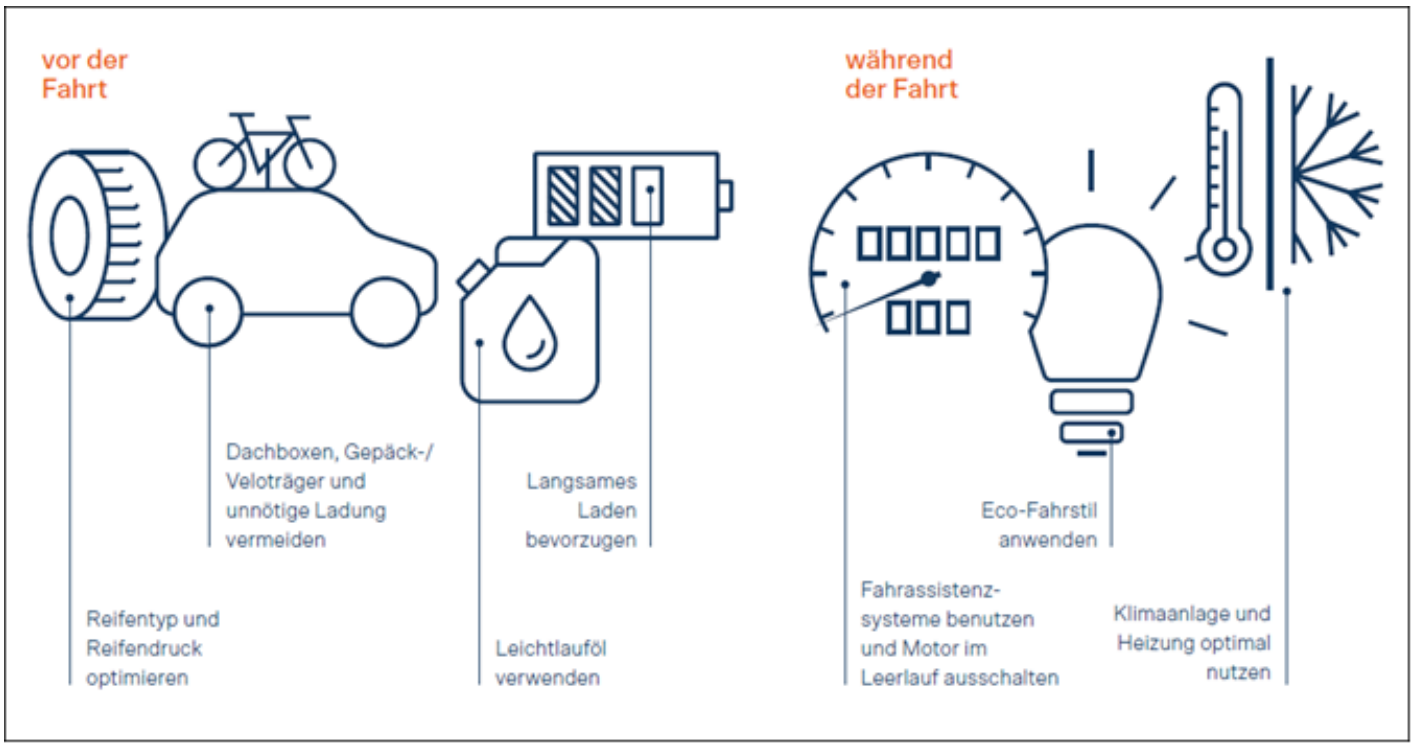
Schlussbericht
20. Februar 2024

Analyse des Energiesparpotentials durch effizientes Fahren



EnergieSchweiz
Bundesamt für Energie BFE

Pulverstrasse 13
CH-3063 Ittigen

Postadresse:
CH-3003 Bern

Infoline 0848 444 444
energieschweiz.ch

Auftraggeber
Bundesamt für Energie, Sektion Mobilität, Jean-Marc Geiser

Begleitgruppe
Jean-Marc Geiser, Bundesamt für Energie (BFE)
Anton Keller, Bundesamt für Strassen (ASTRA)
Reiner Langendorf, Quality Alliance Eco-Drive (QAED)

Projektteam

EBP	Dr. Peter de Haan	044 395 11 14	peter.dehaan@ebp.ch
	Noa Spörri	044 395 11 93	noa.spoerri@ebp.ch
	Alessio Mina	044 395 13 30	alessio.mina@ebp.ch
Empa	Dr. Miriam Elser	058 765 47 74	miriam.elser@empa.ch
	Dr. Betsy Sandoval Guzman	058 765 45 01	betsy.sandovalguzman@empa.ch

EBP Schweiz AG
Ressourcen, Energie + Klima
Mühlebachstrasse 11
8032 Zürich
Telefon +41 44 395 16 16
www.ebp.ch

Empa
Fahrzeugantriebssysteme
Überlandstrasse 129
8600 Dübendorf
Tel. 058 765 11 11
www.empa.ch

Zwischenbericht_EcoDrive_Versandversion_V4.docx

Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung	6
2.	Ausgangslage, Auftrag und Ziele	8
3.	Zwischen offiziellem Normverbrauch und dem Realverbrauch: Energie einsparen dank effizienter Fahrweise	9
	3.1 Optimale Ausrüstung, optimaler Betrieb, optimale Fahrweise	9
	3.2 Definition von Norm-, Minimal-, Real- und Optimalverbrauch	9
4.	Massnahmen für umweltbewusstes Fahren	11
	4.1 Klassische Massnahmen für umweltbewusstes Fahren	11
	4.1.1 Reifentyp und -druck	11
	4.1.2 Entfernung von Dachboxen, Dach-/Fahrradträgern, Anhängern und unnötigen Zusatzlasten	14
	4.1.3 Verwendung von Leichtlauföl	15
	4.1.4 Verringerung des Einsatzes von Nebenaggregaten	18
	4.1.5 Eco-Fahrstil	22
	4.2 Moderne Massnahmen für umweltbewusstes Fahren	23
	4.2.1 Fahrerassistenzsysteme (FAS)	23
	4.2.2 Regeneratives Bremsen	28
	4.2.3 Langsames Laden von BEVs	29
	4.3 Künftige Massnahmen für umweltbewusstes Fahren	33
	4.3.1 Auf maschinellem Lernen basierende Eco-Fahrassistenzsysteme (ML-Eco-FAS)	34
5.	Konfiguration, Wartung und Ausrüstung der Fahrzeugflotte	38
	5.1 Reifentyp und –druck	38
	5.2 Dachboxen, Dach-/Fahrradträgern, Anhängern und unnötigen Zusatzlasten	41
	5.3 Verwendung von Leichtlauföl	41
	5.4 Verwendung von Nebenaggregaten	41
	5.5 Marktdurchdringung der relevanten FAS	43
6.	Schlüsselvariablen für die Bewertung der Energieeinsparungen	46
	6.1 Massnahmen für umweltbewusstes Fahren	46
	6.2 Fahrbedingungen	48
	6.3 Fahrzeugtypen	50
7.	Modellierungsansatz	55

7.1 uCARe-PHEM Tool 55
7.2 Schätzung des Einsparpotenzials von FAS 60
7.2.1 Energiesparpotenzial von FAS für PKWs/LNFs 60
7.2.2 Energiesparpotenzial von FAS für LKWs/Busse 62
7.3 Schätzung des Einsparpotenzials von regenerativem Bremsen 64
7.4 Erforderliche Modellentwicklungen 65
7.5 Simulations-Matrix 65

8. Simulationsergebnisse: Energiesparpotenzial für einzelne Fahrzeugklassen und Fahrsituationen 69
8.1 Nomenklatur 69
8.2 Tempomat-Simulation 69
8.3 Energiesparpotenzial einzelner Massnahmen 70
8.4 Energiesparpotenzial kombinierter Massnahmen 78

9. Methode für die Hochrechnung der Einsparpotenziale für die ganze Fahrzeugflotte 90
9.1 Definition der Hochrechnung 90
9.2 Gewichtung der Jahreszeiten Sommer und Winter 91
9.3 Gewichtung Fahrzeugkategorien 91
9.4 Gewichtung Antriebstechnologien 92
9.5 Gewichtung Grössen- und Euroklasse 94
9.6 Gewichtung Fahrzyklus 94
9.7 Skalierung für die Einsatzverhältnisse 95
9.8 Hochrechnung der Emissionen-Einsparpotenzial 97

10. Einsparpotenzial im schweizerischen Fuhrpark 99
10.1 Theoretisches Einsparpotenzial nach Antriebstechnologie 99
10.2 Theoretisches Einsparpotenzial nach Fahrzeugkategorie 101
10.3 Gesamtes theoretisches Einsparpotenzial für den Energiebedarf des Strassenverkehrs 102
10.4 Emissionen-Einsparpotenzial 103
10.5 Absolutes Einsparpotenzial für Personenwagen 105
10.6 Abschätzung des theoretischen Einsparpotenzials einzelner Massnahmen 106
10.7 Einsparpotenzial in der Praxis 107
10.8 Schlussfolgerungen 109

Anhang

A1 Literaturverzeichnis 110

1. Zusammenfassung

Die Studie berechnet, wieviel Energie und CO_2-Emissionen in der Schweizer Fahrzeugflotte in den Jahren 2023 und 2030 durch reine Verhaltensänderung eingespart werden könnten. Zusätzlich analysierte sie das Einsparpotenzial einzelner Massnahmen in den Bereichen Fahrzeugausrüstung, Unterhalt und angepasstes Fahrverhalten. Basierend auf den Ergebnissen prüft das Bundesamt für Energie die weitere finanzielle Unterstützung des Programms Ecodrive. Die Hochrechnung des Einsparpotenzials beruht auf der Simulation von rund 3000 Kombinationen verschiedener Fahrzeugtypen und Fahrsituationen. Die getestete Fahrzeugflotte setzte sich aus Personenwagen, leichten Nutzfahrzeugen, schweren Nutzfahrzeugen, Stadtbussen und Reisebussen zusammen.

Die Möglichkeit Energie und CO_2 einzusparen ist und bleibt hoch: Im Jahr 2023 konnten Fahrerinnen und Fahrer der schweizerischen Fahrzeugflotte theoretisch 21.5% Energie bzw. 2.83 Mio. Tonnen CO_2 einsparen. Dies entspricht auf die Personenwagen bezogen 915 Mio. Litern Benzinäquivalenten und 186 GWh elektrischer Energie. Im Jahr 2030 liegt das theoretische Energiesparpotenzial der schweizerischen Fahrzeugflotte bei 21.6% bzw. 1.86 Mio. Tonnen CO_2. Auf die Personenwagen bezogen, entspricht dies 528 Mio. Litern Benzinäquivalenten und 941 GWh elektrischer Energie. Das relative Energiesparpotenzial bleibt somit auch in Zukunft in allen Fahrzeugkategorien hoch. Durch die Zunahme an batterieelektrischen Fahrzeugen gewinnt allerdings das Einsparpotenzial von elektrischer Energie an Bedeutung und das Einsparpotenzial bei CO_2 und Litern Benzinäquivalenten nimmt ab.

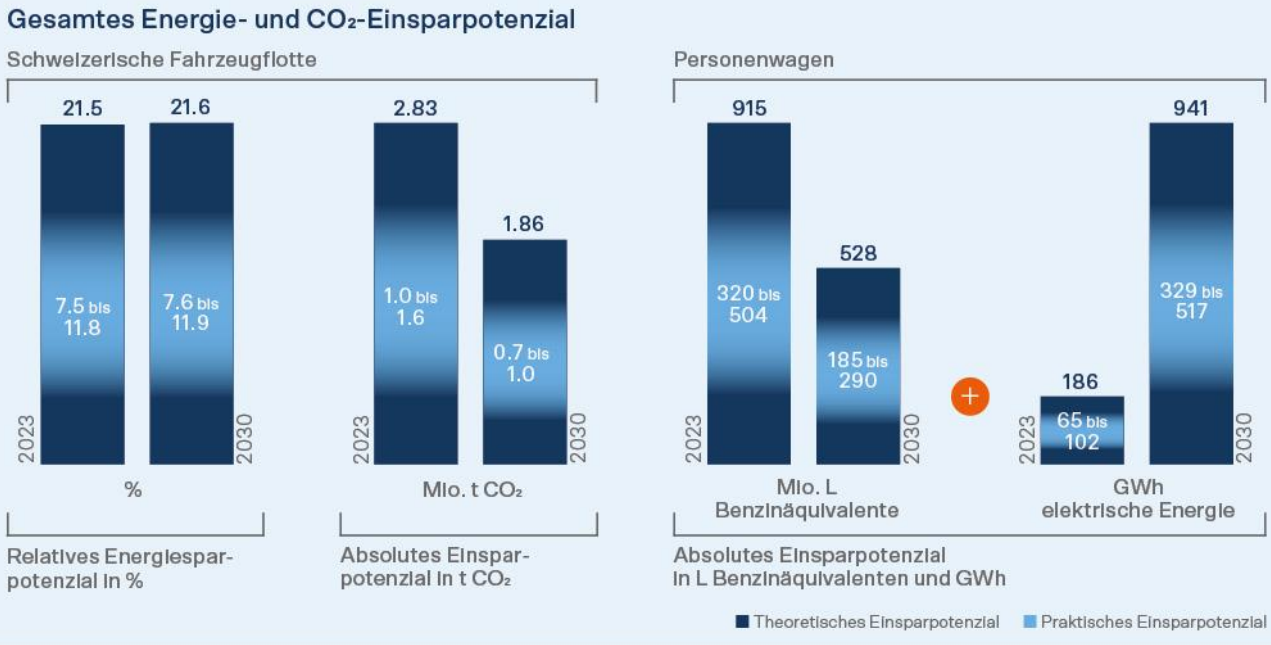


Abbildung 1: Gesamtes Energie- und CO_2-Einsparpotenzial für die Jahre 2023 und 2030. Das theoretische Einsparpotenzial ist der Unterschied zwischen dem Energieverbrauch des Best Cases und dem des Default Cases. Das praktische Einsparpotenzial gibt das realistisch erreichbare Einsparpotenzial an.

Das Energiesparpotenzial für die gesamte Fahrzeugflotte basiert auf einer Hochrechnung. Diese gewichtet die unterschiedlichen Fahrzeugkategorien gemäss ihrem Anteil in der Fahrzeugflotte. Die Personenwagen machen mit über 60% den grössten Anteil aus und beeinflussen so das Energiesparpotenzial der Flotte am stärksten. Die Studie zeigt auch das praktische Energiesparpotenzial auf: Dieses berücksichtigt, dass der Energieverbrauch in der Realität vom theoretischen Einsparpotenzial abweicht und liegt bei 35-55% des theoretischen Einsparpotenzials. Von den einzelnen Massnahmen bietet das Montieren von Reifen der Effizienzklasse A ein grosses Energiesparpotenzial über alle Fahrzeugkategorien hinweg. Bei den Personenwagen zeigt das Abmontieren von Dachboxen, Gepäck- oder Veloträgern den stärksten Effekt. Je nach Fahrverhältnissen gewinnen andere Massnahmen, wie Anwenden des Eco-Fahrstils, an Bedeutung.

Als Grundlage für die Hochrechnung für das gesamte Energiesparpotenzial definiert die Studie pro Fahrzeugtyp und Fahrsituation einen Best Case und einen Default Case. Der Best Case geht davon aus, dass alle Fahrerinnen und Fahrer alle Energiesparmassnahmen vor und während der Fahrt konsequent und zu jeder Zeit umsetzen. Der Default Case bildet die bestmögliche Schätzung der Realität ab. Für die Annahmen der beiden Fälle wurden Daten aus der Literatur oder reale Daten von Garagisten verwendet. Das theoretische Energiesparpotenzial ist der Unterschied zwischen dem Energieverbrauch des Best Cases und dem des Default Cases.

2. Ausgangslage, Auftrag und Ziele

Das BFE unterstützt Massnahmen zur Förderung einer energiesparenden Fahrweise. Dazu hat das BFE 1999 an der Gründung des Vereins Quality Alliance EcoDrive (QAED) mitgewirkt und seither über Energie 2000 bzw. EnergieSchweiz jährliche Subventionen gesprochen. Die QAED fördert die Bekanntheit und Anwendung von, sowie die Haltung zu EcoDrive bei der breiten Öffentlichkeit. Gegenüber Stakeholdern, Behörden und Organisationen vertritt sie das Thema in verschiedenen Gremien. Zudem vereint, koordiniert und unterstützt die QAED die wesentlichen Akteure, die im Bereich der Aus- und Weiterbildung von Fahrzeuglenkern tätig sind, und bündelt so die Kräfte im Markt. Die Ecodrive-Fahrweise ist in dieser Zeit einem immer grösseren Personenkreis bekannt gemacht worden, namentlich auch durch die Integration in die Ausbildung von Neulenkern (BFE 2007).

Als Grundlage für die Beurteilung der zukünftigen Unterstützung der QAED-Aktivitäten durch EnergieSchweiz ab 2024 soll abgeschätzt werden, welches Einfluss- resp. Einsparpotenzial ab 2024 angenommen und zugrunde gelegt werden darf. Dazu verfolgt das vorliegende Projekt folgende Ziele:

1. Analyse des Einflusspotenzials der Fahrer/innen auf Energieverbrauch und CO_2-Emissionen, für PW/LNF und schwere Nutzfahrzeuge/Busse, unter Berücksichtigung u. a. der Antriebstechnologie und des Fortschritts im Zusammenhang mit der Fahrzeugausrüstung.
2. Analyse des Potenzials für Energie-Einsparung unter Berücksichtigung des im jeweiligen Jahr vorhandenen Fahrzeugparks, inkl. Szenarien bzgl. möglicher unterschiedlicher Marktentwicklungen bis 2030.
3. Entwickeln einer Methodik zur Hochrechnung des gesamten Energieeinsparpotenzials, und Hochrechnung für den Schweizer Fahrzeugpark für die Zeitperiode 2024–2030.

3. Zwischen offiziellem Normverbrauch und dem Realverbrauch: Energie einsparen dank effizienter Fahrweise

3.1 Optimale Ausrüstung, optimaler Betrieb, optimale Fahrweise

Der offizielle Normverbrauch eines Personenwagens stellt einen «best case» dar, der im Alltag nur dann erreicht werden kann, wenn die folgenden drei Bereiche vollständig umgesetzt werden:

1. Optimale Fahrzeugausrüstung: Leichtlaufreifen der richtigen Dimension, optimaler Reifendruck, Einsatz von Leichtlauföl
2. Optimaler Betrieb: Kein Gepäck, keine Passagiere, Sommerreifen
3. Optimales Fahrverhalten: Vorausschauende, niedrigtourige Fahrweise, kein Einsatz elektrischer Nebenverbraucher, kein Einsatz der Klimaanlage

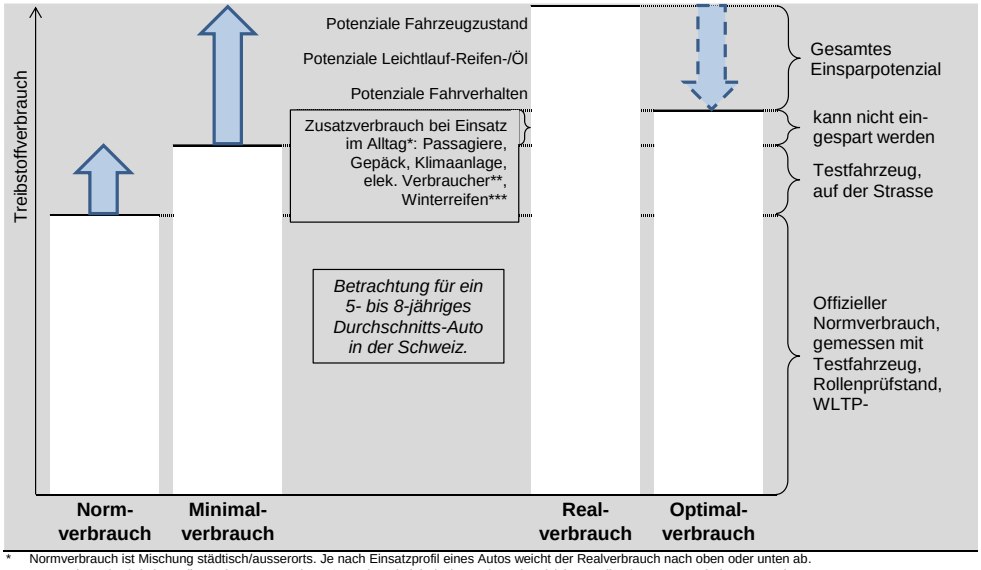
Der vorliegende Bericht ermittelt, wie gross das energetische Sparpotenzial der drei Bereiche ist.

Auch, wenn das energetische Sparpotenzial vollständig umgesetzt wird, ist es möglich, dass der offizielle Normverbrauch nicht ganz erreicht wird. Deshalb wird im Folgenden unterschieden zwischen dem Normverbrauch und dem Minimalverbrauch. Falls der Minimalverbrauch für ein konkretes Fahrzeug höher ist als der offizielle Normverbrauch, lässt sich diese Differenz nicht mit effizienter Fahrweise zum Verschwinden bringen.

3.2 Definition von Norm-, Minimal-, Real- und Optimalverbrauch

Wir unterscheiden vier verschiedene Ausprägungen des Treibstoffverbrauchs:

- Normverbrauch = offizieller Verbrauch gemäss den EU-Verordnungen 2017/1151 und 2018/1832 (auf Verbrauchsmessung hin optimiertes Testauto; gemessen im WLTP-Fahrzyklus auf Rollenprüfstand, im Labor).
- Minimalverbrauch = hypothetischer Verbrauch des Testautos auf der Strasse (Verbrauch gemittelt über die realen Verkehrsverhältnisse eines ganzen Jahres).
- Realverbrauch = Standardauto (mit Reifen und Motoröl wie ausgeliefert, normalem Reifendruck), im Alltageinsatz (übliches Mitführen von Passagieren, Gepäck, Gepäckträger; Einsatz elektrischer Verbraucher, Klimaanlage und Winterreifen), reale Verkehrsverhältnisse. Der Fahrer hat ein normalen Fahrverhalten.



* Normverbrauch ist Mischung städtisch/ausserorts. Je nach Einsatzprofil eines Autos weicht der Realverbrauch nach oben oder unten ab.
** Normverbrauch wird ohne Klimaanlage, Passagiere, Gepäck und elektrische Verbraucher (Licht, Musikanlage, Fensterheizung, usw.) gemessen.
*** Normverbrauch wird mit Sommerreifen ermittelt. Winterreifen sind in der Schweiz allgemein üblich; sie führen zu etwas höherem Verbrauch.

Abbildung 1 Definition von Norm-, Minimal- und Normverbrauch, und Optimalverbrauch als bestmöglicher Verbrauch eines optimierten Standardautos im Alltagseinsatz.

Die Differenz zwischen **Norm- und Minimalverbrauch** betrug zuzeiten des NEFZ (Neuer Europäischen Fahrzyklus) im Durchschnitt um die 40% (ICCT 2019; T&E 2016; EBP 2021). Infolge der Einführung des neuen WLTP (World harmonized Light vehicles Test Procedure), welches explizit die Reduktion dieser Differenz zum Ziel hatte, kam es zu strukturellen Erhöhungen des Normverbrauchs und damit zu einer geringeren Differenz. Sie dürfte jetzt noch eine Grössenordnung von ca. 15% erreichen. Je nach Antriebs-/Getriebekonfiguration sind die Abweichungen unterschiedlich hoch. ICCT (2020) zeigt in einer ersten Analyse von nach WLTP zugelassenen Fahrzeugen, dass die Differenz ca. 14% beträgt. In einer neueren Publikation (ICCT 2022) ist dann von 15% für konventionelle Antriebe und einem Vielfachen davon für PHEV (Plug-in-Hybrid Vehicles) die Rede, und gemäss ICCT (2024) ist eine erneute Zunahme der Differenz zu beobachten. Der Differenz zwischen Norm- und Minimalverbrauch bei PHEV hat die ICCT noch eine vertiefte Analyse gewidmet (ICCT 2021).

Als **Optimalverbrauch** wiederum wird der so weit wie möglich optimierte Realverbrauch eines Standardautos im Alltagseinsatz (mit Passagieren, Gepäck, Klimaanlage und saisonale Bereifung) bezeichnet, dank Massnahmen in den Bereichen…

- Wartung und Beschaffung: Empfohlene Reifendimension, Reifen mit optimaler Reifenetikette, Winterreifen nur solange nötig einsetzen, Leichtlaufmotoröl, Reifendruck, ggf. Nachrüstung mit LED-Tagfahrleuchten; korrekte Wartung;
- Fahrzeugbetrieb («vor jeder Fahrt»): Ohne unnötiges Gepäck, Dachboxen und Gepäckträger nach Gebrauch demontieren;
- Fahrverhalten («während der Fahrt»): Vorausschauende, niedrigtourige Fahrweise, Motor ausschalten bei Stopps, Einsatz der Klimaanlage nach Klima-18-Regel, bewusster Einsatz elektrischer Verbraucher.

4. Massnahmen für umweltbewusstes Fahren

Dieses Kapitel enthält die Ergebnisse der Literaturrecherche zu den verschiedenen Massnahmen für umweltfreundliches Fahren und deren Auswirkungen auf die Fahrdynamik und den Energieverbrauch. Im Folgenden unterscheiden wir zwischen klassischen, modernen und zukünftigen Eco-Driving-Massnahmen. Bei den ersten beiden Kategorien fokussiert sich die Literaturrecherche auf die Beschaffung der notwendigen Inputdaten, um die Massnahmen mit den verfügbaren Modellen zu simulieren. In den Fällen, in denen die Simulation aufgrund unzureichender Daten als nicht durchführbar erachtet wird oder für den Umfang des aktuellen Projekts zu komplex ist, fokussiert sich die Literaturrecherche auf die Sammlung quantitativer Schätzungen der potenziellen Energieeinsparungen, die im Upscaling-Prozess verwendet werden, um das gesamte Einsparpotenzial der Schweizer Flotte zu bestimmen. Andererseits werden die zukünftigen Eco-Driving-Massnahmen nur qualitativ bewertet, mit dem Ziel, die Relevanz solcher Massnahmen für die Zukunft hochgradig vernetzter und automatisierter Fahrzeugflotten zu unterstreichen.

4.1 Klassische Massnahmen für umweltbewusstes Fahren

Bei den klassischen Eco-driving-Massnahmen unterscheiden wir zwischen zwei Arten: Massnahmen, die sich auf den Zustand des Fahrzeugs beziehen, und solche, die das Verhalten des Fahrers betreffen. Zu den Fahrzeugbezogenen gehören die Wahl des richtigen Reifentyps und -drucks, das Entfernen von Dachboxen, Anhängern und Zusatzlasten sowie die Verwendung von Leichtlauföl. Zu den fahrerbezogenen Massnahmen gehören die Verringerung des Einsatzes von Zusatzaggregaten wie Klimaanlage und Heizung und eine vorausschauende und schonende Fahrweise, indem die Höchstgeschwindigkeit reduziert und plötzliche Beschleunigungen, Bremsvorgänge und Leerlauf vermieden werden. Massnahmen, die sich auf die Reiseplanung oder Streckenführung beziehen, wie z.B. Öko-Routen, die Vermeidung von Kurzstrecken und Kaltstarts, werden in unseren Analysen nicht berücksichtigt.

Es gibt umfangreiche Literatur, die sich mit den Vorteilen dieser klassischen Eco-Driving-Massnahmen auf den Energieverbrauch beschäftigt. Im Folgenden geben wir einen Überblick über die wichtigsten Ergebnisse für jede der oben genannten Massnahmen.

4.1.1 Reifentyp und -druck

Die Auswahl des Reifentyps und die Einhaltung des korrekten Reifendrucks haben einen erheblichen Einfluss auf den Energieverbrauch eines Fahrzeugs. Der gewählte Reifentyp bestimmt den Rollwiderstand des Fahrzeugs. Reifen mit geringem Rollwiderstand können den Kraftstoffverbrauch und die CO2-Emissionen senken. Die Europäische Kommission berichtet zum Beispiel, dass Reifen mit geringem Rollwiderstand, die den richtigen Druck haben, bis zu 10 % Einsparungen bewirken können (EU 2023). Dies wurde auch durch eine aktuelle Studie bestätigt, die den Kraftstoffeinsparungseffekt von Reifen mit geringem

Rollwiderstand für schwere Nutzfahrzeuge auf 6,9 bis 8,4 % unter typischen Autobahnbedingungen beziffert (Na 2022). Auch der richtige Reifendruck kann den Kraftstoffverbrauch und die CO2-Emissionen reduzieren, da dadurch der Rollwiderstand verringert wird. Reifen mit zu niedrigem Druck erzeugen mehr Reibung mit der Strasse, was wiederum mehr Energie erfordert, um das Fahrzeug zu bewegen. Obwohl ein zu hoher Reifendruck den Rollwiderstand weiter verringert, reduziert dies auch die Traktion und erhöht das Risiko einer Reifenpanne. Es wird daher nicht empfohlen, den auf dem Reifeninformationsetikett angegebenen idealen Druck zu überschreiten. Eine Studie des Joint Research Center der Europäischen Kommission (JRC 2016), in der die Faktoren untersucht wurden, die den Kraftstoffverbrauch von Personenkraftwagen beeinflussen, ergab, dass ein um 0,2 bar niedrigerer Reifendruck als der empfohlene zu einem Anstieg des Kraftstoffverbrauchs von Personenkraftwagen um 1,4 % führen kann.

Das uCARe-PHEM-Modell, mit dem wir in diesem Projekt die Energieeinsparpotenziale simulieren, benutzt den Rollwiderstand und die Luftwiderstandskoeffizienten als Input für die Berechnung des Energieverbrauchs und der CO2-Emissionen. Daher fokusierte sich die Literaturrecherche auf die Bewertung der Veränderungen des Rollwiderstands und der Rollwiderstandskoeffizienten für verschiedene Reifentypen und Druckniveaus.

	RRC (N/kN)		
Reifeneffizienzklasse	**C1 Reifen (PKW)**	**C2 Reifen (LNF)**	**C3 Reifen (SNF)**
A	RRC≤6.5	RRC≤5.5	RRC≤4.0
B	6.6≤RRC≤7.7	5.6≤RRC≤6.7	4.1≤RRC≤5.0
C	7.8≤RRC≤9.0	6.8≤RRC≤8.0	5.1≤RRC≤6.0
D	9.1≤RRC≤10.5	8.1≤RRC≤9.0	6.1≤RRC≤7.0
E	10.6≤RRC	9.1≤RRC	7.1≤RRC

Tabelle 1 Bereiche des Rollwiderstandskoeffizienten (RRC) für C1, C2 und C3 Reifen verschiedener Effizienz-klassen. Quelle: EU 2020.

PKWs, LNFs und LKWs/Busse sind in der Regel mit Reifen der Klassen C1, C2 bzw. C3 ausgestattet. Die zulässigen RRC-Werte, für jede Effizienz- und Reifenklasse, sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Der Zusammenhang zwischen Rollwiderstand und Reifendruck wurde in einem Bericht von TNO und TUG (TNO 2013) auf der Grundlage von Daten aus der Literatur, Fragebögen und Messdaten untersucht. Sie stellen die Änderung des Rollwiderstands (RR) pro Änderung des Luftdrucks um ein Bar als Funktion des empfohlenen Drucks (p_rec) dar, wie in Abbildung 2 gezeigt. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Druckabfall von 1 bar zu einem Anstieg des Rollwiderstands um 25% bei PKWs (Gruppe N1, empfohlenen Druck von 2,2 bar) und um 3,5% bei schweren Nutzfahrzeugen (Gruppe N3, empfohlenen Druck von 9 bar) führt. Als allgemeine Vereinfachung haben die Autoren angenommen, dass für einen gegebenen empfohlenen Druck die Änderung der RR linear mit der Änderung des Drucks ist.

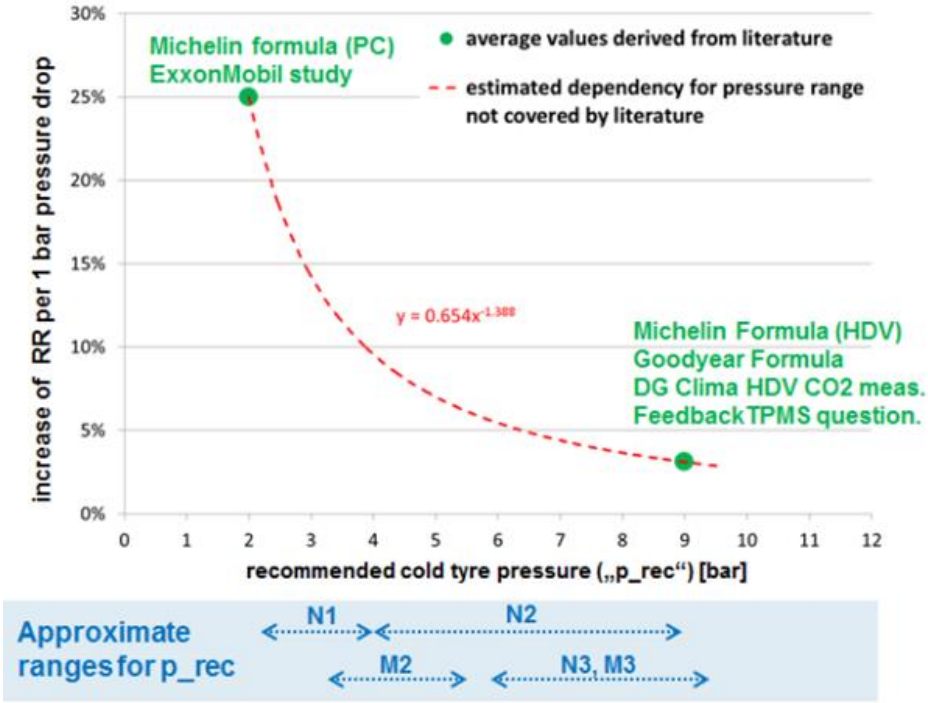


Abbildung 2 Veränderung des Rollwiderstands (RR) pro 1 bar Luftdruckänderung in Abhängigkeit vom empfohlenen Reifendruck. Quelle: TNO 2013.

Andererseits analysierte Guzzella (2013) die Auswirkungen von Fahrzeuggeschwindigkeit, Reifendruck und Fahrbahnbeschaffenheit auf den Rollreibungskoeffizienten (Cr) und berichtete, dass die Auswirkung des Reifendrucks ungefähr proportional zum Kehrwert der Quadratwurzel des Drucks ist.

Im Rahmen des uCARe-Projekts wurde eine Reihe von Messungen durchgeführt, um die Veränderungen des Rollwiderstands bei verschiedenen Fahrzeugkonfigurationen zu bewerten (uCARe 2022a). Die in Abbildung 3 dargestellten Ergebnisse zeigen die gemessenen Veränderungen des Roll- und Luftwiderstands für verschiedene Fahrzeugkonfigurationen, einschliesslich verschiedener Kombinationen von Reifentypen (Sommer und Winter), Druck (empfohlen und ± 0,5 bar), Wetterbedingungen (Wind, nasse Strasse, Regen), Beladung (± 220 kg) und die Verwendung von Dachträgern (Dachbox, Fahrradträger mit 2 Fahrrädern) und Anhängern. Um die Auswirkungen der Veränderungen des Rollwiderstands und des Luftwiderstands zu veranschaulichen, wurde ein durchschnittlicher RDE-Zyklus für ein typisches EURO 6d-temp Dieselfahrzeug simuliert. Diese Analysen ergaben einen Anstieg des Kraftstoffverbrauchs im Vergleich zum Best-Case-Fall (d.h. Sommerreifen, empfohlener Druck) von 3,5 % für Sommerreifen mit niedrigem Druck und 5,3 % für Winterreifen mit dem empfohlenen Druck.

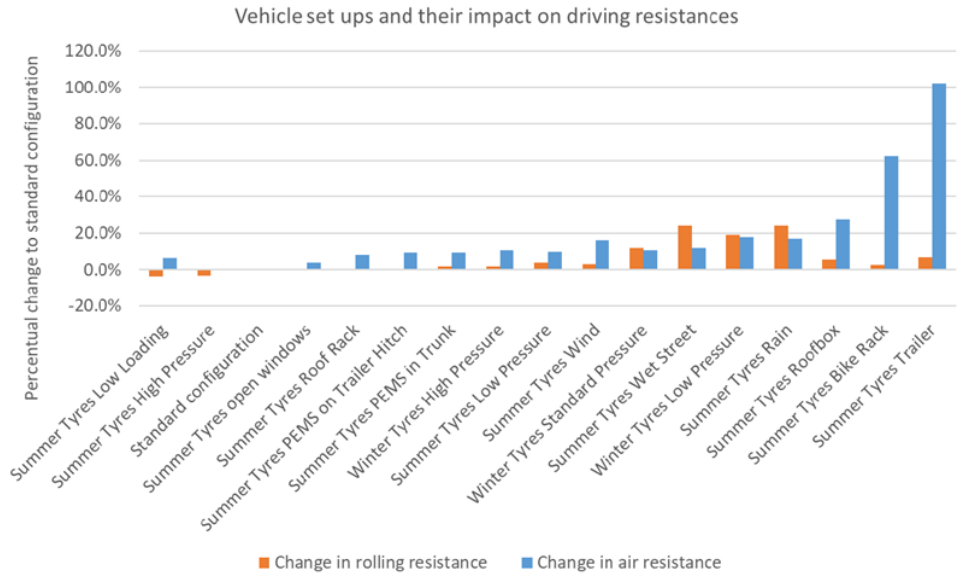


Abbildung 3 Veränderung der Fahrwiderstände bei verschiedenen Fahrzeugkonfigurationen. Quelle: uCARe 2022.

4.1.2 Entfernung von Dachboxen, Dach-/Fahrradträgern, Anhängern und unnötigen Zusatzlasten

Die Verwendung von Dachboxen und Anhängern sowie das Vorhandensein zusätzlicher Ladung auf einem Fahrzeug erhöhen das Gewicht, den Luftwiderstand und den Rollwiderstand, was zu einem Anstieg des Energiebedarfs für die Fortbewegung des Fahrzeugs und damit zu einem höheren Energieverbrauch und CO2-Emissionen führt. Daher kann die Entfernung von Dachboxen, Anhängern und unnötigen Zusatzlasten von einem Fahrzeug zu erheblichen Energieeinsparungen und geringeren CO2-Emissionen führen. Laut der Literaturübersicht in dem oben erwähnten JRC-Bericht (JRC 2016) erhört eine zusätzliche Ladung von 100 kg den Kraftstoffverbrauch eines mittelgrossen Pkw um bis zu 6-7 % und im Durchschnitt um 2-4 %. Der Effekt der zusätzlichen Ladung ist sogar noch grösser, wenn Dachboxen montiert sind oder ein Anhänger gezogen wird. In solchen Fällen berichtet die gesichtete Literatur von einem Anstieg des Kraftstoffverbrauchs um bis zu 20 % bzw. 37,2 %. Darüber hinaus zeigen die Simulationsergebnisse des JRC (JRC 2016), dass der Kraftstoffverbrauch bei höheren Geschwindigkeiten deutlich ansteigt, wenn Dachboxen verwendet werden, verglichen mit einem Fahrzeug mit der gleichen zusätzlichen Masse, aber ohne den zusätzlichen Luftwiderstand.

Wie der Rollwiderstand gehen auch das Fahrzeuggewicht und der Luftwiderstand in das ucare-PHEM-Modell ein. Daher fokusiert sich die Literaturrecherche auf die Auswirkungen verschiedener Fahrzeugkonfigurationen auf die Fahrwiderstände.

Die in Abbildung 3 dargestellten uCARe-Ergebnisse für PKWs veranschaulichen die Veränderungen des Fahrwiderstands bei zusätzlichem Gewicht (Messungen mit PEMS auf der Anhängerkupplung oder im Kofferraum) oder verschiedenen Zubehörteilen wie einem Dachgepäckträger, einer Dachbox, einem dachmontierten Fahrradträger

oder einem Anhänger am Fahrzeug. Die Verwendung eines Fahrradträgers und das Ziehen eines Anhängers führen zu den höchsten Anstiegen des Rollwiderstands, über 60 bzw. 100%.

4.1.3 Verwendung von Leichtlauföl

Die Verwendung von Ölen mit niedriger Viskosität führt bekanntermassen auch zu einem geringeren Kraftstoffverbrauch, da der reduzierte Reibungswiderstand dieser vollsynthetischen Öle den Ölfluss im Motor erhöht, was den Verschleiss verringert und gleichzeitig Kraftstoff spart. Da es keine einfache Möglichkeit gibt, die Motorreibung zu modifizieren und somit die Auswirkungen verschiedener Öle auf den Kraftstoffverbrauch mit dem verfügbaren Simulationswerkzeug zu modellieren, fokusierte sich die Literaturrecherche auf die Bewertung des Kraftstoffeinsparpotenzials von Referenz- und Niedrigviskositätsölen für verschiedene Fahrzeugklassen und Antriebe.

