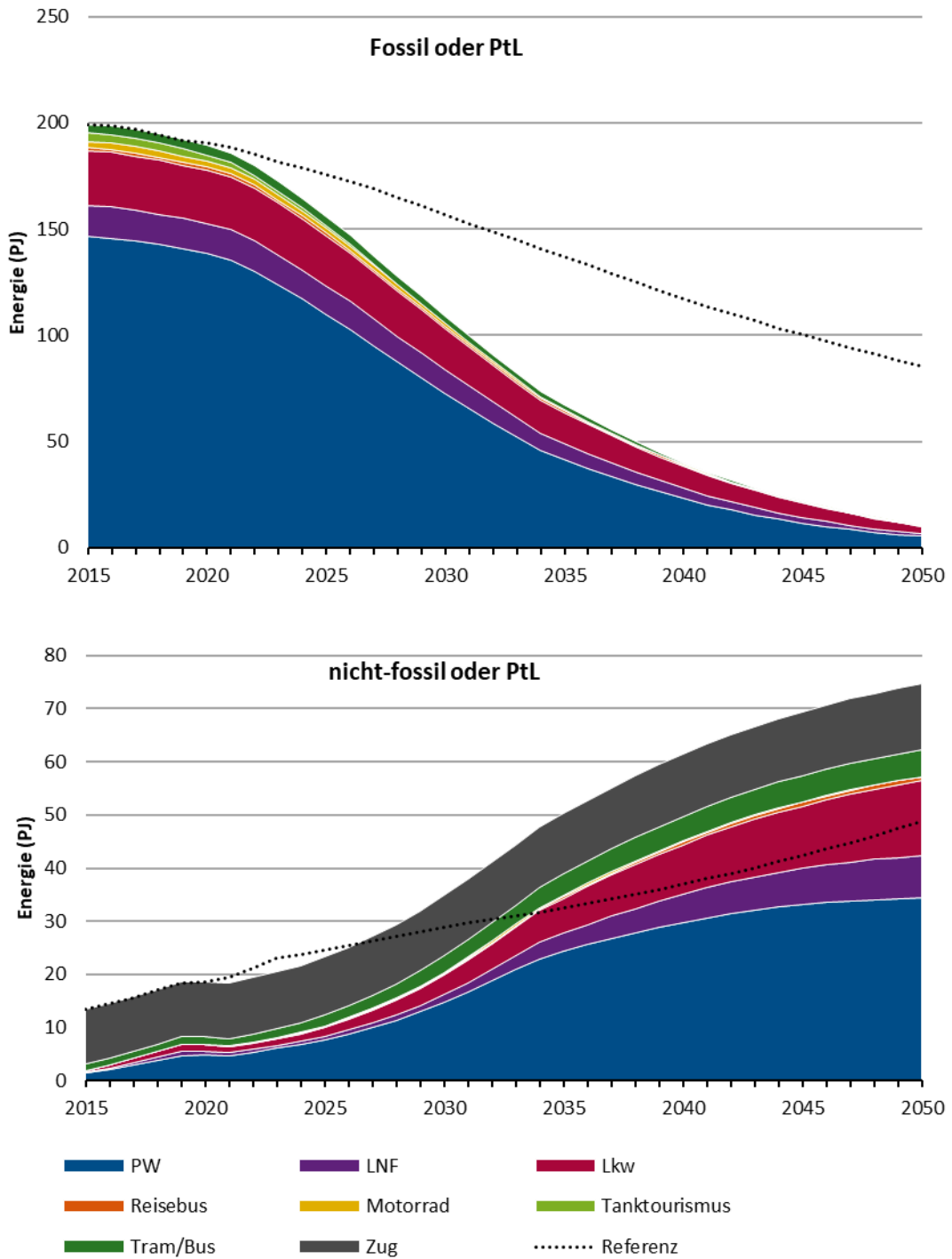


Fossilfreier Verkehr ist dann erreicht, wenn die graue Fläche «Fossil oder PtL, flüssig» null oder vollständig durch PtL gedeckt wird.

Grafik INFRAS.

Abbildung 60 zeigt auch, dass der Bedarf an fossilen oder PtL Treibstoffen in dieser Modellrechnung viel stärker zurückgeht als im Referenzszenario, während der Bedarf an fossilfreien Treibstoffen (exkl. PtL) deutlich höher liegt.

Abbildung 60: Entwicklung des Treibstoffbedarfs des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei, Basis»



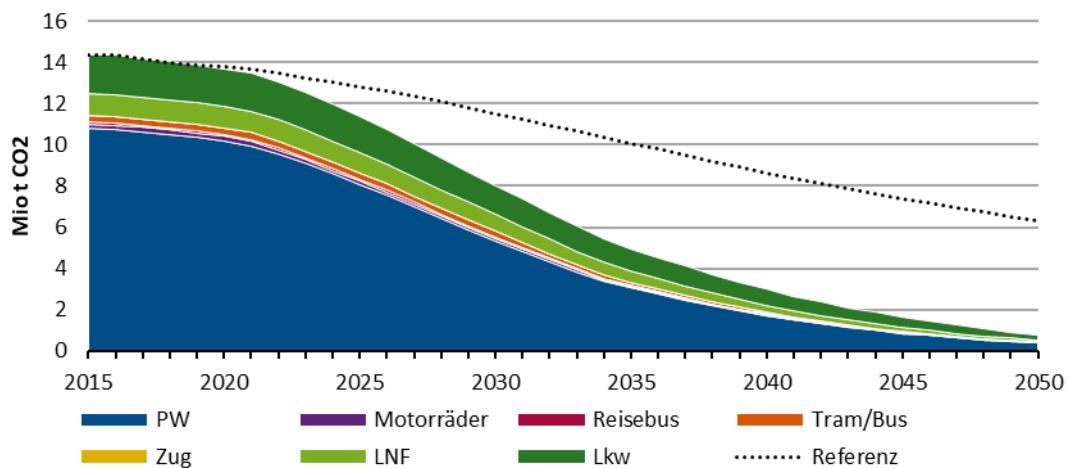
Grafik INFRAS.

B.4 CO₂-Emissionen

Unter der Annahme, dass kein PtL eingesetzt würde, sinkt die CO₂-Emission des Verkehrs in der Modellrechnung «Fossilfrei, Basis» rasch und stark ab. 2050 würden noch 780'000 t CO₂ emittiert. Wird ab 2050 PtL eingesetzt, so sinkt die CO₂-Emission des Verkehrs damit auf null.

Das THG Reduktionsziel der Schweiz bis 2030 liegt bei -50% gegenüber 1990. Dreiviertel davon sollen im Inland reduziert werden. Im Szenario «Fossilfrei, Basis» würde ohne Einsatz von PtL bis 2030 im Verkehr eine Reduktion von 36% gegenüber 1990 erreicht, was das Ziel der Schweiz (37.5% über alle Sektoren) knapp verfehlen würde.

Abbildung 61: Entwicklung der CO₂-Emissionen des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei, Basis»



Unter Annahme, dass keine PtL eingesetzt werden. Bei vollständigem Ersatz von fossilen Treibstoffen durch PtL, würde die Emission auf null sinken.

Grafik INFRAS.

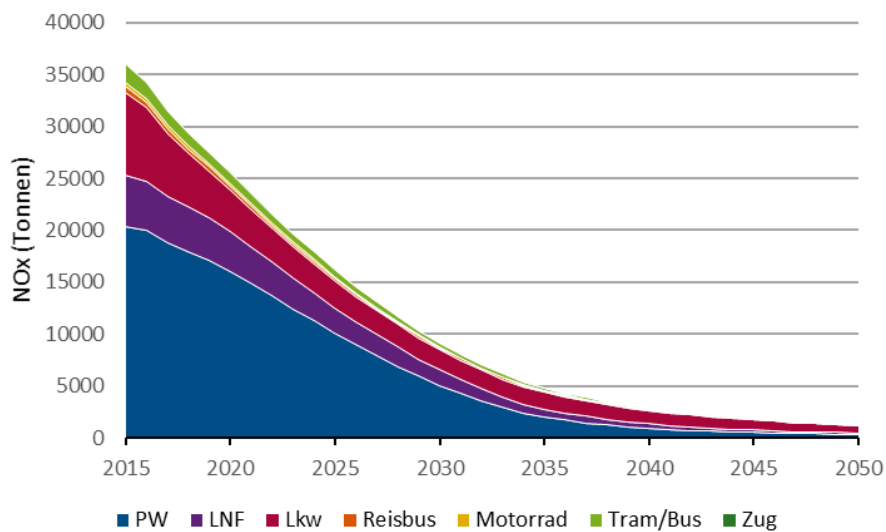
B.5 Luftschadstoffemissionen

Mit der Reduktion der konventionellen Fahrzeuge und deren Fahrleistung sinken die Stickoxidemissionen des Verkehrs massiv (Abbildung 62). Zu dieser Reduktion trägt ebenfalls bei, dass die älteren Fahrzeuge der heutigen Flotte, die teilweise sehr hohe spezifische NO_x-Emissionen pro km verursachen, kontinuierlich aus dem Verkehr gezogen und durch sauberere Fahrzeuge ersetzt werden.

Die Emission von Feinstaub (PM₁₀) geht viel stärker zurück als im Referenzszenario, aber nicht im selben Ausmass wie die NO_x (Abbildung 63). Das hängt damit zusammen, dass Abrieb von Strasse, Reifen und Bremsen einen grossen Teil dieser Emission ausmachen und dass dieser Abrieb auch bei Elektrofahrzeugen relevant ist. Elektrofahrzeuge verursachen zwar weniger Bremsabrieb, weil sie statt mit Bremscheiben mit dem Elektromotor bremsen können und

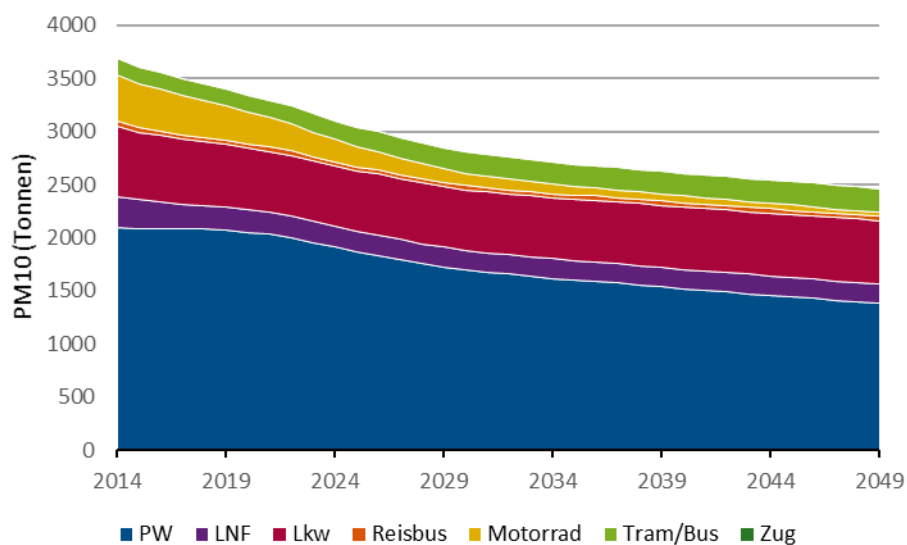
dabei Energie zurückgewinnen. Dafür ist der Reifenabrieb tendenziell höher, weil beim Anfahren ein höheres Drehmoment zur Verfügung stellt und damit mehr Kraft auf die Strasse übertragen werden kann. Diese Effekte dürften sich etwa aufheben. Darum gehen wir für alle Antriebsoptionen von denselben Emissionen für den Abrieb aus.