Laut der im JRC-Bericht (JRC 2016) durchgeführten Literaturrecherche verbessert die Verwendung von reibungsarmem Motoröl den Kraftstoffverbrauch von PKWs im Durchschnitt um etwa 2,4 %, wobei der Effekt in städtischem Umfeld grösser zu sein scheint. Die Auswirkung der Schmierstoffviskosität auf den Kraftstoffverbrauch wurde in dieser Arbeit durch Simulationen für drei EURO5-PKWs (Benzin, Benzin mit Turbolader und Diesel) weiter untersucht. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die getesteten Öle. Die Ergebnisse der Simulationen sind in

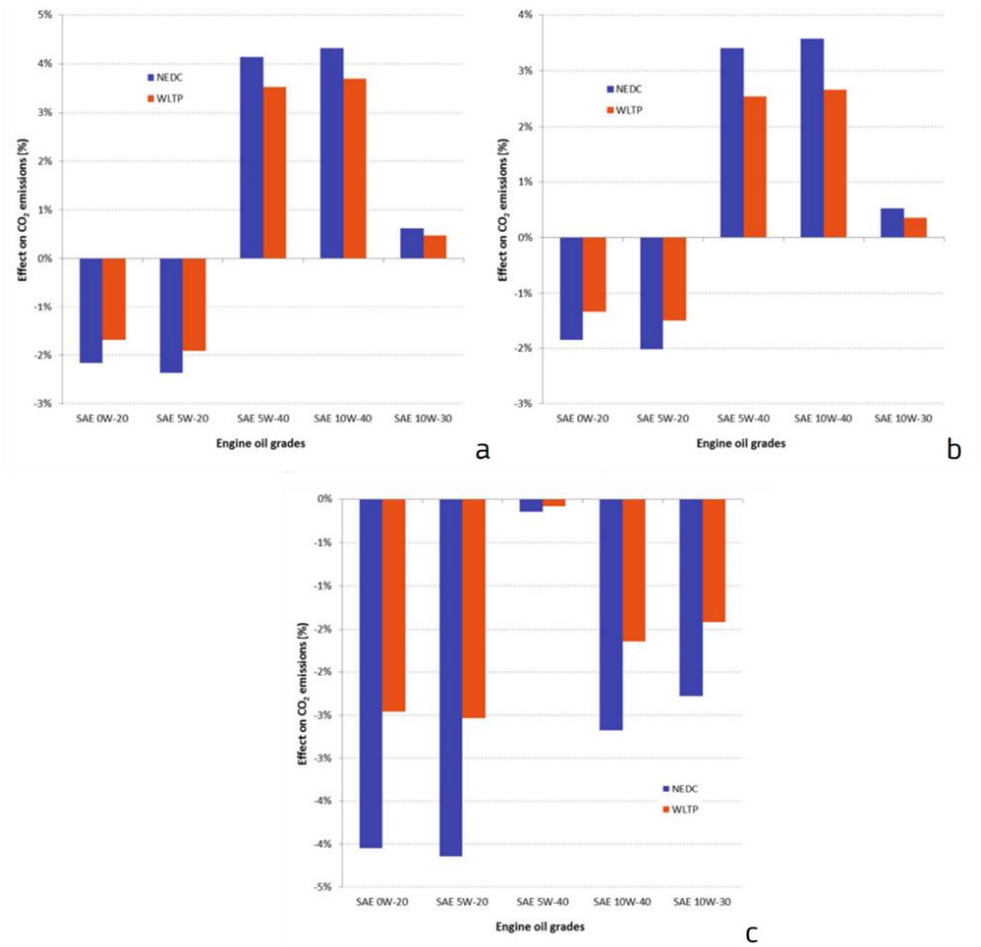


Abbildung 4 dargestellt und zeigen eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs um 1,9 %, 1,5 % und 3,0 % für das Benzin-, Benzin- mit Turbo und Dieselfahrzeug durch die Verwendung von Motorenöl mit niedrigerer Viskosität (z.B. SAE 5W-20). Die Unterschiede zwischen den zwei Benzin- und dem Dieselfahrzeug wurden auf die unterschiedlichen Referenzöle für jeden Motortyp zurückgeführt, wobei für Dieselschmierstoffe eine höhere Viskosität angenommen wurde.

Kinematic viscosity (mm^2/s)	Engine oil grade	Temperature	
		40 °C	100 °C
	SAE 5W-30 (Petrol baseline)	63.2	10.5
	SAE 10W-40 (Diesel baseline)	93.3	14.6
	SAE 0W-20	44.8	8.7
	SAE 5W-20	45.2	8.4
	SAE 5W-40	90.9	14.4
	SAE 10W-30	69.0	11.0

Tabelle 2 Kinematische Viskosität der in der Simulation verwendeten Motoröle. Quelle: JRC 2016.

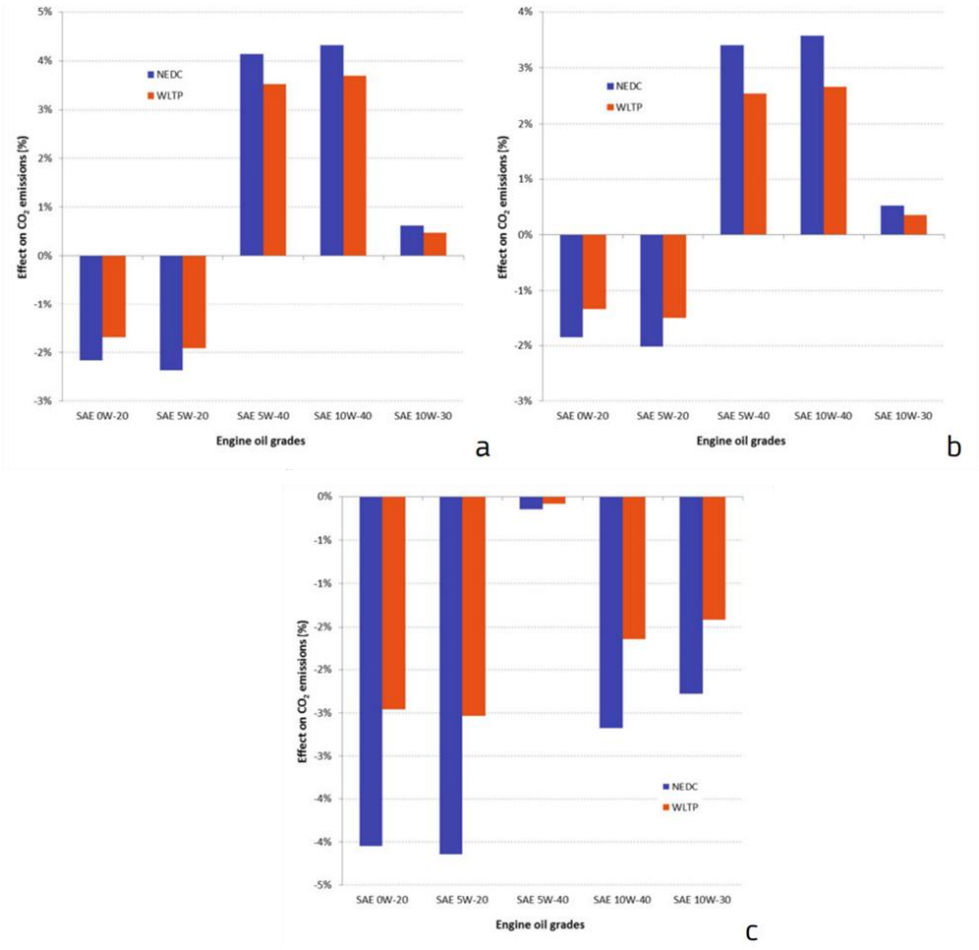


Abbildung 4 Auswirkung des Motoröls auf die CO2-Emissionen eines (a) Benzin-Saugmotors, (b) Benzin-Turbomotors und (c) Dieselfahrzeugs. Quelle: JRC 2016.

Ähnliche Kraftstoffeinsparungen wurden auch in unserer Literaturübersicht für LNFs und SNFs gefunden.

Eine Studie des Tribology International aus dem Jahr 2019 (Tormos 2019) hat 5 verschiedene Motorenöle, darunter zwei mit einem auf Molybdän basierten Reibungsmodifikator, auf dem Motorenprüfstand mit einem Referenzöl verglichen und daraus die in Tabelle 3 aufgeführten Real-World-Emissionen in drei verschiedenen Fahrzyklen errechnet. Als Fahrzeug wurde ein Lieferwagen mit 2465 kg Masse simuliert. Die maximale Krafstoffeinsparung erzielte dabei ein 5W20 Öl (bis zu 9% Einsparpotenzial), was einer um 27% reduzierten (3.67cP zu 2.7cP) HTHS-Viskosität entspricht. Es ist wichtig zu beachten, dass das HTHS (High Temperatur High Shear, das Mass der Viskolität bei 150°C) die vom Motorenhersteller spezifizierten Werte nicht unterschreiten sollte, um ein Abreissen des Schmierfilms bei hohen Temperaturen und hohen Drehzahlen zu verhindern.

Ein anderes Paper das 2014 im Tribology International erschienen ist (Macian 2014) leitet - ebenfalls an einem LNF gemessen – die in Tabelle 4 aufgeführten last- und drehzahlabhängige Sparpotenziale ab.

	Stadtzyklus - Spanien		**Stadtzyklus - UK**		**Ländlicher Zyklus**	
Öle	**Absolute Differenz [g]**	**Prozentualer Unterschied [%]**	**Absolute Differenz [g]**	**Prozentualer Unterschied [%]**	**Absolute Differenz [g]**	**Prozentualer Unterschied [%]**
10W40	4.77	0.46	2.56	0.67	18.26	0.79
10W30	28.12	-2.72	12.00	-3.15	54.06	-2.33
5W30 +FM	18.03	1.75	5.05	1.32	23.80	1.03
5W30 +FM	21.43	-2.07	8.30	-2.18	44.44	-1.92
5W20	91.32	-8.84	27.07	-7.10	120.25	-5.19

Tabelle 3 Einsparungen beim Kraftstoffverbrauch unter realen Fahrbedingungen. Referenzöl: 10W30 (FM = Friciton Modifier). Quelle: Angepasst von Tormos 2019.

Revs. / Eng. Last	**25(%)**	**50(%)**	**75(%)**
2000 U/min	-3.42	-1.77	-0.24
3000 U/min	-2.06	-1.24	-1.07
4000 U/min	-0.27	-1.41	-1.05

Tabelle 4 Kraftstoffeinsparungspotenzial abhängig von Drehzahl und Motorlast. Referenzöl: 15W40, getestetes Öl: 5W30 (HTHS: 3,7 zu 2,9). Quelle: Angepasst von Macian 2014.

Für LKWs sind laut einer Veröffentlichung in Transport & Environment (Macian 2015), in der 60 Diesel- und CNG-Busse mit 2 verschiedenen Viskositäts-Motor- und Differentialölen im Realbetrieb verglichen wurden, die in Tabelle 5 aufgeführten Einsparpotenziale erreichbar (l/100 km für Diesel und m^3/100 km für CNG):

Linienbus	Referenzöl	Leicht-lauföl	Kraftstoff-Einsparung
Diesel 1	15W40	5W30	1.83%
Diesel 2	10W40	5W30	0.98%
CNG	10W40	5W30	3.70%

Tabelle 5 Reale Kraftstoffeinsparungen mit verschiedenen Ölen für Diesel- und CNG-Busse. Quelle: Angepasst von Macian 2015.

Auch Meinrad Signer weist in einer Veröffentlichung des SSM im Jahr 2014 (SSM 2014) Kraftstoffeinsparungen von 1,3% für LKWs bei Verwendung eines 0W-20 Öls (HTHS von 2,9 cP) im Vergleich zu einem 15W-40 Öl aus.

Zusammengefasst kann davon ausgegangen werden, dass ein um 0,5cP (eine Klasse tiefer) reduzierter HTHS einer Verbrauchseinsparung von ca. 0,5% bis 2% entspricht.

4.1.4 Verringerung des Einsatzes von Nebenaggregaten

Ein wichtiger Parameter für die Simulation des realen Fahrzeugbetriebs ist die Nebenverbrauchsleistung des Fahrzeugs. Das ist die Leistung, die der Verbrennungsmotor erzeugen muss, um alle Aggregate des Fahrzeugs zu betreiben, darunter u.a. Luftreinigung, Heizung und Klimaanlage, Beleuchtung, Scheibenwischer, Einparkhilfe und Kollisionswarn- und -vermeidungssysteme. Wie gross dieser zusätzliche Energiebedarf ist, hängt von vielen Faktoren ab. Es wird jedoch oft berichtet, dass die Klimaanlage (AC) bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor den grössten Anteil ausmacht, während die Heizung auch bei Elektrofahrzeugen ein grosser Verbraucher ist.

Im uCARe-PHEM-Tool kann die Leistungsaufnahme der Nebenaggregate als absoluter Wert oder als fester Prozentsatz der gesamten Motorleistung eingegeben werden. Daher fokusierte sich die Literaturrecherche auf die Ermittlung repräsentativer Leistungsanforderungen für die verschiedenen Zusatzaggregate und Fahrzeugkategorien.

In einer früheren Arbeit der Empa in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich wurde der Energieverbrauch von verschiedenen PKW-Antriebstechnologien durch detaillierte Messungen des Energieverbrauchs auf der Strasse und auf dem Rollenprüfstand in einer Langzeit-Feldstudie untersucht. Anhand dieser Daten wurde ein Modell entwickelt, mit dem der Energiebedarf aktueller und zukünftiger Fahrzeuge sowie der daraus resultierende Gesamtenergiebedarf für hypothetische nationale Flotten zuverlässig geschätzt werden kann. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit wurden in Küng (2019) publiziert. Die reale Nutzung der Klimaanlage aus der Feldstudie wurde verwendet, um die in Abbildung 5 gezeigte Kurve zu erstellen, welche die durchschnittliche AC-Leistung (pro Fahrt) als Funktion der Umgebungstemperatur darstellt. Der durchschnittliche Verbrauch der Klimaanlage liegt nach diesen Ergebnissen bei einer Umgebungstemperatur von 25°C bei etwa 400 W, aber der Durchschnitt aller gemessenen Fahrten (über das Jahr verteilt) liegt deutlich unter diesem Wert.

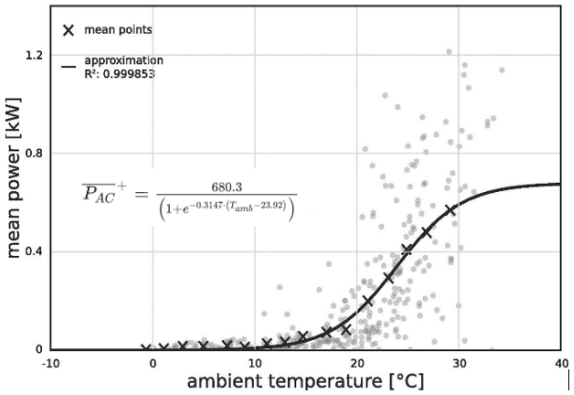


Abbildung 5 Mittlere AC-Leistung für jede gemessene Fahrt, bei der eine Klimaanlage verwendet wurde, angepasst mit einer Sigmoidfunktion. Quelle: Adaptiert von Küng 2019.

Die umfangreiche Literaturauswertung im JRC-Bericht (JRC 2016) zeigt für PKWs einen Anstieg des Kraftstoffverbrauchs von 9 % für die Nutzung der Klimaanlage, bis zu 4,5 % für die Lenkunterstützung und bis zu 6,5 % für die anderen Nebenaggregate (Motormanagement, Kraftstoffeinspritzung, Nebelscheinwerfer, Bremsleuchten, Scheibenwischer, Abblendlicht, Bremsassistent, beheizte Windschutzscheibe, Gebläse usw.). Ihre Simulationen eines zusätzlichen elektrischen Bedarfs von 600 W und eines zusätzlichen mechanischen Bedarfs von 400 W führen zu einem Anstieg des WLTP-Kraftstoffverbrauchs von 9,6 % bzw. 2,5 %.

Ähnliche Leistungsanforderungen werden auch in Zapf 2019 für die Nebenaggregate von PKWs angenommen. Um die Lasten der Nebenaggregate zu berücksichtigen, wurde in dieser Arbeit ein durchschnittlicher Leistungsbedarf von 600 W (elektrisch) für das Bordnetz und 450 W (mechanisch) für den Klimakompressor festgelegt. Bei einem konventionellen Antriebssystem wird die elektrische Leistung für das Bordnetz von einen Alternator bereitgestellt (Effizienz von 67%), während bei PHEVs und BEVs das 12-V-Bordnetz mit Spannung von der HV-Batterie versorgt wird (Wirkungsgrad von 90%). Daraus resultiert ein Nebenverbrauch von 895 W für ICEs und 667 W für PHEVs/BEVs (siehe Tabelle 6).

Leistungsbedarf (W)	ICE	PHEV/BEV
Bordnetz	895	667
AC	450	450
Heizung	0	450
Total	1345	1567

Tabelle 6 Jährlicher durchschnittlicher Leistungsbedarf von Nebenaggregaten für PKWs. Quelle: auf Basis von Zapf 2019.

In Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren ist die Heizung in der Regel kein grosser Energieverbraucher, da der Motor selbst Wärme als Nebenprodukt des Verbrennungsprozesses erzeugt, und diese wird in der Regel zur Beheizung des Innenraums verwendet. Die vom Motor erzeugte Wärme reicht normalerweise aus, um den Heizbedarf des Fahrzeugs zu decken. Es ist jedoch erwähnenswert, dass einige Fahrzeuge zusätzliche Heizoptionen anbieten, wie z.B. elektrische Heizelemente oder Zusatzheizungen, die bei extremer Kälte eine zusätzliche oder schnellere Beheizung ermöglichen,

was zusätzliche Energie erfordert. Auch Lenkrad- und Sitzheizungen verbrauchen zusätzliche Energie, und der Verzicht auf den Einsatz solcher Systeme ist daher ebenfalls eine Energiesparmassnahme. Da es jedoch keine Daten über die Verbreitung und Nutzung solcher Systeme in der Realität gibt, werden sie in unserer Bewertung nicht einbezogen.

Im Falle von BEVs führt der hohe Wirkungsgrad des elektrischen Antriebsstrangs dazu, dass nur wenig Abwärme zur Verfügung steht. Darüber hinaus wird diese Abwärme bei relativ niedrigen Temperaturen erzeugt, was sie für Heizzwecke ungeeignet macht. Infolgedessen stellt die Kabinenheizung bei BEVs die wichtigste Zusatzlast dar.

Um Energie zu sparen und die Reichweite von BEVs zu erhöhen, wird oft empfohlen, Sitz- und Lenkradheizung zu verwenden, anstatt die gesamte Kabine zu beheizen. Laut Dudenhöffer (2009) haben Sitz- und Lenkradheizung einen Leistungsbedarf von etwa 400 W bzw. 50 W.

Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 6 die mittlere Leistungsaufnahme der Heizung der beiden in Küng (2019) untersuchten EVs in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur, wobei der Leistungsbedarf bei niedrigen Aussentemperaturen deutlich höher ist als der der Sitz- oder Lenkradheizung.

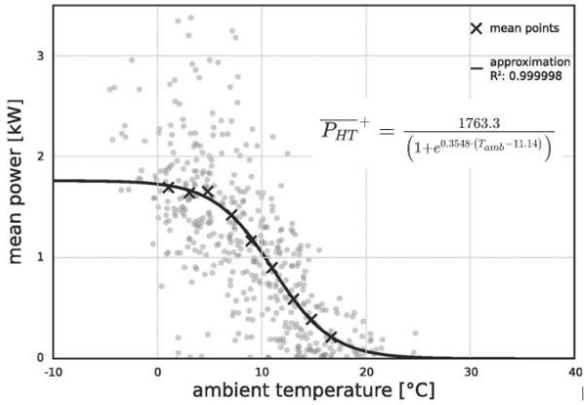


Abbildung 6 Mittlere Heizleistung für jede überwachte Mission, bei der der Lufterhitzer verwendet wurde, angepasst mit einer Sigmoidfunktion. Quelle: Angepasst von Küng 2019.

Diese Ergebnisse scheinen gut mit den Annahmen in Zapf 2019 übereinzustimmen, wo für ein Drittel des Jahres eine elektrische Heizleistung von 1,5 kW mitberücksichtigt wird (über das ganze Jahr gemittelt und bei einem Wirkungsgrad von 90 % ergibt sich ein zusätzlicher Heizbedarf von 450 W, siehe Tabelle 6).

Eine weitere Massnahme, die manchmal als Strategie zur Senkung des Energieverbrauchs von Elektrofahrzeugen angesehen wird, ist das Vorheizen der Batterie und der Fahrgastzelle während des Aufladens des Fahrzeugs (d.h. unter Verwendung von Energie aus dem Stromnetz). Die Leistung herkömmlicher Lithium-Ionen-Batterien wird durch ihre Betriebstemperatur stark beeinträchtigt (Anstieg des Innenwiderstands, was zu erhöhten internen Verlusten und einer geringeren lieferbaren Leistung führt). Ausserdem verringert sich bei kalten Umgebungstemperaturen die Kapazität der Batterien und ihre Lebensdauer. Um diese Probleme zu lösen, wurden Wärmemanagementsysteme für Batterien entwickelt. Das Vorheizen der Batterie

und der Fahrgastzelle während des Ladevorgangs kann den Verbrauch der in der Batterie gespeicherten Energie verringern und somit die elektrische Reichweite des Fahrzeugs erhöhen. Im Allgemeinen ist jedoch die Menge an zusätzlicher Energie, die aus dem Netz bezogen wird, höher als die Einsparungen an Energie, die der Batterie entnommen wird. Eine detaillierte Simulationsarbeit, die im IEEE Vehicular Technology Magazine (Ramsey 2022) veröffentlicht wurde, zeigt, dass das Vorheizen bei kurzen Fahrten (1 Stunde) zu einem Anstieg des Gesamtenergieverbrauchs um bis zu 33% führt. Daher stellt das Vorheizen einen Kompromiss zwischen Fahrgastkomfort, Batterieabnutzung und Gesamtenergieverbrauch dar und der Verzicht darauf kann als Eco-Driving-Massnahme betrachtet werden. Da es jedoch keine Daten über die tatsächliche Nutzung dieser Funktion zur Verfügung stehen, wird diese Massnahme im weiteren Verlauf des Projekts / in der Hochrechnung nicht berücksichtigt.

Für LKWs, wird in einem ICCT-Bericht aus dem Jahr 2017 (ICCT, 2017) auf der Grundlage einer umfassenden Literaturrecherche der typische Nebenenergiebedarf von Sattelzugfahrzeuge angegeben. Betrachtet man nur die für Europa repräsentativen Studien, die in Tabelle 7 aufgeführt sind, so ergibt sich ein Gesamtnebenenergiebedarf für LKWs von etwa 4,6 kW. Davon entfallen ca. 350 W auf die Klimaanlage.

Fahrzeug-Zubehör	Leistungsbedarf (kW)	Quelle
Generator	1.36	Dünnebeil et al., 2015
	1.24	Luz et al., 2014
Luftkompressor	1.59	Dünnebeil et al., 2015
	1.34	Luz et al., 2014
Servolenkung	0.72	Dünnebeil et al., 2015
	0.72	Luz et al., 2014
Kühlgebläse	0.52	Dünnebeil et al., 2015
	1.09	Luz et al., 2014
Klimatisierung	0.36	Dünnebeil et al., 2015
	0.35	Luz et al., 2014
Total Zubehör	4.55	Dünnebeil et al., 2015
	4.74	Luz et al., 2014
	5.6	ICCT, 2017

Tabelle 7 Durchschnittliche Strombedarfswerte aus der Literatur für Traktor-Anhänger-Zubehör. Quelle: Angepasst von ICCT 2017 (nur für Europa repräsentative Referenzen).

Busse sind in diesem Fall getrennt von LKWs zu betrachten, da sie einen höheren Heizungs- und Klimatisierungsbedarf aufweisen, um den Komfort der Passagiere zu gewährleisten. Der Gesamtnebenenergiebedarf von Bussen ist deutlich höher als bei LKWs und liegt für Stadtbussen zwischen 15 und 27 % des Gesamtenergieverbrauchs, während der Durchschnittswert für LKWs bei 5% liegt (Zacharof 2023). Der Unterschied wird auf den höheren Klimatisierungsbedarf (A/C (alle) und Heizung (BEVs)), das pneumatische System für die Türöffnung und andere Funktionen zurückgeführt, die zum Komfort der Fahrgäste beitragen. Bartlomiejczyk (2020) hat den Bereich der Nennleistung der wichtigsten Nebenaggregate für einen 12 m langen

Elektrobus in Tabelle 8 dargestellt. Die benötigte Basisleistung (ohne Heizung und Klimaanlage) liegt im Bereich von 7,5 bis 17 kW (Durchschnitt: 12 kW).

System	Nominal power
Lightning	1–2 kW
Passenger information systems, ticket vending machine	1–3 kW
Charging of 24 V board batteries	0,5 - 2 kW
Air compressor	3–6 kW
Hydraulic pump	2–4 kW
Air condition	10–16 kW
Heating	5–25 kW

Tabelle 8 Nennleistungsbereich der wichtigsten Nebenaggregate für einem 12 m langen Elektrobus. Quelle: Bartlomiejczyk 2020.

Tanyeri 2019 hat die jährliche Wärmebelastung eines elektrischen Stadtbusses in Istambul ermittelt. Der durchschnittliche Energieverbrauch der Klima- und Heizanlagen liegt bei 3 kW und schwankt zwischen 1 kW im Frühling und Herbst, 3 kW im Sommer und 9 kW im Winter.

4.1.5 Eco-Fahrstil

Der umweltfreundliche Fahrstil umfasst alle im Zusammenhang mit dem Fahrverhalten Entscheidungen, die ein Fahrer trifft, um den Energieverbrauch zu senken. Frühere Literaturübersichten berichten von Energieeinsparungspotenzialen durch Eco-Fahrweise von durchschnittlich etwa 10 %, wobei einzelne Arbeiten Werte im Bereich von 3,5 % bis 30 % sowohl für PKWs als auch für SNFs angeben (Barkenbus 2010, Saniul Alam 2014, JRC 2016, ICCT 2021a).

Auch wenn die genaue Definition je nach Quelle leicht variieren kann, umfassen die mit dem Fahrverhalten verknüpften Massnahmen zum umweltbewussten Fahren im Allgemeinen Folgendes:

1. Sanftes Beschleunigen (entspricht der Massnahme 5.3 in Tabelle 16)
2. Hochschalten bei relativ niedrigen Auflösungen, da die innere Reibung des Motors mit der Motordrehzahl ansteigt (entspricht Massnahme 5.2 in Tabelle 16)
3. Antizipieren des Verkehrsflusses und der Strassensignale, um unnötige Beschleunigungs- und Bremsvorgänge zu vermeiden und den Schwung zu nutzen (d.h. vorauschauendes Fahren) (nicht direkt mit einer Massnahme in Tabelle 16 verbunden, da wir in den Simulationen nicht zwischen notwendigen und unnötigen Beschleunigungs- und Bremsvorgängen unterscheiden können, aber indirekt in den Massnahmen 5.3 und 5.4 berücksichtigt)
4. Einhaltung einer gleichmässige Geschwindigkeit und gegebenenfalls Verwendung des Tempomaten auf der Autobahn (entspricht den Massnahmen 6.3, 6.4, 6.5 und 7.3 in Tabelle 16)
5. Fahren mit oder, sofern gefahrlos möglich, unter der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (entspricht der Massnahme 5.1 in Tabelle 16)

6. Beim Bremsem, Bergabfahren oder Anhalten im Gang bleiben, aber so früh wie möglich vom Gas gehen, z.B. beim Herannahen einer roten Ampel oder eines Kreisverkehrs (d.h. Ausrollen bzw. Segeln) (bereits als erste Wahl für Verzögerungen in PHEM implementiert, siehe Abschnitte 7.1 und 7.3 für weitere Details. Für LKWs/Busse ist dies mit der Massnahme 7.2 in Tabelle 16 verbunden)
7. Leerlauf vemeiden/Abstellen des Motors im Stand (entspricht den Massnahmen 5.5, 6.1 und 7.1 in Tabelle 16)

4.2 Moderne Massnahmen für umweltbewusstes Fahren

In diesem Abschnitt beschreiben wir Massnahmen zum umweltfreundlichen Fahren, die sich auf den Einsatz von Technologien in modernen Fahrzeugen beziehen, wie z.B. Fahrassistenzsysteme und regeneratives Bremsen.

4.2.1 Fahrerassistenzsysteme (FAS)

Fahrerassistenzsysteme (FAS, oft auch als ADAS bezeichnet), sind elektronische Systeme in einem Fahrzeug, die fortschrittliche Technologien zur Unterstützung des Fahrers nutzen. Während das Hauptziel von FAS darin besteht, die Sicherheit und den Komfort des Fahrers zu verbessern, kann ihr Einsatz in einigen Fällen auch zu einer effizienteren Fahrweise und damit zu einer Senkung des Energieverbrauchs führen. Tabelle 9 gibt einen Überblick über die FAS, die in modernen PKWs/LNFs und LKWs/Bussen zu finden sind und die als relevant für den Energieverbrauch identifiziert wurden.

PKW/LNF	LKW/Busse
- Start-Stopp	- Start-Stopp
- Eco-modus	- Eco-Rolling
- Tempomat (CC)	- Prädiktiver Tempomat (PCC)
- Adaptiver Tempomat (ACC)	
- Prädiktiver Tempomat (PCC)	

Tabelle 9 Relevante FAS für den Energieverbrauch.

FAS für PKWs/LNFs

Für PKWs und LNFs sollten folgenden Systeme in Betracht gezogen werden:

Start-Stopp:

Start-Stopp-Systeme sind als energieeffiziente Funktion für moderne Fahrzeuge anerkannt worden. Start-Stopp ist eine Funktion, die den Motor automatisch ausschaltet, wenn das Fahrzeug stillsteht, z.B. an einer Ampel oder im dichten Verkehr, und ihn wieder startet, wenn der Fahrer die Bremse löst oder die Kupplung betätigt. Einige Systeme haben auch zusätzliche Kriterien für die Aktivierung, wie z.B. einen Mindestladezustand der Batterie (muss ausreichen, um die elektrischen Systeme des Fahrzeugs bei ausgeschaltetem Motor mit Strom zu versorgen), die optimale Motortemperatur (das System wird erst aktiviert, wenn der Motor eine bestimmte Betriebstemperatur erreicht hat, um Schäden an den Motorkomponenten zu vermeiden) und die gewünschte

Innenraumtemperatur (das System wird möglicherweise nicht aktiviert, wenn die Einstellungen des Klimasystems und das tatsächliche Klima im Fahrgastraum erheblich voneinander abweichen). Die Start-Stopp-Funktion ist in modernen Fahrzeugen, die über diese Funktion verfügen, in der Regel standardmässig aktiviert. In einigen Fahrzeugen muss der Fahrer sie jedoch manuell über eine Taste oder einen Schalter am Armaturenbrett aktivieren/deaktivieren, während andere Fahrzeuge dem Fahrer die Möglichkeit bieten, die Aktivierungskriterien der Start-Stopp-Funktion anzupassen oder die Funktion ganz zu deaktivieren. Die Start-Stopp-Funktion vermeidet längere Leerlaufzeiten und reduziert so den Energieverbrauch. Das tatsächliche Energiesparpotenzial von Start-Stopp-Systemen hängt von verschiedenen Faktoren wie den Verkehrsbedingungen, der Häufigkeit von Stopps und Starts sowie der Grösse und dem Typ des Fahrzeugs ab. Mehrere Studien (Fonseca 2011, Kropiwnicki 2013, Zhu 2022) haben gezeigt, dass der Einsatz von Start-Stopp-Systemen in modernen Fahrzeugen je nach Fahrbedingungen und Fahrzeugmerkmalen zu Energieeinsparungen von 2-3% (durchschnittliche Stadtbedingungen) bis zu 30% (Stau) führen kann.

ECO-Modus:

Viele moderne Autos verfügen über eine ECO-Modus-Einstellung, die darauf abzielt, Energie zu sparen, indem die Motorenleistung begrenzt wird. Wenn der ECO-Modus ausgewählt ist, werden die Gaspedale weniger reaktiv, was zu einer langsameren Beschleunigung und damit zu Energieeinsparungen führt. Der ECO-Modus funktioniert am besten bei entspanntem Fahren (idealerweise in Städten mit geringen Geschwindigkeiten), während es manchmal empfehlenswert ist, ihn in Situationen zu deaktivieren, in denen man schnell beschleunigen muss (z.B. beim Einfädeln in den Verkehr). Während die spezifischen Auswirkungen des ECO-Modus von Hersteller zu Hersteller variieren, optimiert diese Funktion in den meisten Fällen auch die Motor- und Getriebeleistung, indem sie die Schaltstrategie des Getriebes anpasst (Feintuning der Schaltvorgänge) und einige der Klimaeinstellungen (Heizung und Klimaanlage) reduziert oder ausschaltet. In einigen Fällen schaltet der ECO-Modus auch andere kleinere Energieverbraucher wie die Innenbeleuchtung, die Sitzheizung oder die Servolenkung aus oder begrenzt sie. Darüber hinaus beinhaltet der ECO-Modus in einigen Fällen eine ECO-Coasting-Funktion, die das Getriebe auskuppelt und die Motorbremse deaktiviert, so dass das Fahrzeug ausrollen bzw. segeln kann, wenn das Gaspedal losgelassen wird. Schliesslich kann der ECO-Modus auch auf andere FAS einwirken, z.B. die Beschleunigung des Tempomaten reduzieren. Während die meisten Autos über eine einfache Taste zum Ein- und Ausschalten des ECO-Modus verfügen, gibt es bei einigen Fahrzeugen auch eine automatische ECO-Modus-Funktion, die sich zu bestimmten Zeiten einschaltet.

Tempomat (CC):

Der CC (Cruise Control) ist eine Technologie, die es einem Fahrzeug ermöglicht, eine konstante Geschwindigkeit beizubehalten, ohne dass der Fahrer ständig das Gaspedal betätigen muss. Sobald das System aktiviert

ist, erkennt es mithilfe von Sensoren die Geschwindigkeit des Fahrzeugs und passt den Motor und das Getriebe entsprechend an, um das Fahrzeug in einem konstanten Tempo zu bewegen. Da das System in der Lage ist, kleine Anpassungen der Fahrzeuggeschwindigkeit effizienter vorzunehmen als ein Fahrer dies manuell tun könnte, kann der Einsatz von CC im Prinzip den Energieverbrauch senken. Die Energievorteile von CC können beim Fahren auf langen, geraden Strassen mit wenig Verkehrsunterbrechungen und unterschiedlichen Geschwindigkeitsbegrenzungen (z.B. Autobahn) erzielt werden. Ein Feldversuch mit fünf Fahrzeugen, bei dem das Fahrverhalten von Tempomaten und menschlichen Fahrern auf Autobahnen im freien Verkehr verglichen wurde, ergab, dass ein Tempomat den Kraftstoffverbrauch im Vergleich zum menschlichen Fahren um durchschnittlich 3,3 % senken kann (Park 2013). Im Gegensatz dazu wird die Verwendung des Tempomats in Situationen mit starkem Verkehr oder mit häufig wechselnden Gradienten oder Geschwindigkeitsbegrenzungen nicht empfohlen, da der Tempomat in solchen Situationen das Fahrzeug unpassend beschleunigen oder abbremsen kann, was zu einem erhöhten Energieverbrauch führen kann.

Adaptiver Tempomat (ACC):

ACC (Adaptive Cruise Control) ist eine erweiterte Version vom CC, die Radar- oder Kameradaten verwendet, um einen sicheren Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug einzuhalten. Neben der gewünschten Geschwindigkeit kann der Fahrer auch den Mindestabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug festlegen. Es gibt zwar eine relativ grosse Anzahl von Studien, welche die Anforderungen und möglichen Auswirkungen des Einsatzes von ACC-Systemen analysieren, aber nur wenige Studien haben den Einsatz kommerzieller Systeme in der Praxis untersucht. Darüber hinaus fokusiert sich ein grosser Teil dieser Studien auf die Auswirkungen auf die Fahrdynamik und die damit verbundenen Sicherheitsaspekte und nur eine Minderheit analysiert die Auswirkungen auf den Energieverbrauch. Bei der Analyse der Auswirkungen vom ACC auf den Energieverbrauch ist es wichtig, zwischen "Free-Flow"-Szenarien, bei denen die Interaktionen mit den umliegenden Fahrzeugen minimal sind, und "Car-Following"-Szenarien zu unterscheiden, bei denen die Interaktionen mit dem führenden Fahrzeug im Mittelpunkt stehen. In "Free-Flow"-Szenarien arbeitet der ACC hauptsächlich wie ein normaler CC und wir können daher von einem ähnlichen Energiesparpotenzial ausgehen. In Szenarien, in denen das Auto einem zweitem folgt, haben das Fahrverhalten des vorausfahrenden Fahrzeugs und der vom Fahrer eingestellte Abstand einen grossen Einfluss auf das Energiesparpotenzial des ACC-Systems. Denn wie in mehreren Arbeiten in der Literatur gezeigt wird (z. B. Milanes 2014, Knoop 2019, Gunter 2019, Makridis 2020), kann der Einsatz von ACC unter bestimmten Bedingungen zu einer "String"-instabilität führen, d.h. Geschwindigkeitsschwankungen des führenden Fahrzeugs werden durch den ACC-Folger verstärkt. Dies führt zu verstärktem Beschleunigen und Bremsen und damit zu einem insgesamt höheren Energieverbrauch. Von besonderem Interesse in diesem Bereich ist die Forschung des Joint Research Center der Europäischen Kommission im Rahmen einer Reihe von Messkampagnen, die zwischen 2018 und 2019 durchgeführt wurden und

deren Daten öffentlich zugänglich gemacht wurden (Makridis 2021). He (2020) berichtete über die Ergebnisse von Tests mit vier Fahrzeugen, die auf öffentlichen Autobahnen mit aktiven und inaktiven ACC-Systemen gefahren wurden, und zeigte, dass der Einsatz von ACC zu einem um 3 bis 20 % höheren Verbrauch an Traktionsenergie führte als das Pendant des menschlichen Fahrers, was die positiven Auswirkungen von ACC-Fahrzeugen auf den Energieverbrauch in Frage stellt. Diese Auswirkungen wurden von Ciuffo (2021) in einer weiteren Messkampagne untersucht, in der die Auswirkungen von zehn Fahrzeugen mit verschiedenen ACC-Systemen und unterschiedlichen Zeitabständen (kurz, mittel oder lang) analysiert wurden, die sich in einer Zugformation bewegten. Diese Experimente ergaben, dass mehrere Faktoren wie die Einstellung des Abstands, die gewünschte Geschwindigkeit, die Grösse der Geschwindigkeitsschwankungen und die Strassenneigung für grosse Unterschiede im Energieverbrauch von ACC-Zügen verantwortlich sind, und bestätigten, dass kleine Abstände insgesamt zu einem höheren Energieverbrauch der ACC-Benutzer führen. Deshalb wird als Eco-Massnahme beim Einsatz von ACC-Systemen empfohlen, den Abstand so hoch wie möglich einzustellen und trotzdem vorausschauend zu fahren.

Prädiktiver Tempomat (PCC):

Der prädiktive Tempomat (Predictive Cruise Control, PCC) ist eine Weiterentwicklung des ACC-Systems, das zusätzliche Technologien wie Verkehrszeichenerkennung, GPS und Strassenkarten nutzt, um die Fahrbedingungen für die nächsten Kilometer vorauszusehen und die Geschwindigkeit bei Bedarf anzupassen (z.B. bei einer Änderung der Geschwindigkeitsbegrenzung oder bei Annäherung an eine scharfe Kurve oder einen Kreisverkehr). Soweit wir wissen, gibt es keine Studie, die das Energiesparpotenzial kommerzieller PCC-Systeme analysiert hat. Während ACC- und PCC-Algorithmen im Allgemeinen darauf ausgelegt sind, Sicherheit und Komfort zu maximieren, kann in einigen Fällen auch der Energieverbrauch in das Optimierungsverfahren einbezogen werden (auch ECO-ACC genannt). Mehrere Studien haben verschiedene ECO-ACC-Ansätze entwickelt und berichten von Energiesparpotenzial von bis zu 27% in Abhängigkeit von der Strassenneigung und den Verkehrsbedingungen (Vasebi (2023) und Referenzen darin). Es ist jedoch wichtig, darauf hinzuweisen, dass es sich hierbei nicht um kommerzielle Systeme handelt. Obwohl die Zahlen sehr vielversprechend sind, fehlen Untersuchungen über ihre Anwendung in der realen Welt. Ihre Auswirkungen auf den Verkehrsfluss auf Netzwerkebene und auf den Energieverbrauch bleiben daher sehr unklar.

FAS für LKWs/Busse

Wie in Tabelle 9 dargestellt, wurden folgende FAS als relevant für den Energieverbrauch von LKWs und Bussen identifiziert:

Start-Stopp:

Wie bei PKWs werden auch in modernen Schwerlastfahrzeugen Start-Stopp-Systeme eingebaut, um den Motor bei Fahrzeugstopps automatisch

abzuschalten und auf diese Weise die Leerlaufzeit des Motors und den damit verbundenen Energieverbrauch zu reduzieren.

Eco-Rolling:

Die Eco-Rolling-Funktion (oder Eco-Coasting), die in den ECO-Modus einiger PKWs integriert ist, existiert oft als eigenständige Funktion in modernen LKWs. Diese Funktion koppelt den Verbrennungsmotor bei bestimmten Bergabfahrten mit geringem Gefälle automatisch vom Antriebsstrang ab. Der Motor läuft entweder im Leerlauf weiter oder, wenn das System mit einer Start-Stopp-Funktion kombiniert ist, wird der Motor für die Dauer des Eco-Rolling abgeschaltet, was zu einem geringeren Energieverbrauch führt.

Prädiktiver Tempomat (PCC):

Die derzeit kommerziell erhältlichen PCC-Systeme für schwere Nutzfahrzeuge nutzen in der Regel eine Vorschau der Strassenneigungsdaten und die GPS-Daten, um die Nutzung der potenziellen Energie während einer Fahrt zu optimieren. Gemeinsame Energiesparfunktionen, die von diesen Systemen abgedeckt werden, sind in der Verordnung (EU) 2019/318 (EU 2019a) über die Bestimmung der CO2-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs von schweren Nutzfahrzeugen definiert und umfassen:

1. Crest Coasting: Bei der Annäherung an eine Kuppe wird die Fahrzeuggeschwindigkeit im Vergleich zur eingestellten Geschwindigkeit des Tempomats reduziert, so dass das Abbremsen während der folgenden Bergab-Phase verringert werden kann.
2. Beschleunigung ohne Motorleistung: Beim Bergabfahren mit niedriger Geschwindigkeit auf Strassen mit starkem Gefälle wird das Fahrzeug ohne Motorleistung beschleunigt, so dass das Bremsen bergab reduziert werden kann.
3. Dip Coasting: Das System erlaubt bei Bergabfahrten, wenn das Fahrzeug mit der eingestellten Geschwindigkeit abbremst, für kurze Zeit Geschwindigkeiten, die leicht über der in der Tempomaten eingestellten Geschwindigkeit liegen, um die Bergabfahrt mit einer höheren Fahrzeuggeschwindigkeit zu beenden.