Abbildung 62: Entwicklung der NO_x-Emissionen des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei 2050»



Grafik INFRAS.

Abbildung 63: Entwicklung der PM₁₀-Emissionen des Verkehrs in der Schweiz



Grafik INFRAS.

C. Fossilfrei, Shift

In dieser Modellrechnung werden die Massnahmen des Szenarios «Fossilfrei, Basis» operationalisiert. Allerdings wird ab 2032, als Reaktion auf die weitere Verteuerung der fossilen Treibstoffe, die Fahrleistung pro Fahrzeug von PW und LNF mit Diesel- und Benzinmotoren stärker reduziert als in der Basisrechnung. Dieser Shift von Fahrleistung mit konventionellen Fahrzeugen zu Fahrleistung mit alternativen Antrieben gibt der Modellrechnung ihren Namen.

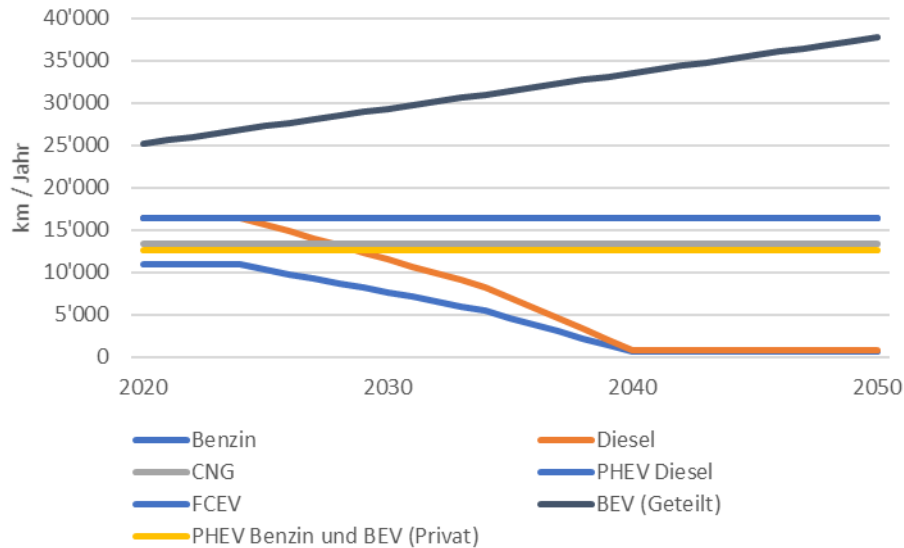
Diese Modellrechnung wird als Basis für das Szenario «Fossilfrei 2040, Shift» verwendet.

C.1 Technologie/Flottenmix

Die Anzahl Neufahrzeuge und die Zusammensetzung der Neufahrzeugflotte in dieser Modellvariante sind identisch mit der Variante «Fossilfrei, Basis». Dasselbe gilt für die Effizienzentwicklungen der Antriebstechnologien und darum auch für die Entwicklung der Neufahrzeugflottenmissionen. Natürlich sind so auch die Fahrzeugbestände und deren Entwicklungen in beiden Modellen identisch.

Aufgrund von der zusätzlichen Preiserhöhung bei Treibstoffen werden aber in «Fossilfrei, Shift» die konventionellen Fahrzeuge mit der Zeit noch weniger gefahren. Wir unterstellen bei PW und LNF eine Reduktion der Jahreskilometer pro Diesel- und Benzinfahrzeug zwischen der Einführung der Massnahmen in 2024 und 2040 auf 5% der jeweiligen Ausgangswerte (Abbildung 56). Da die Jahresfahrleistung der gesamten Flotte gegenüber «Fossilfrei, Basis» unverändert bleibt, führt das dazu, dass jedes alternativ angetriebene Fahrzeug jährlich mehr km zurücklegt. Dies ist in Abbildung 56 nicht ersichtlich, da diese die Modellinputs darstellt, aus denen zur Berechnung die relativen Anteile gebildet werden, damit Flottengrössen, Flottenzusammensetzung und jährlich Fahrleistung der gesamten Flotte ein konsistentes Bild geben.

Abbildung 64: Entwicklung der Fahrleistung pro Personenwagen in der Schweizer Flotte in «Fossilfrei, Shift»



Grafik INFRAS.

C.2 Verkehrsnachfrage

An der gesamten Verkehrsnachfrage ändert sich in dieser Modellrechnung nichts gegenüber der Rechnung «Fossilfrei, Basis». Da aber die Fahrleistung pro Fahrzeug bei den konventionellen Fahrzeugen reduziert ist, wird der Anteil der entsprechenden Fahrleistung kleiner, während der Anteil bei den alternativ angetriebenen Fahrzeugen steigt. Tabelle 24 und Tabelle 25 zeigen die absoluten und relativen Fahrleistungen mit konventionellen Fahrzeugen in der Modellrechnung «Fossilfrei, Shift».

Tabelle 24: Fahrleistung (Fzkm) mit konventionellen Fahrzeugen in «Fossilfrei, Shift», in Mia. Fzkm

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
PW	58.6	50.7	35.7	18.1	3.9	2.2	1.2
LNF	4.3	4.4	3.8	2.4	0.8	0.2	0.1
LKW	2.3	2.2	1.9	1.5	1.1	0.8	0.6
Reisebus	0.14	0.14	0.13	0.11	0.09	0.06	0.04
Stadtbus	0.29	0.29	0.24	0.16	0.084	0.040	0.017
Motorrad	1.9	1.6	1.1	0.7	0.50	0.36	0.24
Tram/Trolleybus	0	0	0	0	0	0	0
Zug	0	0	0	0	0	0	0

«konventionell» beinhaltet Benzin- und Dieselfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können. Als Treibstoffe für diese Fahrzeuge kommen prinzipiell fossile, biogene oder synthetische Kohlenwasserstoffe in Frage.

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Berechnung.

Tabelle 25: Anteil der Fahrleistung (Fzkm) mit konventionellen Fahrzeugen in «Fossilfrei, Shift»

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
PW	99%	91%	69%	37%	8%	5%	3%
LNF	99%	96%	80%	48%	15%	4%	2%
LKW	99%	94%	81%	63%	46%	33%	25%
Reisebus	100%	98%	89%	75%	57%	39%	23%
Stadtbus	96%	84%	61%	39%	20%	9%	4%
Motorrad	94%	81%	58%	39%	27%	20%	13%
Tram/Trolleybus	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Zug	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

«konventionell» beinhaltet Benzin- und Dieselfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können. Als Treibstoffe für diese Fahrzeuge kommen prinzipiell fossile, biogene oder synthetische Kohlenwasserstoffe in Frage.

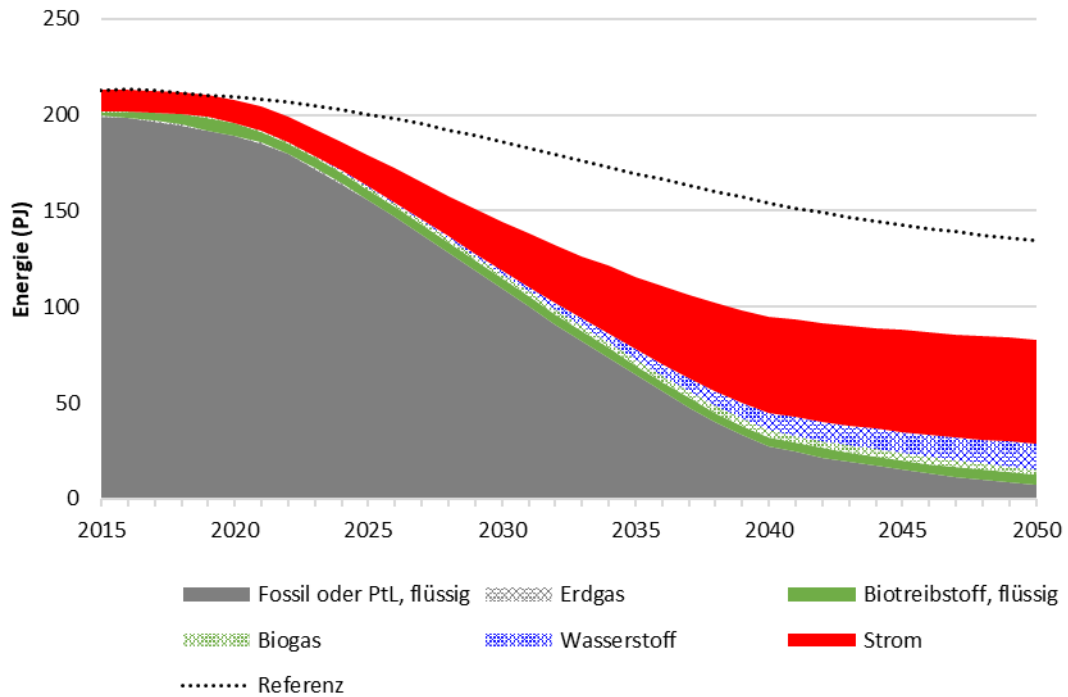
Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Berechnung.

C.3 Energiebedarf

Der Energiebedarf des landbasierten Verkehrs sinkt durch die Referenzentwicklung und die zusätzlichen Massnahmen in dieser Modellrechnung zwischen 2020 und 2050 um 60%. Zudem ist ein deutlicher Shift von fossilen Treibstoffen zu Strom (54.5 PJ in 2050) und Wasserstoff (13.2 PJ in 2050) zu beobachten. Das Potenzial an flüssigen Biotreibstoffe wird sehr rasch vollständig ausgenutzt. 2050 verbleibt eine Nachfrage nach 6.9 PJ flüssigen Kohlenwasserstoffen, die nicht durch Biotreibstoffe gedeckt werden kann. Das entspricht ungefähr 4% des fossilen Treibstoffbedarfs von 2020 oder 195 Mio. Liter Diesel-äquivalente. Knapp die Hälfte davon wird von PW verbraucht, rund ein Drittel von LKW und der Rest von den anderen Fahrzeugklassen (Abbildung 60).