Das Energiesparpotenzial der oben genannten FAS sowie ihrer kombinierten Anwendung in LKWs kann mit dem VECTO-Tool (Vechicle Energy Consumption calculation TOol, VECTO 2023) bewertet werden. VECTO ist ein Open-Source-Modell für die Berechnung des CO2- und Kraftstoffverbrauchs von LKWs, der von der Europäischen Kommission für die Zertifizierung von LKWs ab 2019 entwickelt wurde. Die implementierte In-the-Loop-ADAS-Simulation (TUG 2019) ergibt für eine 40-Tonnen-Sattelzugmaschine mit Start-Stopp-, Eco-Roll- und PCC-Systemen für Langstreckenfahrten Energieeinsparungen von bis zu 3%. Weitere Einzelheiten zu diesen Analysen und den entsprechenden Ergebnissen findet man in Abschnitt 7.2.

4.2.2 Regeneratives Bremsen

Beim regenerativen Bremsen handelt es sich um eine Technik, die in Elektrofahrzeugen (EVs) eingesetzt wird. Dabei fungiert der Elektromotor, der das Fahrzeug antreibt, beim Bremsen wie ein Generator und erzeugt Energie, die in das Hybrid- oder Elektrosystem zurückfliesst und auf diese Weise die Reichweite des Elektrofahrzeugs erhöht. Im Gegensatz zu herkömmlichen Bremssystemen, bei denen die kinetische Energie des Fahrzeugs in Wärmeenergie umgewandelt und an die Umwelt abgegeben wird, können elektrifizierte Fahrzeuge durch regeneratives Bremsen einen Teil dieser andernfalls verlorenen Energie zurückgewinnen. Der Gesamtwirkungsgrad des regenerativen Bremsens liegt im Allgemeinen bei 60-70% und hängt von der Bremsstrategie, den Einstellungen des Bremskontrollsystems sowie von der Fahrzeuggrösse und den Fahrbedingungen ab. Es wird berichtet, dass EVs insgesamt zwischen 10-30% ihres Energieverbrauchs durch regeneratives Bremsen zurückgewinnen können (Vasiljevic 2022).

Regeneratives Bremsen ist bei schwereren Fahrzeugen, im Stadtverkehr mit Stop-and-Go und beim Bergabfahren effektiver. Bei Verzögerungen gibt es einen Kompromiss zwischen regenerativem Bremsen (d.h. Rückgewinnung von Energie durch Bremsen bei gleichzeitiger Verzögerung des Fahrzeugs) und Rollen bzw. Segeln (d.h. das Fahrzeug über eine längere Strecke frei rollen lassen, während der Motor ein- bzw. ausgeschaltet ist), so dass übermässiges regeneratives Bremsen zu einem erhöhten Energieverbrauch führen kann. Daher ist es wichtig, das richtige Gleichgewicht zwischen den beiden Techniken zu finden, um eine maximale Energieeffizienz zu erreichen.

Es ist wichtig zu beachten, dass in diesem Projekt das regenerative Bremsen in den Energieverbrauchssimulationen der EVs enthalten ist. Ausserdem muss der Kompromiss mit dem Rollen/Segeln und die Interaktion mit der Eco-Bremsmassnahme berücksichtigt werden. Schliesslich kann das regenerative Bremsen bei Systemen, bei denen der Fahrer die Rückgewinnung beeinflussen kann, als eigenständige Eco-Driving-Massnahme betrachtet werden. Bei einigen Fahrzeugmarken/-modellen kann der Fahrer verschiedene Stufen des regenerativen Bremsens einstellen oder es sogar ausschalten, während es bei anderen nur eine feste Standardeinstellung gibt. Wenn verschiedene Stufen verfügbar sind, wird oft empfohlen, auf freien Autobahnen die niedrigste Stufe zu verwenden (um ein gewisses Mass an Ausrollen zu ermöglichen) und in städtischen Gebieten mit vielen Ampeln oder bei starkem Verkehr die höchste Stufe. Nur sehr wenige Studien haben das Energierückgewinnungspotenzial verschiedener Stufen des regenerativen Bremsens im Strassenverkehr gemessen. Berjoza (2022) stellte beispielsweise fest, dass bei den 0, 20, 40, 60, 80 und 100% Einstellungen des regenerativen Bremssystems eines elektrischen Renault Clio im Stadtverkehr 0; 0,3; 4,6; 13,5; 22,8 und 24,7% der Gesamtenergie zurückgewonnen wurden. Man muss aber auch berücksichtigen, dass das vom Fahrer beeinflussbare Energiesparpotenzial auch stark von der Ausführung der Bremsen des jeweiligen Fahrzeuges abhängig ist. Bei Fahrzeugen mit hydraulisch entkoppelten Bremspedalen,

bei denen die Rekuperation über das Bremspedal moduliert werden kann, wird vom System immer die maximal verfügbare Rekuperationsleistung eingesetzt, um die der Fahrsituation entsprechende Verzögerung zu erreichen. Die Einstellungen von Rekuperationsstufen oder One-Pedal-Driving sind bei diesen Fahrzeugen aus Sicht des Energieverbrauches irrelevant. Andere Fahrzeuge wiederum rekuperieren bei Betätigung des Bremspedals mit einer fixen und relativ geringen Leistung. Schliesslich gibt es auch Fahrzeuge welche über eine rein konventionelle hydraulische Bremse verfügen und die regenerative Bremsleistung somit einzig über die selektierbaren Rekuperationsstufen respektive über One-Pedal-Driving moduliert werden kann. In den letzten beiden Fällen sind die vom Nutzer getätigten Einstellungen für die rekuperierte Energie essentiell und können den gesamten Bereich von optimaler bis hin zu gar keiner Rekuperation bewirken.

4.2.3 Langsames Laden von BEVs

Batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEVs) bieten eine vielversprechende Lösung für die Dekarbonisierung des Strassentransportsektors. Aufgrund ihrer hohen Energie- und Leistungsdichte, ihrer Umweltfreundlichkeit und ihrer langen Lebensdauer zeichnet sich die Lithium-Ionen-Batterie (LiB)-Technologie als führendes Energiespeichersystem für BEVs aus (Lu 2013). Anhand der Ladegeschwindigkeit unterscheidet man zwischen langsamem und schnellem Laden. Ursprünglich wurden Ladestationen mit einer Leistung von über 50 kW als Schnellladegeräte bezeichnet, während heutzutage eher Ladestationen mit einer Leistung von 90 kW oder höher gemeint sind (Energieschweiz, 2023).

Um die Einführung dieser Technologie zu beschleunigen, werden verschiedene potenzielle Ansätze untersucht. Einige Studien deuten darauf hin, dass die Verringerung der "Reichweitenangst" durch schnelles Aufladen der Batterien die Akzeptanz von Elektrofahrzeugen beschleunigen könnte. Es ist jedoch wichtig, die Grenzen der Batterien zu berücksichtigen. Einerseits können sich die hohen Ströme, die für das schnelle Laden erforderlich sind, nachteilig auf die Lebensdauer der Batterien auswirken, z.B. durch Lithium-Plattierung und einige mechanische Effekte. Andererseits steigen die Energieverluste mit zunehmender Ladegeschwindigkeit.

Daher stellt sich die Frage, ob angesichts des Hauptziels der Dekarbonisierung dem Schnellladen Vorzug gegeben werden sollte, auch wenn es zu einem höheren Energieverbrauch führt. Die Frage ist von entscheidender Bedeutung, denn die zum Laden benötigte Energie muss schliesslich irgendwoher bezogen werden und die Verluste, die beim Laden der Batterien entstehen, tragen an anderer Stelle zum CO2-Fussabdruck bei.

Vor diesem Hintergrund haben frühere Studien die verschiedenen Komponenten untersucht, die beim Schnellladen eine Rolle spielen. Der Einfluss der Ladegeschwindigkeit auf die Ladeeffizienz als Massnahme zur Energieeinsparung wurde bisher allerdings noch nicht vollständig untersucht. Ziel dieses Abschnitts ist es, einen Überblick über die Energieverluste beim Aufladen von Batterien mit hohen

Ladegeschwindigkeiten zu geben und das Energiesparpotenzial des langsamen Ladens gegenüber dem schnellen abzuschätzen. Ausserdem werden einige Kollateralschäden des Schnellladens erläutert, wie z. B. die Lithiumschichtung und einige mechanische Effekte, die sich erheblich auf die Lebensdauer und Sicherheit der Batterie auswirken können und somit als zusätzliche Motivation für langsames Laden dienen können.

Energieverluste beim Schnellladen

Verluste beim Laden von EV-Batterien sind unvermeidlich und hängen vom Ladegerät (Umwandlung von Wechsel- in Gleichstrom), der Länge des Ladekabels, der Ladeleistung, dem Wärmemanagementsystem der EV-Batterie und den Wetterbedingungen ab. In der Literatur werden oft Ladeverluste von etwa 5 % angenommen (UVEK 2017).

Eine wichtige Grösse beim Laden einer Batterie ist die C-Rate. Diese entspricht der Geschwindigkeit, mit der eine Batterie geladen oder entladen wird, und ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen dem Lade-/Entladestrom und der Nennkapazität der Batterie.

Die Energieeffizienz und die Lebensdauer von Batterien können durch hohe Lade-/Entladeströme (hohe C-Rate) beeinträchtigt werden. Die Energieverluste sind häufig auf ein Missverhältnis zwischen den Eigenschaften der verschiedenen Komponenten zurückzuführen (z. B. Unterschiede in der Transportgeschwindigkeit von Elektronen und Ionen) und äussern sich in Form von Wärme (Wärmeentwicklung).

Der Joule-Effekt spielt eine wesentliche Rolle bei der Wärmeerzeugung und trägt zu etwa 50 % der insgesamt erzeugten Wärme bei (NREL 2021). Es ist wichtig zu betonen, dass die durch den Jouleschen Effekt erzeugte Wärme in einem quadratischen Verhältnis zum Strom steht (Dimopoulos Eggenschwiler, 2021). Da schnelles Laden höhere Ladeströme erfordert, nimmt die erzeugte Wärme aufgrund dieser quadratischen Abhängigkeit exponentiell zu, und folglich geht während des Ladevorgangs mehr Energie verloren. Dies wurde vor kurzem vom Department of Energy Efficiency & Renewable Energy in den USA (NREL 2021) untersucht, wo die Autoren die Wärmeentwicklung beim extremen Schnellladen gemessen haben, um die damit verbundenen thermischen Herausforderungen für die Batterien zu untersuchen. Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass eine 100-kWh-Batterie bei einer 10-minütigen Ladung mit einer Ladeleistung von 350 kW etwa 50 kW Wärme erzeugen würde. Kürzlich haben Forscher der Empa und des Polytechnikums Mailand das thermische Verhalten von Batteriezellen während des Lade-/Entladevorgangs sowohl experimentell als auch numerisch untersucht (Dimopoulos Eggenschwiler 2021). Aus den Ergebnissen geht hervor, dass bei niedrigen C-Raten (<0,5C) die gesamten Wärmeverluste unter 1% der abgegebenen Leistung liegen, während bei höheren Lade-/Entladeraten (bei 5C-Raten) die Gesamtverlustraten 5% der abgegebenen Leistung erreichen. Damit Batterien bei höheren Temperaturen geladen werden können, werden in Liu (2021) drei Arten von thermischen Umgebungen für das Schnellladen vorgeschlagen: konstant bei 30 °C, vorgewärmt auf 60 °C und adiabatisches Schnellladen. Beim adiabatischen Ansatz betrugen die Verluste bei niedrigen C-Raten etwa 1 %

der abgegebenen Leistung, während sie bei hohen C-Raten etwa 9 % der abgegebenen Leistung betrugen. Einige auf dem Markt erhältliche Fahrzeuge bieten ultraschnelle Ladefunktionen an. Diese Fahrzeuge können angeblich eine Ladung von 5 % auf 80 % in einer Zeit von etwa 22 Minuten erreichen (~2C Rate). Allerdings sind diese Schnellladevorgänge mit Energieverlusten von etwa 11 % der geladenen Energie verbunden (Liu 2021). Dabei ist zu beachten, dass bei höheren Laderaten (bis 5C) mit noch höheren Verlusten zu rechnen ist.

Tabelle 10 fasst die oben erwähnten Studien zusammen und hebt das Hauptziel der Studie sowie die gefundenen Ergebnisse in Bezug auf Energieverluste hervor. Insgesamt können wir aus der gesichteten Literatur schliessen, dass das langsame Laden im Vergleich zum schnellen Laden ein Energieeinsparpotenzial von bis zu 10 % hat.

Beschreibung	**Schlussfolgerung über Energieverluste**	**Referenz**
Die Wärmeentwicklung beim extremen Schnellladen wurde gemessen, um die damit verbundenen thermischen Herausforderungen für die Batterien zu ermitteln.	Eine 100-kWh-Batterie erzeugt während einer 10-minütigen Ladung mit 350 kW 50 kW Wärme.	NREL 2021
Das thermische Verhalten von Batteriezellen wurde während des Lade-/Entladevorgangs sowohl experimentell als auch numerisch untersucht, um die Wärmeentwicklung (Wärmeverluste) zu messen.	Bei niedrigen C-Raten (<0,5C), Verlust von 2% der gelieferten Leistung. Bei hohen C-Raten (5C), Verlust von 5% der gelieferten Leistung.	Dimopoulos Eggenschwiler 2021
Drei Arten von thermischen Umgebungen für die Schnellladung wurden vorgeschlagen: konstant gehalten bei 30 °C, vorgewärmt auf 60 °C und adiabatische Schnellladung. Damit sollen die Batterien bei höheren Temperaturen geladen werden können.	Bei niedrigen C-Raten, Verlust von 1% der gelieferten Leistung. Bei hohen C-Raten, Verlust von ~9% der gelieferten Leistung.	Liu 2021
Die Website berichtet über die Verluste beim Schnellladen verschiedener EVs/Batterien	Eine Schnellladung von 0 auf 100% DC einer 83,7 kWh-Batterie ergibt einen Ladeverlust von 11%.	InsideEVs 2021

Tabelle 10 Übersicht über die Studien zur Bewertung der Energieverluste beim Schnellladen.

Andere Auswirkungen des Schnellladens:
Wie bereits erwähnt, gibt es weitere Kollateralschäden, die mit dem Schnellladen verbunden sind die im Fol-genden kurz dargestellt werden.

Lithiumplattierung ist ein chemischer Prozess, der hauptsächlich während des schnellen Aufladens auftritt, bei dem Lithiumionen im Elektrolyten festes Lithiummetall auf der Oberfläche der negativen Elektrode bilden. Diese Nebenreaktion wird vor allem dann ausgelöst, wenn das elektrostatische Potenzial der negativen Elektrode das einer Li/Li+ -Referenzelektrode erreicht oder unterschreitet. Bedingungen, welche die konkurrierende Interkala-tionsreaktion behindern, wie z.B. niedrige Temperaturen oder unzureichendes Material der negativen Elektrode, verschlimmern die Situation. Zunächst bildet das Lithium Tröpfchen, um die Oberflächenenergie zu minimieren. Diese reagieren schnell mit dem Elektrolyten und bilden eine feste Elektrolyt-Interphase (SEI). Wenn die Beschichtung unter der SEI zunimmt, werden die Tröpfchen mechanisch stärker beansprucht, bis die SEI durch-brochen wird und das Lithium entweicht.

Daraufhin sinkt die Elektrolytkonzentration weit unter das Equilibrium, was dendritisches Wachstum begünstigt (Bai 2016). Dendritisches Wachstum ist das Worst-Case-Szenario der Lithiumbeschichtung, denn wenn der Dendrit die positive Elektrode erreicht, kann es zu einem internen Kur-zschluss kommen, der zu einer schnellen Erwärmung der Zelle führt (Birkl 2016). Dieser Temperaturanstieg kann andere Degradationsmechanismen auslösen, wie die Bildung von SEI, das Austrocknen des Elektrolyten und die Auflösung der positiven Elektrode. Abgeschiedenes Lithium bildet sich oft an der Schnittstelle zwischen El-ektrode und Separator und kann den Rest des aktiven Materials blockieren. Ausserdem ist metallisches Lithium reaktiver als Graphit und fördert weitere Nebenreaktionen, die zu SEI-Wachstum, Gasbildung und Elektro-lytzersetzung führen. Aufgrund dieser Risiken ist ein schnelles Laden bei niedrigen Temperaturen gefährlich und es müssen Anstrengungen unternommen werden, um die Lithiumbe-schichtung zu minimieren und damit die Lebensdauer und Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien zu verlängern.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der durch schnelles Laden induzierten Degradation ist die mechanische Pulver-isierung. Der Hauptgrund für diese Phänomene ist die Dehnungsfehlanpassung, die aus dem Lithiumkonzentra-tionsgradienten resultiert und durch schnelles Laden noch verstärkt wird. Während des schnellen Aufladens in-terkalieren Li+-Ionen in die Anode und deinterkalieren schnell aus der Kathode, was zu einem starken Lithium-konzentrationsgradienten, einem Dehnungsungleichgewicht zwischen verschiedenen Teilen des Elektrodenpartikels und einer Spannungsentwicklung führt. Risse breiten sich in den Partikeln aus, wenn die Ener-giefreisetzungsrate oder der Spannungsintensitätsfaktor einen bestimmten Wert überschreitet. Dies geht immer mit SEI- und CEI-Rissen (Kathoden-Elektrolyt-Interphase) einher. Ausserdem variiert die Gitterdehnung entlang verschiedener Richtungen bei fast allen Arten von Elektrodenmaterialien. Die Primärpartikel sind zufällig orien-tiert und stehen in direktem Kontakt mit benachbarten Primärpartikeln. Infolgedessen kann die durch die schnelle Aufladung hervorgerufene Dehnung zwischen benachbarten Primärpartikeln nicht ausgeglichen werden, was zu einer Isolierung zwischen Elektrodenpartikeln oder leitendem Material und Bindemitteln führen kann. Die Fehlanpassung der Spannung zwischen Elektrodenmaterial und Stromabnehmer kann auch zu Rissen oder Ablösungen führen. Da höhere C-Raten zu einer stärkeren Strominhomogenität über die Elektrodenblätter führen, kann es bei Zellen ohne enge äussere Begrenzungen zu Delaminationen kommen (Zhao 2017). Die Auswirkungen der mechanischen Zersetzung auf die Leistung der Zelle lassen sich in den Verlust von aktivem Material (LAM), den Verlust von Lithiuminventar (LLI) und die Zunahme der Impedanz unterteilen. Erstens füh-ren Risse zu schlechter elektrischer Leitfähigkeit und sogar zur vollständigen Ablösung. Zweitens wird durch die Risse mehr frische Oberfläche freigelegt, die mit dem Elektrolyten reagiert. Solche Nebenreaktionen werden durch die hohe Temperatur, die durch das schnelle Aufladen entsteht, begünstigt. Der Prozess führt zu einem weiteren Wachstum der SEI-Schicht, was den Widerstand erhöht und sowohl LAM als auch LLI verursacht. Schliesslich kann der Verbrauch des Elektrolyten auch

die Benetzbarkeit der Elektroden verringern und den Io-nentransport behindern. Trotz zahlreicher experimenteller Studien zu diesem Thema gibt es immer noch keinen Konsens über zentrale Fragen wie die Beziehung zwischen der C-Ladungsrate und der Rissbildungsrate. Im Ge-gensatz zum SEI-Schichtwachstum oder der Lithiumbeschichtung gibt es relativ wenige validierte Modellier-ungsstudien zu den mechanischen Auswirkungen unter hohen Strömen (Tomaszewska 2019).

Bemerkungen und Schlussfolgerungen:
Während Elektroautos eine vielversprechende Alternative für die Dekarbonisierung bieten, ist es sehr wichtig, die damit verbundenen Energieeffizienzaspekte in den Vordergrund zu stellen und zu berücksichtigen. Die wichtigsten Erkenntnisse aus dieser Literaturanalyse sind:

- Die Energieverluste beim Laden von BEVs werden oft auf die unterschiedlichen Eigenschaften der verschiedenen Komponenten zurückgeführt (z.B. Unterschiede in der Transportgeschwindigkeit von Elektronen und Ionen) und äussern sich in Form von Wärme (Wärmeerzeugung).
- Der Joule-Effekt trägt erheblich zur Wärmeerzeugung bei und macht etwa 50 % der insgesamt erzeugten Wärme aus. Dieser Effekt folgt einer quadratischen Beziehung zum Strom. Da das Schnellladen höhere Ladeströme erfordert, steigt die erzeugte Wärme exponentiell an. Folglich geht während des Ladevorgangs eine grössere Menge an Energie verloren.
- Verschiedenen Studien zufolge ist der Strom bei niedrigen C-Raten gering und die Gesamtwärmeerzeugung liegt bei etwa 1-2% der abgegebenen Leistung. Mit zunehmender C-Rate steigt der Strom und damit die Wärmeerzeugung überproportional an. Die Gesamtwärmeentwicklung kann bis zu 11% der abgegebenen Leistung erreichen. Wenn man sich also für langsames Laden an-stelle von schnellem Laden entscheiden, kann man bis zu 10% der Energie sparen.
- Darüber hinaus kann der Schnellladevorgang zu verschiedenen Kollateralschäden führen, ein-schliesslich der Lithiumbeschichtung und mechanischer Effekte, die die Lebensdauer und Sicherheit der Batterie erheblich beeinträchtigen.

4.3 Künftige Massnahmen für umweltbewusstes Fahren

Das Strassenverkehrssystem steht in den nächsten Jahrzehnten vor einem grossen Wandel. Dieser wird vor allem durch die Einführung neuer Antriebssysteme (z. B. batterieelektrische oder wasserstoffbetriebene Fahrzeuge) und alternativer erneuerbarer Energieträger (z.B. synthetische Kraftstoffe) vorangetrieben. Längerfristig wird auch die Entwicklung autonomer Technologien diesen Prozess parallel begleiten. Technologische Fortschritte wie der erweiterte Einsatz von Drucksensoren in Reifen und die Entwicklung von autonomen Systemen/Fahrassistenten, welche die Fahraufgaben übernehmen, haben das Potenzial, die

Gesamtenergieeffizienz der Strassenflotte erheblich zu verbessern. Infolge dieser Fortschritte wird der Einfluss des Fahrstils des Fahrers auf den Energieverbrauch abnehmen und einige der derzeitigen Massnahmen für umweltbewusstes Fahren werden weniger wichtig oder sogar irrelevant werden. Es werden jedoch neue Massnahmen zur umweltfreundlichen Fahrweise auftauchen und in der zukünftigen Flotte wichtig werden, wie z.B. der Einsatz von ECO-Fahrassistenzsystemen die mittels maschineller Lernmethoden den Energieverbrauch reduzieren. In diesem Abschnitt geben wir einen Überblick über das Energiesparpotenzial solcher zukünftiger Eco-Fahrassistenzsysteme auf der Grundlage einer Literaturübersicht.

4.3.1 Auf maschinellem Lernen basierende Eco-Fahrassistenzsysteme (ML-Eco-FAS)

Algorithmen, die auf maschinellem Lernen (ML) basieren, spielen eine immer wichtigere Rolle bei der Entwicklung von Eco-FASs. Die wachsende Anzahl von Sensoren und Kameras in Fahrzeugen und die Entwicklung von Fahrzeug-zu-Fahrzeug (V2V) und Fahrzeug-zu-Infrastruktur (V2I) Kommunikationssystemen ermöglichen einen nahezu vollständigen Überblick über den Fahrzeugstatus und die Wahrnehmung der umliegenden Fahrzeuge und Infrastrukturen. Darüber hinaus schafft der aktuelle Trend zur Entwicklung und Verfeinerung von Algorithmen des maschinellen Lernens, die sich auf Daten und nicht auf mathematische Modelle stützen (d.h. datengesteuerter Ansatz), ein ideales Umfeld für die Entwicklung fortschrittlicher FAS zur Förderung des umweltbewussten Fahrens.

Durch die Analyse von Daten aus realen Fahrszenarien können ML-Algorithmen Muster und Trends im Fahrerverhalten, den Strassenbedingungen und anderen Variablen erkennen und somit die FAS-Technologien erheblich verbessern. Dies ermöglicht die kontinuierliche Verfeinerung und Weiterentwicklung von FAS-Systemen, was zu einer höheren Effizienz und Sicherheit führt. FAS-Systeme, insbesondere auf maschinellem Lernen basierende Geschwindigkeitsregelungs-Technologien, können durch die Anpassung der Fahrzeuggeschwindigkeit und -beschleunigung den Energieverbrauch minimieren und die Effizienz maximieren. Je nach Grad der Interaktion mit der Umgebung und anderen Fahrzeugen kann man zwischen ML-basierter adaptiver Tempomaten (ML-ACC) und kooperativer adaptiver Tempomaten (CACC) unterscheiden:

— ML-ACC: Diese Systeme kombinieren die Verwendung von Radar- oder Kameradaten zur Einhaltung eines sicheren Abstands zu einem vorausfahrenden Fahrzeug (klassisches ACC) mit Algorithmen des maschinellen Lernens, welche die Geschwindigkeit optimieren, um den Energieverbrauch zu minimieren.
— CACC: Als Erweiterung von ACC-Systemen integrieren CAAC-Systeme zusätzlich V2V- und V2I-Kommunikation, um externe Informationen über andere Fahrzeuge und die Umgebung zu nutzen. Solche CACC-Systeme können so konzipiert werden, dass man vorausfahrenden Fahrzeugen mit deutlich höherer Genauigkeit folgen und schneller auf Veränderungen reagieren kann. Unter Ausnutzung der V2V-Kommunikation ist CACC eine der vielversprechendsten Technologien

für vernetzte automatisierte Fahrzeuge (Connected Automated Vehicles, CAVs) (Wang 2018).

Darüber hinaus können diese intelligenten Geschwindigkeitsregelungssysteme mit anderen Fahrzeugkontrollsystemen, Systemen anderer Fahrzeuge oder sogar den Kontrollsystemen einer intelligenten Stadt integriert werden (Vasebi 2023).

Insgesamt hat die Integration von Techniken des maschinellen Lernens in FAS-Technologien das Potenzial, die Art und Weise, wie man Auto fahrt, zu revolutionieren, insbesondere indem sie das Fahren effizienter, umweltfreundlicher und gleichzeitig sicherer macht. Um die wichtigsten Entwicklungen in diesem Bereich zu veranschaulichen, gibt Tabelle 11 einen Überblick über verschiedene FAS-Implementierungen, die in der Literatur beschrieben werden. Die Tabelle zeigt die Kategorie der implementierten FAS-Technologie (ACC oder CACC), die getestete Antriebstechnologie, den verwendeten mathematischen Algorithmus, die optimierten Parameter und den erzielten Kraftstoffverbrauch. Dieser umfassende Überblick zeigt die Vielfalt der Anwendungen und ihre unterschiedlichen Szenarien, die von einem einzelnen Fahrzeug bis zu einer Flotte von Connected Automated Vehicles (CVAs) reichen können.

Die Minimierung des Energieverbrauchs durch Anpassung von Parametern wie Geschwindigkeit und Beschleunigung kann als Optimierungsproblem dargestellt werden. In der Literatur werden verschiedene optimierungsbasierte Algorithmen verwendet, um dieses Problem zu lösen. In Tabelle 12 fassen wir einige Studien zusammen, die sich mit der Optimierung des Kraftstoffverbrauchs beschäftigen und vielversprechende Ergebnisse gezeigt haben.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Einsatz von maschinellem Lernen bei der Entwicklung von FAS immer wichtiger werden wird. Die Einbeziehung zusätzlicher Informationen über den Fahrzeugstatus, wie z. B. signalisierte Kreuzungen auf Hauptverkehrsstrassen, digitale Strassenkarten, GPS-Standorte und V2V- und V2I-Informationen, kann die Prognosegenauigkeit dieser Systeme erheblich verbessern. Darüber hinaus sind ML-Algorithmen in der Lage, Muster und Trends im Fahrerverhalten, im Strassenzustand und in anderen Variablen zu erkennen, die die Wirksamkeit, Sicherheit und Zuverlässigkeit von FAS-Technologien weiter verbessern können. Die in der Literatur beschriebenen ML-basierten FAS-Systeme erzielen in bestimmten Situationen Energieeinsparungen von bis zu 30 %. Es ist jedoch wichtig anzumerken, dass die meisten dieser Systeme nur durch Simulationen getestet wurden und ihre Auswirkungen auf Netzebene in realen Situationen noch kaum untersucht wurden.

Fahrzeug und FAS-Typ	ML-Algorithmus	Ziel Parameter	Beschreibung	Energieeinsparung	Referenz
HEV-ACC	Neuronales Multiklassen-Netzwerk	Motordrehzahl und Batterieleistung	Ein intelligenter Energieregler, der neuronale Netze nutzt, um den Kraftstoffverbrauch zu minimieren, wurde entwickelt. Der Regler ermöglicht eine vorausschauende Energieoptimierung unter Berücksichtigung der Fahreranforderungen und Systembeschränkungen in Echtzeit. Der Regler wurde in einem Ford Escape Hybrid implementiert, um seine Leistung zu bewerten.	Von 5% bis 19%	Murphey 2012 Murphey 2013
HEV-ACC	Computer Vision + Neuronales Netzwerk + Dynamische Programmierung	Motorleistung	Ein neuronales Netzwerk wurde verwendet, um die Fzg-geschwindigkeit durch die Kombination von Kameradaten, GPS-Standort und aktueller Fahrzeuggeschwindigkeit vorherzusagen. Auf der Grundlage der vorhergesagten Geschwindigkeit wurde dann durch dynamische Programmierung eine optimale Strategie für das Energiemanagement entwickelt. Diese Strategie kann jede Variable in der Fahrzeugsoftware berücksichtigen, z. B. Kraftstoffverbrauch, Motorleistung und Batteriestand, um die Motorleistung zu maximieren. Der Algorithmus wurde in einem Toyota Prius 2010 implementiert und getestet.	Bis zu 19,6%	Tunnell 2018
EV- ACC	Long Short-Term Memory (LSTM) / Recurrent neural network (RNN)	Energieeffizienz	Ein auf "Long Short-Term Memory" (LSTM) basierendes "Recurrent Neural Network" (RNN) wurde anhand von Fahrdaten aus einem Verkehrssimulator entwickelt. Das System nutzt historische Informationen über Geschwindigkeitsverläufe, Ampelzustände und Strassenbedingungen, um die Effizienz zu verbessern. Insb. Informationen über Ampelschaltungen und Strassenkurven verbessern die Vorhersagegenauigkeit.	Bis zu 16 %	Jia 2020
ICE (hochautomatisiertes Fahrzeug)	"Actor-critical reinforcement learning" basierend auf "deep neural networks"	Geschwindigkeit im mehrspurigen Szenario	Das vorgeschlagene System basiert auf der Actor-Critic Reinforcement Learning-Methode und zielt auf eine wirtschaftliche Fahrweise im mehrspurigen Szenario ab. Es besteht aus zwei Schichten, einer statischen Auswertungsschicht und einer dynamischen Verfolgungsschicht. Das "kritische Netzwerk" bewertet mögliche Fahrspuren und wählt eine vorteilhafte Spur für den Fahrspurwechsel aus, während das "Akteursnetzwerk" für die Hindernisvermeidung und die stabile Verfolgung der vorgeschlagenen Spur sorgt.	10%	Gu 2022
HEV- CACC	Verkettung von neuronalen Netzwerken	Geschwindigkeit	Ein Ansatz zur Geschwindigkeitsprognose unter Verwendung eines "Concatenated Neural Network" (CNN) wird vorgestellt. Dieser Ansatz zur Geschwindigkeitsprognose wird anschliessend als Grundlage für eine Strategie zur Minimierung des "äquivalenten Verbrauchs" (d.h. die elektrische Leistung wird in einen äquivalenten Kraftstoffverbrauch umrechnet) verwendet. Das CNN wird zur Vorhersage der Geschwindigkeit über verschiedene Zeithorizonte verwendet und nutzt dabei die Informationen, die über V2V und V2I bereitgestellt werden.	Zwischen 0,2% und 5%	Zhang 2017
ICE- ACC	Lernbasierte Optimierung mit neuronalen Netzwerken	Schaltplan und Geschwindigkeit	Ein neuronales Netzwerk wird zur Optimierung des Schaltplans und der Geschwindigkeitsregelung eingesetzt. Das System reduziert den Kraftstoffverbrauch und verbessert den Fahrkomfort in "car-following" Szenarien. Die Traktion des Fahrzeugs wird mit adaptiver dynamischer Programmierung so abgeleitet, dass es dem vorausfahrenden Fahrzeug folgt und den gewünschten Abstand zwischen den Fahrzeugen einhält. Der "real-time" Schaltplan passt die Motorbetriebspunkte an, um den Kraftstoffverbrauch zu minimieren.	Bis zu 5.03%	Li 2022
EV-CACC	Reinforcement Learning basierend auf einem tiefen neuronalen Netzwerk	Geschwindigkeit	Es wird ein umweltfreundliches Fahrkonzept für vernetzte Elektrofahrzeuge (CVs) auf der Grundlage von Reinforcement Learning (RL) vorgeschlagen, um die Energieeffizienz von Fahrzeugen an signalisierten Kreuzungen zu verbessern. Der Ansatz integriert modellbasierte Strategien für das Folgen von Fahrzeugen und den Spurwechsel mit Strategien des Reinforcement Learning (RL) und gewährleistet einen sicheren Betrieb der Fahrzeuge. Die Methode verwendet einen Markov-Entscheidungsprozess (MDP), um das Verhalten der Fahrzeuge beim Folgen und Wechseln der Fahrspur an Kreuzungen zu optimieren.	Bis zu 27.13%	Jiang 2022

Tabelle 11 Übersicht über die auf maschinellem Lernen basierenden FAS zur Verbesserung des Kraftstoff-/Energieverbrauchs.

Fahrzeug und FAS-Typ	Algorithmus	Zielparameter	Beschreibung	Energieeinsparung	Referenz
ICE - Vernetzte Autonome Fahrzeuge (CAVs)	"Partially observable Markov decision process" (POMDP) + "Reinforcement Learning"	Kraftstoffverbrauch beim Beschleunigen und im Leerlauf	Für eine Flotte vernetzter automatisierter Fahrzeuge (CVAs) wird ein Reinforcement-Learning-Ansatz entwickelt, um effektive Kontrollstrategien für umweltfreundliches Fahren zu entwickeln, die den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen bei minimalen Auswirkungen auf die Fahrzeit minimieren können. Der Fokus liegt auf der Reduzierung von übermässigem Kraftstoffverbrauch und Emissionen, die durch Leerlauf und Beschleunigung der Fahrzeuge an signalisierten Kreuzungen auf Hauptverkehrsstrassen entstehen.	18% bei 100% CAV-Durchdringun 9% bei 25% CAV-Durchdringung	Jayawardana 2022
ICE-CACC	Agentenbasiertes Modell	Geschwindigkeit	Ein kooperativer adaptiver Tempomat, der ein agentenbasiertes Modell zur Berechnung der kraftstoffeffizientesten Fahrzeugroute verwendet, wird vorgeschlagen. Das System nutzt verfügbare Informationen über Strasseneigenschaften, die eingestellte Geschwindigkeit, bevorstehende Signaländerungen sowie V2V- und V2I-Informationen, um den zukünftigen Kraftstoffverbrauch für alternative Fahrzeugrouten vorherzusagen und wählt die kraftstoffoptimale Route aus.	Bis zu 30 %	Kamalanathsharma 2012
ICE-ACC	"Non-linear predictive control" (NPC) basierend auf dynamischen Programmierung	Geschwindigkeit	Ein ACC-Ansatz zur Optimierung des Kraftstoffverbrauchs von Fahrzeugen auf Autobahnen mit Steigungen und Gefällen wird vorgeschlagen. Die vorgeschlagene Methode kombiniert eine digitale Strassenkarte und nichtlineare prädiktive Steuerung (NPC) mit dynamischer Programmierung.	4,1%	Lin 2016
ICE- ACC	Optimal control problem	Geschwindigkeit	Ein System für umweltbewusstes Fahren wird vorgestellt, das die Präferenzen des Fahrers und den Kraftstoffverbrauch in die Kostenfunktion eines optimalen Kontrollproblems einbezieht. Das optimale Regelungsproblem wird in Echtzeit gelöst und die Ergebnisse werden verwendet, um eine visuelle Schnittstelle auf dem Tachometer des Fahrzeugs zu aktualisieren, um umweltbewusstes Fahrverhalten zu fördern. Das System wurde in einem Land Rover Discovery Sport aus dem Jahr 2015 als Prototyp implementiert.	Bis zu 65,7%	Fläming 2018

Tabelle 12 Übersicht der optimierungsbasierten Eco-FAS zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs.

5. Konfiguration, Wartung und Ausrüstung der Fahrzeugflotte

Um das Energieeinsparpotenzial auf Flottenebene zu skalieren, ist es entscheidend, die Verteilung der Fahrzeugkonfigurationen (Reifentyp, Vorhandensein von Assistenzsystemen/FAS), der Wartung (Reifendruck, Öltyp) und der Fahrzeugausstattung (z. B. Dachboxen) sowie die relevanten Bedingungen während der Fahrt (z. B. Nutzung von Nebenaggregaten) in der aktuellen und zukünftigen (bis 2030) Flotte zu beschreiben.

Für die Schätzung über die reale Einsatzverhältnisse der Personenwagen, ist die Analyse der AutoEnergieCheck (AEC) eine wertvolle Ressource. Das AEC ist ein gemeinsames Projekt von Auto Gewerbe Verband Schweiz und EnergieSchweiz. Das betrifft nur die Personenwagen. Diese Dienstleistung wird von Garagisten ausgeführt. Als das Fahrzeug in die Garage eintrifft, wird der Zustand überprüft (Reifendruck, Einstellung Klimaanlage, Lichte, Gepäckträger, unnötigen Zusatzlasten, usw.). Nach dem AEC registriert der Garagist die Daten über den Fahrzeugzustand, sowie seine technischen Spezifikationen, und gibt dem Fahrer Empfehlungen über mögliche Massnahmen, um Treibstoff zu sparen und Emissionen zu reduzieren.

Das AEC wird seit 2012 geführt. In diesem Zeitraum haben 1'621 Garagen in der ganzen Schweiz AEC ausgeführt. Für diese Studie wurden nur die AEC zwischen 1. Januar 2020 und 1. Juni 2023 berücksichtigt. In diesem Zeitraum wurden bei 66'240 Personenwagen einen AEC durchgeführt. Wir können deshalb annehmen, dass die Daten statisch relevant sind und dass sie repräsentativ für die Schweiz sind.

In diesem Abschnitt geben wir zudem einen Überblick über weitere relevante Quellen, die wir bei der Literaturrecherche identifiziert haben und die diese verschiedenen Aspekte abdecken.

5.1 Reifentyp und –druck

Wir konnten leider keine aktuelle Quelle finden, die den durchschnittlichen Rollwiderstand (d. h. die Reifeneffizienzklasse) der in Europa verkauften Reifen angibt. In einem älteren White Paper des ICCT, das den Fahrwiderstand von Leichtfahrzeugen in Europa analysiert (ICCT 2016), wird auf der Grundlage von Daten der Reifenherstellerorganisation ETRTO ein durchschnittlicher Rollwiderstand von 9,34 kg/t (d. h. Klasse D) für 2013 angegeben. Durch das Verbot von F- und G-gekennzeichneten Reifen, ein sensibleres Verhalten der Verbraucher beim Kauf von Reifen mit niedriger Klasse und die Einführung des WLTP-Typgenehmigungsstandards schätzen sie eine Senkung des Rollwiderstands um 22 % (von 9,34 auf 7,3 kg/t) bis 2025. Dies würde eine durchschnittliche Reifenklasse B im Jahr 2025 ergeben, was in Anbetracht des aktuellen Reifenmarktes etwas optimistisch erscheint.

Im Rahmen des uCARe-Projekts wurden die Anteile der Reifeneffizienzklassen und des Reifendrucks für drei verschiedene Fälle ("default", "most-probalbe" und "best-case") für die europäische PKW-Flotte

definiert (siehe Tabelle 13). Die Anteile basieren auf HBEFA-Daten, Umfragen im Rahmen des uCARe-Projekts und zusätzlichen Quellen und können (mit gewissen Modifikationen) als Grundlage für unsere Simulationsszenarien dienen.

	Reifenklasse			Reifendruck		
	A	B	C/D	Niedrig	Standard	Hoch
Default	0%	15%	85%	16%	36%	48%
Most-probable	50%	40%	10%	2%	40%	59%
Best-case	100%	0%	0%	0%	0%	100%

Tabelle 13 Anteil der Reifenklasse und des Reifendrucks, die im Rahmen des uCARe-Projekts zur Beschreibung der "Default", "Most-probable" und "Best-case" Szenarien verwendet wurden. Quelle: Angepasst von uCARe 2022b.

Als Quelle für reale Daten über den Reifendruck verwenden wir die AEC. Wie oben erwähnt, zählt diese Datenbank 66'240 Messungen. Bei 89% von Personenwagen wurde ein Druckmangel festgestellt. Bei 30% von Personenwagen, handelte es sich um ein Druckmangel von über 0.5 bar. Im Durchschnitt wurde der Reifendruck um 0.37 bar erhöht. Dabei wird berücksichtigt, dass die Vorderreifen einen niedrigeren optimalen Reifendruck haben als die Hinterreifen. Der geringste Druck im Durchschnitt war beim Eintreffen bei 2.2 bar und nach dem AEC bei 2,54 bar.

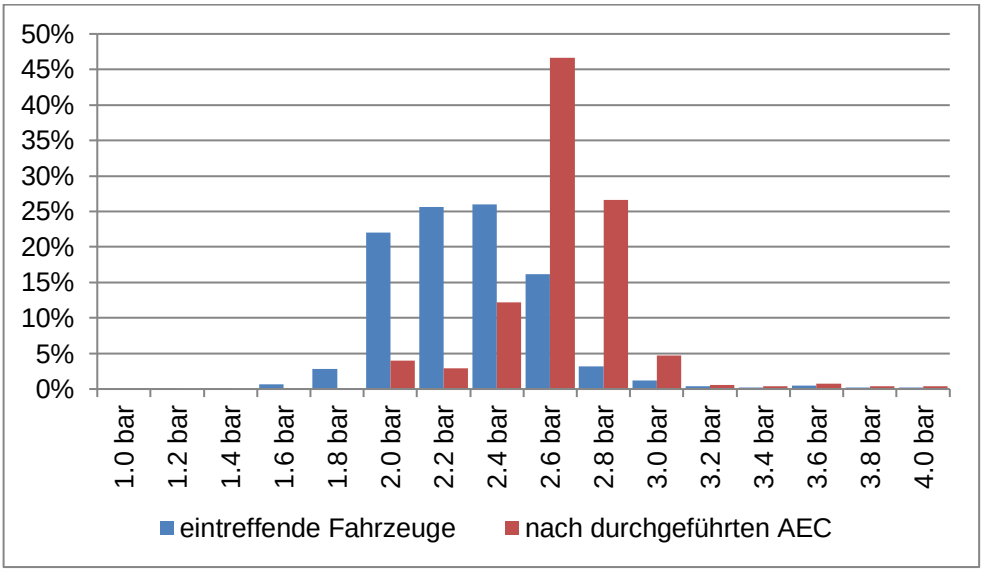


Abbildung 7: Minimal-Reifendruck (in der Regel Vorderreifen) beim Eintreffen (blau) in die Garage und nach durchgeführten AEC (rot). Im Durchschnitt wurde der Reifendruck um 0.37 bar erhöht.

Für SNFs wurde in einem JRC-Bericht, der die CO2-Emissionen der europäischen Schwerlastfahr-zeugflotte analysiert (JRC, 2022), die in Abbildung 8 dargestellten Anteile der verschiedenen Reifen-klassen für unterschiedliche Fahrzeugtypen angegeben. Darüber hinaus findet man in einem "Working Paper" des International Council on Clean Transportation (ICCT 2021b) typische Werte der Rollwiderstandskoeffizienten für LKWs der meistverkauften Marken für alle im VECTO erfassten Fahrzeuggruppen. Schliesslich wurde in einer Studie von TNO und TUG, die das Potenzial von Reifendrucküberwachungssystemen zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs

analysiert (TNO 2013), die Verteilung des Reifendrucks im realen Umfeld für SNFs analysiert, indem ein grosser Datensatz der Reifenherstellerorganisation ETRMA-ETRTO und eine kleine Umfrage der TUG verglichen wurden (siehe Abbildung 9 Anteil der mit unterschiedlichem Reifendruck gefahrenen Kilometer. Quelle: TNO 2013.).

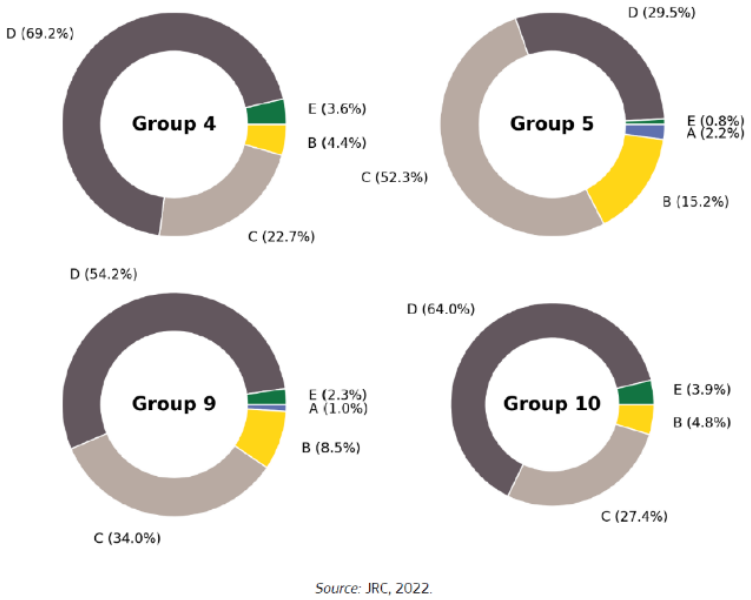


Abbildung 8 Anteil der Reifenklassen pro Fahrzeuggruppe (Gruppe 4: Starrer Lastwagen 4x2 Achse GVW>16t , Gruppe 5: Sattelzugmaschine 4x2 Achse GVW>16t , Gruppe 9: Starrer Lastwagen 6x2 Achse, Gruppe 10: Sattelzugmaschine 6x2 Achse). Quelle: JRC 2022.

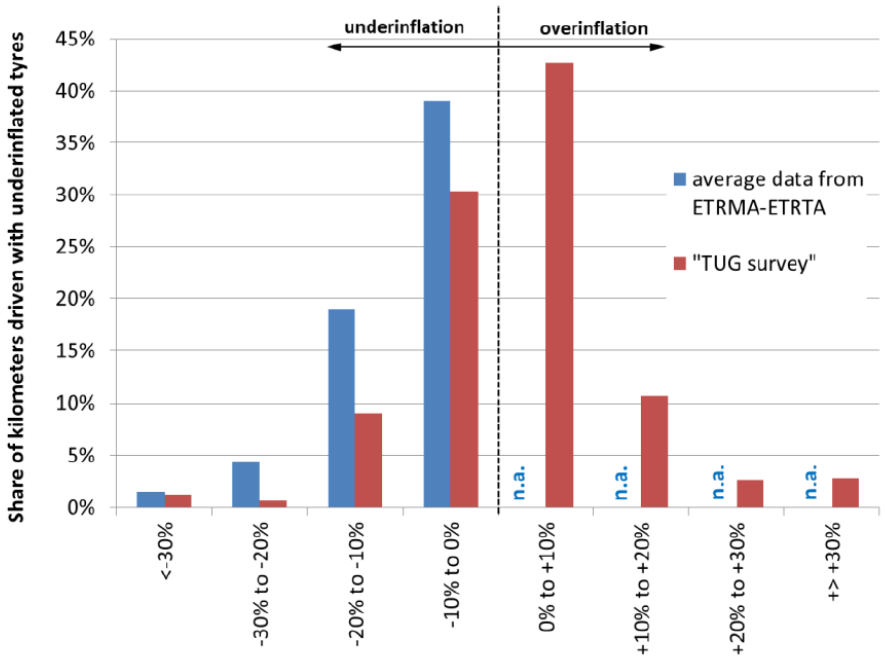


Abbildung 9 Anteil der mit unterschiedlichem Reifendruck gefahrenen Kilometer. Quelle: TNO 2013.

5.2 Dachboxen, Dach-/Fahrradträgern, Anhängern und unnötigen Zusatzlasten

Von den 66'240 analysierten AEC, haben Garagisten bei 2.8% (n=1822) der Personenwagen einen Dachgepäckträger festgestellt und bei weiteren 1.8% (n=1171) einen Heckgepäckträger. Diese Daten wurden beim Eintreffen in die Garage festgestellt. Man kann annehmen, dass viele Autohalter ihre Dach-/Heckgepäckträger vor dem Garagenbesuch demontieren. Auf der Strasse und fahrleistungsgewichtet, dürften deshalb die Anteile eher höher als 2.8% und 1.8% liegen.

Bei 5.9% (n=5888) von Personenwagen haben die Garagisten «überflüssiges» Gepäck wie z.B. Schneeketten im Sommer festgestellt. Es liegt hier dennoch keine Abschätzung des Gewichts vor. Dies ist nochmals die Prävalenz beim Eintreffen in die Garage. Ähnlicherweise kann man hier annehmen, dass viele Fahrzeughalter ihr Fahrzeug vor dem Gang in die Garage eher etwas entrümpeln, schon nur um die Chance auf eine gratis Innenreinigung zu erhöhen. Auf der Strasse dürften auch hier die Anteile eher höher als 5.9% sein.

5.3 Verwendung von Leichtlauföl

Die Statistik über die Verwendung von Leichtlauföl im Rahmen von AEC wurde nur bis Ende Jahr 2016 ausgeführt. 2016 wurden 11'503 Fahrzeuge untersucht. In 5'502 wurde das Öl ersetzt. Bei 21.4% der Fälle (n=1'176) hatte das Fahrzeug konventionelles Öl. Bei den restlichen 77.6% (n=4'268) Fälle war bereits Leichtlauföl im Fahrzeug.

5.4 Verwendung von Nebenaggregaten

Auf der Grundlage einer Langzeitbeobachtung des realen Betriebs und des Energieverbrauchs von PKWs, die von der Empa im Rahmen des ESMOBIL-RED-Projekts durchgeführt wurde, hat Küng (2019) die Nutzungsanteile von Heizung, Klimaanlage und der Kombination aus beiden für verschiedene Umgebungstemperaturen ermittelt (siehe Abbildung 10). Diese Ergebnisse können in Kombination mit den in den Abbildung 5 und Abbildung 6 dargestellten Leistungsbedarfskurven für AC und Heizung verwendet werden, um den gesamten Energiebedarf zu berechnen, der sich aus der Nutzung von AC (ICE) und AC+Heizung (PHEV/BEV) für unterschiedliche Umgebungstemperaturen ergibt. Daraus ergibt sich ein durchschnittlicher Leistungsbedarf von 35 W für das Klima- (alle Fahrzeuge) und 857 W für das Heizsystem (nur BEVs). Der auf diese Weise ermittelte Leistungsbedarf von Klimaanlagen ist viel niedriger als erwartet. Der Wert liegt ungefähr um einen Faktor 10 unter dem in anderen Quellen gefundenen Durchschnittswert (siehe Tabelle 6 und Tabelle 7).

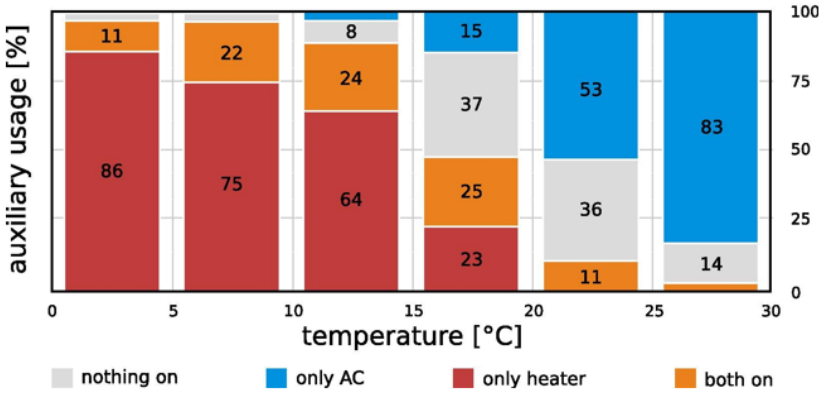


Abbildung 10 Anteil der Nutzung von Klimaanlagen und Heizungen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. Quelle: Küng 2019.

Diese Diskrepanz kann unter anderem auf die Art des Klimasystems der in dieser Studie untersuchten Fahrzeuge zurückzuführen sein. Die aktuelle Fahrzeugflotte umfasst verschiedene Arten von Klimaanlagen, darunter manuell regelbare Klimaanlagen oder selbstregulierende automatische Klimaanlagen, die mit mechanisch oder elektrisch angetriebenen Kompressoren ausgestattet sind. Bei der Literaturrecherche wurden nur sehr wenige Daten über den realen Energieverbrauch dieser Systeme gefunden. Ausserdem erwarten wir erhebliche Unterschiede im nominalen Energieverbrauch und im Betriebsverhalten der verschiedenen Systeme. So ist zum Beispiel zu erwarten, dass bei Fahrzeugen mit automatischen Klimaanlagen, die die Klimaanlage standardmässig beim Motorstart aktivieren, das System häufiger in Betrieb ist als bei Fahrzeugen mit manuellen Klimaanlagen oder automatischen Klimaanlagen, die nicht standardmässig aktiviert werden. Auf der Grundlage solcher Überlegungen und unter Verwendung einiger Annahmen in Bezug auf den Energieverbrauch und den Marktanteil der verschiedenen Systeme haben wir den Energieverbrauch der verschiedenen Nebenaggregate für die verschiedenen Fahrzeugtypen und Simulationsfälle ("default" und "best-case" Sommer/Winter) in Tabelle 14 ermittelt.

		A/C (kW)	Heizung (kW)	Sonstige (kW)	SUMME (kW)
PKW/LNF ICE	def	0.45	0	0.9	1.35
	bestS	0.10	0	0.9	1.00
	bestW	0.01	0	0.9	0.91
PKW/LNF BEV	def	0.35	0.5	0.7	1.55
	bestS	0.08	0	0.7	0.78
	bestW	0.01	0.2	0.7	0.91
LKW ICE	def	0.45	0	4.2	4.65
	bestS	0.10	0	4.2	4.30
	bestW	0.01	0	4.2	4.21
LKW BEV	def	0.35	0.5	4.2	5.05
	bestS	0.08	0	4.2	4.28
	bestW	0.01	0.2	4.2	4.41
Busse ICE	def	1.50	0	12.0	13.50
	bestS	0.33	0	12.0	12.33
	bestW	0.03	0	12.0	12.03

Busse BEV	def	1.50	2.0	12.0	15.50
	bestS	0.33	0	12.0	12.33
	bestW	0.03	0.8	12.0	12.83

Tabelle 14 Energieverbrauch der Nebenaggregate für die verschiedenen Fahrzeugkategorien und Simulationsfälle

5.5 Marktdurchdringung der relevanten FAS

Da FAS oft als optionale Ausstattung eingestuft werden, gibt es derzeit keine umfassende Datenbank weder bei den Herstellern noch bei den Zulassungsbehörden erhältlich, die einen Überblick über die verschiedenen FAS-Systeme bieten, die in verschiedenen PKWs installiert sind.

Start-Stopp-Systeme sind in Europa nicht vorgeschrieben, aber seit einigen Jahren weit verbreitet und gehören zur Standardausstattung vieler PKWs. Die ersten Fahrzeuge mit Start-Stopp-Systemen wurden in Europa in den späten 2000er Jahren eingeführt. Mit der Einführung von CO2-Emissionsnormen im Jahr 2009 (Verordnung (EG) Nr. 443/2009) wurden Start-Stopp-Systeme weit verbreitet. Eine Empa-Studie aus dem Jahr 2019 (Restrepo 2019) zeigt die historische Marktdurchdringung verschiedener elektrischer Steuerungssysteme, einschliesslich Start-Stopp-Systemen, in neu zugelassenen PKWs, wie in Abbildung 11 dargestellt.

Da es keine verbindlichen Statistiken über die Verbreitung von FAS in PKWs gibt, hat die Bundesanstalt für Strassenwesen in den Jahren 2013, 2015, 2017 und 2019 telefonische Umfragen zu deren Verbreitung in deutschen Haushalten durchgeführt (Bast 2023). Die Ergebnisse für die für dieses Projekt relevanten FAS sind in Tabelle 15 zusammengefasst. Darüber hinaus haben wir auf der Grundlage dieser Daten die Prognose bis 2030 anhand einer einfachen linearen Funktion abgeleitet, wie in Abbildung 12 dargestellt.

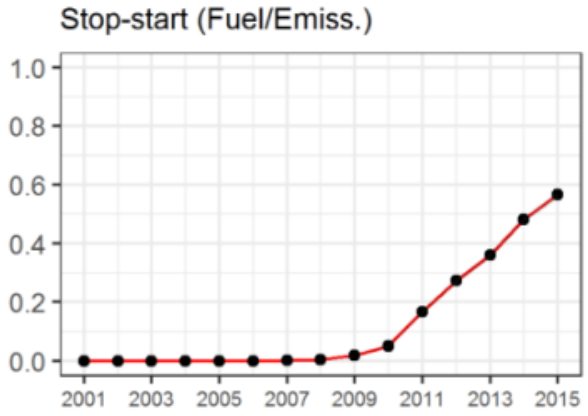


Abbildung 11 Marktdurchdringung des Start-Stopp-Systems in neue PKWs. Quelle: Restrepo 2019.

	Anteil ausgestatteter Fahrzeuge in %				**Prognose**
Assistenzsystem	**2013**	**2015**	**2017**	**2019**	**2030**
Tempomat (CC)	35	43	48	53	85
Adaptiver Tempomat (ACC)	3	5	8	11	25
Prädiktiver Tempomat (PCC)	---	---	2	4	15
Stauassistent (Stopp & Go Automatik)	0	1	2	3	8

Tabelle 15 Anteil der relevanten FAS an der deutschen PKW-Flotte in den Jahren 2013, 2015, 2017, 2019 und unsere Vorhersage für 2030 unter der Annahme eines linearen Wachstums. Quelle: Anteile für die vergangenen Jahre basierend auf Daten in Bast 2023.

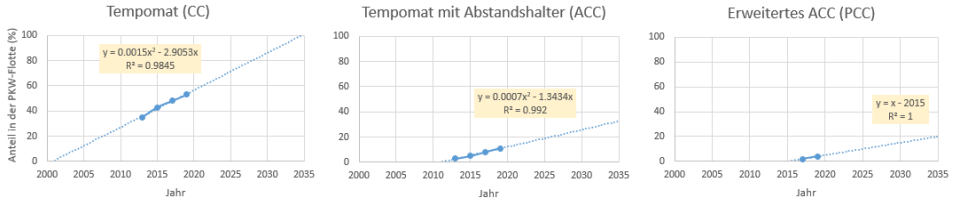


Abbildung 12 Anteil der relevanten FAS an der deutschen PKW-Flotte in den Jahren 2013, 2015, 2017, 2019, gefittet mit einer linearen Funktion zur Vorhersage der Anteile bis 2030. Quelle: Anteile für die vergangenen Jahre basierend auf Daten in Bast 2023.

Für LKWs ist eine Datenbank mit allen von den Herstellern und Mitgliedstaaten übermittelten Daten gemäss der Verordnung (EU) 2018/956 zur Überwachung der CO2-Emissionen von SNFs online verfügbar (EU 2018, EEA 2023). Die Datenbank enthält die zertifizierten CO2-Emissionswerte, die mit dem VECTO-Tool berechnet wurden, sowie Basisdaten zu allen neuen LKW-Zulassungen auf nationaler Ebene, die jährlich von den Herstellern bzw. den Mitgliedstaaten gemeldet werden. Diese Datenbank enthält unter anderem Informationen über die verschiedenen FAS, die in den LKWs eingebaut sind, und kann daher als Quelle für die Ermittlung des Anteils von FAS in den vier schweren LKW-Segmenten verwendet werden, die unter die Verordnung (EU) 2018/956 fallen. Diese Analysen wurden bereits vom Joint Research Center (JRC 2022) unter Verwendung der Daten des ersten Berichtzeitraums durchgeführt (d.h. Fahrzeuge, die zwischen dem 1. Juli 2019 und dem 30. Juni 2020 zugelassen wurden). Die Ergebnisse sind in Abbildung 13 dargestellt und zeigen, dass 48% der Neufahrzeuge in Gruppe 5 (Sattelzug mit 4x2 Achsen und einem zulässigen Gesamtgewicht von mehr als 16 t, der bei weitem grössten Fahrzeugkategorie in der Flotte) mit Eco-Roll und prädiktivem Tempomat ausgestattet waren, während 16% mit Eco-Roll (ohne Motorabschaltung) ausgestattet waren.

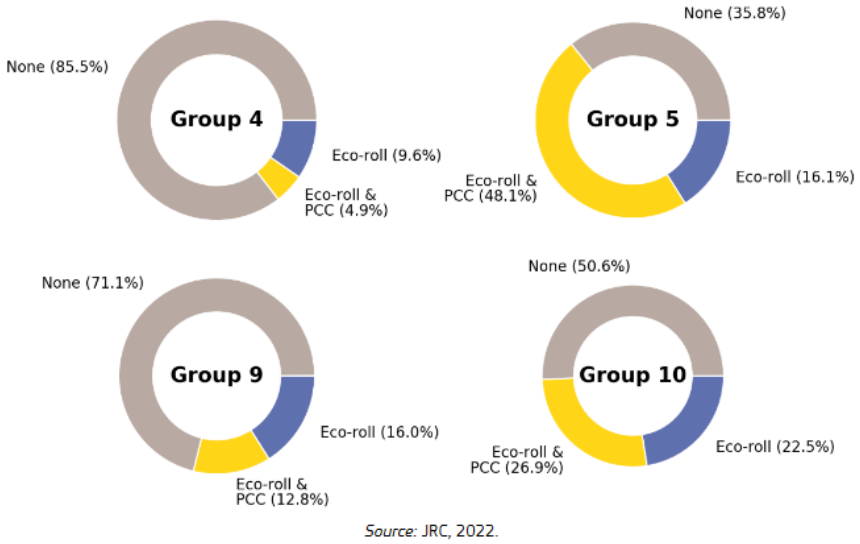


Abbildung 13 Anteil der energierelevanten FAS pro Fahrzeuggruppe (Gruppe 4: Starrer Lastwagen 4x2 Achse GVW>16t , Gruppe 5: Sattelzug 4x2 Achse GVW>16t , Gruppe 9: Starrer Lastwagen 6x2 Achse, Gruppe 10: Sattelzug 6x2 Achse) Quelle: JRC 2022.

Für die erwartete Marktdurchdringung von FAS im SNF-bereich sind die einzigen relevanten Ergebnisse, die wir bisher gefunden haben, Experteneinschätzungen, die in einer Untersuchung der zukünftigen CO2-reduzierenden Technologien im VECTO auf der Grundlage von Beiträgen von Interessengruppen durch eine Umfrage berichtet wurden (JRC, 2021). Die Ergebnisse dieser Bewertung zeigen, dass alle in diesem Projekt berücksichtigten FAS bis 2025 im SNF-bereich etabliert sein dürften (Marktdurchdringung von 31-60%) und bis 2030 zum Standard werden (Marktdurchdringung >61%).

6. Schlüsselvariablen für die Bewertung der Energieeinsparungen

In den folgenden Abschnitten erörtern wir alle relevanten Variablen für die Bewertung der Energiesparpotenziale im AP2, einschliesslich der zu berücksichtigenden Massnahmen, Fahrzeugtypen und Fahrsituationen.

6.1 Massnahmen für umweltbewusstes Fahren

Ziel ist es, das Energieeinsparpotenzial von umweltbewusstem Fahren unter Berücksichtigung aller in den Abschnitten 4.1 und 4.2 beschriebenen klassischen bzw. modernen Eco-Driving-Massnahmen zu bewerten. Wenn möglich, soll die Bewertung des Energiesparpotenzials auf unseren eigenen detaillierten Simulationen beruhen, während Ergebnisse aus der Literatur verwendet werden, wenn eine Simulation nicht möglich ist.

Die einzelnen Eco-Driving-Massnahmen sind in Tabelle 16 aufgelistet, zusammen mit einer kurzen Beschreibung der Variablen, die sie beeinflussen, Hinweisen u.a. zur Datenverfügbarkeit und dem vorgeschlagenen Simulationsansatz, der im Kapitel 7 näher beschrieben wird. Es ist wichtig zu beachten, dass sich die Auswirkungen der verschiedenen Massnahmen in einigen Fällen überschneiden und bei der Bewertung des gesamten Energieeinsparpotenzials nicht immer addiert werden können.

Um die Anzahl der durchzuführenden Simulationen zu begrenzen, wird das Energiesparpotenzial der einzelnen Eco-Driving-Massnahmen nur für einige beispielhafte Fahrzeuge und Fahrsituationen bewertet und nur ihre kombinierte Wirkung wird für alle relevanten Fahrzeugtypen und Fahrsituationen simuliert.

Massnahmen:		**Auswirkungen:**	**Anmerkungen:**	**Modellierungsansatz:**
1. Reifentyp & Reifendruck		Rollwiderstand, Luftwiderstand	Ergebnisse uCARe + Daten AutoEnergie Check + QAED-Aktion an Tankstellen (für PKWs)	- Input-Parameter im uCARe-PHEM
2. Dachboxen, Anhängern & zusätzliche Ladung		Gewicht, Rollwiderstand, Luftwiderstand	Ergebnisse uCARe + Daten AutoEnergie Check (für PKWs)	- Input-Parameter im uCARe-PHEM
3. Leichtlauföl		Reduzierte Reibung im Motor	Daten AutoEnergie Check (für PKWs)	- Basierend auf der Literatur
4. Nebenaggregate (Klima, inkl. Heizung BEV)		Offset im Energieverbrauch	Ergebnisse uCARe (für PKWs)	- Input-Parameter im uCARe-PHEM
5. Fahrprofil	5.1. Max. Geschwindigkeit	Angepasstes Fahrprofil (v, a)	Die Massnahmen 5.3 und 5.4 (Vermeiden von starken Beschleunigungen bzw.	- uCARe-PHEM Super-Eco-Fahrer
	5.2. Eco-Gangwahl	Angepasstes Fahrprofil (v, a)		
	5.3. Eco-Beschleinigung	Angepasstes Fahrprofil (v, a)		

	5.4. Eco-Bremsem	Angepasstes Fahrprofil (v, a)	Bremsen) umfassen teilweise die Auswirkungen des vorausschauenden Fahrens (siehe Abschnitt 7.1)	
	5.5. Leerlauf	Angepasstes Fahrprofil (v, a)		
6. FAS (PKW/ LNF)	6.1. Start-Stopp	Angepasstes Fahrprofil (v, a)	Gleich wie "Leerlauf" Massnahme	- Falls möglich separat auswerten, aber nicht aufsummieren
	6.2. Eco-Modus	Angepasstes Fahrprofil (v, a): Reduzierte Motorleistung/Beschleunigung Optimale Gangwahl (Eco-Coasting) (reduzierte Leistung Klima) (gedimmte Innenbeleuchtung)	Kombination verschiedener oben genannter Massnahmen.	- Falls möglich im uCARe-PHEM Tool separat bewerten aber nicht aufsummieren. - Leistung und Nebenverbrauch als Input-Parameter +super-eco-driver "Gangwahl" und adaptierter super-eco-driver "Beschleunigung" (nur reduzieren, nicht optimieren)
	6.3. Tempomat (CC)	Angepasstes Fahrprofil (v, a)	Nur auf flachen/ebenen Steigungen verkehrsfreie Strassen effizient	- Falls Geschwindigkeit wenig ändert, als konstant setzen - Nur bei "Free-flow" Zyklen ohne oder mit konstantem Gradienten anwenden - Modul zur Anpassung der relevanten Zyklen entwickeln
	6.4. Adaptiver Tempomat (ACC)	Angepasstes Fahrprofil (v, a)	Abhängig von der Fahrsituation ("free flow" vs. "car following"), dem Hersteller (Verbrauch in der Entwicklung berücksichtigt?) und den Einstellungen (Abstand)	- Nur in "Free flow" Zyklen und als Standard CC betrachten
	6.5. Prädiktiver Tempomat (PCC)	Angepasstes Fahrprofil (v, a)	Keine Studien über die Auswirkungen von kommerziellen PCC-Systemen auf den Energieverbrauch	- Nur in "Free flow" Zyklen und als Standard CC betrachten
7. FAS (LKW/ Busse)	7.1. Start-Stopp	Angepasstes Fahrprofil (v, a)	Gleich wie "Leerlauf" Massnahme Falls möglich separat bewerten aber nicht aufsummieren	- Im ADAS in-the-loop Modell im VECTO Tool vorhanden (EU SNF-Zulassung) - Vorhandene Ergebnisse (Bericht TUG) oder selbst simulieren
	7.2. Eco-Rolling	Angepasstes Fahrprofil (v, a)	Beim Bergabfahren mit kleinen negativen Steigungen wird der Motor im Leerlauf betrieben/abgeschaltet.	
	7.3. Prädiktiver Tempomat (PCC)	Angepasstes Fahrprofil (v, a)	Crest Coasting, Beschleunigung	

			ohne Motorleistung und Dip Coasting.	
8. Regeneratives Bremsem		Rekuperation von Energie beim Bremsen, Trade-off mit Segeln	Nur als Eco-Driving Massnahme wenn verschiedene Stufen wählbar. Viele verschiedene Systeme (auch in Kombination mit ACC)	- uCARe PHEM-Simulation der regenerierten Energie
9. Langsames Laden		Geringere Energieverluste beim Laden	Sparpotenzial im vergleich zum Schnellladen	- Basierend auf der Literatur (10%)

Tabelle 16 Zusammenfassung der Massnahmen für umweltfreundliches Fahren, die in diesem Projekt berücksichtigt werden.

6.2 Fahrbedingungen

Um die Auswirkungen der Eco-Driving-Massnahmen unter verschiedenen Fahrbedingungen zu analysieren, werden wir die HBEFA-Fahrzyklen (Ericsson 2019) als Input für die Simulationen verwenden. Das HBEFA umfasst 365 "individuelle Verkehrssituationen", die durch vier Parameter charakterisiert sind: Gebiet (Agglomeration, ländlicher Raum), Strassentyp (Autobahn, Hauptverkehrsstrasse, Sammelstrasse, …), Tempolimit (10, 20, 30, ...130, >130) und Verkehrsdichte (Flüssig, dicht, gesättigt, stop+go, stop+go II).

Ausserdem berücksichtigt HBEFA die Strassenneigung. Unter Berücksichtigung von vier Strassenneigungen (0%, ±2%, ±4% und ±6%) führt dies zu 1472 Zyklen, die für jeden Fahrzeugtyp berücksichtigt werden müssten.

Schliesslich sind die Geschwindigkeitsprofile für die einzelnen Verkehrssituationen für jeden Fahrzeugtyp (PKW, LNF, Reisebusse, Stadtbusse und LKW) definiert.

Die gewichtete lineare Kombination diesen Fahrsituationen definiert die schweizerische durchschnittliche Fahrsituation. Die Gewichtung ist ebenfalls durch HBEFA definiert. HBEFA beschreibt nicht nur die schweizerische durchschnittliche Fahrsituation, sondern auch andere durchschnittliche Fahrsituationen, wie zum Beispiel schweizerische durchschnittliche Fahrsituation Ausserorts im Jahr 2020.

Die durchschnittlichen Verkehrssituationen geben die relative Verteilung einer bestimmten Anzahl von Kilometern auf verschiedene Verkehrssituationen und Strassenneigungen an.

Ein grosser Teil dieser Zyklen ist jedoch für die Schweizer Flotte überhaupt nicht relevant und kann von unserer Bewertung ausgeschlossen werden. Andere Zyklen haben eine sehr tiefe Gewichtung, weil sie selten vorkommen.

Um die Anzahl der zu bewertenden Zyklen zu begrenzen, haben wir für jeden Fahrzeugtyp die Kombinationen von Verkehrssituationen und Strassenneigungen herausgefiltert, die in den im HBEFA definierten "durchschnittlichen Verkehrssituationen" vorkommen und für unsere Bewertung relevant sind.

Für unsere Bewertung wurden die folgenden durchschnittlichen Verkehrssituationen als relevant für die Hochskalierung der Ergebnisse auf Flottenebene betrachtet: CH Ø-Autobahn 2020, CH Ø-Ausserorts 2020 und CH Ø-Innerorts 2020. Wenn man die Auswahl der Fahrzyklen auf die in diesen durchschnittlichen Verkehrssituationen enthaltenen beschränkt, verringert sich die Anzahl der relevanten Zyklen auf etwa 250 für jeden Fahrzeugtyp. Um den Simulationsaufwand weiter zu reduzieren, wurden fünf repräsentative Zyklen pro Fahrzeugkategorie aus jeder relevanten durchschnittlichen Verkehrssituation ausgewählt. Insgesamt resultieren 19 einmalige Fahrzyklen.

Die repräsentativen Fahrsituationen wurden anhand deren Relevanz (hoher Anteil in der jeweiligen durchschnittlichen Verkehrssituation) und deren kinematischen Eigenschaften ausgewählt. Sie minimieren den Fehler bei der Annährung der 250 Zyklen an den fünf Zyklen.

Die für die Simulationen ausgewählten 19 Zyklen sind in Tabelle 17 aufgeführt. Für alle Fahrzeugkategorien werden die 19 Zyklen simuliert. Alle weiteren Zyklen in den relevanten durchschnittlichen Verkehrssituationen werden für die Hochrechnung einem der ausgewählten Zyklen zugeordnet.

Nr.	Gebiet	Strasse	Tempolimit [km/h]	Verkehrszustand	Steigung
1	Agglo	Hauptverkehrsstrasse	50	Flüssig	+/-4%
2	Agglo	Erschliessung	50	Gesättigt	0%
3	Agglo	Erschliessung	50	Dicht	0%
4	Agglo	Erschliessung	50	Flüssig	0%
5	Agglo	Erschliessung	30	Dicht	0%
6	Agglo	Erschliessung	30	Flüssig	0%
7	Land	Hauptverkehrsstrasse	80	St+Go	0%
8	Land	Hauptverkehrsstrasse	80	Gesättigt	0%
9	Land	Hauptverkehrsstrasse	80	Dicht	0%
10	Land	Hauptverkehrsstrasse	80	Flüssig	0%
11	Land	Hauptverkehrsstrasse	50	Flüssig	0%
12	Land	Hauptverkehrsstrasse	80	Flüssig	+/-4%
13	Agglo	Autobahn	120	Dicht	0%
14	Agglo	Autobahn	100	Dicht	0%
15	Land	Autobahn	120	Gesättigt	0%
16	Land	Autobahn	120	Flüssig	0%

17	Land	Autobahn	100	Flüssig	0%
18	Land	Autobahn	120	Flüssig	+/-4%
19	Land	Autobahn	120	Flüssig	+/-2%

Tabelle 17 Ausgewählte HBEFA-Fahrzyklen für die Simulationen.

Es ist wichtig zu beachten, dass die HBEFA-Zyklen das Fahrverhalten eines durchschnittlichen Fahrers darstellen und daher nicht geeignet sind, das Energiesparpotenzial aggressiver Fahrer abzuschätzen. Dieses könnte bei zukünftigen Bewertungen berücksichtigt werden, bei denen das Einsparpotenzial von aggressiven und durchschnittlichen Fahrern verglichen wird.

6.3 Fahrzeugtypen

Um den grösstmöglichen Nutzen aus der HBEFA-Struktur für die Hochskalierung der Ergebnisse zu ziehen, würde die Bewertung der Energieeinsparungen idealerweise alle im HBEFA-Rahmen definierten und in Tabelle 18 dargestellten Fahrzeugkategorien abdecken. Wenn wir alle Kombinationen von Fahrzeugklassen, Antriebsarten, Grössenklassen und Euro-Klassen berücksichtigen, ergibt dies 590 verschiedene Fahrzeugtypen, von denen mehr als 200 Diesel-LKW sind. Berücksichtigt man jedoch 250 Fahrzyklen, 590 Fahrzeugtypen und z.B. 4 Modellläufe (mit verschiedenen Fahrzeugkonfigurationen) pro Kombination, würde dies zu fast 600.000 Simulationen führen, was für den Zeitrahmen des Projekts zu zeitaufwändig sein könnte. Ausserdem haben viele der in Tabelle 18 aufgeführten Fahrzeugtypen nur einen geringen Anteil an den aktuellen und geschätzten zukünftigen Fahrzeugflotten, so dass die Anzahl der Fahrzeugtypen reduziert werden kann, ohne die Endergebnisse des Projekts zu beeinträchtigen.

Fahrzeugtyp		**Antrieb**	**Grössen-klasse**	**Euroklasse**
PKW		Diesel	N.A.	EU0, EU1, EU2, EU3, EU4, EU5, EU6ab, EU6c, EU6dt, EU6d, EU7
		PHEV Diesel		EU4, EU5, EU6ab, EU6d
		Benzin		EU0, EU1, EU2, EU3, EU4, EU5, EU6ab, EU6c, EU6dt, EU6d, EU7
		PHEV benzin		EU4, EU5, EU6ab, EU6d
		BEV		--
		CNG/Benzin		EU2, EU3, EU4, EU5, EU6
		LPG/Benzin		EU2, EU3, EU4, EU5, EU6
		FFV		EU3, EU4, EU5, EU6
		H2		--
LNF		Benzin	M+N1-I, N1-II, N1-III	EU0, EU1, EU2, EU3, EU4, EU5, EU6ab, EU6c, EU6dt, EU6d
		Diesel		EU0, EU1, EU2, EU3, EU4, EU5, EU6ab, EU6c, EU6dt, EU6d
		BEV		--
		PHEV Benzin		EU5, EU6
		PHEV Diesel		EU5, EU6
		CNG/Benzin		EU2, EU3, EU4, EU5, EU6
		H2		--
		FFV	N1-III	EU3, EU4, EU5, EU6
LKW		Diesel	<=7,5t, 7,5-12t, 12-14t, 14-20t,	50er Jahre, 60er Jahre, 70er Jahre, 80er Jahre, EU0, EU-I, EU-II, EU-III,

	Starrer Lkw		20-26t, 26-28t, 28-32t, >32t	EU-IV (EGR/SCR), EU-V (EGR/SCR), EU-VI (A-C/D-E)
		Diesel-PHEV	<=7,5t, 7,5-12t, >12t	EU-IV (EI/D)
		Benzin	N.A.	N.A.
		BEV	<=7,5t, 7,5-12t, >12t	--
		CNG	<=7,5t, 7,5-12t, >12t	EU-IV, EU-V, EU-VI
		LNG	<=7,5t, 7,5-12t, >12t	EU-IV, EU-V, EU-VI
		H2	<=7,5t, 7,5-12t, >12t	--
	Lkw + Anhänger oder Artic. Lkw	Diesel	<=7,5t, 7,5-14t, 14-20t, 20-28t, 28-34t, 34-40t, 40-50t, 50-60t, >60t	50er Jahre, 60er Jahre, 70er Jahre, 80er Jahre, EU0, EU-I, EU-II, EU-III, EU-IV (EGR/SCR), EU-V (EGR/SCR), EU-VI (A-C/D-E)
		Diesel-PHEV	N.A.	EU-IV (EI/D)
		BEV	N.A.	--
		CNG	N.A.	EU-IV, EU-V, EU-VI
		LNG	N.A.	EU-IV, EU-V, EU-VI
		H2	N.A.	--
Busse	Stadtbus	Benzin	midi (<=15t)	EU-IV, EU-V, EU-VI
		Diesel	Midi (<=15t), Standard (15-18t), gelenkig (>18t)	50er Jahre, 60er Jahre, 70er Jahre, 80er Jahre, EU0, EU-I, EU-II, EU-III, EU-IV (EGR/SCR), EU-V (EGR/SCR), EU-VI (A-C/D-E)
		Diesel-Hybrid		EU-IV, EU-V, EU-VI (A-C/D-E)
		CNG		EU-II, EU-III, EU-IV, EU-V, EU-VI
		LNG		EU-IV, EU-V, EU-VI
		Ehanol		EU-II, EU-III, EU-IV, EU-V, EU-VI
		BEV		--
		H2		--
	Reisebus	Diesel	Midi (<=15t), Standard (15-18t), gelenkig (>18t)	50er Jahre, 60er Jahre, 70er Jahre, 80er Jahre, EU0, EU-I, EU-II, EU-III, EU-IV (EGR/SCR), EU-V (EGR/SCR), EU-VI (A-C/D-E)
		CNG		EU-I, EU-II, EU-III, EU-IV, EU-V, EU-VI
		BEV		--
		H2		--

Tabelle 18 Liste aller Fahrzeugklassen und Unterklassen nach Antrieb, Grösse und Euroklasse, die im Rahmen des HBEFA enthalten sind.

Bis zu einem gewissen Grad erfolgt diese Vereinfachung, wenn mann die derzeit im PHEM-Simulationstool implementierten Fahrzeugklassen berücksichtigt (siehe Tabelle 19). Die Fahrzeugklassen/Technologien mit weissem Hintergrund sind in der aktuellen Version des Modells vollständig implementiert. Darüber hinaus haben wir mit unterschiedlichen Hintergrundfarben zusätzliche Fahrzeugklassen gekennzeichnet, die im Allgemeinen als relevant angesehen werden, aber noch nicht vollständig implementiert sind (grün), nicht implementiert sind, aber relativ einfach implementiert werden können (blau) und nicht implementiert sind und deren Implementierung komplex ist (grau). Die Tabelle zeigt, dass alle relevanten ICE-Fahrzeuge für eine breite Reihe von Euro-Klassen durch das Modell abgedeckt sind. BEVs sind für die PKW- und LNF-Kategorien vollständig implementiert. Für SNFs sind BEVs auch implementiert sind, aber die Bewertung des "Eco-Bremsens" fehlt, da die Entwickler noch keine gute Methode dafür gefunden haben. Wir

können jedoch die Einsparpotenziale dieser Massnahme für BEV-LKWs abschätzen, indem wir das Verhältnis des Energieeinsparpotenzials vom "Eco-Bremsen" für Diesel- und BEV-PKWs bewerten und die Ergebnisse auf LKWs übertragen. PHEV-Technologien in der PKW-Kategorie sind nicht per se implementiert, aber sie können als eine Kombination aus einem BEV und einem Diesel- oder Benzin-HEV, gewichtet mit Standard-Nutzungsfaktoren, bewertet werden. Auf diese Weise wird z.B. das Einsparpotenzial eines EU6d-Benzin-PHEV als gewichteter Durchschnitt eines EU6d-Benzin-HEV und eines BEV mit einem Gewichtungsfaktor (Nutzfaktor) von jeweils 0,5 ermittelt. CNG-Fahrzeuge sind in der aktuellen Version nur für PKWs implementiert, aber es sollte relativ einfach sein, sie für alle anderen Fahrzeugtypen zu implementieren, da das Eco-Fahrermodell für CNG dasselbe ist wie für ICEs und alle notwendigen Inputdaten in der HBEFA-Datenbank verfügbar sind. Schliesslich bleibt H2 für alle Fahrzeugtypen ungedeckt, und es gibt auch keine einfache Möglichkeit, es zu implementieren. Der Anteil dieser beiden Technologie an der aktuellen und der erwarteten zukünftigen Flotte ist jedoch gering. Ausserdem können wir annehmen, dass die Einsparpotenziale (in Prozent) von CNG-Fahrzeugen denen von Verbrennungsmotoren entsprechen werden, während die Einsparpotenziale von H2-Fahrzeugen denen von BEVs entsprechen werden.