Durch die gezielte Reduktion der Fahrleistung von konventionellen PW und LNF bis 2040 wird in dieser Modellrechnung auch der Bedarf an fossiler Energie (oder PtL) in 2040 deutlich tiefer als in der Rechnung «Fossilfrei, Basis». Statt rund 40 PJ wird in «Fossilfrei, Shift» 2040 nur 27.6 PJ an PtL benötigt, um alle fossilen Treibstoffe zu substituieren. Das entspricht etwa 780 Mio. Liter Diesel oder 15% des Bedarfs an fossilen Treibstoffen in 2020.

Abbildung 65: Entwicklung des Treibstoffbedarfs des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei, Shift»

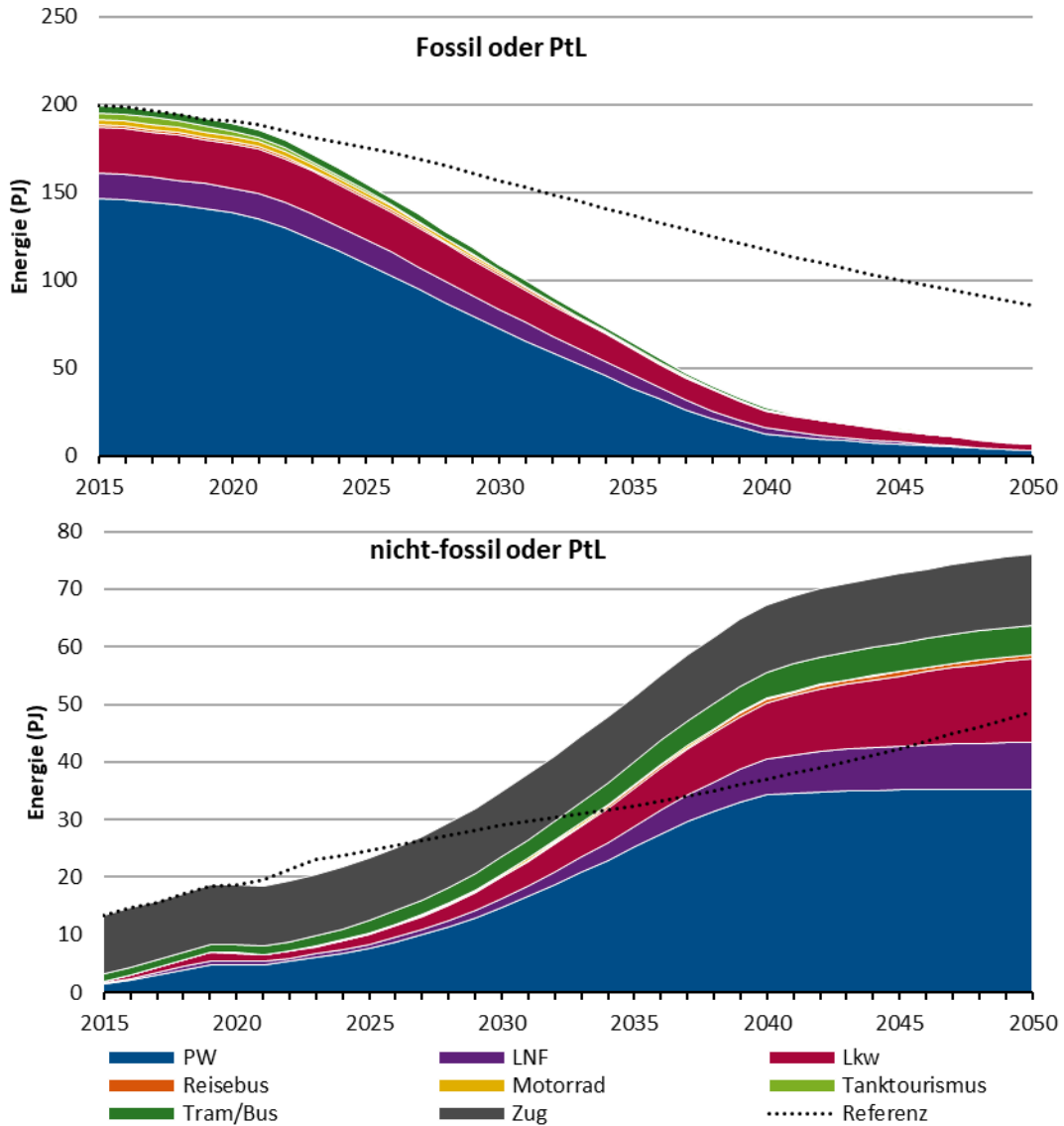


Fossilfreier Verkehr ist dann erreicht, wenn die graue Fläche «Fossil oder PtL, flüssig» null oder vollständig durch PtL gedeckt wird.

Grafik INFRAS.

Abbildung 60 zeigt auch, dass der Bedarf an fossilen oder PtL Treibstoffen in dieser Modellrechnung viel stärker zurückgeht als im Referenzszenario, während der Bedarf an fossilfreien Treibstoffen (exkl. PtL) deutlich höher liegt. Auch sieht man, dass gegenüber «Fossilfrei Basis» ab 2040 nur noch etwa halb so viel flüssige Kohlenwasserstoffe für PW und LNF benötigt werden

Abbildung 66: Entwicklung des Treibstoffbedarfs des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei, Shift»



Grafik INFRAS.

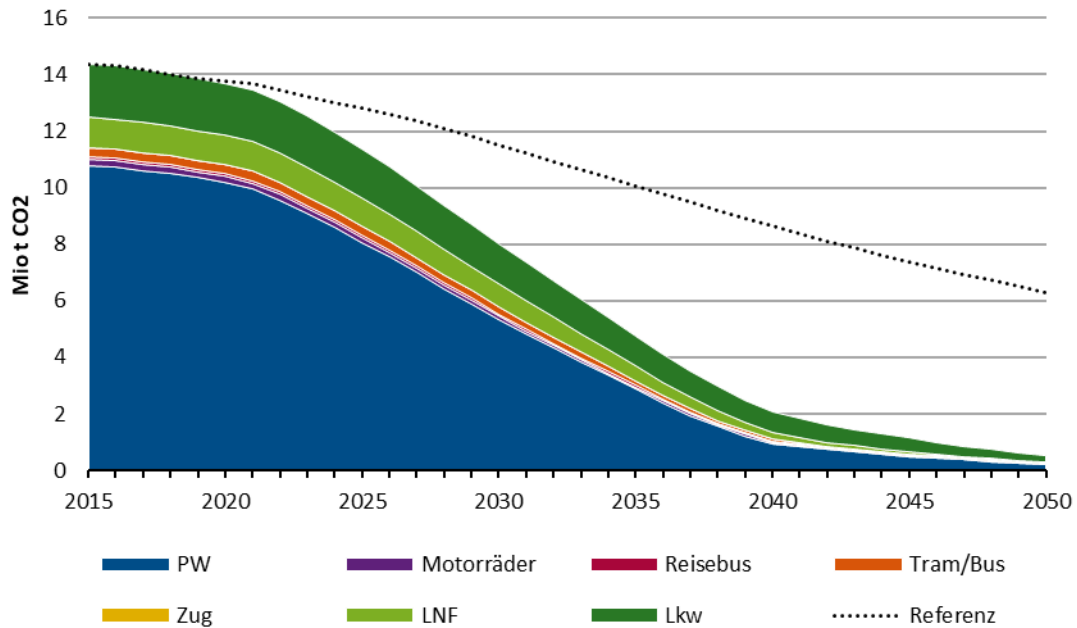
C.4 CO₂-Emissionen

Unter der Annahme, dass kein PtL eingesetzt würde, sinkt die CO₂-Emission des Verkehrs in der Modellrechnung «Fossilfrei, Basis» rasch und stark ab. 2050 würden noch 520'000 t CO₂ emittiert. In 2040 sind es noch 2.06 Mio. t CO₂. Sobald nur noch PtL eingesetzt wird, sinkt die CO₂-Emission des Verkehrs auf null.

Das THG Reduktionsziel der Schweiz bis 2030 liegt bei -50% gegenüber 1990. Dreiviertel davon sollen im Inland reduziert werden. Im Szenario «Fossilfrei, Basis» würde ohne Einsatz

von PtL bis 2030 im Verkehr eine Reduktion von 36% gegenüber 1990 erreicht, was das Ziel der Schweiz (37.5% über alle Sektoren) knapp verfehlen würde.

Abbildung 67: Entwicklung der CO₂-Emissionen des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei, Shift»



Unter Annahme, dass keine PtL eingesetzt werden. Bei vollständigem Ersatz von fossilen Treibstoffen durch PtL, würde die Emission auf 0 sinken.

Grafik INFRAS.

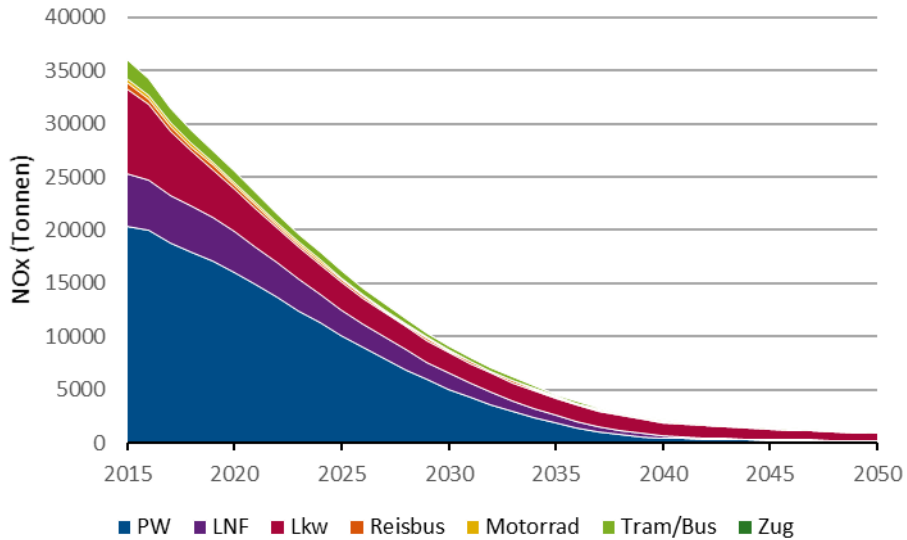
C.5 Luftschadstoffemissionen

Mit der Reduktion der konventionellen Fahrzeuge und deren Fahrleistung sinken die Stickoxidemissionen des Verkehrs noch etwas stärker als in «Fossilfrei, Basis» (Abbildung 68). Zu dieser Reduktion trägt ebenfalls bei, dass die älteren Fahrzeuge der heutigen Flotte, die teilweise sehr hohe spezifische NO_x-Emissionen pro km verursachen, kontinuierlich aus dem Verkehr gezogen und durch sauberere Fahrzeuge ersetzt werden.