Fahrzeugklasse		**Antrieb**	**Grössenklassen**	**Euroklassen**
PKW		Diesel		EU0, EU1, EU2, EU3, EU4, EU5, EU6ab, EU6c, EU6dt, EU6d, EU7
		Diesel-Hybrid		EU6d
		Diesel-PHEV		
		Benzin		EU0, EU1, EU2, EU3, EU4, EU5, EU6ab, EU6c, EU6dt, EU6d, EU7
		Benzin-Hybrid		EU6d
		Benzin-PHEV		
		BEV		N.A.
		CNG		EU4, EU5, EU6ab
		H2		
LNF		Diesel	I, II, III	EU0, EU1, EU2, EU3, EU4, EU5, EU6ab, EU6c, EU6dt, EU6d
		Diesel-Hybrid	I, II, III	EU6d
		Benzin	I, II, III	EU0, EU1, EU2, EU3, EU4, EU5, EU6ab, EU6c, EU6dt, EU6d
		Benzin-Hybrid	I, II, III	EU6d
		BEV	I, II, III	N.A.
		CNG		
		H2		
LKW	Starrer Lkw	Diesel	I, II	EU0, EU-I, EU-II, EU-III, EU-IV_EGR, EU-IV_SCR, EU-V_EGR, EU-V_SCR, EU-VI (A-C), EU-VI (D-E)
		Diesel_HEV	I	EU-VI (A-C)
		BEV	schwer, mittel	N.A.
		CNG		
		H2		
	Sattelschlepper	Diesel		EU0, EU-I, EU-II, EU-III, EU-IV_EGR, EU-IV_SCR, EU-V_EGR, EU-V_SCR, EU-VI (A-C), EU-VI (D-E)
		Diesel_HEV		
		BEV	25t	N.A.
		CNG		

		H2		
Busse	Stadt-bus	Diesel	schwer, Midi, N.A.	EU0, EU-I, EU-II, EU-III, EU-IV_EGR, EU-IV_SCR, EU-V_EGR, EU-V_SCR, EU-VI (A-C), EU-VI (D-E)
		Diesel-HEV	schwer, midi	EU-VI (A-C)
		BEV	schwer, leicht	N.A.
		CNG		
		H2		
	Reise-bus	Diesel	N.A.	EU0, EU-I, EU-II, EU-III, EU-IV_EGR, EU-IV_SCR, EU-V_EGR, EU-V_SCR, EU-VI (A-C), EU-VI (D-E)
		BEV		
		CNG		
		H2		

Tabelle 19 Liste der Fahrzeugklassen und Subklassen (Antriebe, Grösse und Euroklasse), die im uCARe-PHEM-Modell enthalten sind.

Um den Simulationsaufwand weiter zu reduzieren, werden die verbleibenden Technologien und Euroklassen mit geringen Flotten- und Kilometeranteilen (d.h. Diesel-PHEM und Euroklassen unter EU4) sowie energetisch vergleichbare Technologien (unterschiedliche EU6-Klassen für PKWs/LNFs sowie SCR/EGR und (A-C)/(D-E)- Differenzierungen für LKWs/Busse) nicht berücksichtigt. Die insgesamt 73 Fahrzeuge, die somit für die Simulationen ausgewählt wurden, sind in Tabelle 20 aufgeführt.

Fahrzeug-klasse	Sub-klasse	Antrieb	Grössenklasse	Euroklassen
PKW		Diesel		EU4, EU5, EU6d, EU7
		Diesel-Hybrid		EU6d
		Benzin		EU4, EU5, EU6d, EU7
		Benzin-Hybrid		EU6d
		Benzin-PHEV		EU4, EU5, EU6d, EU7
		BEV		N.A.
		CNG		EU4, EU5, EU6ab
LNF		Diesel	I, II, III	EU4, EU5, EU6d
		Diesel-Hybrid	I, II, III	EU6d
		Benzin	I, II, III	EU4, EU5, EU6d
		Benzin-Hybrid	I, II, III	EU6d
		BEV	I, II, III	N.A.
LKW	Rigid Truck	Diesel	I, II	EU-IV_SCR, EU-V_SCR, EU-VI (A-C)
		Diesel_HEV	I	EU-VI (A-C)
		BEV	heavy, medium	N.A.
	Trailer Truck	Diesel	N.A.	EU-IV_SCR, EU-V_SCR, EU-VI (A-C)
		BEV	25t	N.A.
Busse	Stadtbus	Diesel	heavy, midi	EU-IV_SCR, EU-V_SCR, EU-VI (A-C)
		Diesel-HEV	heavy, midi	EU-VI (A-C)
		BEV	heavy, light	N.A.
	Reisebus	Diesel	N.A.	EU-IV_SCR, EU-V_SCR, EU-VI (A-C)

Tabelle 20 Ausgewählte Fahrzeugklassen für die Simulationen.

7. Modellierungsansatz

7.1 uCARe-PHEM Tool

Das PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model) ist ein seit den späten 1990er Jahren am IVT der TU Graz entwickeltes Modell zur Simulation des Energieverbrauchs und der Abgasemissionen von Strassenfahrzeugen (einschliesslich PKWs, LNFs, SNFs und 2-Rad-Fahrzeuge). Eine detaillierte Beschreibung des Modells findet man in der Literatur (Hausberger 2003, Hausberger 2009, Zallinger 2010, Luz 2013). Auf der Grundlage der Fahrzeuglängsdynamik und unter Verwendung von Motoremissionskennfeldern bestimmt PHEM den Energieverbrauch und die Emissionen im Sekundentakt für jeden beliebigen Fahrzyklus (Geschwindigkeitsprofil und Strassenneigung). Die Simulation kann für einzelne Fahrzeuge oder für Fahrzeugflotten durchgeführt werden und deckt sowohl konventionelle Antriebssysteme (Diesel und Benzin von Euro 0 bis Euro 6d) als auch alternative Antriebe (HEV und BEV) ab. Darüber hinaus bietet PHEM einen vordefinierten Satz von "Durchschnittsfahrzeugen" für alle relevanten Fahrzeugkategorien.

Im Rahmen des uCARe H2020-Projekts wurde ein Super-Eco-Driver-Modul für PKWs entwickelt und in PHEM integriert (von nun an als uCARe-PHEM bezeichnet). Ausserdem, wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, wurden im Rahmen des uCARe-Projekts auch neue Datenbanken für den Energiebedarf von Nebenaggregaten sowie für die Auswirkungen verschiedener Fahrzeugeinstellungen (Reifentypen und -druck, Dachboxen, zusätzliches Gewicht...) auf die Fahrwiderstände von PKWs eingerichtet und mit dem Simulationstool verknüpft. So kann das Tool verwendet werden, um die Auswirkungen einzelner Massnahmen zum umweltfreundlichen Fahren (insbesondere die Massnahmen Nummer 1, 2, 4 und 5 in Tabelle 16) auf die wichtigsten Schadstoffemissionen und den Energieverbrauch zu untersuchen.

Das Super-Eco-Driver Modul im uCARe-PHEM Tool simuliert die Emissionen für jede beliebige Strecke mit einem virtuellen "Super Eco"-Fahrer, der die Höchstgeschwindigkeit sowie das Schalt-, Beschleunigungs- und Bremsverhalten optimiert, was jeweils den Massnahmen 5.1, 5.2, 5.3 und 5.4 in Tabelle 16 entspricht. Eine detaillierte Beschreibung des Super-Eco-Driving-Modells ist in einem online verfügbaren uCARe-Bericht zu finden (uCARe 2022a). Die wichtigsten Modellentwicklungen innerhalb des Super-Eco-Fahrer-Moduls umfassen:

— Ein Eco-Schaltmodell, welches messbasierte Eco-Shifting-Parameter und eine Super-Eco-Shifting-Strategie enthält, die alle möglichen Gänge auf geringere Emissionswerte bei gleicher Leistung im Vergleich zum vorgewählten Gang überprüft (Abbildung 14). Das Schaltmodell kann zur Minimierung einzelner Schadstoffe oder einer definierten gewichteten Kombination der verschiedenen Schadstoffe eingesetzt werden. Im Rahmen des uCARe-Projekts wurde das Eco-Schaltmodell so eingestellt, dass ein gewichteter Schadstoffmix auf der Grundlage der langfristigen Klimaschutzkosten für CO2 und der externen Kosten für NOx, PM10 und NMVOCs optimiert wird. Für dieses Projekt werden wir stattdessen die Schaltung zur Minimierung des CO2/Energieverbrauchs optimieren.

— Eine auf 120 km/h eingestellte maximale Geschwindigkeit.

— Eine Eco-Beschleunigungsgrenzkurve, welche die maximale Beschleunigung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit beschreibt und die Beschleunigung nach Erreichen der optimalen Fahrzeuggeschwindigkeit stark einschränkt (Abbildung 15).

— Eine Eco-Bremskurve, welche die minimal benötigte Bremsleistung in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit darstellt und zur Abschätzung des Energiesparpotenzials durch reduziertes mechanisches Bremsen im Post-Processing verwendet wird (Abbildung 16).

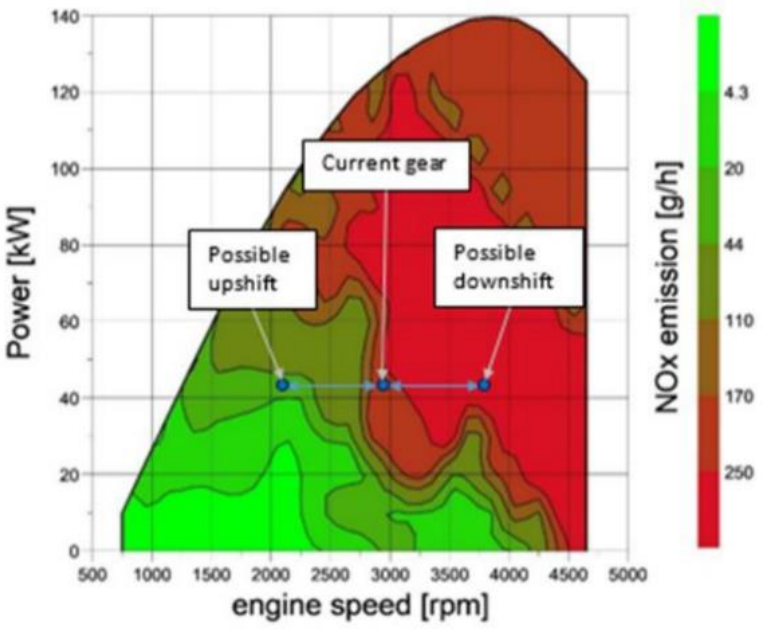


Abbildung 14 Eco-Gangschaltmodell im uCARe-PHEM-Tool am Beispiel der NOx-Optimierung. Quelle: uCARe 2022a.

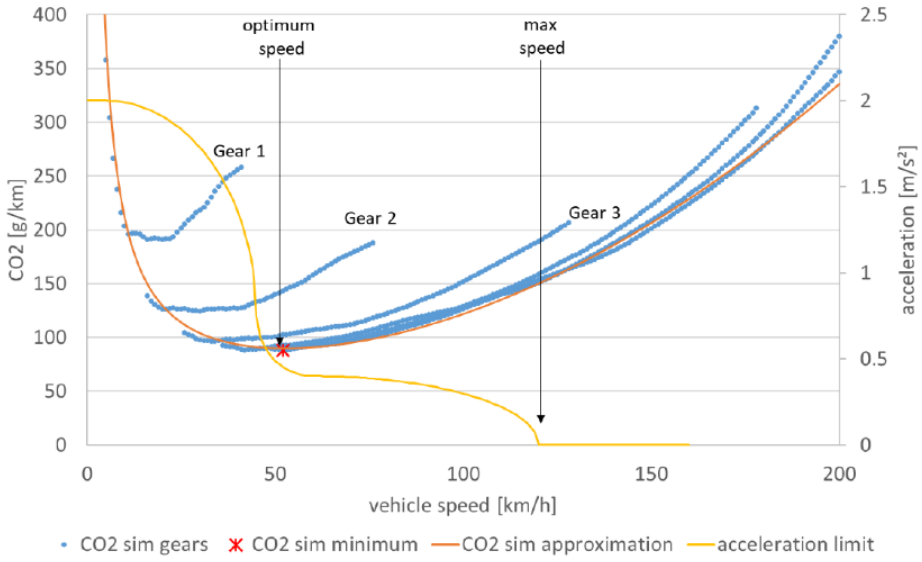


Abbildung 15 Eco-Beschleunigungskurve basiert auf der Analyse der optimalen Fahrzeuggeschwindigkeit. Quelle: uCARe 2022a.

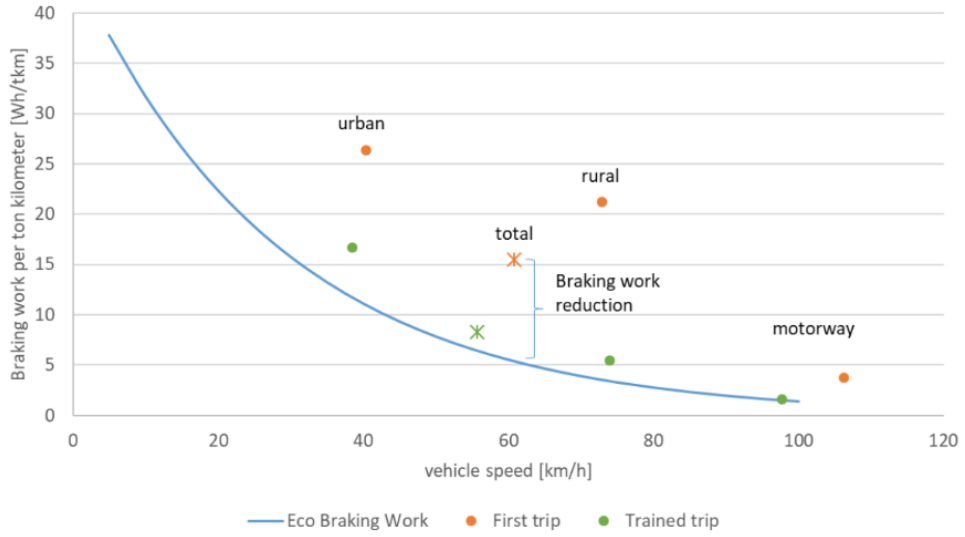


Abbildung 16 Eco-Bremsleistungskurve mit 2 Beispielfahrten (vor und nach Eco-Fahrtraining). Quelle: uCARe 2022a.

Darüber hinaus enthält das PHEM-Modell auch eine Option zur Simulation eines Start-Stopp-Systems (d.h. Abschalten des Motors im Leerlauf) und kann daher auch zur Abschätzung des Energiesparpotenzials der Massnahme 5.5 in Tabelle 16 verwendet werden.

Durch die Kombination der oben genannten Punkte kann das Super-Eco-Driver-Modul verwendet werden, um zumindest zu einem grossen Teil das Energieeinsparpotenzial zu simulieren, welches sich aus einer umweltfreundlichen Fahrweise ergibt. Die im Tool berücksichtigte Eco-Beschleunigungskurve und maximale Bremsarbeit basieren auf Fahrdaten von Eco-Fahrern und stellen daher die Auswirkungen des Eco-Fahrens auf Beschleunigung und Bremsen dar. Wie im Abschnitt 4.1 erläutert, können manche weitere Auswirkungen der Eco-Fahrweise (z.B. vorausschauendes Fahren und Segelns) auf den Energieverbrauch ohne Mikro-Verkehrssimulationen nicht geschätzt werden, da z.B. die Möglichkeit zum Segeln von der jeweiligen Verkehrssituation abhängt.

Darüber hinaus berücksichtigt der Super Eco-Driver ausschliesslich Handschaltgetriebe. Da der Fahrer bei Automatikgetrieben keinen direkten Einfluss auf die Gangwahl hat, überschätzt das Super Eco-Driver-Modell bei diesen Fahrzeugen das Einsparpotenzial durch die Eco-Fahrweise. Bei neueren Fahrzeugen wird die Schaltstrategie des Automatikgetriebes jedoch durch die Aktivierung des Eco-Modus ebenfalls auf Energieeinsparung optimiert. Damit bleiben die Einsparpotenziale, obwohl sie in einen Fall aus dem Fahrverhalten und im anderen Fall aus der Nutzung des Eco-Modus resultieren, insgesamt gleich.

Das uCARe-PHEM simuliert automatisch die Emissionen auf der Grundlage der eingegebenen Fahrzeuggeschwindigkeit und Höhendaten in einer Zeitauflösung von 1 Hz für zwei Varianten: Im ersten Durchlauf wird die eingegebene Motordrehzahl/Geschwindigkeit verwendet ("DirectRPM"-Simulation, gibt die Basiswerte für die Bewertung des Einsparpotenzials aus), während im zweiten Durchlauf die Motordrehzahl unter Verwendung der Super-

Eco-Schaltstrategie und der oben beschriebenen Beschleunigung und Höchstgeschwindigkeitsbegrenzung berechnet wird ("SuperECO"-Simulation). Bei der "SuperECO"-Simulation wird die potenzielle Reduzierung des Energieverbrauchs/der Emissionen aufgrund der verringerten Bremsarbeit im Nachhinein berechnet (dies ist bei der sekundengenauen Simulation nicht möglich, da nicht bekannt ist, welche Verzögerungen notwendig waren, um Unfälle usw. zu vermeiden). Konkret wird die Differenz zwischen der durchschnittlichen Bremsarbeit der Fahrt und der durchschnittlichen Bremsarbeit von Eco-Fahrten mit derselben mittleren Geschwindigkeit als der Überschuss angesehen, der eingespart werden könnte. Das Ergebnis der SuperECO-Simulation ist der Energieverbrauch bzw. die Emissionen, die sich aus dem optimierten Fahrstil für den jeweiligen Zyklus ergeben. Durch den Vergleich der Emissionen und des Energieverbrauchs, die sich aus den directRPM- und SuperECO-Simulationen ergeben, können die Energie- und Emissionseinsparpotenziale durch eine optimierte Fahrweise ermittelt werden.

Um das Super Eco-Driver-Modell zu validieren, wurde im Rahmen des uCARe-Projekts eine Pilotmesskampagne mit vier Testfahrern durchgeführt. Der Vergleich des geschätzten CO2-Einsparungspotenzials (d.h. des Energieverbrauchs) für die vier Fahrer auf derselben vordefinierten Strecke vor und nach dem Eco-Driving-Training ist in Abbildung 17 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass das verbleibende Reduktionspotenzial nach dem Eco-Driving-Training im Vergleich zum Potenzial vor dem Training relativ gering ist(zwischen 0,2 und 2,2 %). Dies zeigt, dass das Super-Eco-Fahrermodell, obwohl es vorauschauendes Fahren und Segeln nicht direkt und vollständig einbezieht, zumindest zum grössten Teil die Auswirkungen eines Eco-Fahrstils angemessen darstellt.

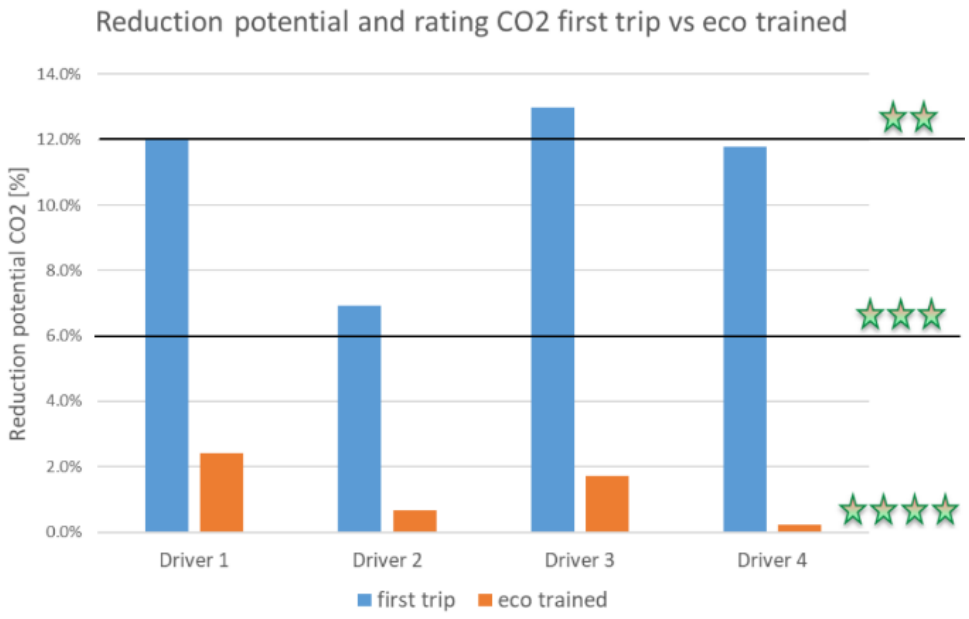


Abbildung 17 CO2-Reduktionspotenzials von vier Testfahrern vor und nach einem Eco Driving-Training im Vergleich zum simulierten Super Eco-Fahrer. Quelle: uCARe 2022a.

Seit Abschluss des uCARe-Projekts hat die TU Graz das Super-eco-driver-Modul weiterentwickelt, um auch zusätzliche Antriebstechnologien (BEV) und Fahrzeugtypen (LNFs und LKWs) einzubeziehen.

Bei der Simulation des Energieverbrauchs von BEVs ist es wichtig, die Auswirkungen des regenerativen Bremsens, dessen Kompromiss mit dem Rollen/Segeln des Fahrzeugs und dessem Interaktion mit der im Super-Eco-Fahrermodell enthaltenen Massnahme "Eco-Bremsen" zu berücksichtigen. Der Grundgedanke hinter dem Bremsmodell des Super-Eco-Driver-Moduls in PHEM ist, dass Geschwindigkeitsreduzierungen so sanft wie möglich sein sollten und mechanisches Bremsen so weit wie möglich vermieden werden sollte. Der Grund dafür ist, dass die von den mechanischen Bremsen verbrauchte Energie später vom Motor wieder zugeführt werden muss. Wenn das Fahrzeug nur im Leerlauf fährt, wird die kinetische Energie durch den Roll- und Luftwiderstand reduziert, was unvermeidliche Verluste sind. Werden die mechanischen Bremsen jedoch durch Betätigen des Bremspedals aktiviert, um schneller zu verzögern, wird zusätzliche kinetische Energie in Wärmeverluste umgewandelt. Ausnahmen sind Elektro- und Hybridfahrzeuge, die einen hohen Anteil der Bremsenergie zurückgewinnen können. Aber auch bei diesen Systemen reduziert die Vermeidung unnötiger Bremsvorgänge den Energieverbrauch und die Emissionen aufgrund von Verlusten bei der Umwandlung und Speicherung von Energie. Im Allgemeinen teilt das PHEM-Modell die Verzögerungsleistung zwischen mechanischem Bremsen und Motorbremsen auf, zusätzlich zu der durch die Fahrwiderstände verursachten Verzögerung. Bei der Analyse der Eco-Bremsleistung wird nur die mechanische Bremsleistung berücksichtigt, während die Verzögerung durch die Motorbremsung in der Simulation berücksichtigt, aber nicht auf mögliche Einflüsse des Fahrers hin analysiert wird (*Hintergrund: Das Rollen ohne Auskuppeln führt in dieser Phase zu einer Nulleinspritzung, addiert aber das Schleppmoment des Motors zu den Fahrwiderständen. Das Motorschleppmoment könnte vermieden werden, wenn der Motor während des Abbremsens ausgekuppelt wird, aber dann entsteht während des Abbremsens der Leerlaufkraftstoffverbrauch. Insgesamt ist das Abbremsen mit eingekuppeltem Motor in einem relativ hohen Gang, um den Widerstand zu minimieren, eine effiziente und die einfachste Methode zum Abbremsen konventioneller Fahrzeuge. Bei Hybridfahrzeugen erfolgt das Auskuppeln und Abschalten des Motors in den Verzögerungsphasen automatisch und erfordert daher keine Aktivität des Fahrers*). Bei BEVs ist das PHEM-Verzögerungsmodell so angelegt, dass so viel wie möglich mit dem Elektromotor rekuperiert wird und der Einsatz der mechanischen Bremse auf den Fall einer starken Bremsung beschränkt ist (d.h. nur, wenn die erforderliche Bremsarbeit die Rekuperationsleistung des Elektromotors übersteigt). Das Super-Eco-Driver-Modul für BEVs basiert auf demselben Prinzip, das oben für konventionelle Fahrzeuge beschrieben wurde, aber anstelle der Bremsarbeit berücksichtigt das Modell die negative Motorarbeit (oder Rekuperation) und vergleicht sie mit einer Eco-Bremskurve. Jede Rekuperationsarbeit unterhalb dieser Kurve wird als notwendig angesehen, um den Zyklus fahren zu können, während jede Rekuperationsarbeit oberhalb dieses Niveaus als unnötig angesehen wird. Durch Subtraktion der "Eco-Rekuperationsarbeit" von der simulierten Rekuperationsarbeit wird der Überschuss berechnet. Da jedoch auch die

überschüssige Rekuperationsarbeit in die Batterie zurückgespeist wird, werden nur die Lade- und Entladeverluste als Überschussverluste betrachtet. Die Summe der Verluste im Zusammenhang mit der überschüssigen Rekuperationsarbeit und den Verlusten durch die Nutzung der mechanischen Bremsen (die immer als Verlust betrachtet wird) stellt das Einsparpotenzial durch die Massnahme "Eco-Bremsen" im Falle eines BEVs dar und wird als Output des Eco-Fahrer-Modells in PHEM bereitgestellt.

7.2 Schätzung des Einsparpotenzials von FAS

Die Verwendung von FAS wurde nicht in das uCARe-PHEM-Modell implementiert und daher müssen alternative Möglichkeiten zur Bewertung ihrer Energiesparpotenziale entwickelt werden. Wie in Tabelle 16 dargestellt, beeinflusst die Verwendung der verschiedenen FAS in erster Linie das Fahrprofil (Geschwindigkeit und Beschleunigung). Es ist wichtig zu beachten, dass sich die mit der Verwendung von FAS verbundenen Effekte mit denen überschneiden können, die bereits im Super Eco-Driver-Modul des PHEM-Modells berücksichtigt werden. Bei der Bewertung und Skalierung der Ergebnisse ist es daher entscheidend, die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen FAS und allen anderen in der Bewertung betrachteten Eco-Driving-Massnahmen zu berücksichtigen, damit keine Einsparungen doppelt gezählt werden. Im Folgenden wird kurz beschrieben, wie wir die Auswirkungen der einzelnen FAS auf den Energieverbrauch der verschiedenen Fahrzeugtypen bewerten und die Zusammenhänge mit den anderen Massnahmen für umweltfreundliches Fahren berücksichtigen wollen.

7.2.1 Energiesparpotenzial von FAS für PKWs/LNFs

Start-Stopp:

Die Verwendung eines Start-Stopp-Systems entspricht der Funktion "Leerlauf vermeiden" des Super Eco-Driver-Modells im uCARe PHEM-Tool. Beide Massnahmen führen dazu, dass der Motor ausgeschaltet wird, wenn das Fahrzeug steht (d.h. v = 0), was zu einem Energieverbrauch von Null führt.

Das uCARe-PHEM Tool verfügt über eine Option zur Simulation der Nutzung eines Start-Stopp-Systems. Wir können diese Funktion nutzen, um das Energiesparpotenzial der Verwendung eines Start-Stopp-Systems unabhängig von allen anderen Eco-Driving-Massnahmen für einige beispielhafte Fahrzeugtypen und Fahrzyklen zu bewerten. Darüber hinaus werden wir den kombinierten Effekt mit allen anderen Eco-Driving-Massnahmen für alle Fahrzeugtypen und Fahrzyklen bewerten.

ECO-Modus:

Wie im Abschnitt 4.2 erörtert und in Tabelle 16 zusammengefasst, reduziert der ECO-Modus in PKWs die Leistung des Motors, was zu einer langsameren Beschleunigung führt. Bei Automatikfahrzeugen wird zudem die Gangwahl optimiert, um den Energieverbrauch zu senken. Darüber hinaus umfasst der ECO-Modus bei einigen Marken und Modellen auch eine ECO-Coasting-Funktion und reduziert die Leistung der Klimaanlage und andere Nebenaggregate. Abgesehen vom direkten Effekt, der sich aus der Reduzierung der Motorleistung ergibt, werden all diese Effekte bereits entweder

durch das Super Eco-Driver-Modul (sanftes Beschleunigen und optimale Gangwahl) oder durch die modifizierten Inputmodellparameter (geringerer Einsatz von Nebenaggregaten) abgedeckt. Die reduzierte Motorleistung würde sich nur in unwahrscheinlichen Situationen direkt auf das Fahrprofil und den Energieverbrauch auswirken, z.B. wenn das Auto aufgrund der reduzierten Leistung nicht die gewünschte Geschwindigkeit erreichen kann. In Anbetracht des hohen Motorisierungsgrads der Schweizer PKW-Flotte und der Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h ist dies jedoch eine sehr unwahrscheinliche Situation und kann vernachlässigt werden, solange der indirekte Effekt der Verringerung der Beschleunigungen berücksichtigt wird.

Wenn möglich (mit der TU Graz zu besprechen), könnte man vielleicht auch in diesem Fall das uCARe-PHEM-Tool verwenden, um das Energieeinsparpotenzial des ECO-Modus für einige beispielhafte Fahrzeuge und Fahrzyklen unabhängig von allen anderen Massnahmen abzuschätzen. Dazu müsste man die Leistung des Motors und der relevanten Nebenaggregate in den Modellinputs begrenzen und (wenn möglich) im Super-Eco-Driver nur die Optimierung der Gangwahl und des Beschleunigungsverhaltens aktivieren (es ist im Moment unklar, ob dies leicht von den anderen Massnahmen im Super-Eco-Driver-Modul entkoppelt werden kann). Wichtig ist auch, dass der Super-Eco-Driver einer idealen Eco-Beschleunigungskurve folgt, während der ECO-Modus in der Regel zu sanfteren Beschleunigungen führt, die näher an der Idealkurve liegen. Wie nah sie am Idealfall liegen, hängt jedoch stark vom Druck ab, den der Fahrer auf das Gaspedal ausübt. Auf diese Weise würde eine solche Bewertung die "ideale Nutzung" des ECO-Modus darstellen, bei der die Beschleunigung auf ein Minimum reduziert wird. Wie bei der Start-Stopp-Funktion sollten die Einsparpotenziale des ECO-Modus bei der Bewertung des gesamten Energieeinsparpotenzials nicht berücksichtigt werden, da alle seine Auswirkungen bereits durch andere (teilweise sogar effizientere) Eco-Fahrmassnahmen abgedeckt werden.

Tempomat (CC):

Durch die Festlegung der Fahrzeuggeschwindigkeit mit Hilfe der CC-Funktion können kleine ungewollte Schwankungen im Geschwindigkeitsprofil vermieden und somit der Energieverbrauch reduziert werden. Wie aus der Literatur hervorgeht, ist die Verwendung von CCs zur Energieeinsparung nur dann effektiv und sicher, wenn es in Situationen mit freiem Verkehr auf Strassen mit flacher oder konstanter Steigung/Gefälle eingesetzt wird. Die glättende Wirkung des Einsatzes von CCs auf die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofile wird von der Super-Eco-Driver-Funktion des uCARe-PHEM-Tools nicht erfasst. Um die Auswirkungen auf den Energieverbrauch zu bewerten, planen wir ein einfaches Modell zu entwickeln, das die Auswirkungen der Verwendung des CC-Systems auf die Geschwindigkeitsprofile der relevanten Zyklen (nur bei Free-Flow und flache/konstante Gradienten) simuliert. Für einige beispielhafte Fahrzeugtypen und -zyklen können wir dann den Energieverbrauch des Standardfahrermodells im uCARe-PHEM bei Verwendung des originalen und des modifizierten Geschwindigkeitsprofils vergleichen, um das Einsparpotenzial von CC als Einzelmassnahme zu bewerten. Darüber hinaus muss das Energiesparpoten-

zial durch den Einsatz von CC bei der Bewertung des gesamten Energiesparpotenzials berücksichtigt. Dazu planen wir, den Energieverbrauch des Super Eco-Fahrers mit dem angepassten Fahrzyklus mit dem des Standard-Fahrers mit den originalen Fahrzyklen zu vergleichen. Das sich daraus ergebende Einsparpotenzial wird für die Bewertung des gesamten Energiesparpotenzials verwendet.

Adaptiver Tempomat (ACC):

Die Literaturübersicht hat gezeigt, dass die Auswirkungen von ACCs auf den Energieverbrauch stark vom Hersteller, den Einstellungen des Systems (d.h. die gewählte Entfernung) und der spezifischen Verkehrssituation (einschliesslich des Verhaltens der vorausfahrenden Fahrzeuge) abhängen. Während in den "Free-Flow"-Szenarien der Einsatz von ACCs einen ähnlichen Energievorteil haben dürfte wie ein Standart-Tempomat, kann sein Einsatz in den "Car-Following"-Szenarien je nach Situation zu einem höheren oder niedrigeren Energieverbrauch im Vergleich zu einem menschlichen Fahrer führen. Um die Auswirkungen des Einsatzes eines ACC auf den Energieverbrauch in solchen "Car-following"-Situationen korrekt zu simulieren, müsste ein detailliertes Verkehrsmodell eingesetzt werden. In Anbetracht all dessen halten wir es weder für machbar noch für sinnvoll, im Rahmen dieses Projekts zu versuchen, das Energiesparpotenzial von ACCs in anderen Situationen als dem Free-Flow zu bewerten. Da ein ACC in Free-flow Situationen die gleiche Funktionalität hat wie ein Standart-CC, kann man die Ergebnisse der CC-Systeme direkt auf die ACC-Systeme übertragen.

Prädiktiver Tempomat (PCC):

Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass es an experimentellen Daten über den Einsatz kommerzieller PCC-Systeme in PKWs und deren Auswirkungen auf den Energieverbrauch mangelt. Angesichts des Datenmangels und der oben beschriebenen komplexen Abhängigkeiten zwischen dem Einsatz von ACC-Systemen und dem daraus resultierenden Energieverbrauch halten wir es nicht für sinnvoll, die Auswirkungen von PCC-Systemen in unsere Bewertungen einzubeziehen. Stattdessen schlagen wir vor, PCC-Systeme mit den gleichen Einsparpotenzialen wie ACC- (oder CC-) Systeme zu betrachten.

7.2.2 Energiesparpotenzial von FAS für LKWs/Busse

Wie in Abschnitt 4.2 erwähnt, kann das VECTO-Modell, ein von der Europäischen Kommission entwickeltes Simulationstool, das seit 2019 für die Zertifizierung von SNFs eingesetzt wird, verwendet werden, um das Energieeinsparpotenzial von energierelevanten FAS für SNFs zu bewerten. In diesem Open-Source-Simulationstool können generische Modellparameter für die vier Fahrzeuggruppen die von der Verordnung abgedeckt werden (Starr- und Sattelzug-LKWs über 16 Tonnen mit 4x2- und 6x2-Achskonfigurationen, die jeweils den Fahrzeuggruppen 4, 5, 9 und 10 entsprechen) ausgewählt werden. Diese "regulierten Gruppen" machen zusammen etwa 65% bis 70% der CO2-Emissionen von LKWs in der EU aus und haben das grösste Potenzial zur Reduzierung der CO2-Emissionen (JRC 2022). Die wichtigsten FAS in Tabelle 16 und alle ihre Kombinationen sind im Simulationstool auf einer In-the-Loop-Basis implementiert. Alle Einzelheiten zur Simulation findet man in

einem Bericht von der TUG (TUG 2019, Anhang 2). Durch den Vergleich des vom Modell mit und ohne FAS geschätzten Energieverbrauchs/CO2-Ausstosses kann das Energiesparpotenzial leicht bewertet werden. Die Einsparpotenziale aller mit dem VECTO-Modell geschätzten FAS-Kombinationen für die Fahrzeuggruppe 5 (die in Bezug auf den Marktanteil die bei weitem grösste Gruppe ist) sind im TUG-Bericht aufgeführt und in Tabelle 21 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kombination von Start-Stopp (ESS), Eco-Rolling und PCC (1, 2, 3), d.h. PCC-Systeme mit den drei Funktionen, die in Abschnitt 4.2 beschrieben wurden) zu den höchsten CO2- (und damit Energie-)Einsparpotenzialen führen. Die maximale Energieeinsparung wurde für das regionale Lieferfahrzeug mit der Referenznutzlast auf 2,7 % festgelegt. Wir haben uns an den Hauptautor des Berichts gewandt, um zu erfahren, ob diese Ergebnisse auch für die anderen regulierten Fahrzeuggruppen zur Verfügung stehen. Leider sind diese Ergebnisse nicht verfügbar, aber wir haben die aktualisierten Ergebnisse für die Untergruppe der Langstreckenfahrzeuge der Gruppe 5 erhalten, die in Tabelle 22 aufgeführt sind und die ein Einsparpotenzial von 3,1% für die Kombination der 3 oben genannten Systeme zeigen. Die Ergebnisse in den Tabelle 21 und Tabelle 22 werden für die Hochrechnung des Einsparpotenzials von FAS für LKWs/Busse verwendet. Dabei ist es wichtig, zunächst zu betrachten, wie die verschiedenen FAS im VECTO-Modell implementiert wurden, um die Zusammenhänge zwischen der Nutzung der verschiedenen FAS und dem Super Eco-Fahrermodell des uCARe PHEM-Tools zu bewerten und um festzustellen, ob und in welchem Umfang das Einsparpotenzial von FAS in die Bewertung des Gesamteinsparpotenzials einbezogen werden sollen.

Combination nr.	ESS during vehicle stops	Eco-roll without ESS	Eco-roll with ESS	PCC (1, 2)	PCC (1, 2, 3)	Group 5									
						Long Haul				Regional Delivery				Urban Delivery	
						ref. payload	low payload	EMS ref. payload	EMS low payload	ref. payload	low payload	EMS ref. payload	EMS low payload	ref. payload	low payload
1	yes	no	no	no	no	-0.1%	-0.1%	-0.1%	-0.1%	-0.5%	-0.6%	-0.4%	-0.5%	-1.9%	-2.6%
2	no	yes	no	no	no	-0.1%	-0.1%	0.0%	0.0%	-0.1%	-0.2%	0.0%	-0.1%	0.0%	0.0%
3	no	no	yes	no	no	0.0%	-0.1%	0.0%	0.0%	-0.1%	-0.3%	-0.1%	-0.2%	0.0%	0.0%
4/1	no	no	no	yes	no	-0.3%	-0.1%	-0.4%	-0.2%	-1.1%	-0.6%	-1.2%	-0.8%	0.0%	0.0%
4/2	no	no	no	no	yes	-0.7%	-0.2%	-0.9%	-0.3%	-1.6%	-0.8%	-1.7%	-1.1%	0.0%	0.0%
5	yes	yes	no	no	no	-0.1%	-0.2%	-0.1%	-0.1%	-0.6%	-0.8%	-0.4%	-0.6%	-1.9%	-2.6%
6	yes	no	yes	no	no	-0.1%	-0.1%	-0.1%	-0.1%	-0.6%	-0.9%	-0.5%	-0.7%	-1.9%	-2.6%
7/1	yes	no	no	yes	no	-0.4%	-0.2%	-0.5%	-0.3%	-1.6%	-1.2%	-1.5%	-1.3%	-1.9%	-2.6%
7/2	yes	no	no	no	yes	-0.8%	-0.2%	-0.9%	-0.3%	-2.1%	-1.4%	-2.1%	-1.6%	-1.9%	-2.6%
8/1	no	yes	no	yes	no	-0.6%	-0.3%	-0.7%	-0.2%	-1.2%	-1.1%	-1.2%	-1.1%	0.0%	0.0%
8/2	no	yes	no	no	yes	-1.1%	-0.4%	-1.2%	-0.4%	-1.8%	-1.3%	-1.8%	-1.5%	0.0%	0.0%
9/1	no	no	yes	yes	no	-1.1%	-0.4%	-1.0%	-0.3%	-1.6%	-1.6%	-1.5%	-1.5%	0.0%	0.0%
9/2	no	no	yes	no	yes	-1.5%	-0.5%	-1.6%	-0.5%	-2.2%	-1.9%	-2.1%	-1.8%	0.0%	0.0%
10/1	yes	yes	no	yes	no	-0.7%	-0.4%	-0.8%	-0.3%	-1.7%	-1.7%	-1.6%	-1.6%	-1.9%	-2.6%
10/2	yes	yes	no	no	yes	-1.1%	-0.4%	-1.3%	-0.4%	-2.3%	-1.9%	-2.2%	-1.9%	-1.9%	-2.6%
11/1	yes	no	yes	yes	no	-1.2%	-0.5%	-1.1%	-0.4%	-2.1%	-2.3%	-1.9%	-2.0%	-1.9%	-2.6%
11/2	yes	no	yes	no	yes	-1.6%	-0.6%	-1.6%	-0.6%	-2.7%	-2.5%	-2.5%	-2.3%	-1.9%	-2.6%

Tabelle 21 CO2-Einsparungen durch FAS für ein Fahrzeug der Gruppe 5 im Vergleich zum Fall ohne FAS. Quelle: TUG 2019.