Die Emission von Feinstaub (PM₁₀) geht ebenfalls etwas stärker zurück als im Referenzszenario, aber nicht im selben Ausmass wie die NO_x (Abbildung 69). Das hängt damit zusammen, dass Abrieb von Strasse, Reifen und Bremsen einen grossen Teil dieser Emission ausmachen und dass dieser Abrieb auch bei Elektrofahrzeugen relevant ist. Elektrofahrzeuge verursachen zwar weniger Bremsabrieb, weil sie statt mit Bremsscheiben mit dem Elektromotor bremsen können und dabei Energie zurückgewinnen. Dafür ist der Reifenabrieb tendenziell höher, weil beim Anfahren ein höheres Drehmoment zur Verfügung stellt und damit mehr Kraft auf die

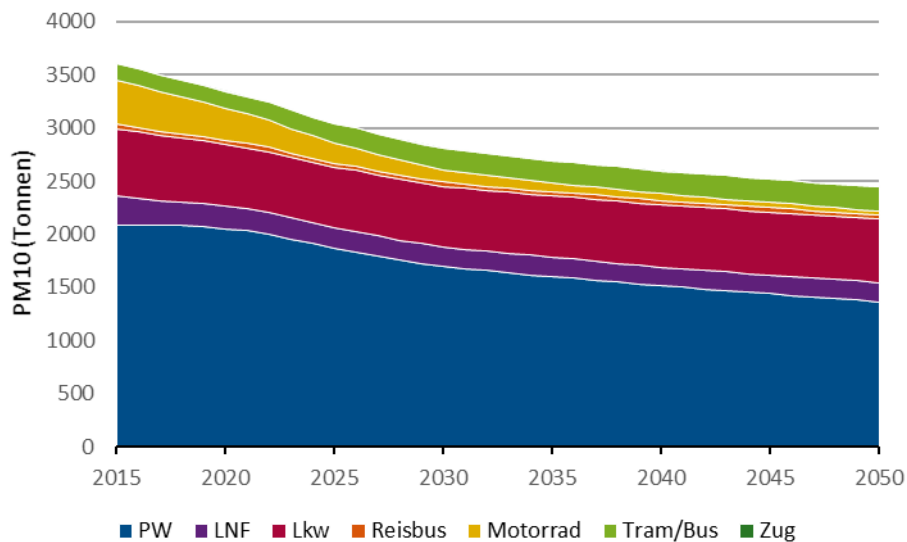
Strasse übertragen werden kann. Diese Effekte dürften sich etwa aufheben. Darum gehen wir für alle Antriebsoptionen von denselben Emissionen für den Antrieb aus.

Abbildung 68: Entwicklung der NO_x-Emissionen des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei, Shift»



Grafik INFRAS. Quelle: Eigene Rechnung.

Abbildung 69: Entwicklung der PM₁₀-Emissionen des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei, Shift»



Grafik INFRAS. Quelle: Eigene Rechnung.

D. Fossilfrei, MIV minimal

In dieser Modellrechnung werden die Massnahmen des Szenarios «Fossilfrei, Basis» operationalisiert. Allerdings wird eine noch stärkere Reduktion des PW-Verkehrs, angenommen. Zudem wird ab 2032, als Reaktion auf die weitere Verteuerung der fossilen Treibstoffe, die Fahrleistung pro Fahrzeug von PW und LNF mit Diesel- und Benzinmotoren noch stärker reduziert als in der Shift-Rechnung. Ab 2040 wird der Wert auf null gesetzt, womit faktisch alle konventionellen PW und LNF aus der Flotte (Bestand) fallen. Damit sind in dieser Modellrechnung Fahrleistung, insbesondere die mit konventionellen Fahrzeugen, auf ein Minimum reduziert, was der Modellrechnung ihren Namen gibt.

Diese Rechnung dient als Basis für die Szenarien «Fossilfrei 2040, MIV minimal» und «Fossilfrei 2030, MIV minimal».

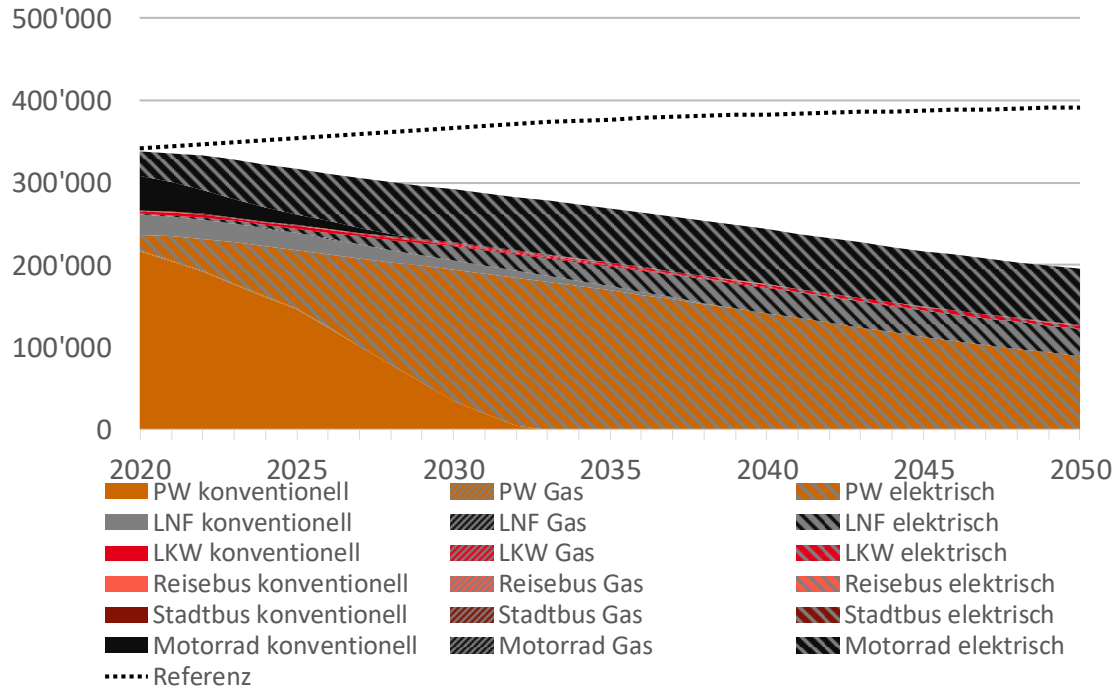
D.1 Technologie/Flottenmix

Abbildung 70 zeigt, dass sich aufgrund der Massnahmen die Anzahl Neufahrzeuge pro Jahr deutlich verringert. Der Wert für PW liegt 2050 etwa halb so hoch wie in der Modellrechnung «Fossilfrei, Basis». Dies ist eine Reaktion auf die Reduktion der Fahrleistungen. Die Abbildung zeigt auch, dass bei PW und LNF eine sehr rasche Elektrifizierung stattfindet. Die kurzfristige Elektrifizierungsrate kann nur so hoch sein, weil die Anzahl Neufahrzeuge pro Jahr zurückgeht. Grund dafür ist, dass die absolute Anzahl an BEV aufgrund der globalen Batterieproduktionskapazität beschränkt ist.

Ab 2033 kommen nur noch elektrifizierte PW in die Schweizer Flotte. Ab 2040 werden auch keine PHEV mehr dazu kommen. Bei LNF und LKW dauert es noch etwas länger, bis keine konventionellen Fahrzeuge mehr neu zugelassen werden.

Die Effizienzentwicklungen der Antriebstechnologien sind identisch mit der Variante «Fossilfrei, Basis». Weil die Anteile elektrischer Fahrzeuge etwas höher sind, sinkt die Neufahrzeugflottenmission noch ein bisschen rascher (Abbildung 72). Dies bewirkt auch Unterschiede bei den Fahrzeugbeständen und deren Entwicklungen in beiden Modellen (Abbildung 73). Der auffälligste Unterschied im Bestand kommt aber daher, dass mit der Reduktion der Fahrleistung von konventionellen PW und LNF auf null in 2040 (Abbildung 71) diese Fahrzeuge praktisch aus der inländischen Flotte fallen. Danach fahren nur noch konventionelle PW und Lieferwagen aus dem Ausland auf Schweizer Strassen.

Abbildung 70: Entwicklung der Anzahl Fahrzeuge in der Schweizer Neufahrzeugflotte in «Fossilfrei, MIV minimal»



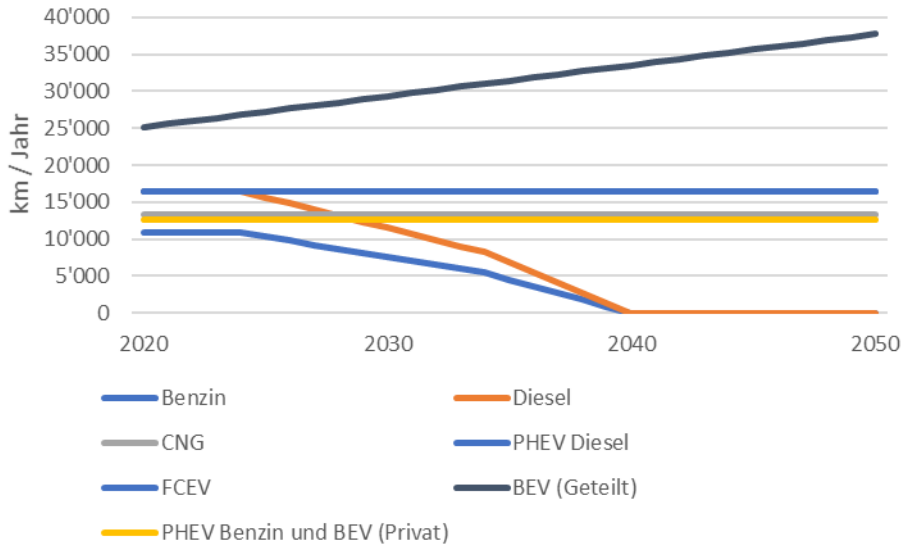
«konventionell» beinhaltet Benzin- und Dieselfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können.

«Gas» beinhaltet Erdgasfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können.

«elektrisch» beinhaltet Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge sowie Plug-in-Hybride

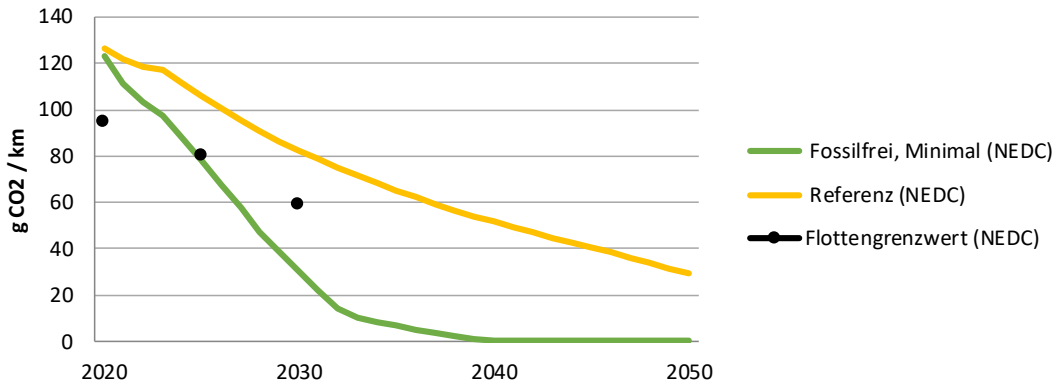
Grafik INFRAS.

Abbildung 71: Entwicklung der Fahrleistung pro Personenwagen in der Schweizer Flotte in «Fossilfrei, MIV minimal»



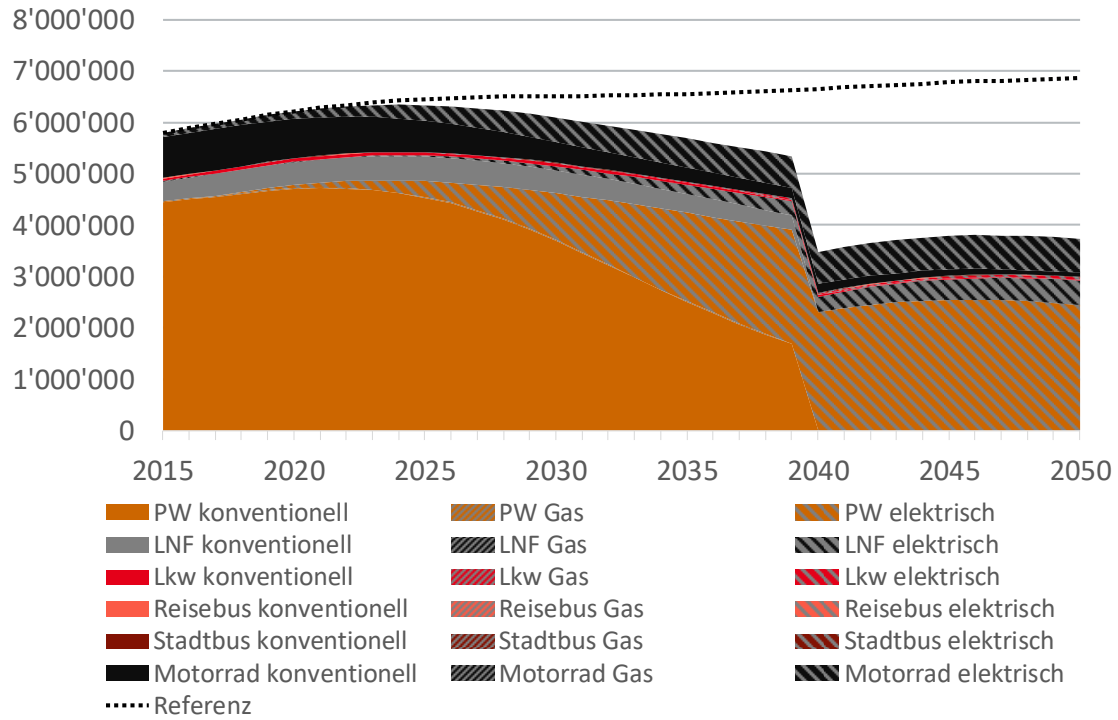
Grafik INFRAS.

Abbildung 72: Entwicklung der Durchschnittseffizienz der in der Schweizer Neufahrzeugflotte in «Fossilfrei, MIV minimal»



Grafik INFRAS.

Abbildung 73: Entwicklung der Anzahl Fahrzeuge in der Schweizer Flotte in «Fossilfrei, MIV minimal»



«konventionell» beinhaltet Benzin- und Dieselfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können.
 «Gas» beinhaltet Erdgasfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können.
 «elektrisch» beinhaltet Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge sowie Plug-in-Hybride.
 Der Einbruch der Flotte in 2040 kommt daher, dass ab 2040 konventionellen PW und LNF, die in der Schweiz zugelassen sind, nicht mehr fahren und darum (im Modell) aus der Flotte fallen.

Grafik INFRAS.

D.2 Verkehrsnachfrage

Die Verkehrsnachfrage (Tabelle 26) in dieser Modellrechnung ist bei PW gegenüber der «Referenz» und der Rechnung «Fossilfrei, Basis» deutlich tiefer (Tabelle 27 und Tabelle 28). Da zusätzlich die Fahrleistung pro Fahrzeug bei den konventionellen Fahrzeugen reduziert ist, wird der Anteil der entsprechenden Fahrleistung ebenfalls kleiner. Tabelle 29 und Tabelle 30 zeigen die absoluten und relativen Fahrleistungen mit konventionellen Fahrzeugen in der Modellrechnung «Fossilfrei, MIV minimal».

Die detaillierte Entwicklung der Verkehrsleistung (pkm, tkm) des Szenarios «Fossilfrei 2040, MIV minimal» ist im Kapitel 4.3.3 des Hauptteils dargestellt (sowie in Annex 3).

Tabelle 26: Fahrleistung (Fzkm) «Fossilfrei, MIV minimal», in Mia. Fzkm

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
PW	59.50	56.23	52.23	47.29	41.47	36.24	31.38
LNF	4.35	4.56	4.77	5.01	5.25	5.44	5.61
LKW	2.32	2.35	2.38	2.43	2.47	2.51	2.54
Reisebus	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
Stadtbus	0.30	0.33	0.35	0.36	0.37	0.37	0.38
Motorrad	2.02	1.94	1.83	1.87	1.89	1.91	1.93
Tram/Trolleybus	0.06	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09
Zug	0.24	0.27	0.30	0.31	0.33	0.35	0.37

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Berechnung.

Tabelle 27: Fahrleistung (Fzkm) «Fossilfrei, MIV minimal» im Vergleich zu «Referenz»

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
PW	100%	91%	82%	72%	63%	54%	47%
LNF	96%	94%	93%	92%	92%	91%	91%
LKW	101%	98%	95%	93%	91%	90%	89%
Reisebus	99%	93%	88%	86%	86%	86%	85%
Stadtbus	100%	103%	106%	105%	103%	102%	102%
Motorrad	99%	92%	84%	84%	83%	84%	84%
Tram/Trolleybus	101%	109%	116%	116%	116%	117%	119%
Zug	101%	105%	110%	114%	119%	124%	128%

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Berechnung.

Tabelle 28: Fahrleistung (Fzkm) «Fossilfrei, MIV minimal» im Vergleich zu «Fossilfrei, Basis»

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
PW	100%	101%	101%	96%	88%	81%	74%
LNF	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
LKW	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Reisebus	99%	94%	89%	88%	86%	84%	82%
Stadtbus	98%	94%	91%	90%	89%	88%	86%
Motorrad	100%	100%	101%	102%	104%	105%	107%
Tram/Trolleybus	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Zug	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Berechnung.

Tabelle 29: Fahrleistung (Fzkm) mit konventionellen Fahrzeugen in «Fossilfrei, MIV minimal», in Mia. Fzkm

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
PW	58.61	50.98	36.28	17.27	2.66	1.50	0.79
LNF	4.32	4.38	3.81	2.31	0.00	0.00	0.00
LKW	2.30	2.21	1.93	1.53	1.14	0.83	0.62
Reisebus	0.14	0.13	0.12	0.10	0.08	0.05	0.03
Stadtbus	0.29	0.27	0.22	0.14	0.08	0.04	0.02
Motorrad	1.88	1.49	0.98	0.67	0.48	0.35	0.24
Tram/Trolleybus	0	0	0	0	0	0	0
Zug	0	0	0	0	0	0	0

«konventionell» beinhaltet Benzin- und Dieselfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können. Als Treibstoffe für diese Fahrzeuge kommen prinzipiell fossile, biogene oder synthetische Kohlenwasserstoffe in Frage.

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Berechnung.

Tabelle 30: Anteil der Fahrleistung (Fzkm) mit konventionellen Fahrzeugen in «Fossilfrei, MIV minimal»

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
PW	99%	91%	69%	37%	6%	4%	3%
LNF	99%	96%	80%	46%	0%	0%	0%
LKW	99%	94%	81%	63%	46%	33%	25%
Reisebus	100%	98%	90%	76%	58%	40%	24%
Stadtbus	96%	84%	62%	40%	21%	10%	4%
Motorrad	93%	77%	53%	36%	26%	18%	12%
Tram/Trolleybus	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Zug	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

«konventionell» beinhaltet Benzin- und Dieselfahrzeuge inkl. Hybride, die nicht am Stromnetz geladen werden können. Als Treibstoffe für diese Fahrzeuge kommen prinzipiell fossile, biogene oder synthetische Kohlenwasserstoffe in Frage.

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Berechnung.