ADAS Comb. Nr.	Engine stop-start during vehicle stops	Eco-roll without engine stop-start	Eco-roll with engine stop-start	PCC (1, 2)	PCC (1, 2, 3)	ADAS simulated in-the-loop			
						original LH cycle		updated LH cycle	
						payload low	payload rep.	payload low	payload rep.
1	yes	no	no	no	no	-0.1%	0.0%	-0.1%	0.0%
2	no	yes	no	no	no	0.0%	0.0%	-0.1%	0.0%
3	no	no	yes	no	no	0.0%	0.0%	-0.1%	0.0%
4/1	no	no	no	yes	no	-0.2%	-0.6%	-0.2%	-1.4%
4/2	no	no	no	no	yes	-0.2%	-0.9%	-0.2%	-1.8%
5	yes	yes	no	no	no	-0.1%	-0.1%	-0.1%	-0.1%
6	yes	no	yes	no	no	0.0%	0.0%	-0.2%	-0.1%
7/1	yes	no	no	yes	no	-0.2%	-0.6%	-0.2%	-1.4%
7/2	yes	no	no	no	yes	-0.2%	-1.0%	-0.3%	-1.9%
8/1	no	yes	no	yes	no	-0.4%	-1.0%	-0.9%	-1.7%
8/2	no	yes	no	no	yes	-0.4%	-1.3%	-1.1%	-2.6%
9/1	no	no	yes	yes	no	-0.4%	-1.2%	-1.1%	-2.1%
9/2	no	no	yes	no	yes	-0.5%	-1.5%	-1.4%	-3.0%
10/1	yes	yes	no	yes	no	-0.4%	-1.0%	-0.9%	-1.7%
10/2	yes	yes	no	no	yes	-0.5%	-1.3%	-1.1%	-2.6%
11/1	yes	no	yes	yes	no	-0.5%	-1.2%	-1.2%	-2.1%
11/2	yes	no	yes	no	yes	-0.6%	-1.5%	-1.4%	-3.1%

Tabelle 22 Aktualisierte Werte für den Langstreckenzyklus in Tabelle 21. Quelle: TUG 2023, unveröffentlicht.

7.3 Schätzung des Einsparpotenzials von regenerativem Bremsen

Wie in Abschnitt 4.2 erwähnt, kann das regenerative Bremssystem je nach Hersteller und spezifischem Fahrzeugmodell eine einzige Einstellung (die nicht deaktiviert werden kann) oder mehrere Stufen die vom Fahrer ausgewählt werden können haben. Im ersten Fall hat der Fahrer nur begrenzten Einfluss auf die Menge der zurückgewonnenen Energie und daher wird das regenerative Bremsen in diesen Fällen im Rahmen dieses Projekts nicht als relevante Eco-Fahrmassnahme "per se" betrachtet. In den Fällen, in denen der Fahrer den Grad der Rekuperation wählen kann, wird oft empfohlen, die Rekuperation bei Autobahnfahrten niedrig einzustellen, um ein gewisses Mass an Rollen zu ermöglichen, und die höchste Stufe der Rekuperation in städtischen Gebieten zu nutzen, in denen das Rollen ohnehin durch die Verkehrsbedingungen begrenzt ist. Diese "Eco-Auswahl" der Rekuperationsstufen ist der PHEM-Verzögerungsstrategie für BEVs ziemlich ähnlich. Wie in Abschnitt 7.1 beschrieben, werden bei der PHEM-Verzögerungsstrategie zuerst Fahrwiderständen überwunden (Vorrang für das Rollen). Wenn das nicht genügt, um die benötigte Verzögerung zu erreichen, wird immer so viel wie möglich mit dem Elektromotor rekuperiert, während der Einsatz der mechanischen Bremse auf den Fall einer starken Bremsung beschränkt ist. Daher kann die simulierte regenerierte Arbeit im Super-Eco-Fahrermodell für BEVs direkt als Schätzung des Einsparpotenzials bei der Nutzung der regenerativen Bremse im Gegensatz zur vollständigen Deaktivierung des Systems verwendet werden. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass nur in den Fällen, in denen (1) der Benutzer das regenerative Bremssystem vollständig deaktivieren kann und (2) das Betätigen des Bremspedals nicht direkt zu einem bestimmten Grad an Regeneration führt, das volle Energiesparpotenzial für die Hochskalierung berücksichtigt werden kann. In Fällen, in denen das Bremspedal automatisch einen bestimmten Regenerationsgrad aktiviert (entweder fest oder moduliert), ist nur ein (unbekannter) Teil dieses Energiesparpotenzials mit der Wahl des Fahrers für den Regenerationsgrad verbunden und sollte bei der Hochrechnung berücksichtigt werden. In Anbetracht der grossen Vielfalt an regenerativen Systemen/Strategien, die auf dem Markt verfügbar sind, und der Tatsache, dass sich selbst für eine be-

stimmte Fahrzeugmarke und ein bestimmtes Modell die Systemeigenschaften ändern können (siehe z.B. Tesla), erscheint es nicht sinnvoll, das Energieeinsparpotenzial des regenerativen Bremsens auf Flottenebene hochzurechnen (ausser selbstverständlich im Zusammenhang mit der Interaktion mit der Massnahme Eco-Bremsen) und wird daher im Folgenden nicht als separate Massnahme betrachtet.

7.4 Erforderliche Modellentwicklungen

Es stehen zwei wichtige Entwicklungsarbeiten an, die vor dem Start der Simulationen durchgeführt werden müssen. Erstens soll ein Modell zur realistischen Simulation der Nutzung von Tempomaten entwickelt werden. Zweitens ist es erforderlich, die Erstellung der Input-Dateien sowie die Verarbeitung der Output-Dateien des PHEM-Modells zu automatisieren.

7.5 Simulations-Matrix

Tabelle 23 und Tabelle 24 zeigen die Basissimulationsmatrizen für PKWs/LNFs bzw. LKWs/Busse. Diese Simulationen werden für alle Fahrzeugklassen/Unterklassen und alle Fahrzyklen durchgeführt, die in Kapitel 6 als relevant für die Hochrechnung der Einsparpotenziale identifiziert wurden.

Für jeden Fahrzeugtyp und jeden Fahrzyklus werden folgende Fälle betrachtet:

Best-Case (Sommer und Winter):

- effizientester kommerziell verfügbarer Reifentyp: Klasse A für Sommerreifen und B für Winterreifen
- empfohlener Reifendruck (Standarddruck + 0,3 bar)
- minimale Ladung (zusätzlich zum Fahrzeugleergewicht):
  - PKWs: 1,5 Personen (mittlerer Besetzungsgrad laut Mikrozensus), 15 kg benötigte Ladung (Ladekabel für BEVs, Zusatzrad, Auto-Notfallset, Erste-Hilfe-Set,...)
  - LNFs: 1,5 Personen (mittlerer Besetzungsgrad laut Mikrozensus), 215 kg benötigte Ladung (PKW Ladung + Güter)
  - LKWs: 50% Auslastung, 1 Person, 70 kg benötigte Ladung (Palethubwagen, leere Paletten, Ladekabel,...)
  - Busse: 50% Passagierauslastung, 15 kg benötigte Ladung (Ladekabel für BEVs, Zusatzrad, Auto-Notfallset, Erste-Hilfe-Set,...)
- geringe Nutzung von Nebenaggregaten (gemäss Tabelle 14):
  - PKWs/LNFs: 1,0 kW ICE-Sommer, 0,95 kW ICE-Winter, 0,78 kW BEV-Sommer, 0,94 kW BEV-Winter
  - LKWs: 4,30 kW ICE-Sommer, 4,25 kW ICE-Winter, 4,28 kW BEV-Sommer, 4,44 kW BEV-Winter
  - Busse: 12,3 kW ICE-Sommer, 12,2 kW ICE-Winter, 12,3 kW BEV-Sommer, 13,0 kW BEV-Winter

Default Case (repräsentativ für durchschnittliche Fahrbedingungen):

- durchschnittlicher Reifentyp und Reifendruck:
  - PKWs/LNFs: Klasse C/D Reifen (gemäss uCARe-Annahme in Tabelle 13) mit einem Unterdruck von 0,1 bar (gemäss AEC Daten)
  - LKWs/Busse: Klasse C Reifen (gemäss Abbildung 8) und unterdrück von 0,9 bar (gemäss ETRMA-ETRTA Daten in Abbildung 9))
- durchschnittliche Ladung (zusätzlich zur Ladung im Best-Case): + 20 kg unnötige Ladung
- durchschnittliche Nutzung von Nebenaggregaten (gemäss Tabelle 14):
  - PKWs/LNFs: 1,35 kW ICE, 1,55 kW BEV
  - LKWs: 4,65 kW ICE, 5,05 kW BEV
  - Busse: 13,5 kW ICE, 15,5 kW BEV

Das Energiesparpotenzial wird dann aus dem Vergleich des geschätzten Energieverbrauchs des Durchschnittsfahrers im Default Fall mit dem des Super-Eco-Fahrers unter Verwendung von FAS im Best-Case-Fall abgeleitet. Zu beachten ist, dass die Auswirkungen der Nutzung von Leichtlauföl und des langsamen Ladens von BEVs nicht in den Simulationen enthalten sind und auf Basis von Literaturwerten hinzugefügt werden. Im Falle von LKWs/Busse wird ebenfalls der Effekt der Verwendung von FAS auf der Grundlage der VECTO-Ergebnisse nachträglich hinzugefügt.

Wichtig ist auch zu beachten, dass die so ermittelten Energiesparpotenziale das Maximum darstellen, das sich aus dem Vergleich zwischen einem Fahrzeughalter, der gar keine Energiesparmassnahmen ergreift, und einem, der alle Massnahmen perfekt umsetzt, ergibt. In der Praxis wird das tatsächliche Einsparpotenzial jedoch niedriger sein als dieser Maximalwert. Zum einen werden einige Massnahmen bereits umgesetzt, und zum anderen können selbst geschulte und erfahrene Fahrer/innen nicht immer alle Massnahmen mit hundertprozentiger Effizienz umsetzen. Das erste gilt vor allem für LKW- und Busbesitzer, die aus wirtschaftlichen Gründen ein grosses Interesse am Einsparen von Energie haben. So optimieren sie zum Beispiel durch die passende Reifenwahl, die Überwachung des Reifendrucks oder die Verwendung von Leichtlauföl bereits (zumindest teilweise) den Energieverbrauch. In solchen Fällen sind die zusätzlichen Einsparungen, die durch das Eco-Driving-Training erzielt werden können, daher deutlich geringer als die hier simulierten maximalen Einsparungen.

PKW / LNF:		uCARe-PHEM		uCARe-PHEM mit FAS (modifizierter Fahrzyklus)	
		Durchschnittsfahrer	Super-Eco-Fahrer	Durchschnittsfahrer	Super-Eco-Fahrer
Best-case Sommer	Reifenklasse A, Standarddruck + 0,3 bar, 1,5 Personen + 15 / 215 kg, niedrige Aux.				**x (Ref)**
Best-case Winter	Reifenklasse B, Standarddruck + 0,3 bar, 1,5 Personen + 15 / 215 kg, niedrige Aux.				**x (Ref)**
Default	Reifenklasse C/D, Standarddruck - 0,1 bar, 1,5 Personen + 35 / 235 kg, mittlere Aux.	X			

Tabelle 23 Basis Simulationsmatrix für PKWs und LNFs zur Hochrechnung des Energieeinsparpotenzials aller Eco-Driving-Massnahmen kombiniert.

LKW / Busse:		uCARe-PHEM	
		Durchschnittsfahrer	Super Eco-Fahrer
Best-case Sommer	Reifenklasse A, Standarddruck + 0,3 bar, 50% Auslastung + 1 Person + 70 / 15 kg, niedrige Aux.		**x (Ref)**
Best-case Winter	Reifenklasse B, Standarddruck + 0,3 bar, 50% Auslastung + 1 Person + 70 / 15 kg, niedrige Aux.		**x (Ref)**
Default	Reifenklasse C, Standarddruck – 0,9 bar, 50% Auslastung + 1 Person + 90 / 35 kg, mittlere Aux.	x	

Tabelle 24 Basis Simulationsmatrix für LKWs und Busse zur Hochrechnung des Energieeinsparpotenzials aller Eco-Driving-Massnahmen kombiniert.

Zusätzlich werden die in Tabelle 25 und Tabelle 26 beschriebenen Simulationen für einige beispielhafte Fahrzeuge (1 Fahrzeug pro Typ-Technologie, Mittelgrösse, EU6d/EU-VI) und 3 Zyklen (Innerorts, Ausserorts und Autobahn mit mittlerer Dynamik, Nr. 4, 10 und 16 in Tabelle 17) durchgeführt, um die Auswirkungen einzelner Eco-Driving-Massnahmen auf den Energieverbrauch zu bewerten. Die Auswirkungen von hohem und niedrigem Reifendruck (± 0,5 bar) sowie die Verwendung von Dachbox, Fahrradträger oder Anhänger auf den Rollwiderstand werden in der Simulation entsprechend den in Abbildung 3 dargestellten uCARe-Ergebnissen berücksichtigt.

	PKW / LNF:		uCARe-PHEM		uCARe-PHEM mit FAS (modifizierter Fahrzyklus)	
			Durchschnitts-fahrer	Super-Eco-Fahrer	Durchschnitts-fahrer	Super-Eco-Fahrer
	Default	Reifenklasse C/D, Standard-druck - 0,1 bar, 1,5 Personen + 35 kg, mittlere Aux	**x (Ref)**	x		
Variationen des Default-Falls	Fall 1	Reifenklasse D, Standarddruck	x			
	Fall 2	Reifenklasse C, Standarddruck	x			
	Fall 3	Reifenklasse B, Tiefdruck	x			
	Fall 4	Reifenklasse B, Standarddruck	x			
	Fall 5	Reifenklasse B, Hochdruck	x			
	Fall 6	Reifenklasse A, Standarddruck	x			
	Fall 7	Zusätzliche Ladung (+30 kg)	x			
	Fall 8	Dachbox	x			
	Fall 9	Fahrradträger	x			
	Fall 10	Trailer	x			
	Fall 11	Niedrige Aux.	x			
	Fall 12	Start-Stopp System	x			
	Fall 13	Tempomat			x	

Tabelle 25 Simulationsmatrix für PKWs und LNFs zur Bewertung des Energieeinsparpotenzials einzelner Eco-Driving-Massnahmen.

	LKW/Busse:		uCARe-PHEM	
			Durchschnittsfahrer	Super-Eco-Fahrer
	Default	Reifenklasse C, Standarddruck -0,9 bar, 50% Auslastung + 1 Person + 90kg, mittlere Aux	**x (Ref)**	X
Variationen des Default-Falls	Fall 1	Reifenklasse D, Standarddruck	x	
	Fall 2	Reifenklasse C, Standarddruck	x	
	Fall 3	Reifenklasse B, Tiefdruck	x	
	Fall 4	Reifenklasse B, Standarddruck	x	
	Fall 5	Reifenklasse B, Hochdruck	x	
	Fall 6	Reifenklasse A, Standarddruck	x	
	Fall 7	Zusätzliche Ladung (+30 kg)	x	
	Fall 8	Niedrige Aux.	x	

Tabelle 26 Simulationsmatrix für LKWs und Busse zur Bewertung des Energieeinsparpotenzials einzelner Eco-Driving-Massnahmen.

8. Simulationsergebnisse: Energiesparpotenzial für einzelne Fahrzeugklassen und Fahrsituationen

8.1 Nomenklatur

Folgende Abkürzungen werden nachfolgend für die verschiedenen Fahrzeugsegmente verwendet:

PC/PKW = Passenger Car, Personenkraftwagen

LCV/LNF = Light Commercial Vehicle, Leichtes Nutzfahrzeug

HGV/LKW = Schweres Nutzfahrzeug, Lastkraftwagen

unterteilt in:

- RT = Rigid Truck, Lkw ohne Anhänger
- TT = Trailer Truck, Lkw mit Anhänger und Sattelzüge

CO = Coach bus, Reisebus

CB = City bus, Stadtbus

Die folgenden Abkürzungen werden zudem für die verschiedenen Strassenkategorien und Verkehrssituationen in den Sup-Zyklen verwendet:

UR = Urban, Agglomeration/Ballungsraum

RUR = Rural, Ländlicher Raum

MW = Motorway, Autobahn

Distr. = Distributor/District Connection, Hauptverkehrsstrasse

Access = Access-residential, Erschliessungsstrasse

Freeflow = Freeflow, Flüssig

Heavy = Heavy traffic, Dicht

Sat. = Saturated, Gesättigt

Stop+Go = Stop & go

8.2 Tempomat-Simulation

Um das Energiesparpotenzial der Nutzung des Tempomats in verkehrsfreien Situationen zu simulieren, wurden die entsprechenden HBEFA-Inputgeschwindigkeitsprofile angepasst. Zu diesem Zweck wurde ein Matlab-Code entwickelt, der bei Erfüllung bestimmter Bedingungen Zeitfenster für die Aktivierung des Tempomats definiert und anschliessend die Geschwindigkeit auf den Durchschnittswert innerhalb jedes Fensters einstellt. Zu den Bedingungen für die Aktivierung des Tempomats gehören: Verkehrszustand flüssig, Geschwindigkeit > 30 km/h und Beschleunigung (t, t+15s)< 0,5 m/s2. Abbildung 18 zeigt die resultierenden angepassten Geschwindigkeitsprofile (rote Kurven) für drei Beispiel-HBEFA-Zyklen (schwarze Kurven) und die definierten Fenster für die Aktivierung des Tempomats (blaue Kurven).

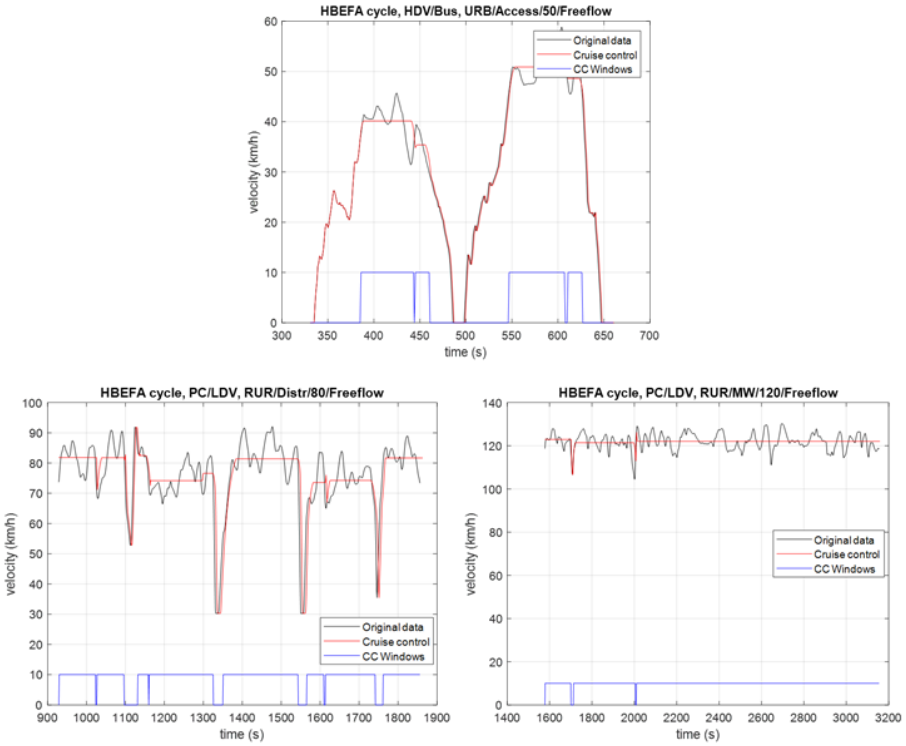


Abbildung 18 Beispiele zur Simulation des Einsatzes eines Tempomaten auf das Geschwindigkeitsprofil für ausgewählte HBEFA-Zyklen mit Freeflow-Bedingungen.

8.3 Energiesparpotenzial einzelner Massnahmen

In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen der einzelnen Eco-Driving-Massnahmen anhand der in Tabelle 25 und Tabelle 26 beschriebenen Simulationen dargestellt.

Eco-Fahrstil

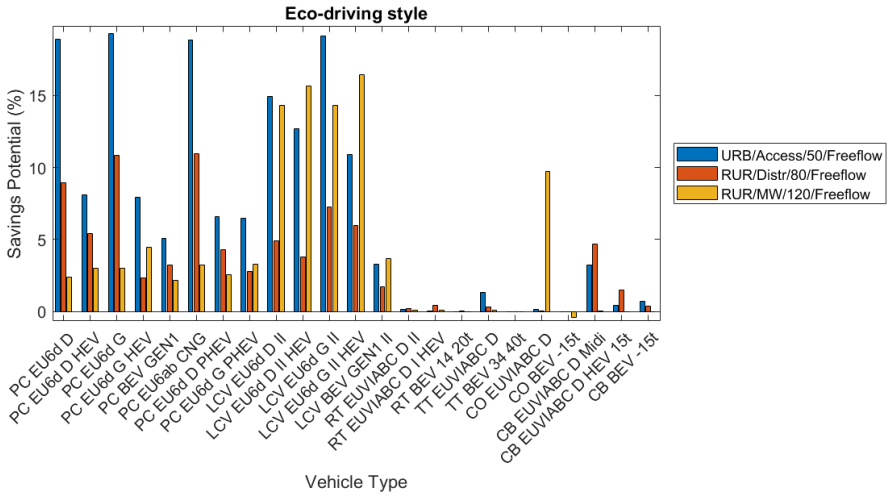


Abbildung 19 zeigt das Energiesparpotenzial bei einem (Super-)Eco-Fahrstil. Die erzielten Einsparpotenziale variieren erheblich zwischen den berücksichtigten Fahrzeugen und Fahrzyklen und liegen im Bereich von 1,7 und 19 % für PKWs und LNFs und, mit einer Ausnahme, zwischen 0.5 und

5 % für LKWs/Busse. Bei LNFs ist das Einsparpotenzial bei Autobahn-Zyklen viel höher als bei PKWs. Grund dafür ist die Höchstgeschwindigkeit des LNF-Super Eco-Drivers, die im uCARe-PHEM auf 110 km/h eingestellt ist und somit die Durchschnittsgeschwindigkeit des Zyklus reduziert. Im Gegensatz dazu ist die Höchstgeschwindigkeit beim PKW-Super Eco-Driver auf 120 km/h eingestellt, was keine Auswirkungen auf die ausgewählten Zyklen hat. So lassen sich etwa 85 % der für LNFs auf Autobahnen ermittelten Einsparpotenziale auf die Begrenzung der Höchstgeschwindigkeit zurückführen. Anderseits ergeben sich die niedrigen Einsparpotenziale für LKWs und Busse aus der Tatsache, dass der (durchschnittliche) LKW-Fahrer im PHEM-Modell bereits ein Fahrverhalten hat, das dem des Eco-Fahrers sehr nahe kommt, und dass die meisten Lkw und Busse über ein Automatikgetriebe verfügen (und somit die Schaltung bereits optimiert ist). Das simulierte Einsparpotenzial für BEVs ist im Allgemeinen niedriger als bei anderen Technologien, aber dennoch signifikant (bis zu 5 % für PKWs). Für HEVs, wurde bei der Auswahl des Betriebsmodus (ICE/Elektro) im uCARe-PHEM ein Problem festgestellt. Das Problem muss vom Modellhersteller behoben werden, was aber leider im Zeitrahmen des Projekts nicht möglich ist. Das Problem führte in einigen Fällen zu negativen Einsparpotenzialen durch den Super Eco-Driving-Fahrstil für HEVs. Um dies zu vermeiden, wurde eine vereinfachte Korrektur vorgenommen. Diese führt zu vernünftigen Ergebnissen (das Einsparpotenzial von HEVs liegt im Allgemeinen zwischen dem von ICEs und BEVs). Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass das Einsparpotenzial von HEVs dadurch leicht unterschätzt wird.

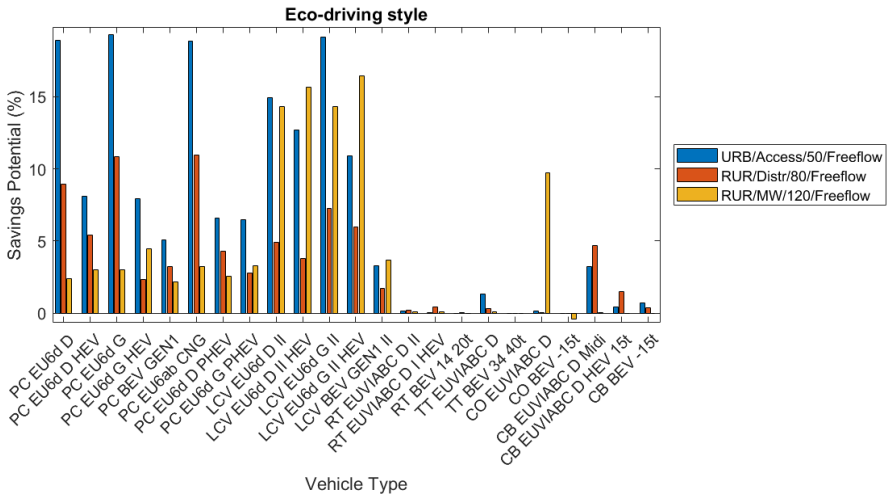


Abbildung 19 Energiesparpotenzial durch Eco-Driving-Fahrweise.

Reifenklasse und Reifendruck

Abbildung 20 bis Abbildung 25 zeigen die Einsparpotenziale verschiedener Reifenklassen und Reifendrücke im Vergleich zum Standardfall (Reifenklasse zwischen C und D mit –0,1 bar für PKWs/LNFs und Reifenklasse C mit –0,9 bar für LKWs/Busse). Im Allgemeinen zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Fahrzeugtypen und Fahrsituationen. Die Verwendung von Reifen der Klasse D mit Standarddruck (Abbildung 20) führt im Vergleich zum Default-fall zu einem höheren Energieverbrauch und damit zu einem negativen Einsparpotenzial im Bereich von –0,9 bis –8,4 %.

Der Effekt ist bei LKWs und Bussen grösser, da die Reifenklasse im Default-Fall besser ist als die von PKWs/LNFs. Die Nutzung von Reifen der Klasse C mit Standarddruck (Abbildung 21) führt zu einem geringeren Energieverbrauch und damit zu positiven Einsparpotenzialen. Bei PKWs und LNFs ergibt sich das Einsparpotenzial aus der besseren Reifenklasse und dem höheren Reifendruck und liegt in der Grössenordnung von 1,3 bis 3,5 %. Bei LKWs und Busse resultieren die Einsparungen einzig aus dem höheren Reifendruck (da die Default-Reifenklasse ebenfalls C ist) und liegen in der Grössenordnung von 0,5 bis 1,8 %. Das Einsparpotenzial steigt weiter mit der Verwendung von Reifentypen der Klasse B. In diesem Fall wurden drei verschiedene Reifendrücke simuliert: -0,5 bar, Standard und +0,5 bar (Abbildung 22, Unterdruck.

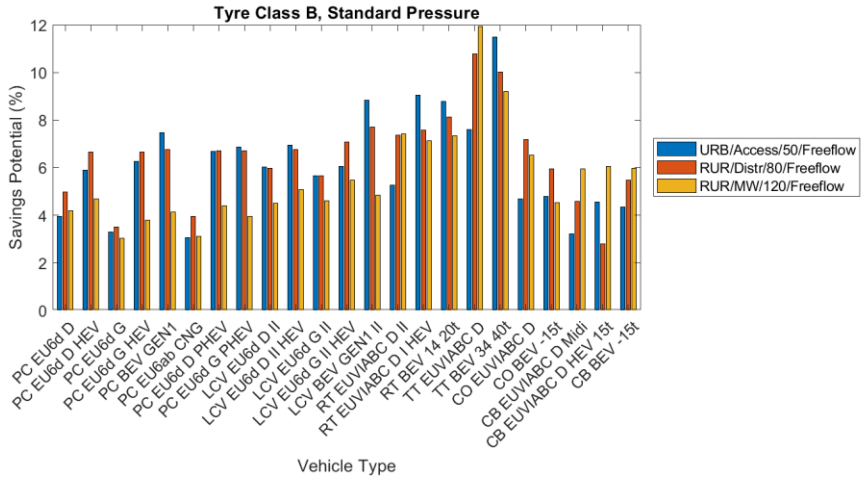


Abbildung 23 und Abbildung 24).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Erhöhung des Reifendrucks von -0,5 bar auf +0,5 bar bei PKWs und LNFs zu ca. 2,5-mal höheren Einsparungen führen kann. Die höchsten Sparpotenziale wurden für die Reifenklasse A mit Standarddruck erzielt (Abbildung 25), und liegen zwischen 4,7 und 1 % für PKWs und LNFs und 6,2 und 22% für LKWs und Busse.

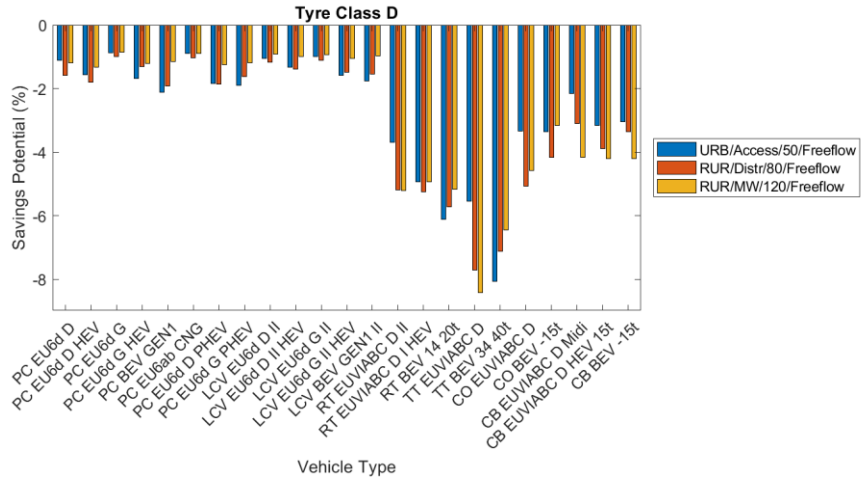


Abbildung 20 Energiesparpotenzial durch Verwendung von Reifen der Klasse D mit Standarddruck.

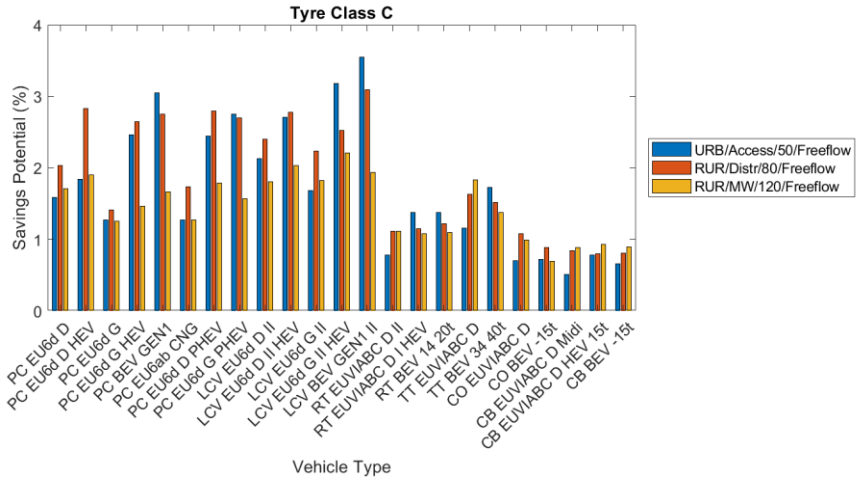


Abbildung 21 Energiesparpotenzial durch Verwendung von Reifen der Klasse C mit Standard-druck.

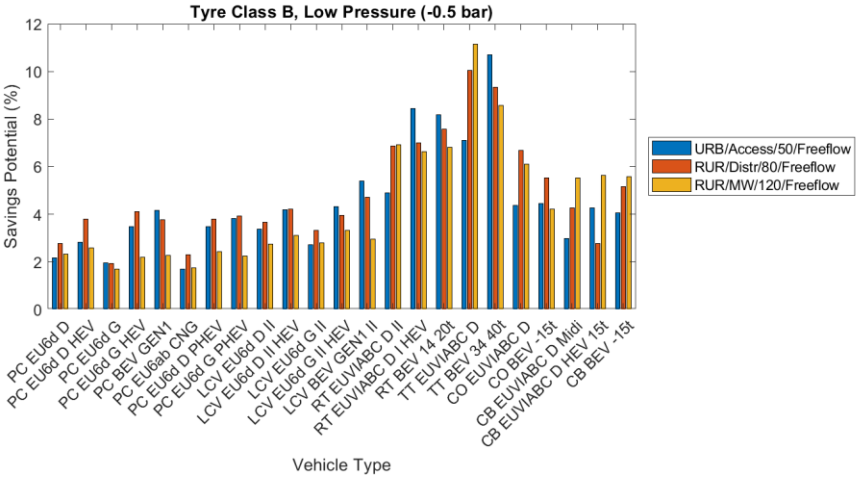


Abbildung 22 Energiesparpotenzial durch Verwendung von Reifen der Klasse B mit Unterdruck.

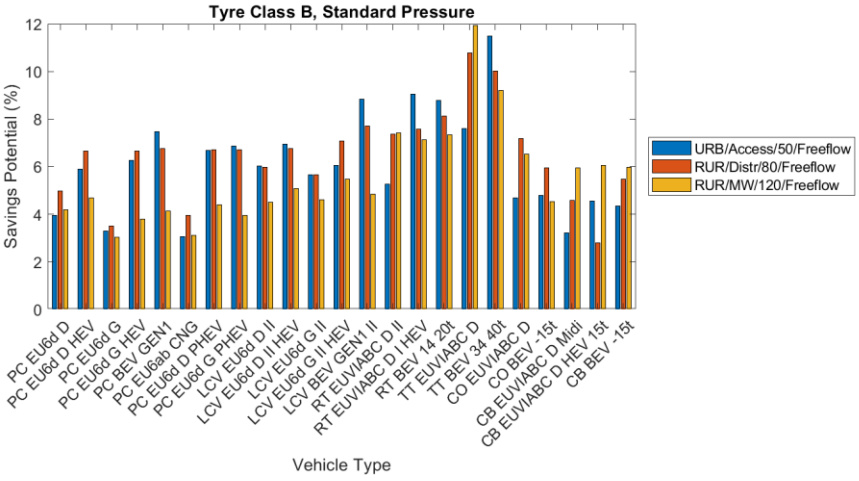


Abbildung 23 Energiesparpotenzial durch Verwendung von Reifen der Klasse B mit Standard-druck.

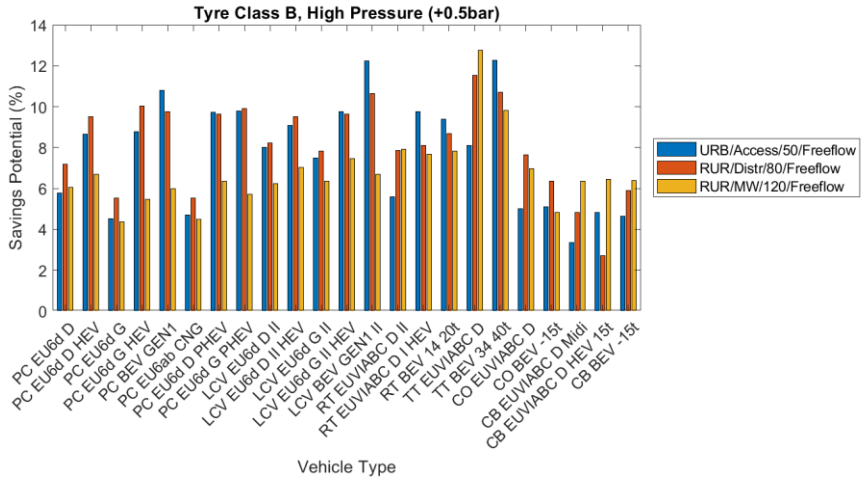


Abbildung 24 Energiesparpotenzial durch Verwendung von Reifen der Klasse B mit Überdruck.

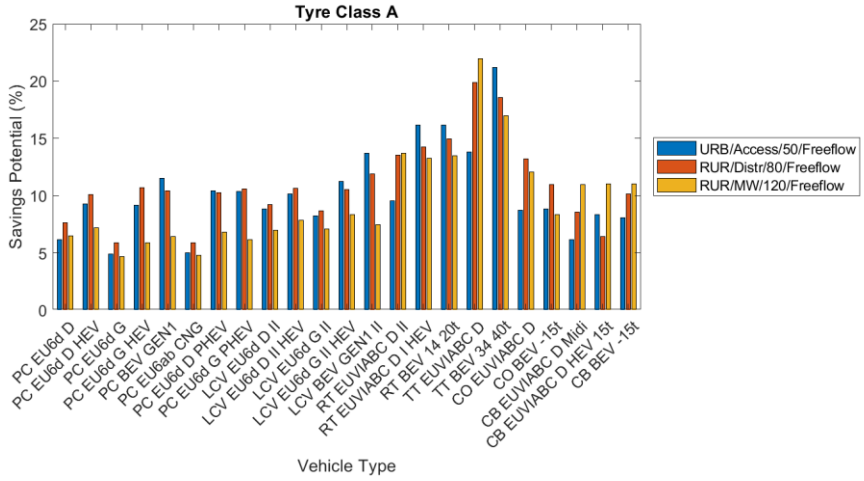


Abbildung 25 Energiesparpotenzial durch Verwendung von Reifen der Klasse A mit Standarddruck.

Zusätzliches Gewicht

Abbildung 26 zeigt den Anstieg des Energieverbrauchs (d. h. das negative Einsparpotenzial), der sich aus einer Zusatzladung von 30 kg ergibt. Erwartungsgemäss ist der relative Effekt bei leichteren Fahrzeugen (PKW/LNF) höher, bei denen der Energieverbrauch um 0,7 und bis zu 2,2 % steigt. Bei schwereren Fahrzeugen (LKW/Busse) liegt der ermittelte Anstieg des Energieverbrauchs zwischen 0,1 und 0,4 %.

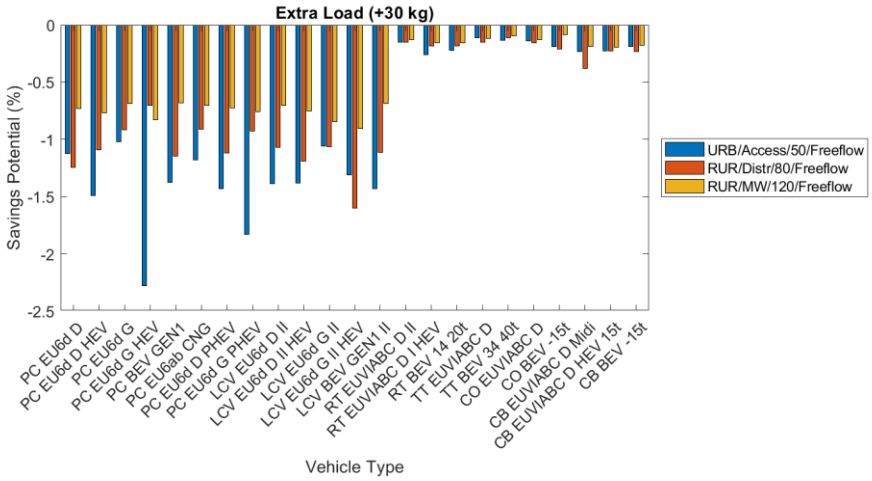


Abbildung 26 Anstieg des Energieverbrauchs (negatives Einsparpotenzial) durch eine Zusatzladung von 30 kg.

Dachbox, Fahrradträger und Anhänger

Abbildung 27 zeigt die negativen Auswirkungen auf den Energieverbrauch bei Verwendung einer Dachbox, eines Fahrradträgers oder eines Anhängers für die ausgewählten PKWs, LNFs und Fahrzyklen. Dabei ist der negative Effekt bei Anhängern am grössten, gefolgt von Fahrradträgern und Dachboxen. In diesem Fall ist ein deutlicher Einfluss der durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit zu erkennen, wobei höhere Geschwindigkeiten (z.B. auf der Autobahn) zu deutlich höherem Verbrauch führen (grössere negative Einsparpotenziale).