D.3 Energiebedarf

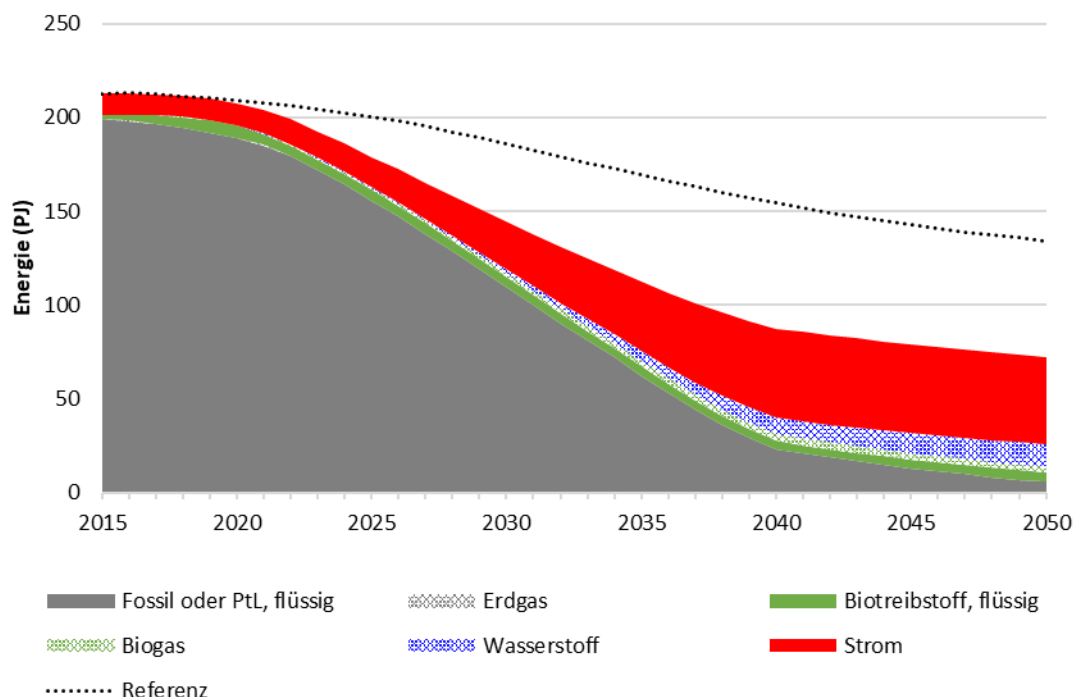
Der Energiebedarf des landbasierten Verkehrs sinkt in dieser Modellrechnung zwischen 2020 und 2050 um 75%. 2040 beträgt die Reduktion bereits 58%. Zudem ist ein deutlicher Shift von fossilen Treibstoffen zu Strom (46.6 PJ in 2050, 47.6 in 2040) und Wasserstoff (12.0 PJ in 2050, 8.7 in 2040) zu beobachten. Das Potenzial an flüssigen Biotreibstoffe wird sehr rasch vollständig ausgenutzt. 2050 verbleibt eine Nachfrage nach 5.6 PJ, die nicht durch Biotreibstoffe gedeckt werden kann. Das entspricht 2050 ungefähr 3% des fossilen Treibstoffbedarfs von 2020 oder 159 Mio. Liter Diesel. Knapp die Hälfte davon wird von LKW verbraucht, rund 40% von PW und der Rest von den anderen Fahrzeugklassen (Abbildung 75).

Durch die generelle und gezielte Reduktion der Fahrleistung von konventionellen PW und LNF bis 2040 wird in dieser Modellrechnung auch der Bedarf an fossiler Energie (oder PtL) in 2040 deutlich tiefer als in der Rechnung «Fossilfrei, Basis». Statt rund 40 PJ wird in «Fossilfrei, MIV minimal» 2040 nur 23.1 PJ¹¹ an PtL benötigt, um alle fossilen Treibstoffe zu substituieren. Das entspricht etwa 650 Mio. Liter Diesel oder 12% des Bedarfs an fossilen Treibstoffen in 2020.

Abbildung 75 zeigt auch, dass der Bedarf an fossilen oder PtL Treibstoffen in dieser Modellrechnung viel stärker zurückgeht als im Referenzszenario, während der Bedarf an fossilfreien Treibstoffen (exkl. PtL) deutlich höher liegt. Auch sieht man, dass gegenüber «Fossilfrei Basis» ab 2040 nur noch etwa halb so viel flüssige Kohlenwasserstoffe für PW und LNF benötigt werden

Auffällig ist, dass nach 2040 der Bedarf an fossilen oder synthetischen Treibstoffen für PW nicht auf null geht, obwohl in der Modellrechnung eine Reduktion der Fahrleistung auf 0 angesetzt wird. Grund für diesen scheinbaren Widerspruch liegt darin, dass auch nach 2040 noch konventionelle PW aus dem Ausland auf Schweizer Strassen unterwegs sein werden.

Abbildung 74: Entwicklung des Treibstoffbedarfs des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei, MIV minimal»

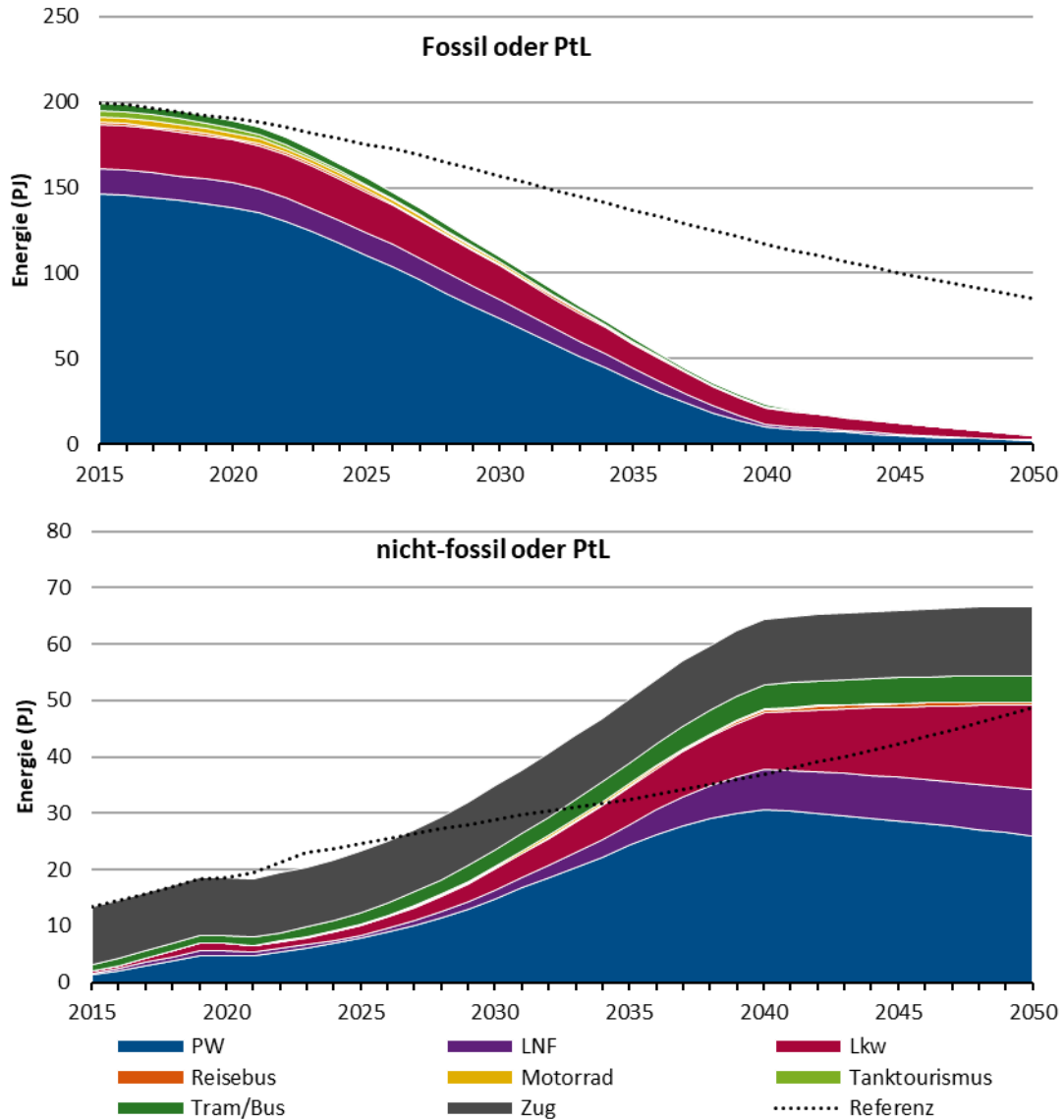


Fossilfreier Verkehr ist dann erreicht, wenn die graue Fläche «Fossil oder PtL, flüssig» null oder vollständig durch PtL gedeckt wird.

Grafik INFRAS.

¹¹ in «Fossilfrei, Shift» waren es 27.6 PJ

Abbildung 75: Entwicklung des Treibstoffbedarfs des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei, MIV minimal»



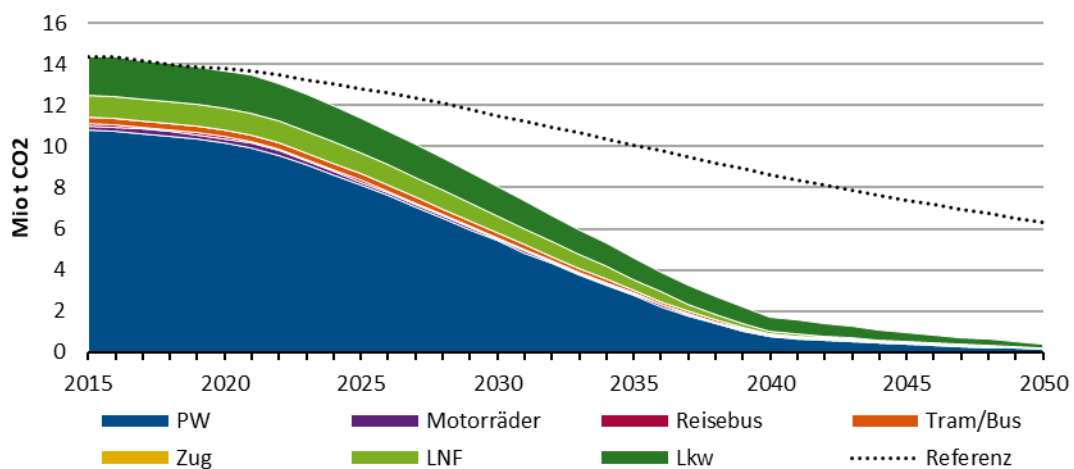
Grafik INFRAS.

D.4 CO₂-Emissionen

Unter der Annahme, dass kein PtL eingesetzt würde, sinkt die CO₂-Emission des Verkehrs in der Modellrechnung «Fossilfrei, MIV minimal» rasch und stark ab. 2050 würden noch 420'000 t CO₂ emittiert. In 2040 sind es noch 1.73 Mio. t CO₂. Sobald nur noch PtL eingesetzt wird, sinkt die CO₂-Emission des Verkehrs auf null.

Das THG Reduktionsziel der Schweiz bis 2030 liegt bei -50% gegenüber 1990. Dreiviertel davon sollen im Inland reduziert werden. Im Szenario «Fossilfrei, Basis» würde ohne Einsatz von PtL bis 2030 im Verkehr eine Reduktion von 36% gegenüber 1990 erreicht, was das Ziel der Schweiz (37.5% über alle Sektoren) knapp verfehlen würde.

Abbildung 76: Entwicklung der CO₂-Emissionen des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei, MIV minimal»



Unter Annahme, dass keine PtL eingesetzt werden. Bei vollständigem Ersatz von fossilen Treibstoffen durch PtL, würde die Emission auf 0 sinken.

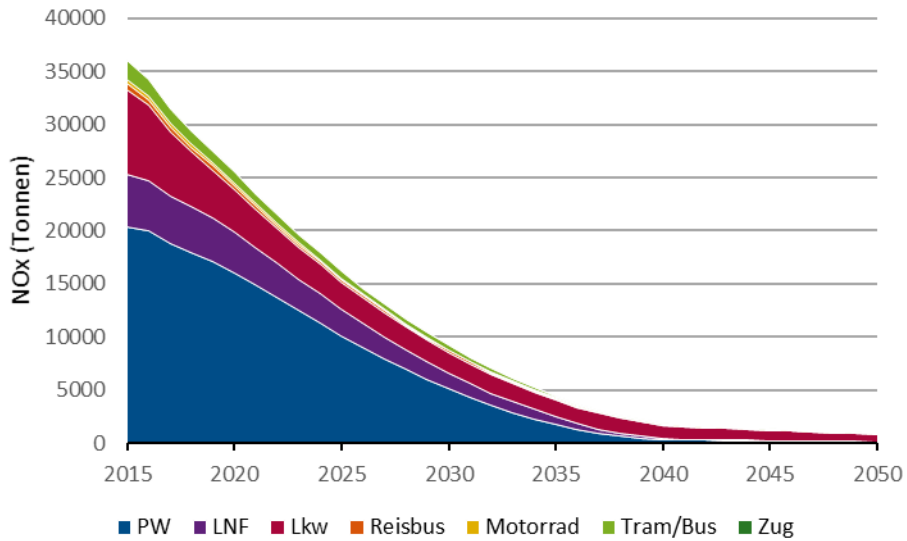
Grafik INFRAS.

D.5 Luftschadstoffemissionen

Mit der Reduktion der konventionellen Fahrzeuge und deren Fahrleistung sinken die Stickoxidemissionen des Verkehrs noch etwas stärker als in «Fossilfrei, Basis» (Abbildung 77). Zu dieser Reduktion trägt ebenfalls bei, dass die älteren Fahrzeuge der heutigen Flotte, die teilweise sehr hohe spezifische NO_x-Emissionen pro km verursachen, kontinuierlich aus dem Verkehr gezogen und durch sauberere Fahrzeuge ersetzt werden.

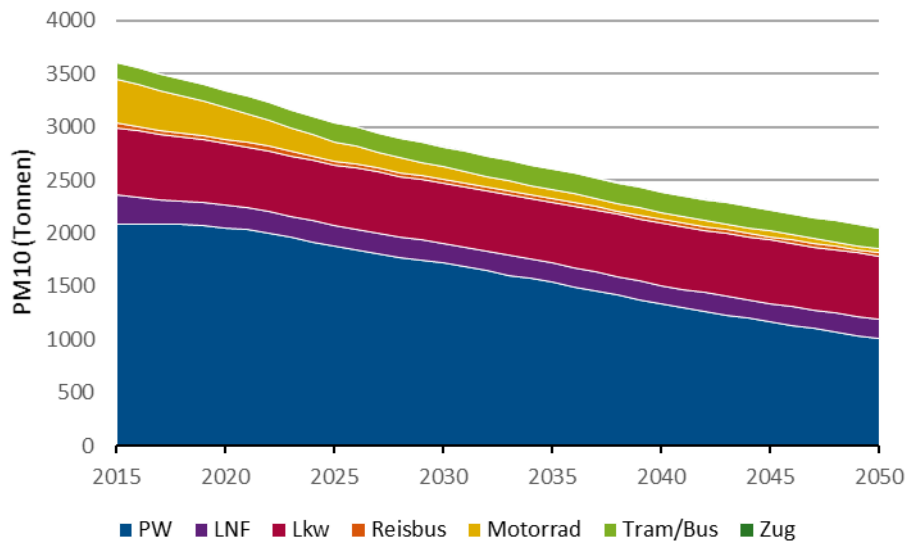
Die Emission von Feinstaub (PM10) geht ebenfalls etwas stärker zurück als im Referenzszenario, aber nicht im selben Ausmass wie die NO_x (Abbildung 78). Das hängt damit zusammen, dass Abrieb von Strasse, Reifen und Bremsen einen grossen Teil dieser Emission ausmachen und dass dieser Abrieb auch bei Elektrofahrzeugen relevant ist. Elektrofahrzeuge verursachen zwar weniger Bremsabrieb, weil sie statt mit Bremsscheiben mit dem Elektromotor bremsen können und dabei Energie zurückgewinnen. Dafür ist der Reifenabrieb tendenziell höher, weil beim Anfahren ein höheres Drehmoment zur Verfügung stellt und damit mehr Kraft auf die Strasse übertragen werden kann.

Abbildung 77: Entwicklung der NO_x-Emissionen des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei, MIV minimal»



Grafik INFRAS. Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 78: Entwicklung der PM₁₀-Emissionen des Verkehrs in der Schweiz in «Fossilfrei, MIV minimal»



Grafik INFRAS. Quelle: Eigene Berechnungen.

Annex 3: Detaillerggebnisse Verkehrsnachfrage

Referenzszenario

Tabelle 31: Verkehrsnachfrage Referenzszenario

	2020	2030	2040	2050
Personenverkehr (in Mio. pkm)				
PW	97'210	103'820	107'840	109'480
Cars	2'920	3'120	3'240	3'290
Motorräder/Mofa	2'190	2'340	2'430	2'470
<i>MIV total</i>	<i>102'320</i>	<i>109'280</i>	<i>113'510</i>	<i>115'230</i>
Bahn	22'130	25'290	27'220	28'450
ÖV Strasse*	4'750	5'340	5'740	5'9550
<i>ÖV Total</i>	<i>26'880</i>	<i>30'630</i>	<i>32'960</i>	<i>34'400</i>
<i>Fuss- und Veloverkehr**</i>	<i>8'280</i>	<i>9'210</i>	<i>9'830</i>	<i>10'110</i>
Personenverkehr total	137'480	149'120	156'300	159'740
Güterverkehr (in Mio. tkm)				
LKW	16'790	18'340	19'920	21'130
Lieferwagen (LNF)	980	1'110	1'240	1'350
<i>Strassengüterverkehr total</i>	<i>17'770</i>	<i>19'460</i>	<i>21'160</i>	<i>22'480</i>
<i>Schienengüterverkehr</i>	<i>11'280</i>	<i>13'700</i>	<i>14'110</i>	<i>14'690</i>
Güterverkehr total	29'050	33'160	35'270	37'170

* ÖV Strasse = Busse, Tram, Trolley. ** inkl. E-Bikes.

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Berechnungen, basierend auf eigenem, aggregierten Modell Verkehrsnachfrage, das abgestützt ist auf ARE 2016 (Referenz), ARE/BFS 2017, ARE/BFS 2017b und BFS 2020a (für Details vgl. Kapitel 2.2.4).
Werte auf 10 Mio. pkm bzw. tkm gerundet.

Basisszenario «Fossilfrei 2050»

Tabelle 32: Verkehrsnachfrage «Fossilfrei 2050» (Basisszenario)

	2020	2030	2040	2050
Personenverkehr (in Mio. pkm)				
PW	96'980	83'920	76'620	69'290
Cars	2'920	3'070	3'230	3'380
Motorräder/Mofa	2'180	1'950	1'960	1'940
<i>MIV total</i>	<i>102'080</i>	<i>88'950</i>	<i>81'810</i>	<i>74'610</i>
Bahn	22'330	28'800	33'740	38'750
ÖV Strasse*	4'810	6'210	6'630	7'080
<i>ÖV Total</i>	<i>27'140</i>	<i>35'010</i>	<i>40'370</i>	<i>45'830</i>
<i>Fuss- und Veloverkehr**</i>	<i>8'700</i>	<i>10'120</i>	<i>11'320</i>	<i>12'420</i>
Personenverkehr total	137'920	134'090	133'500	132'850
Güterverkehr (in Mio. tkm)				
LKW	16'790	17'470	18'200	18'770
Lieferwagen (LNF)	940	1'030	1'140	1'220
<i>Strassengüterverkehr total</i>	<i>17'730</i>	<i>18'500</i>	<i>19'340</i>	<i>19'990</i>
<i>Schienengüterverkehr</i>	<i>11'320</i>	<i>12'930</i>	<i>14'250</i>	<i>15'250</i>
Güterverkehr total	29'050	31'430	33'580	35'240

* ÖV Strasse = Busse, Tram, Trolley. ** inkl. E-Bikes.

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Berechnungen, basierend auf eigenem, aggregierten Modell Verkehrsnachfrage, das abgestützt ist auf ARE 2016 (Referenz), ARE/BFS 2017, ARE/BFS 2017b und BFS 2020a (für Details vgl. Kapitel 2.2.4).
Werte auf 10 Mio. pkm bzw. tkm gerundet.

Szenario «Fossilfrei MIV Minimal»

(«Fossilfrei 2040, MIV minimal» und «Fossilfrei 2030, MIV minimal»)

Tabelle 33: Verkehrsnachfrage «MIV Minimal»

	2020	2030	2040	2050
Personenverkehr (in Mio. pkm)				
PW	96'980	85'130	67'600	51'180
Cars	2'890	2'750	2'780	2'780
Motorräder/Mofa	2'180	1'970	2'030	2'080
<i>MIV total</i>	<i>102'060</i>	<i>89'850</i>	<i>72'410</i>	<i>56'040</i>
Bahn	22'330	28'810	33'740	38'750
ÖV Strasse*	4'760	5'880	6'190	6'480
<i>ÖV Total</i>	<i>27'090</i>	<i>34'690</i>	<i>39'930</i>	<i>45'230</i>
<i>Fuss- und Veloverkehr**</i>	<i>8'460</i>	<i>10'340</i>	<i>12'560</i>	<i>13'960</i>
Personenverkehr total	137'610	134'880	124'900	115'220
Güterverkehr (in Mio. tkm)				
LKW	16'790	17'470	18'200	18'770
Lieferwagen (LNF)	940	1'030	1'140	1'220
<i>Strassengüterverkehr total</i>	<i>17'730</i>	<i>18'500</i>	<i>19'340</i>	<i>19'990</i>
<i>Schienengüterverkehr</i>	<i>11'320</i>	<i>12'930</i>	<i>14'250</i>	<i>15'250</i>
Güterverkehr total	29'050	31'430	33'580	35'240

* ÖV Strasse = Busse, Tram, Trolley. ** inkl. E-Bikes.