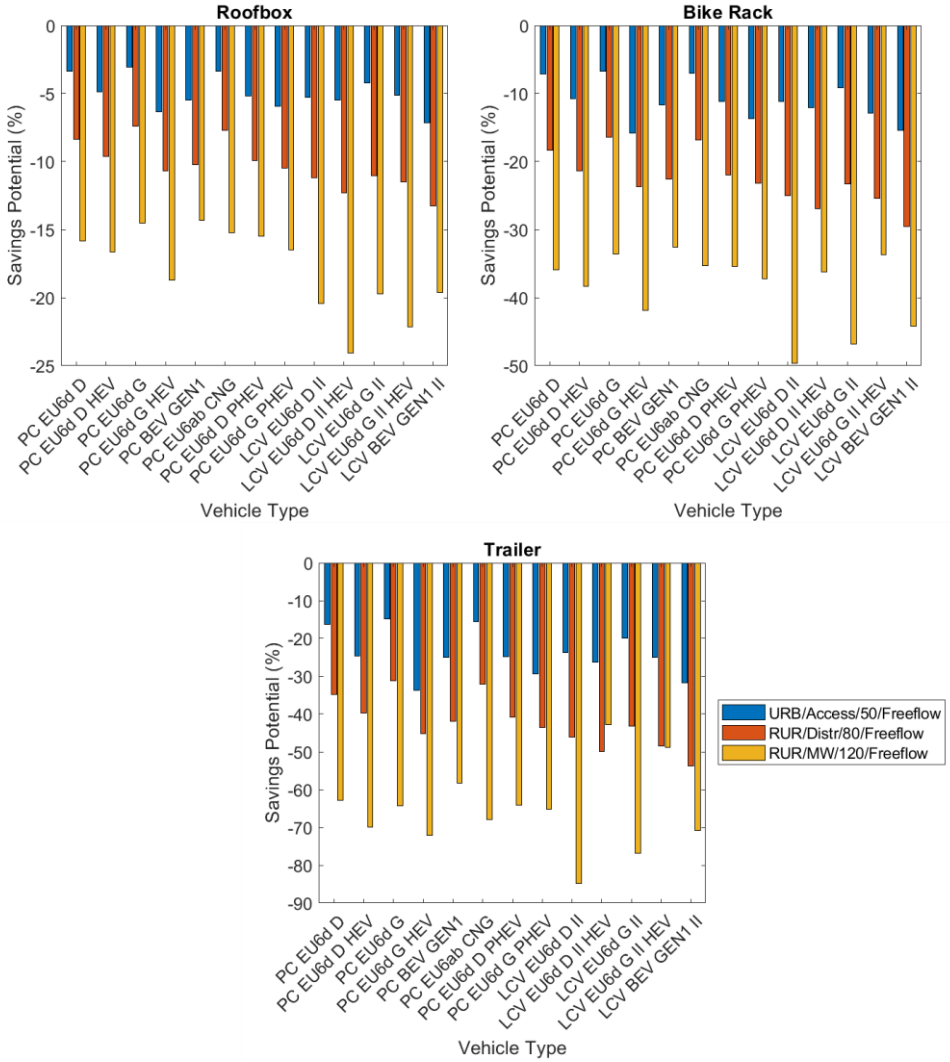


Abbildung 27 Anstieg des Energieverbrauchs (negatives Einsparpotenzial) durch die Verwendung von Dachbox, dachmontiertem Fahrradträger und Anhänger.

Nebenaggregate

Abbildung 28 zeigt die Sparpotenziale bei niedriger Nutzung der Nebenaggregate (Klimaanlage und Heizung) im Jahresdurchschnitt. Nicht überraschend sind die höchsten Einsparpotenziale (bis zu 11 %) bei den BEV-Fahrzeugen zu finden, bei denen die Heizung im Winter ein wichtiger Verbraucher darstellt. Die geringeren simulierten Einsparpotenziale für LKWs sind auf den eher geringen Heiz-/Kühlbedarf der Kabine (ähnlich dem von PKWs) und den hohen absoluten Energieverbrauch zurückzuführen.

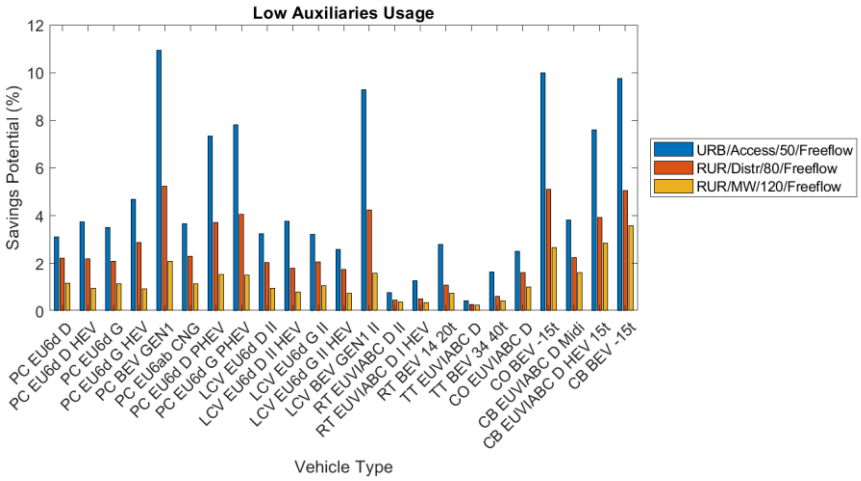


Abbildung 28 Energiesparpotenzial durch niedrigen Einsatz von Nebenaggregaten (gemäss Tabelle 14).

Fahrassistenzsysteme

Abbildung 29 zeigt die simulierten Sparpotenziale durch den Einsatz von Fahrassistenzsystemen für PWKs und LNFs. Für LKWs und Busse sind die aus den verfügbaren VECTO-Simulationen abgeleiteten Einsparpotenziale durch den Einsatz von Fahrassistenzsystemen in Abbildung 30 dargestellt. Es ist wichtig zu beachten, dass im PHEM-Modell das Start-Stopp-System für HEVs, PHEVs und BEVs immer aktiviert ist (auch im Default-Fall), was zu Null Einsparpotenzial für diese Fahrzeuge führt. Da die simulierten Fahrzyklen nur freie Verkehrsbedingungen umfassen, ist der Effekt auch für die anderen Technologien sehr gering (zwischen 0 und 2,5 %). Allerdings ist zu erwarten, dass das Einsparpotenzial durch die Nutzung des Start-Stopp-Systems in anderen Verkehrssituationen (z. B. gesättigt oder Stop&Go) viel höher ist. Anderseits führt die Nutzung des Tempomats zu Einsparpotenzialen zwischen 0,1 und 5,5%. Das negative Einsparpotenzial für den EURO 6d-Benzin-HEV im 80-km/h-Zyklus ist auch mit dem oben beschriebenen Problem bei der Wahl des Betriebsmodus für HEVs im uCARe-PHEM-Model verbunden. Daraus ergibt sich dann auch ein leicht negatives Einsparpotenzial für das entsprechende PHEV-Fahrzeug, da die Sparpotenzial für PHEVs auf der Grundlage der Ergebnisse der HEV- und BEV-Fahrzeuge ermittelt werden.

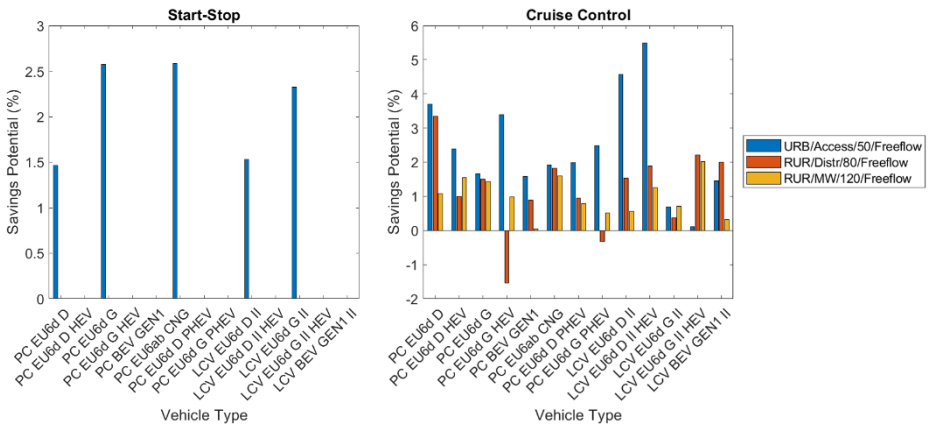


Abbildung 29 Energiesparpotenzial durch den Einsatz von Fahrassistenzsystemen für PKWs und LNFs.

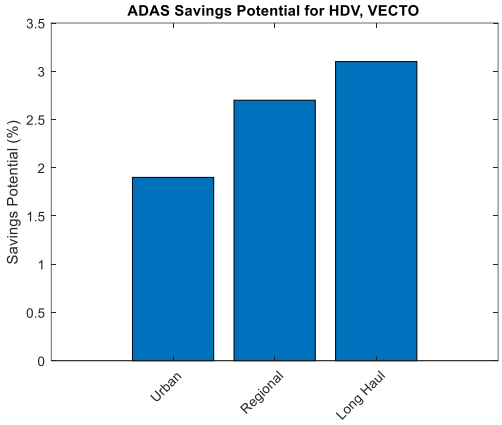


Abbildung 30 Energiesparpotenzial durch den Einsatz von Fahrassistenzsystemen für LKWs und Busse (Ergebnisse VECTO, gemäss Tabelle 21 und Tabelle 22).

8.4 Energiesparpotenzial kombinierter Massnahmen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Basissimulationen gemäss Tabelle 23 und Tabelle 24 dargestellt, die die kombinierte Wirkung der in den Simulationen berücksichtigten Massnahmen zeigen und die Grundlage für die Hochrechnung im AP3 bilden. Nicht berücksichtigt sind hier die Auswirkungen der Verwendung von unnötigen Dachboxen, Fahrradträgern und Trailers, sowie das langsame Laden von BEVs, welche bei der Hochrechnung hinzugefügt werden. Zudem ist es wiederum wichtig zu beachten, dass es sich hierbei um die maximalen theoretischen Einsparpotenziale handelt und dass die realen Einsparpotenziale, insbesondere bei bestimmten Fahrzeugklassen, voraussichtlich deutlich geringer sein werden.

Personenwagen

Abbildung 31 bis Abbildung 35 zeigen die Ergebnisse für PKWs. Im Allgemeinen gibt es nur geringe Unterschiede bei den relativen Einsparpotenzialen für die verschiedenen Euro-Klassen der einzelnen Technologien. Zudem sind die Einsparpotenziale im Winter aufgrund der betrachteten Reifenklassen immer etwas geringer als im Sommer. Die Einsparpotenziale steigen generell bei geringeren Geschwindigkeiten und starkem Verkehr (stockender Verkehr und Stop+Go). Bei PKWs mit Verbrennungsmotoren (Diesel, Benzin und CNG) liegt das Einsparpotenzial zwischen 10% (Autobahn, flüssig) und 45% (Erschliessungsstrasse, gesättigt). Bei elektrifizierten Fahrzeugen (HEV, PHEV und BEV) liegt das maximale Einsparpotenzial bei ca. 35% (Erschliessungsstrasse, gesättigt), was vor allem auf die geringeren Auswirkungen der Eco-Fahrweise zurückzuführen ist.

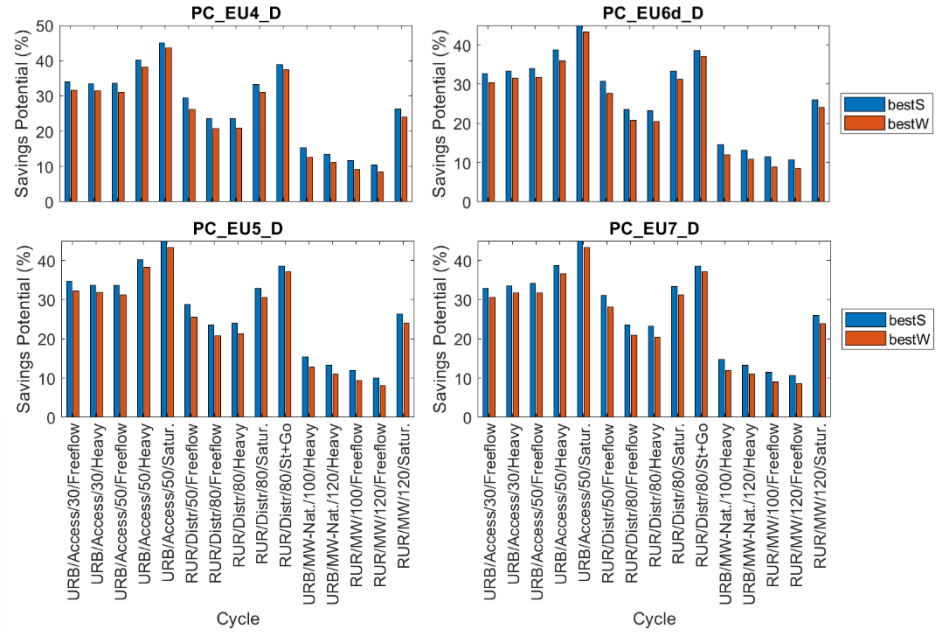


Abbildung 31 Energiesparpotenzial der kombinierten Eco-Massnahmen für Diesel-PKWs.

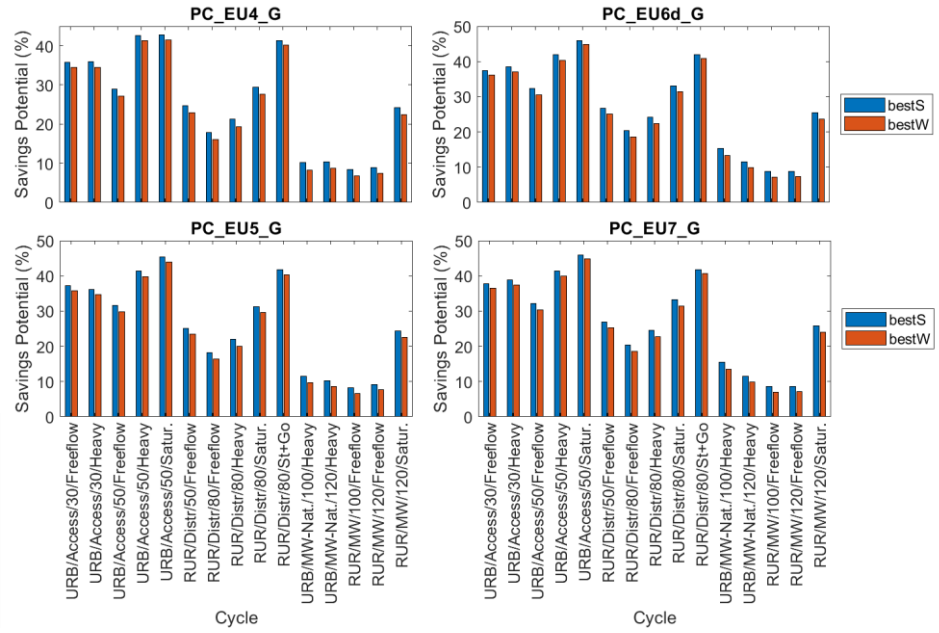


Abbildung 32 Energiesparpotenzial der kombinierten Eco-Massnahmen für Benzin-PKWs.

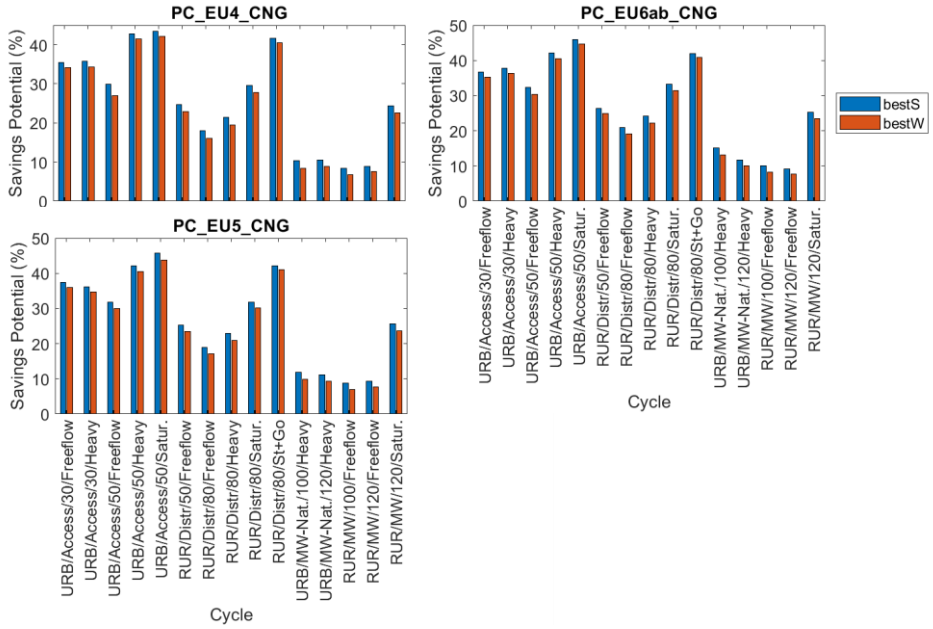


Abbildung 33 Energiesparpotenzial der kombinierten Eco-Massnahmen für CNG-PKWs.

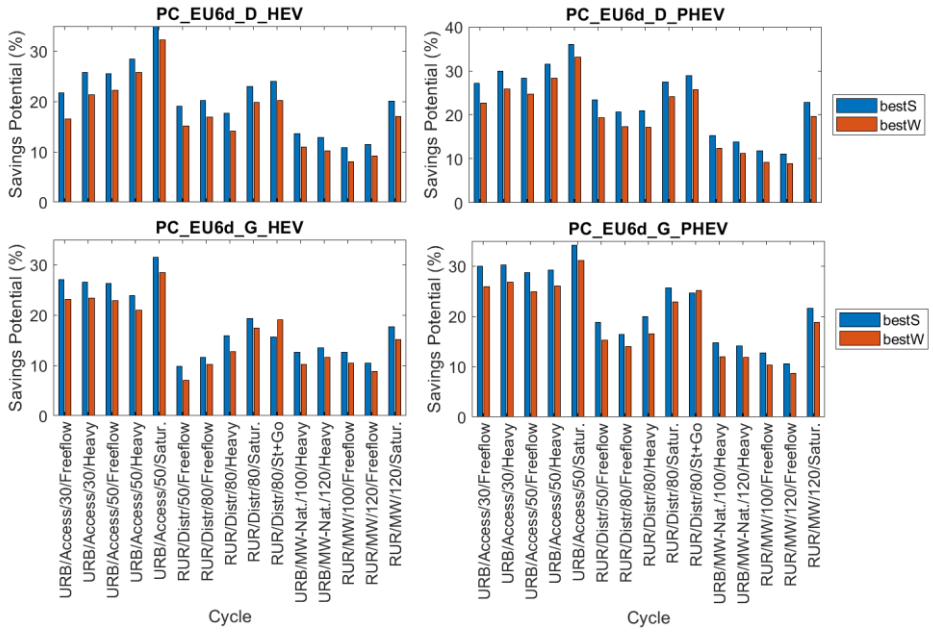


Abbildung 34 Energiesparpotenzial der kombinierten Eco-Massnahmen für HEV- und PHEV-PKWs.

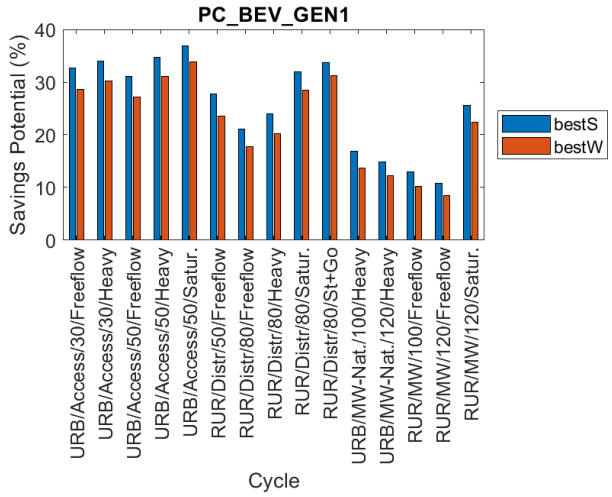


Abbildung 35 Energiesparpotenzial der kombinierten Eco-Massnahmen für BEV-PKWs.

Leichte Nutzfahrzeuge

Abbildung 36 bis Abbildung 38 zeigen die Ergebnisse für LNFs. Im Allgemeinen gibt es nur geringe Unterschiede in den relativen Einsparpotenzialen für die verschiedenen Euro- und Grössenklassen der einzelnen Technologien. Auch in diesem Fall sind die Einsparpotenziale im Winter aufgrund der betrachteten Reifenklassen immer etwas geringer als im Sommer und steigen generell bei geringeren Geschwindigkeiten und starkem Verkehr (stockender Verkehr und Stop+Go). Das Einsparpotenzial für LNFs ist in der Regel etwas höher als für PKWs, wobei die maximalen Einsparungen wiederum bei Erschliessungsstrassen mit gesättigtem Verkehr zu finden sind, nämlich bis zu 50% für ICEs, 44% für HEVs und 39% für BEVs.

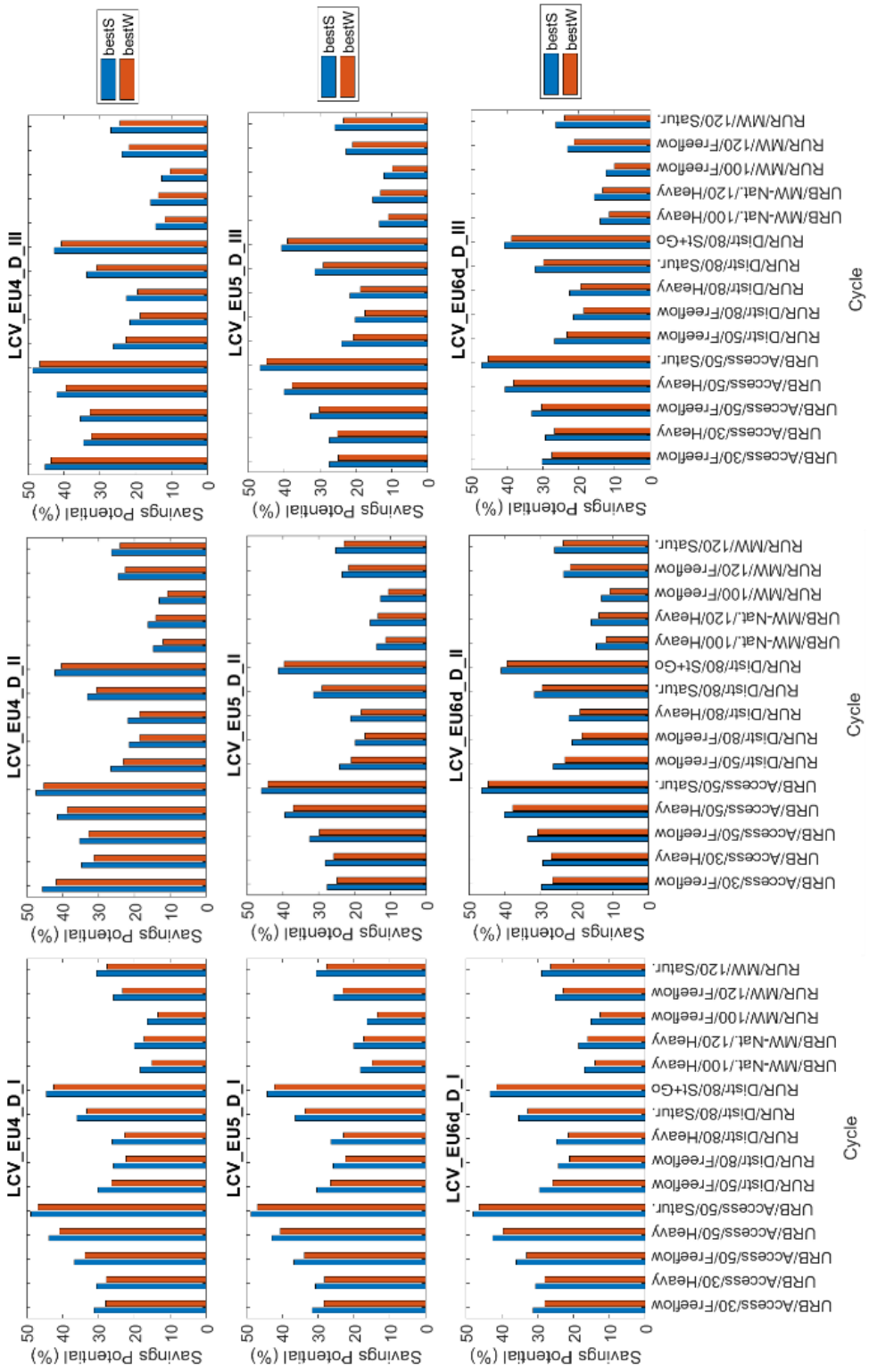


Abbildung 36 Energiesparpotenzial der kombinierten Eco-Massnahmen für Diesel-LNFs.

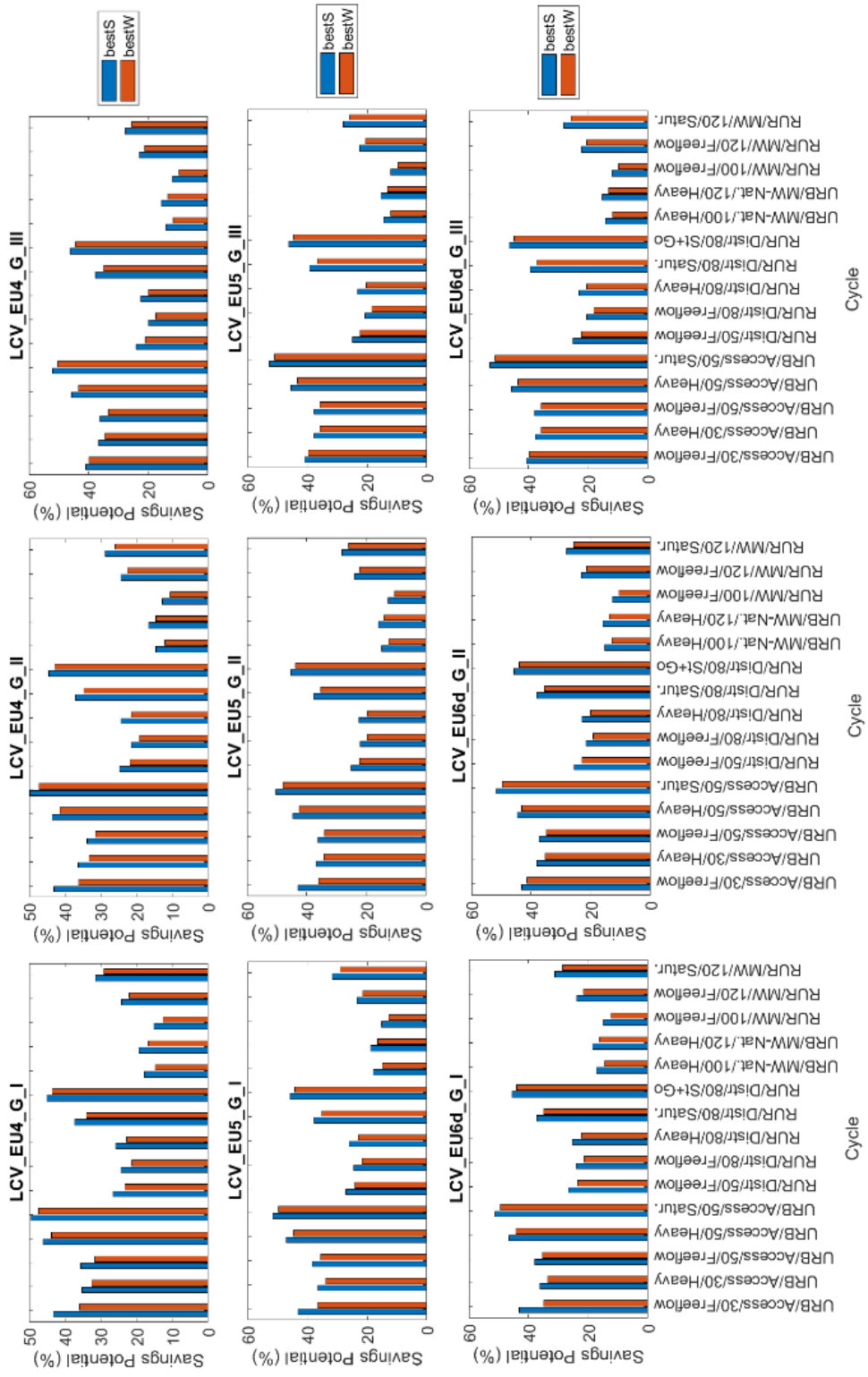


Abbildung 37 Energiesparpotenzial der kombinierten Eco-Massnahmen für Benzin-LNFs.

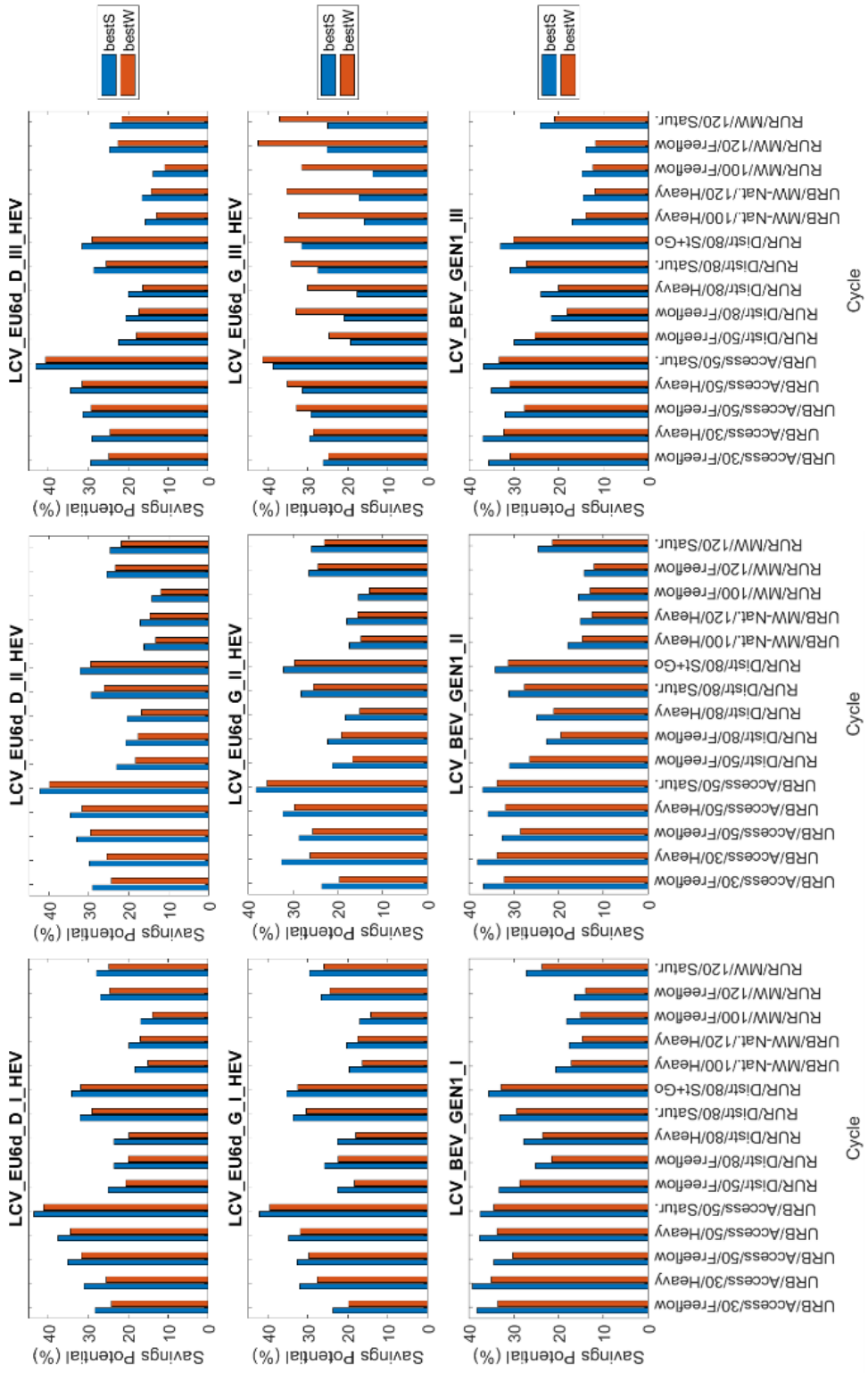


Abbildung 38 Energiesparpotenzial der kombinierten Eco-Massnahmen für HEV- und BEV-LNFs.

Schwere Nutzfahrzeuge

Abbildung 39 und Abbildung 40 zeigen die Ergebnisse für LKWs. Hier zeigt sich eine Tendenz zu höheren Einsparpotenzialen für grössere Fahrzeuge.

Ausserdem sind die Unterschiede zwischen den Einsparpotenzialen im Winter und im Sommer im Vergleich zu PKWs und LNFs etwas grösser. Während bei gesättigten und Stop-and-Go-Verkehrsbedingungen bei Diesel-LKWs weiterhin deutlich höhere Einsparungen möglich sind als bei sonstigen Verkehrsbedingungen, sind in diesem Fall keine signifikanten Unterschiede für verschiedene Durchschnittsgeschwindigkeiten erkennbar. Bei elektrifizierten LKWs lassen sich ebenfalls keine eindeutigen Auswirkungen des Verkehrszustands feststellen.
Bei den LKWs wurden in die Simulationen auch einige Zyklen mit ± 2 und ± 4 % Gradienten einbezogen, die in der Regel zu den geringeren Einsparpotenzialen führen (Minimum von 2%). Die maximalen Einsparpotenziale liegen bei 35, 40 und 50% für Diesel- und 22, 25, 26 und 28% für BEV-LKWs mit steigender Grösse. Das einzige simulierte HEV (klein) erreicht ein Einsparpotenzial von etwa 30 %, das erwartungsgemäss zwischen dem der Diesel- und der BEV-Variante liegt.

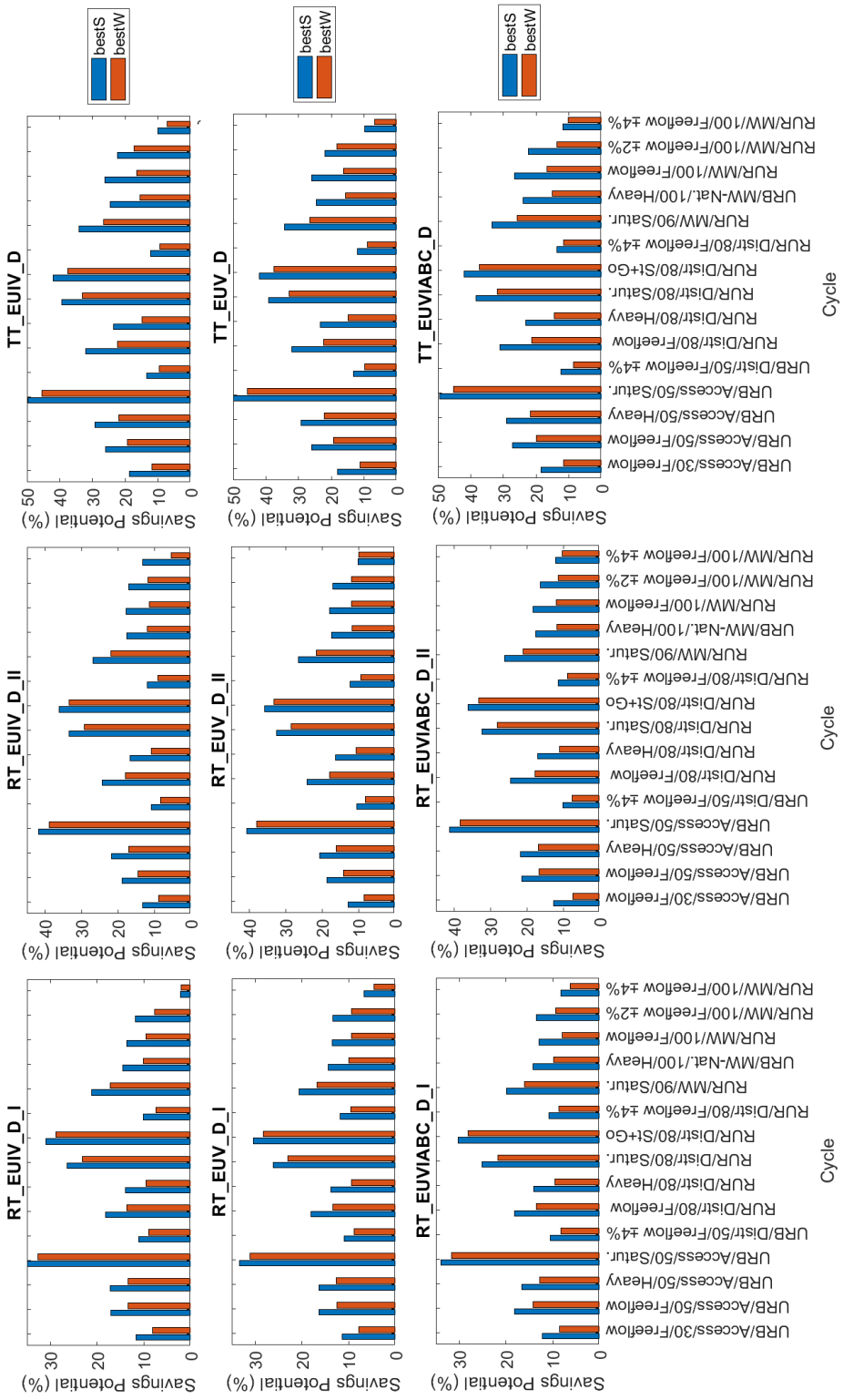


Abbildung 39 Energiesparpotenzial der kombinierten Eco-Massnahmen für Diesel-LKWs.

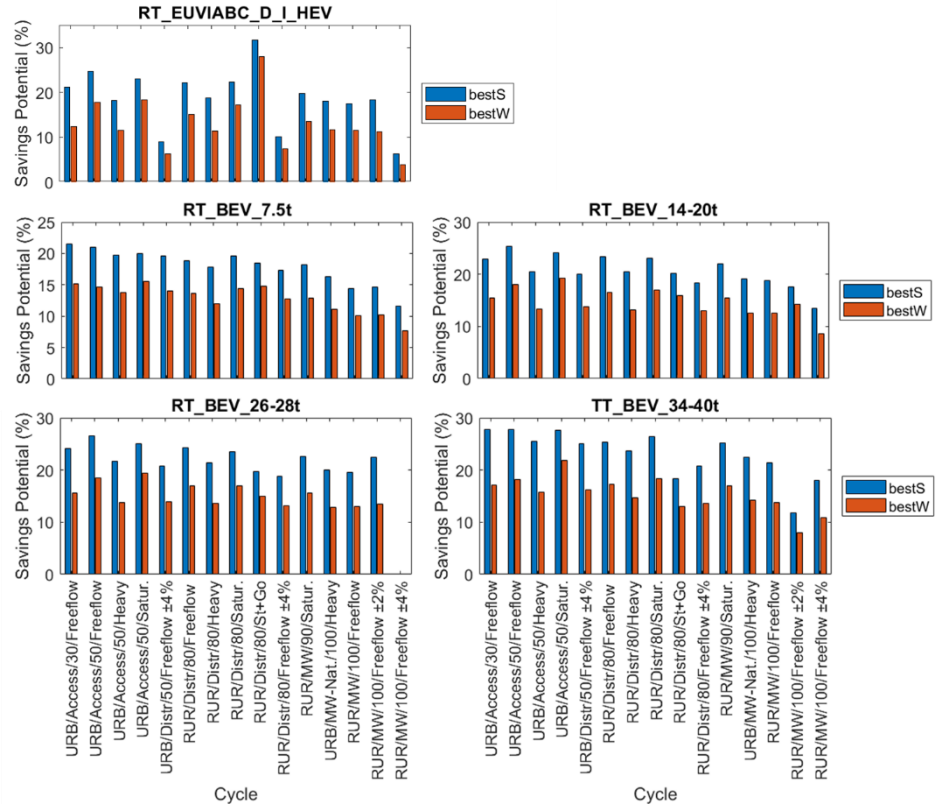


Abbildung 40 Energiesparpotenzial der kombinierten Eco-Massnahmen für HEV- und BEV-LKWs.

Stadt- und Reisebusse

Abbildung 41 bis Abbildung 43 zeigen die Ergebnisse für Busse. Wie bei den LKWs zeigt sich auch bei den Bussen eine Tendenz zu höheren Einsparpotenzialen für grössere Fahrzeuge und etwas grösseren Unterschieden zwischen Winter und Sommer im Vergleich zu PKWs und LNFs. Auch hier zeigen sich nur geringe Unterschiede bei unterschiedlichen Durchschnittsgeschwindigkeiten, und im gesättigten und Stop-and-Go-Verkehr sind die Einsparungen bei Dieselbussen meist nur wenig höher als bei anderen Verkehrsbedingungen. Die minimalen Einsparpotenziale für Stadt- und Reisebusse liegen bei etwa 12 bzw. 9 %. Die maximalen Sparpotenziale liegen bei 29 bzw. 38 % für Diesel-, 24 bzw. 35 % für HEV- und 24 bzw. 25 % für BEV-Stadtbusse mit steigender Grösse. Die einzige simulierte Grösse für Reisebusse erreicht im Vergleich ein Einsparpotenzial von etwa 35% im Fall eines Diesels und 25% bei der BEV-Version.

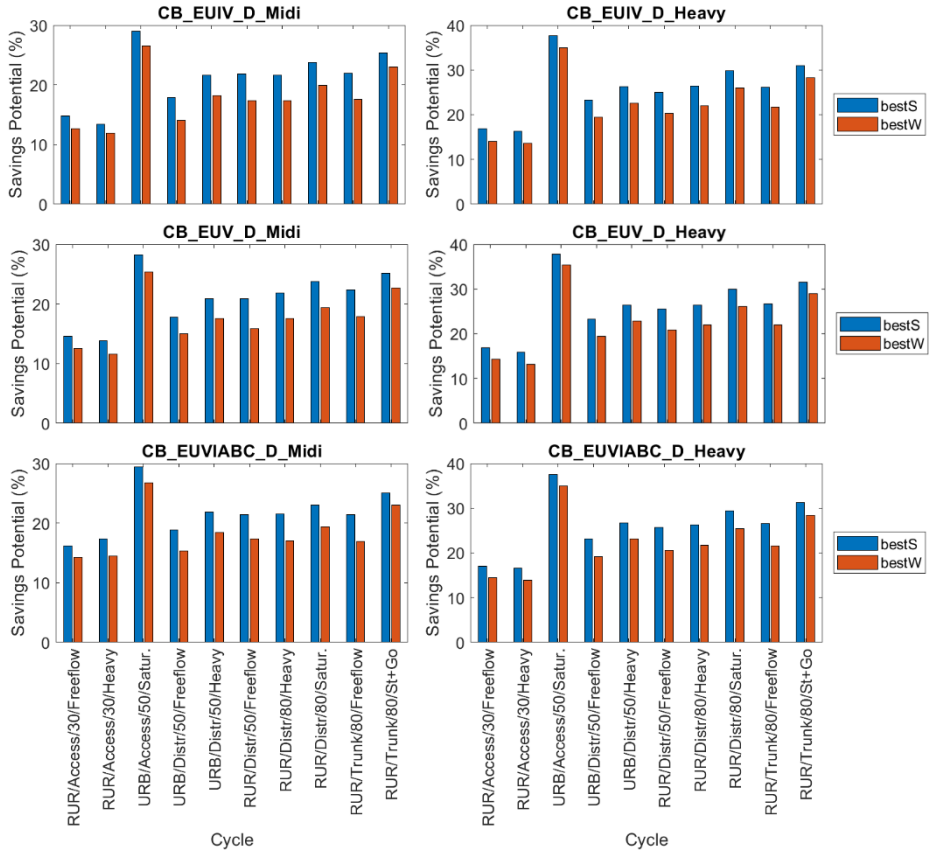


Abbildung 41 Energiesparpotenzial der kombinierten Eco-Massnahmen für diesel-Stadtbusse.