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Berechnungen, basierend auf eigenem, aggregierten Modell Verkehrsnachfrage, das abgestützt ist auf ARE 2016 (Referenz), ARE/BFS 2017, ARE/BFS 2017b und BFS 2020a (für Details vgl. Kapitel 2.2.4). Werte auf 10 Mio. pkm bzw. tkm gerundet.

Literatur

- AFV 2020:** Agglomerationsprogramm Stadt Zürich – Glattal, 4. Generation, Version für öffentliche Mitwirkung, Amt für Verkehr des Kantons Zürich, Zürich, 2020.
- AIREG 2020:** Roadmap zur Entwicklung und Einführung nachhaltiger Flugkraftstoffe. Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany e.V. (aireg), April 2020 (https://aireg.de/wp-content/uploads/2020/04/200418_aireg_roadmap_deutsch.pdf)
- ARE 2016:** Perspektiven des Schweizerischen Personen- und Güterverkehrs bis 2040; Projektion 2050. Bundesamt für Raumentwicklung ARE, Bern, Sept. 2016
- BAFU 2020:** Treibhausgasinventar der Schweiz, Daten 2020: Emissionen von Treibhausgasen nach revidiertem CO₂-Gesetz und Kyoto-Protokoll, 2. Verpflichtungsperiode (2013–2020), Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2020.
- BAFU 2020b:** Ausgestaltung und Verteilungswirkung einer CO₂-Lenkungsabgabe auf fossile Treibstoffe oder Kontingentierung; INFRAS im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU, in Arbeit / unveröffentlicht (Veröffentlichung 2021), Zürich/Bern.
- Basler & Hoffmann 2019:** Winterstrom Schweiz; Was kann die heimische Photovoltaik beitragen? Basler & Hoffmann, Zürich, 2019.
- Benchmark mineral Intelligence 2019:** Written Testimony of Simon Moores, Managing Director, Benchmark Mineral Intelligence. Outlook for energy and minerals markets in the 116th Congress. For US senate Committee on Energy and Natural Resources Committee, February 5 2019. https://www.energy.senate.gov/public/index.cfm/files/serve?File_id=9BAC3577-C7A4-4D6D-A5AA-33ACDB97C233
- BFE 2019a:** Wasserkraftpotenzial der Schweiz. Abschätzung des Aufbaupotenzials der Wasserkraftnutzung im Rahmen der Energiestrategie 2050. Bundesamt für Energie, 2019 <https://www.news.admin.ch/newsd/message/attachments/58259.pdf> (letzter Aufruf: 28.10.2020).
- BFE 2019b:** Schweizer Hausdächer und -fassaden könnten jährlich 67 TWh Solarstrom produzieren, Medienmitteilung des Bundesamtes für Energie BFE, Bern, <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/news-und-medien/medienmitteilungen/mm-test.msg-id-74641.html> (letzter Aufruf: 28.10.2020).
- BFE 2020:** Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2019, Bundesamt für Energie, Bern, 2020.
- BFS 2019:** Kosten und Finanzierung des Verkehrs 2015 (KFV-Statistik 2015), Bundesamt für Statistik BFS, Neuchâtel, 2019.
- BFS 2020a:** Leistungen im Personenverkehr, Bundesamt für Statistik BFS, Neuchâtel, 2020.
- BFS 2020b:** Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung der Schweiz und der Kantone 2020–2050, Neuchâtel, 2020.

- BFS/ARE 2017:** Verkehrsverhalten der Bevölkerung – Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015, Bundesamt für Statistik BFS und Bundesamt für Raumentwicklung ARE, Neuchâtel/Bern, 2017.
- BFS/ARE 2017b:** Mikrozensus Mobilität und Verkehr (MZMV) 2015, Einzeldaten, Bundesamt für Statistik BFS und Bundesamt für Raumentwicklung ARE, Neuchâtel/Bern, 2017.
- BloombergNEF 2020:** Electric Vehicle Outlook 2020, BloombergNEF.
<https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/> (letzter Aufruf: 28.10.2020).
- EBP, HSLU, KOF ETHZ 2014:** Auswirkungen neuer Arbeitsformen auf den Energieverbrauch und das Mobilitätsverhalten von Arbeitnehmenden. Bundesamt für Energie, Bern.
- Econcept 2018:** Überprüfung der Schweizer Klimaziele nach dem 1.5-Grad-Bericht des Weltklimarats, Econcept im Auftrag von Swisscleantech, Zürich, 2018.
- Ecoplan 2015:** Verkehrsinfrastrukturen smarter nutzen dank flexibler Arbeitsformen. Entlastungspotentiale für die Hauptverkehrszeiten am Beispiel der Region Bern. Schweizerische Bundesbahnen SBB, Amt für öffentlichen Verkehr und Verkehrskoordination des Kantons Bern (AÖV), Schweizerische Post und Swisscom, Bern.
- European Commission 2020:** A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe. European Commission 2020, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/865942/EU_Hydrogen_Strategy.pdf (letzter Aufruf: 28.10.2020).
- INFRAS 2016:** Brechen der Verkehrsspitzen, im Auftrag der Metropolitankonferenz Zürich, Zürich, November 2016.
- FehrAdvice 2016:** Gemeinsame Hebel und Wege zur Optimierung der Auslastung im öffentlichen Verkehr: Eine Verhaltensökonomische Studie. Schweizer Bundesbahnen SBB, Konferenz der kantonalen Direktoren des öffentlichen Verkehrs KÖV, Verband öffentlicher Verkehr VöV, Zürich.
- Fraile et al. 2015:** Fraile, D., Lanoix, J-C., Maio, P., Rangel, P., Torres, A. Overview of the market segmentation for hydrogen across potential customer groups, based on key application areas. Deliverable 1.2 of CertyfHy, June 2015,
http://www.certifyhy.eu/images/D1_2_Overview_of_the_market_segmentation_Final_22_June_low-res.pdf (letzter Aufruf: 28.10.2020).
- INFRAS 2020a:** Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (HBEFA) Version 4.1.
<https://www.hbefa.net/d/>
- INFRAS 2020b:** Abschätzung des Einsatz- und CO₂-Reduktionspotenzials durch Busse mit nicht fossilen Antriebstechnologien und Fördermöglichkeiten, INFRAS im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Zürich, 2020.
- INFRAS/ifeu 2018:** Beitrag des Güterverkehrs zur Erreichung der Schweizer Klimaziele, INFRAS und ifeu im Auftrag des Bundesamtes für Verkehr BAV, Bern/Heidelberg, 2018.

- INFRAS/Quantis 2020:** Netto-Null Treibhausgasemissionen Stadt Zürich, Grundlagenbericht, INFRAS und Quantis im Auftrag der Stadt Zürich, Zürich, 2020.
- Interface 2013:** Evaluation Mobility – Kundenprofil, Nutzungs- und Mobilitätsverhalten, Energie- und CO₂-Bilanz und Potenzialanalyse, Luzern, 2013.
- Interface 2015:** Verkehrsspitzen glätten dank späterem Schulbeginn. Amt für öffentlichen Verkehr und Verkehrskoordination, Bern.
- IWSB / KIT / SNZ 2016:** Zeitliche Homogenisierung der Verkehrsbelastung – Brechen von Spitzen, Forschungsprojekt SVI 2013/001 auf Antrag der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI), Bern, Oktober 2016.
- Öko-Institut 2019:** Die Bedeutung strombasierter Stoffe für den Klimaschutz in Deutschland. Zusammenfassung und Einordnung des Wissenstands zur Herstellung und Nutzung strombasierter Energieträger und Grundstoffe. Öko-Institut, Freiburg i.Brg., 2019.
- Metetest 2017:** Solarpotenzial Schweiz – Solarwärme und PV auf Dächern und Fassaden, Metetest (René Cattin und Beat Schaffner), Zürich, 2017.
- Swiss Economics / HSLU 2018:** Sharing Economy und der Verkehr in der Schweiz, SVI 2014/007, 2018.
- Prognos, TEP, INFRAS 2019:** Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000-2018. Prognos, TEP, INFRAS im Auftrag des Bundesamtes für Energie BFE, Bern/Zürich, 2019.
- PSI 2017:** Potenziale, Kosten und Umweltauswirkungen von Stromproduktionsanlagen, Christian Bauer und Stefan Hirschberg, PSI – Paul Scherrer Institut im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Villigen/Bern, 2017.
- PTV Swiss AG, ETH Zürich, Rundum mobil AG 2011:** Potenzial von Fahrgemeinschaften. Forschungsauftrag ASTRA 2008/2017, Bundesamt für Strassen, Bern.
- SBB 2019:** Mobilitätsszenarien für die Schweiz – Überlegungen der SBB AG; Langfristige, integrierte Mobilitäts- und Arealentwicklungen; SBB, Bern, Juni 2019.
- Stadt Zürich 2019:** «Stadtverkehr 2025 – Bericht 2018», Stadt Zürich, Tiefbauamt, Zürich, Juli 2019.
- Stadt Zürich 2020:** Stadtverkehr 2025 – Zürich macht vorwärts, <https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/stadtverkehr2025.html> (letzter Zugriff am 02.10.2020).
- T&E 2019:** Less (cars) is more: how to go from new to sustainable mobility, Transport & Environment, Brüssel, 2019.
- UBA 2016a:** Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050; ifeu, INFRAS und LBST im Auftrag des Umweltbundesamtes UBA, Heidelberg/Bern/München, 2016.
- UBA 2016b:** Finanzierung einer nachhaltigen Güterverkehrsinfrastruktur, INFRAS und Fraunhofer-ISI im Auftrag des Umweltbundesamtes UBA, Zürich/Karlsruhe, 2016.

UBA 2019: Kein Grund zur Lücke – So erreicht Deutschland seine Klimaschutzziele im Verkehrssektor für das Jahr 2030, Umweltbundesamt UBA, Dessau, 2019.

VCS 2018: Verkehr ohne fossile Treibstoffe – für einen umwelt- und menschengerechten Verkehr, Verkehrs-Club der Schweiz VCS, Bern, 2018.

VSE 2020: Strom aus Biomasse, Basiswissen-Dokument VSE Stand März 2020, Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen VSE, Online verfügbares Dokument:

<https://www.strom.ch/de/dokument/strom-aus-biomasse-0> (letzter Aufruf: 28.10.2020).

Wehrli-Schindler 2012: Flexibel arbeiten und Home-Office für weniger Pendlerverkehr: Ergebnisse eines Pilotprojektes bei Credit Suisse und Swiss Re in Zürich im Rahmen des Projektes „Zukunft urbane Mobilität“. Zukunft urbane Mobilität. Zürich