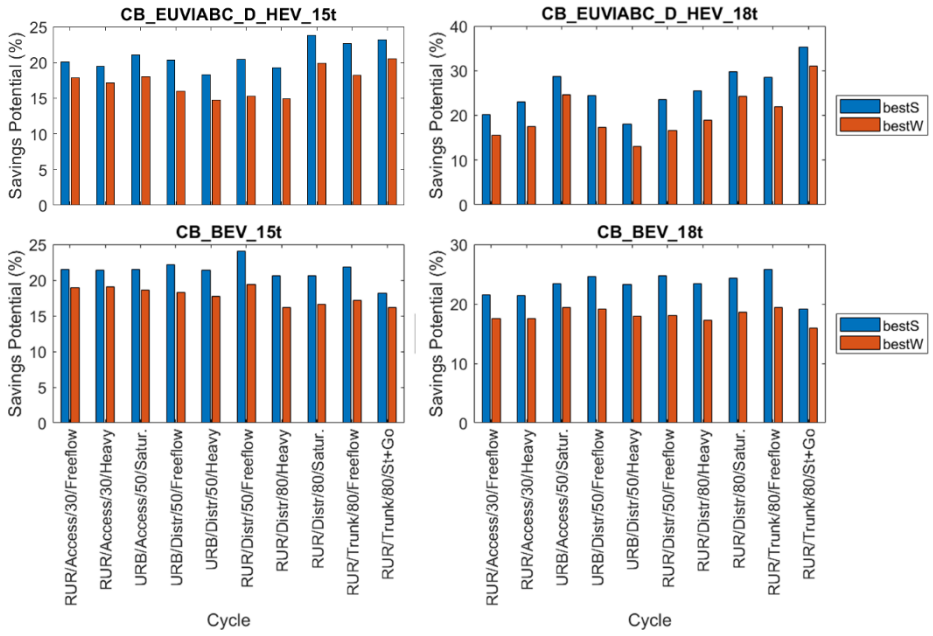


Abbildung 42 Energiesparpotenzial der kombinierten Eco-Massnahmen für HEV- und BEV-Stadtbusse.

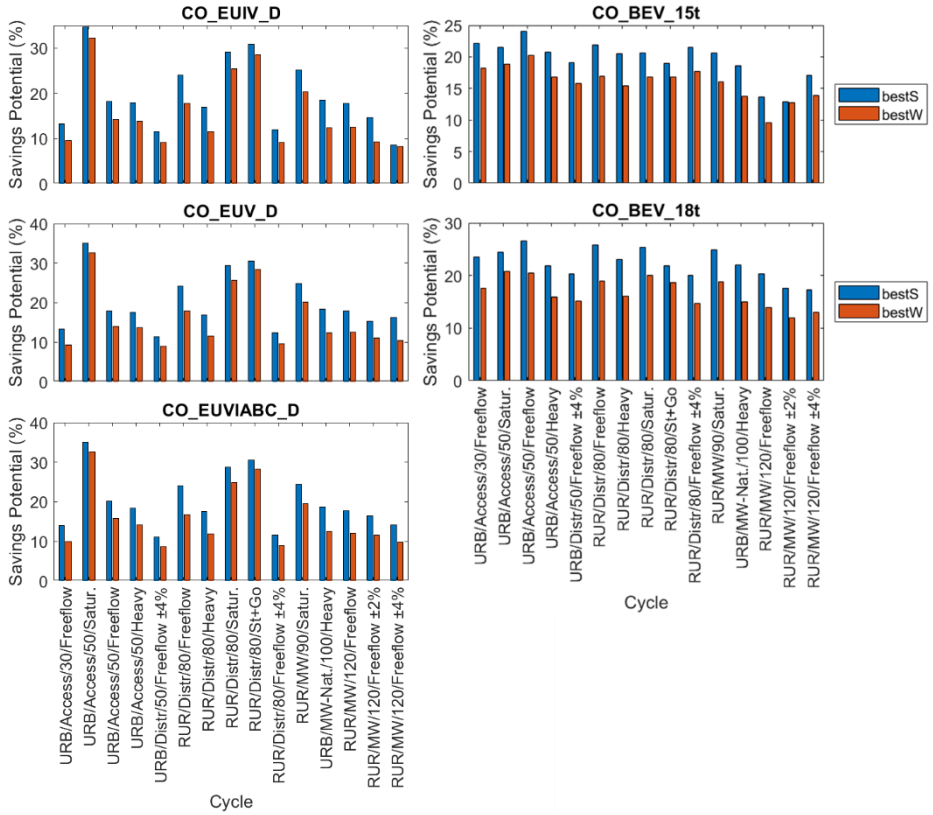


Abbildung 43 Energiesparpotenzial der kombinierten Eco-Massnahmen für diesel- und BEV-Reisebusse.

9. Methode für die Hochrechnung der Einsparpotenziale für die ganze Fahrzeugflotte

9.1 Definition der Hochrechnung

Im Kapitel 8 wurden die Simulationsergebnisse vorgestellt, wobei jeweils der Energieverbrauch für einen bestimmten «Case» berechnet wurde. Für die Hochrechnung auf die Ebene der gesamten Schweiz werden die Ergebnisse aus Kapitel 8.4 verwendet (Einsparpotenzial der kombinierten Massnahmen). Jedes Simulationsergebnis ergibt sich aus der Festlegung der folgenden Elemente:

— Jahreszeit (Winter/Sommer)

— Fahrzeugkategorie

— Antriebstechnologie

— Grössen- und Euroklasse

— Fahrzyklus

Jedes Ergebnis zeigt dabei das Einsparpotenzial des «Best Case» gegenüber dem «Default Case» auf. Die Definition von Best and Default Case ist in Tabelle 23 und Tabelle 24 aufgeführt. Das Ergebnis bezieht sich also jeweils auf einen spezifischen Fall (z.B. «Lieferwagen Diesel Euroklasse 6, Grössenklasse II, auf Autobahn, mit flüssigem Verkehr, keine Steigung und im Winter»).

Um das gesamte Einsparpotenzial in der Schweiz abzuschätzen, müssen diese spezifischen Ergebnisse aggregiert werden. Diese Aggregation der Ergebnisse ist die Hochrechnung der Einsparpotenziale für die ganze Fahrzeugflotte über alle Jahreszeiten, Fahrzeugkategorien, Antriebstechnologie, Grössen-/Euroklassen und Fahrzyklen hinweg. Das vorliegende Kapitel beschreibt die Methode und Quellen für die Hochrechnung.

Die Hochrechnung ist eine gewichtete Summe der Ergebnisse aus Kapitel 8.4. Jedes Ergebnis bekommt eine Gewichtung. Die Gewichtung entspricht der Häufigkeit des spezifischen Falls im schweizerischen Fuhrpark, gewichtet nach der Fahrleistung der entsprechenden Fahrzeugkategorie.

Die Gewichtung der einzelnen Fälle erfolgt dabei nacheinander für die fünf Stufen (Jahreszeit, Fahrzeugkategorie, Antriebstechnologie, Grössen- und Euroklasse und Fahrzyklus). Die Ergebnisse der Hochrechnung werden anschliessend skaliert, sodass nachher die Korrekturen für besondere Einsatzverhältnisse (Fahrassistenzsysteme, Fahrradträger, usw.) berücksichtigt werden können.

Die Hochrechnung wird für zwei Stichjahre ausgeführt: 2023 und 2030. Die zwei Stichjahre unterscheiden sich im Hinblick auf die Zusammensetzung des Fuhrparks (Antriebstechnologien und Fahrzeugkategorien) und die Verbreitung von Fahrassistenzsystemen.

Das gesamte Einsparpotenzial E im Jahr y ergibt sich aus der gewichteten Summe

$$E(y) = \sum_{j} w_j \left(\sum_{f} w_f \left(\sum_{a} w_a \left(\sum_{g} w_g \left(\sum_{z} w_z \; e(j,f,a,g,z) \right) \right) \right) \right)$$

wobei

— w_j die Gewichtung der Jahreszeit (Kapitel 9.2),

— w_f die Gewichtung der Fahrzeugkategorie (Kapitel 9.3),

— w_a die Gewichtung der Antriebstechnologie (Kapitel 9.4),

— w_g die Gewichtung der Grössen- und Euroklasse (Kapitel 9.5),

— w_z die Gewichtung des Fahrzyklus (Kapitel 9.6) und

— *e(j, f, a, g, z)* das Einsparpotenzial von Best Case gegenüber Default case für Jahreszeit *j*, das Fahrzeug *f* mit Antriebstechnologie *a* und Grössenklasse *g* im Fahrzyklus *z* ist. Die Ergebnisse sind im Kapitel 8.4 enthalten.

Die nachstehenden Unterkapitel beschreiben die Methode für die Bestimmung der Gewichtungen.

9.2 Gewichtung der Jahreszeiten Sommer und Winter

Es werden die beiden Jahreszeiten «Sommer» und «Winter» unterschieden. Die Gewichtung der Jahreszeit berücksichtigt, dass im Winter das Einsparpotenzial geringer ist, weil die Winterreifen einen höheren Reibungskoeffizienten haben. Nach dem Prinzip «Winterreifen von Oktober bis Ostern», nehmen wir an, dass im «Best Case»-Szenario Winterreifen zwischen dem 15. Oktober und dem 15 April montiert sind (183 Tage). Deshalb ist die Gewichtung für die Sommerzeit 0.5 und für die Winterzeit 0.5.

9.3 Gewichtung Fahrzeugkategorien

Die Hochrechnung erfolgt getrennt für die fünf Fahrzeugkategorien

— Personenwagen (PC)

— Leichte Nutzfahrzeuge (LCV)

— Schwere Nutzfahrzeuge (HGV)

— Reisebusse (CO)

— Stadtbusse (CB)

Die Gewichtung setzt sich dabei zusammen aus zwei Faktoren: Die Anzahl jährliche Fahrzeugkilometer und der Verbrauch pro Kilometer.

Gewichtung nach Fahrzeugkilometer
Das Gewicht einer Fahrzeugkategorie hängt von der Anzahl jährlicher Fahrzeugkilometer in der Schweiz ab. Die Anzahl Fahrzeugkilometer stammt aus zwei Quellen. Für PC, LCV und HGV nehmen wir die Fahrzeugkilometer gemäss Verkehrsperspektiven 2050, Szenario Basis (ARE, 2022). Für CB und CO sind keine Daten in den Verkehrsperspektiven 2050. Für diese zwei Fahrzeugkategorien nehmen wir die Anzahl Fahrzeugkilometer aus der Statistik über die Leistungen des Personenverkehrs (BFS, 2023). Als Wert nehmen wir die jüngste Statistik (Jahr 2021) und nehmen an, dass die Anzahl

Fahrzeugkilometer für diese zwei Kategorien zwischen 2021 und 2030 konstant bleibt.

Die Faktoren für die Gewichtung nach Fahrzeugkilometer sind in der Tabelle 27 gegeben.

Gewichtung nach Verbrauch pro Kilometer
Da wir das Einsparpotenzial berechnen wollen, sind die Kilometer der Fahrzeugkategorien nicht äquivalent. Eine Einsparung von 10% bei einem Lastwagen hat ein grösseres Gewicht als eine Einsparung von 10% bei einem Personenwagen, weil der Verbrauch pro Kilometer beim Lastwagen höher ist.

Deshalb haben wir die Fahrzeugkilometer nach dem Verbrauch der Kategorie gewichtet. Als Faktoren für die Gewichtung haben wir die hochgerechneten Verbräuche für die Antriebstechnologie Diesel beim Default Case genommen. Der Verbrauch der Fahrzeugkategorie *f* mit Antriebstechnologie Diesel ist gegeben durch

$$V(f, Diesel) = \sum_g w_g \left(\sum_z w_z \; v(f, Diesel, g, z) \right)$$

wobei *V (f, Diesel, g, z)* den Verbrauch im Default Case für das Fahrzeug der Kategorie *f*, mit Antriebstechnologie Diesel, Grössenklasse *g* und Fahrzyklus *z* bezeichnet.

Die Verbrauchsfaktoren für die Gewichtung nach Verbrauch pro Kilometer sind in der Tabelle 27 gegeben.

Fahrzeugkategorie	Milliarden Fahrzeugkilometer im Jahr 2023	Milliarden Fahrzeugkilometer im Jahr 2030	Verbrauch in g Diesel pro km
Personenwagen	61.75	63.49	44.6
Leichte Nutzfahrzeuge	6.34	7.87	78.7
Schwere Nutzfahrzeuge	2.43	2.68	336
Reisebusse	0.311	0.311	485
Stadtbusse	0.138	0.138	356

Tabelle 27: Daten für die Gewichtung nach Fahrzeugkategorie

9.4 Gewichtung Antriebstechnologien

Innerhalb einer Fahrzeugkategorie erfolgt eine Aufteilung nach Antriebstechnologie. In dieser Studie berücksichtigen wir vier Antriebstechnologie: Benzin (nur PC und LCV), Plug-in-Hybrid (nur PC und LCV), Diesel und batterieelektrisch.

Die heutige Zusammensetzung nach Antriebstechnologie innerhalb einer Fahrzeugkategorie ist aus dem Motorfahrzeugregister Stand 1. Februar 2023 abgeleitet.

Für die Schätzung der zukünftigen Verbreitung der Antriebstechnologien im Fahrzeugbestand verwenden wir die Ergebnisse aus der Studie «Verständnis Ladeinfrastruktur 2050. Wie lädt die Schweiz in Zukunft? (EBP 2022, EBP 2023). Die Ergebnisse entstammen dem EBP Electric and Hydrogen Mobility Modell. Das Modell berücksichtigt die soziodemographische Entwicklung, Technologie- und Marktentwicklung, Mobilitätsverhalten (ARE, 2022) und Verkehrsflüsse. Die zukünftigen Fahrzeugbestände werden ausgehend von den tatsächlichen Beständen gemäss Motorfahrzeugregister und den erwarteten Neuzulassungen modelliert. Eine detaillierte Beschreibung des Modells und der Annahmen findet man in der Studie (EBP, 2023).

Antriebs-technologie	**PC**	**LCV**	**HGV**	**CO**	**CB**
Benzin	71%	13%			
Diesel	22%	86%	99%	100%	95%
Batterie-elektrisch	5%	1%	1%	0%	5%
Plug-in-Hybrid	2%	0%			

Tabelle 28: Zusammensetzung nach Antriebstechnologie im Jahr 2023

Antriebs-technologie	**PC**	**LCV**	**HGV**	**CO**	**CB**
Benzin	44%	5%			
Diesel	14%	79%	81%	90%	76%
Batterie-elektrisch	36%	15%	19%	10%	24%
Plug-in-Hybrid	6%	1%			

Tabelle 29: Zusammensetzung nach Antriebstechnologie im Jahr 2030

Andere Antriebstechnologie stellen einen sehr kleinen Anteil des Fuhrparks dar. Fahrzeuge mit Antriebstechnologie CNG und LNG wurden als Benzinfahrzeuge betrachtet (bzw. Dieselfahrzeuge für sehr wenige HGV, CO und CB) und Fahrzeuge mit Wasserstoff Brennstoffzellen wurden als batterieelektrische Fahrzeuge betrachtet. Wie im Kapitel 6.3 erwähnt, können wir annahmen, dass die Einsparpotenziale von Gasfahrzeugen denen von Verbrennungsmotoren entsprechen, beziehungsweise die von Brennstoffzellen Fahrzeugen denen von BEV entsprechen.

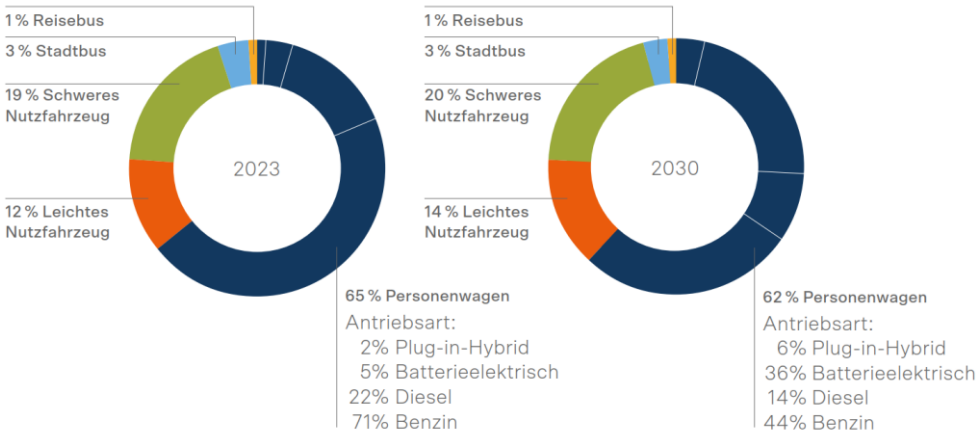


Abbildung 44: Gewichtung der einzelnen Fahrzeugkategorien. Die Verteilung der Antriebsarten wird beispielhaft für die Personenwagen aufgeschlüsselt.

9.5 Gewichtung Grössen- und Euroklasse

Fahrzeuge einer Kategorie und einer Antriebstechnologie können weiter in Grössen- und Euroklassen aufgeteilt werden. Eine Grössenklasse und eine Euroklasse bilden ein Subsegment (z.B. LCV Diesel Grösse II EU6). Die Liste der simulierten Subsegmente ist in der Tabelle 20 ersichtlich.

Die Verteilung der Grössenklassen wurde für 2030 als unverändert gegenüber 2023 angenommen. Dies hat mehrere Gründe: Es vereinfacht die Vergleichbarkeit der Resultate, die Änderungen in der Verteilung der Grössenklassen sind nur gering und mutmassliche Änderungen wären mit Unsicherheiten behaftet.

Die Gewichtung der Subsegmente erfolgt gemäss Handbook Emission Factors for Road Transport, Version 4.2 (HBEFA 4.2). Wir verwenden den im HBEFA definierten Mix nach Subsegmenten für die Schweiz.

Nicht alle Subsegmente wurden simuliert. Das Gewicht dieser nicht-simulierten Subsegmente wird den ähnlichsten simulierten Subsegmenten zugeordnet. Für die Bestimmung, welches Subsegment am ähnlichsten ist, wird zuerst die Grössenklasse und danach die Euroklasse berücksichtigt.

9.6 Gewichtung Fahrzyklus

Wie im Kapitel 6.2 erklärt wurden pro Fahrzeugkategorie 15 repräsentative Fahrzyklen ausgewählt. Für diese repräsentativen Fahrzyklen wurden dann Simulationen ausgeführt, um das Einsparpotenzial zu berechnen. Die simulierten Zyklen sind in der Tabelle 17 dargestellt.

Die Fahrzyklen sind so gewichtet, dass die durchschnittliche Fahrsituation der Schweiz abgebildet wird. Die Gewichtung setzt sich aus zwei Komponenten zusammen: Gewichtung nach Gebiet und Gewichtung nach Fahrsituation.

Gewichtung nach Gebiet
Wir unterscheiden drei Gebiete: Autobahn, Ausserorts und Innerorts. Für Stadtbusse hat das Gebiet «Autobahn» null Gewicht.

Für die Fahrzeugkategorien PC, LCV und HGV verwenden wir die Ergebnisse aus den Verkehrsperspektiven 2050 (ARE, 2022) Szenario Basis. Die Verkehrsperspektiven unterscheiden nicht diese drei Gebiete. Sie zeigen aber, wie viele Kilometer auf der Autobahn gefahren werden. Ausserdem zeigen sie die Aufteilung zwischen Kilometer im Innerorts- und Ausserortsgebiet. Für die Berechnung haben wir angenommen, dass alle Autobahnkilometer im Ausserortsgebiet gezählt wurden.

Für die Kategorien CO und CB sind keine Angaben in den Verkehrsperspektiven vorhanden. Für diese zwei Kategorien haben wir die Gewichtung gemäss der durchschnittlichen Fahrsituation in der Schweiz nach HBEFA berechnet.

Die resultierende Gewichtung nach Gebiet ist Tabelle 30 gegeben

	PC	LCV	HGV	CO	CB
Autobahn	44%	45%	72%	57%	0%
Innerorts	38%	41%	17%	27%	72%
Ausserorts	18%	13%	10%	16%	28%

Tabelle 30: Gewichtung nach Gebiet

Gewichtung nach Fahrsituation

Für jede Fahrzeugkategorie und jedes Gebiet wurden fünf repräsentative Fahrzyklen ausgewählt. Die Gewichtung der fünf repräsentative Fahrzyklen wird anhand der durchschnittlichen Fahrsituationen gemäss HBEFA bestimmt. Die drei durchschnittlichen Fahrsituationen von HBEFA sind CH Ø-Autobahn 2020, CH Ø-Ausserorts 2020 und CH Ø-Innerorts 2020. Jede durchschnittliche Fahrsituation setzt sich zusammen aus einer linearen Kombination von 124 bis 158 einzelnen Fahrsituationen.

Jede einzelne Fahrsituation wurde einem repräsentativen Fahrzyklus zugewiesen. Die Summe der Gewichte aller zugewiesenen Fahrzyklen ergeben das Gewicht des repräsentativen Fahrzyklus.

Die Zuweisung ist so definiert, dass die Fahrsituation dem repräsentativen Zyklus mit dem ähnlichsten Verbrauch und den ähnlichsten kinematischen Effekten zugewiesen wird. Deshalb unterscheidet sich der Zuweisungsalgorithmus je nach Fahrzeugkategorie.

Aus diesem Verfahren resultieren 70 Gewichtsfaktoren für die Fahrzyklen.

9.7 Skalierung für die Einsatzverhältnisse

Am Ende der Hochrechnung werden die Ergebnisse für PC und LCV noch korrigiert, um spezielle Einsatzverhältnisse und die Fahrassistenzsysteme zu berücksichtigen.

Das Default Case wird korrigiert. Wegen des Einsatzes von Dachgepäckträgern und Fahrradträgern steigt das Einsparpotenzial. Die Verbreitung von Fahrassistenzsystemen hat ebenfalls einen Einfluss:

— Start-Stop System: Das manuelle Abschalten vom Motor, wenn das Fahrzeug hält, gehört zu den EcoDrive Massnahmen. Ein Start-Stop System setzt diese Massnahme automatisch ein. Wenn ein Fahrzeug ein Start-Stop System hat, hat das Default Case kein Einsparpotenzial gegenüber das Best Case. Wenn ein Fahrzeug kein Start-Stop System hat, hat das Best Case Einsparpotenzial, weil der Eco-Fahrer den Motor manuell abschaltet. Die Verbreitung von Start-Stop Systemen reduziert deshalb das Einsparpotenzial.

— Tempomat: Die Verwendung von Tempomat gehört zu den EcoDrive Massnahmen. Die Massnahme kann aber nur dann eingesetzt werden, wenn das Fahrzeug einen Tempomat hat. Wenn ein Fahrzeug keinen Tempomat hat, hat das Best Case kein Einsparpotenzial gegenüber dem Default Case. Wenn ein Fahrzeug hingegen einen Tempomat hat, dann kann der Eco-Fahrer den Tempomat verwenden und damit sparen. Die Verbreitung von Tempomaten erhöht deshalb das Einsparpotenzial.

Das Einsparpotenzial bei diesen speziellen Einsatzverhältnissen wurde nicht für alle Fahrzeugtypen und alle Fahrzyklen simuliert (siehe Kapitel 7.5). Für jeden Fall wurde das Einsparpotenzial des Fahrzeuges mit dem grössten Gewicht in der Hochrechnung und für den Fahrzyklus mit dem grössten Gewicht angenommen.

Neben der Veränderung des Einsparpotenzials brauchen wir auch die Frequenz, d.h. wie oft die speziellen Einsatzverhältnisse vorkommen (z.B. wie oft fahren Personenwagen mit Dachpackträger). Dafür verwenden wir die Angaben aus Kapitel 5.2 für Dach- und Fahrradträger und aus Kapitel 5.5 für die Verbreitung von Start-Stop und Cruise Control Systemen.

Die Korrekturen sind in Tabelle 31 und Tabelle 32 gegeben.

Einsatzverhältnis	Frequenz 2023	Frequenz 2030	Energieeinsparungen gegenüber Default Case
Dachpackträger	2.8%	2.8%	-7.4%
Fahrradträger	1.8%	1.8%	-16.4%
Start und Stop	5%	8%	2.6%
Cruise Control	64%	85%	1.5%

Tabelle 31: Korrekturen für speziellen Einsatzverhältnisse bei Personenwagen

Einsatzverhältnis	Frequenz 2023	Frequenz 2030	Energieeinsparungen gegenüber Default Case
Start und Stop	5%	8%	2.3%
Cruise Control	64%	85%	1.5%

Tabelle 32: Korrekturen für speziellen Einsatzverhältnisse bei Lieferwagen

Wie im Kapitel 7.5 erklärt wurde der Effekt von FAS bei LKW und Bussen nicht simuliert. Dieses Einsparpotenzial wird ebenfalls nach der Hochrechnung hinzugefügt.

Das Einsparpotenzial wird auf Basis der VECTO-Ergebnisse geschätzt (siehe Abbildung 30 im Kapitel 8.3). Wir nehmen an, dass das Einsparpotenzial 2.5% bei LKW und Reisebussen (rurales Gebiet) und 2% bei Stadtbussen (urbanes Gebiet) beträgt. Für die erwartete Marktdurchdringung von FAS verwenden wir die Daten (JRC, 2021) aus Kapitel 5.5. Wir nehmen an, dass 40% der Fahrzeuge im Jahr 2023 FAS haben und 70% im Jahr 2030.

Schliesslich korrigieren wir die Einsparpotenziale der Verbrennungsfahrzeuge unter Berücksichtigung der Massnahme «Einsatz von Leichtlauföl».

Basierend auf der Literatur (siehe Kapitel 4.1.3) nehmen wir an, dass das Einsparpotenzial aufgrund des Einsatzes von Leichtlauföl 2% gegenüber der von Herstellern empfohlenen Motorölqualität für PC und LCV beträgt und für HGV, CB und CO 1% beträgt. Gemäss AEC setzten im Jahr 2016 bereits 77.6% der Personenwagen das Leichtlauföl ein. Wir nehmen an, dass heute nur noch 15% der Fahrzeuge in den Kategorien PC und LCV und 5% in den Kategorien HGV, CB und CO kein Leichtlauföl einsetzen.

9.8 Hochrechnung der Emissionen-Einsparpotenzial

In den vorherigen Kapiteln haben wir erklärt, wie die Hochrechnung des Energie-Einsparpotenzial durchgeführt wurde. Auf Basis dieses Ergebnisses wurde auch das Einsparpotential der CO_2-Emissionen berechnet.

Die heutigen CO_2-Emissionen im Sektor Verkehr nach Fahrzeugkategorie sind im Treibhausgasinventar der Schweiz gegeben (BAFU, 2023). Unter Berücksichtigung der folgenden drei Entwicklungen wurden die Emissionen nach Fahrzeugkategorie im Jahr 2030 geschätzt:

— Entwicklung der Fahrzeugkilometer: Die angenommene Entwicklung der Fahrzeugkilometer nach Fahrzeugkategorie ist in Tabelle 27 gegeben. In Zukunft steigt die Anzahl Fahrzeugkilometer.

— Entwicklung alternative Antriebstechnologien: Die angenommene Entwicklung der Antriebstechnologien im schweizerischen Fuhrpark ist in Tabelle 28 und Tabelle 29 gegeben. In Zukunft sind mehr emissionsfreie Fahrzeuge im Bestand.

— Entwicklung Effizienzklassen und Grössenklassen. Die Reduktion der CO_2-Emissionen pro Fahrzeugkilometer wurde gemäss HBEFA 4.2 angenommen (durchschnittliche Fahrsituation Schweiz 2020). Die Reduktionsfaktoren sind in Tabelle 33 gegeben. In Zukunft verursachen die Verbrennungsmotoren weniger Emissionen pro Kilometer.

Fahrzeugkategorie	Antriebstechnologie	Emissionen im Jahr 2023 [g CO_2/km]	Emissionen im Jahr 2030 [g CO2/km]	Reduktion 2023-2030
PC	Benzin	157.1	129.7	16%
PC	Diesel	175.7	168.7	4%
PC	Plug-in-Hybrid	79.7	70.3	11%
LCV	Benzin	190.5	155.1	17%
LCV	Diesel	231.6	209.0	9%
LCV	Plug-in-Hybrid	110.1	97.9	11%
HGV	Diesel	761.2	700.0	8%
CO	Diesel	673.1	621.3	7%
CB	Diesel	1042.1	1016.0	2%

Tabelle 33: Emissionsfaktoren im Jahr 2023 und 2030 nach Fahrzeugkategorie und Antriebstechnologie gemäss HBEFA 4.2.

10. Einsparpotenzial im schweizerischen Fuhrpark

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Hochrechnung vorgestellt. Die Zahlen sind in Prozent gegeben und stellen das Eisparpotenzial zwischen dem Default Case und dem Best Case (definiert in Tabelle 23 und Tabelle 24) im schweizerischen Fuhrpark und unter durchschnittlichen Fahrverhältnissen (siehe Kapitel 9) dar.

10.1 Theoretisches Einsparpotenzial nach Antriebstechnologie

Das hochgerechnete Einsparpotenzial nach Antriebstechnologie ist für die Jahre 2023 und 2030 in vielen Aspekten gleich, abgesehen von den Korrekturen wegen der stärkeren Verbreitung von FAS. In diesem Kapitel sind die Ergebnisse für das Jahr 2023 gezeigt. Die Ergebnisse sind für das Jahr 2030 jeweils 0.3% höher wegen einer höheren Verbreitung des Tempomates. In der Kategorie Personenwagen ist das theoretische Einsparpotenzial, je nach Antriebstechnologie, zwischen 19% und 23% (Abbildung 45).

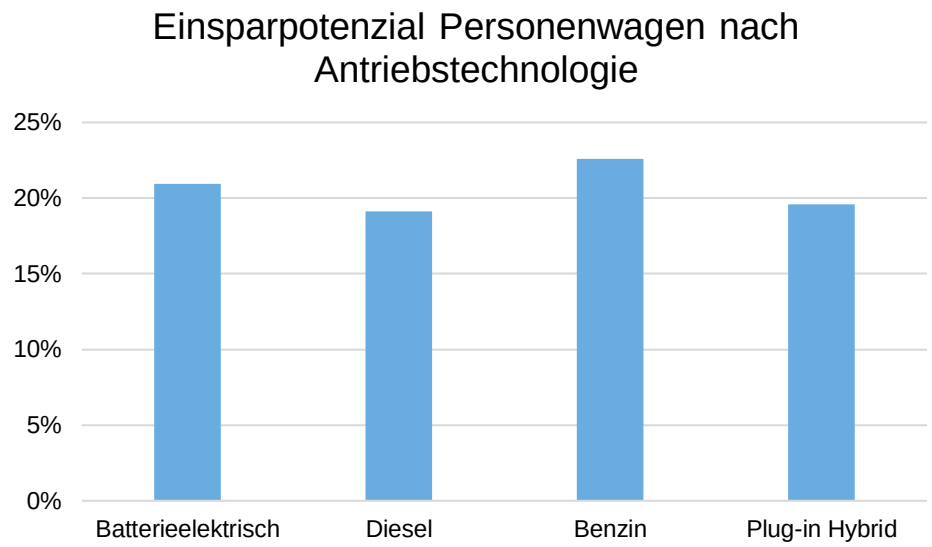


Abbildung 45:Einsparpotenzial in der Kategorie Personenwagen nach Antriebstechnologie.

In der Kategorie Lieferwagen ist das theoretische Einsparpotenzial zwischen 22% und 29%, je nach Antriebstechnologie (Abbildung 46).

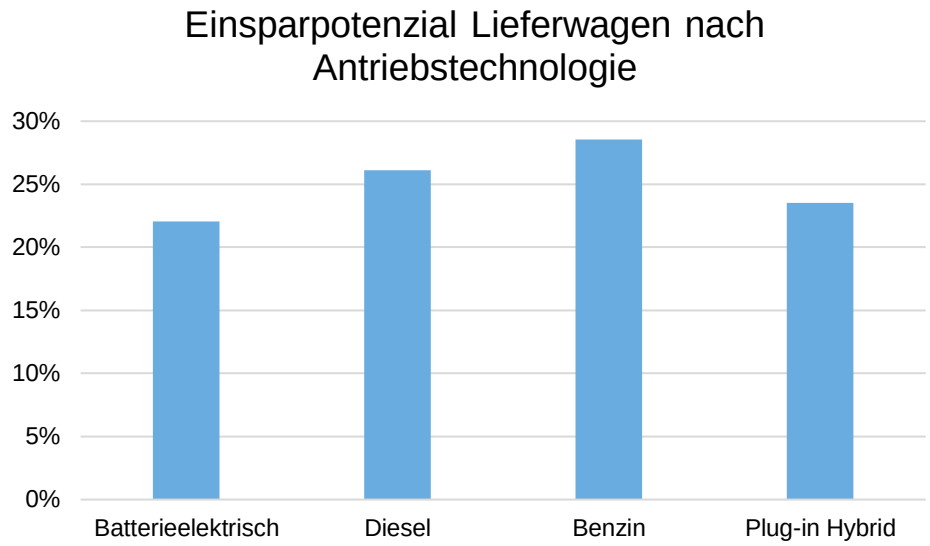


Abbildung 46: Einsparpotenzial in der Kategorie Lieferwagen nach Antriebstechnologie.

In der Kategorie Lastwagen ist das theoretische Einsparpotenzial 17.6% für Diesel-Fahrzeuge und 17.5% für batterieelektrische-Fahrzeuge. Die Abbildung 47 zeigt die Ergebnisse der Hochrechnung für die Kategorie Lastwagen.

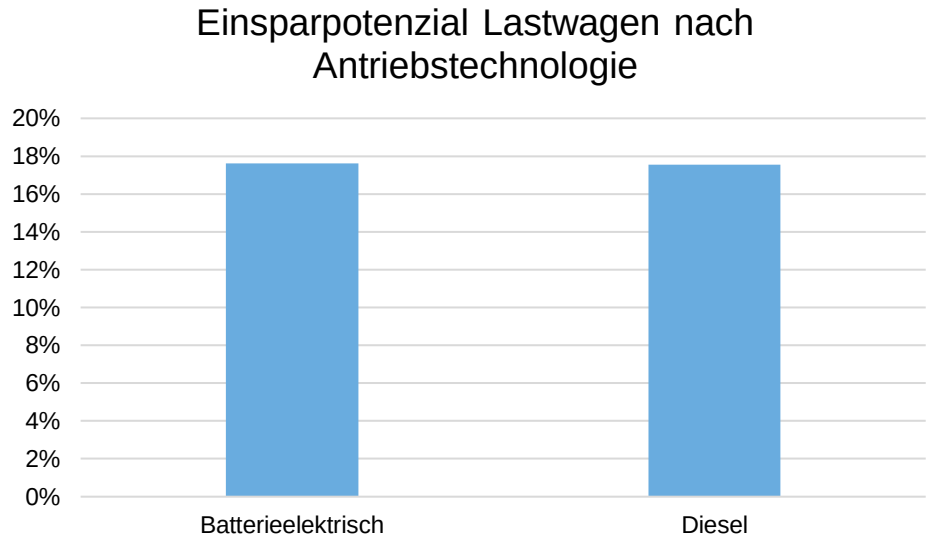


Abbildung 47: Einsparpotenzial in der Kategorie Lastwagen nach Antriebstechnologie.

In der Kategorie Stadtbusse ist das theoretische Einsparpotenzial 24% für Diesel-Fahrzeuge und 18% für batterieelektrische-Fahrzeuge. Die Abbildung 48 zeigt die Ergebnisse der Hochrechnung für die Kategorie Stadtbusse.

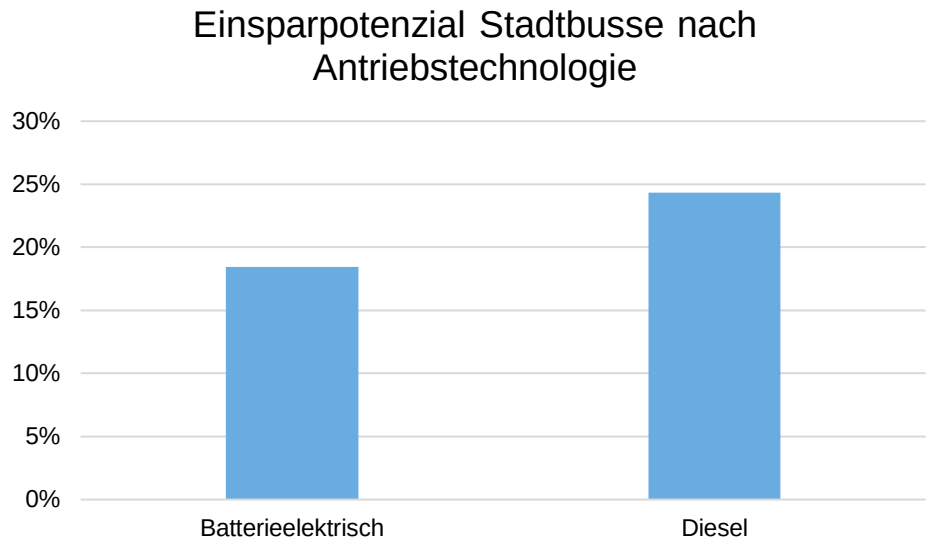


Abbildung 48: Einsparpotenzial in der Kategorie Stadtbusse nach Antriebstechnologie.

In der Kategorie Reisebusse ist das theoretische Einsparpotenzial 17% für Diesel-Fahrzeuge und 19% für batterieelektrische-Fahrzeuge. Die Abbildung 49 zeigt die Ergebnisse der Hochrechnung für die Kategorie Reisebusse.

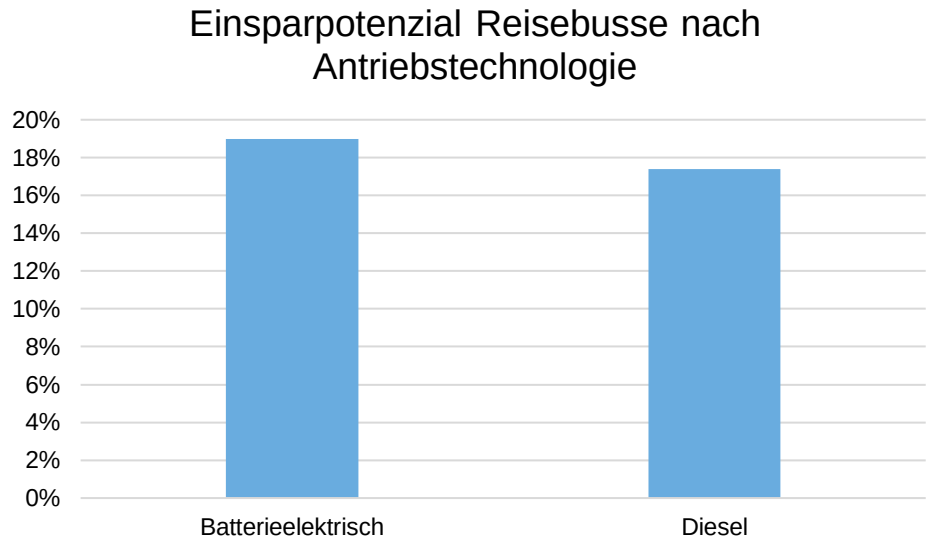


Abbildung 49: Einsparpotenzial in der Fahrzeugkategorie Reisebusse nach Antriebstechnologie.

10.2 Theoretisches Einsparpotenzial nach Fahrzeugkategorie

Die Abbildung 50 zeigt das theoretische Einsparpotenzial nach Fahrzeugkategorie für die Jahre 2023 und 2030. Das tiefste Einsparpotenzial liegt mit 17.4% bei Reisebussen und das höchste Potenzial erreichen die Lieferwagen mit 26.4%.

In einigen Kategorien ist das Einsparpotenzial im Jahr 2030 grösser als im Jahr 2023, während bei anderen es umgekehrt ist.

In den Kategorien Lieferwagen und Stadtbusse ist das Einsparpotenzial im Jahr 2030 tiefer als im Jahr 2023. In den Kategorien Personenwagen, Lastwagen und Reisebusse ist es hingegen umgekehrt. Die Differenz hängt vor allem von der Verbreitung von batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeugen sowie von der Verbreitung von FAS ab.

Einige Effekte kompensieren sich gegenseitig. Zum Beispiel bei Personenwagen reduziert einerseits die Verbreitung von batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeugen das Einsparpotenzial. Anderseits erhöht die Verbreitung von Tempomaten das Einsparpotenzial. Die zwei Effekte kompensieren sich gegenseitig, weshalb man nur kleine Unterschiede zwischen 2023 und 2030 sieht.

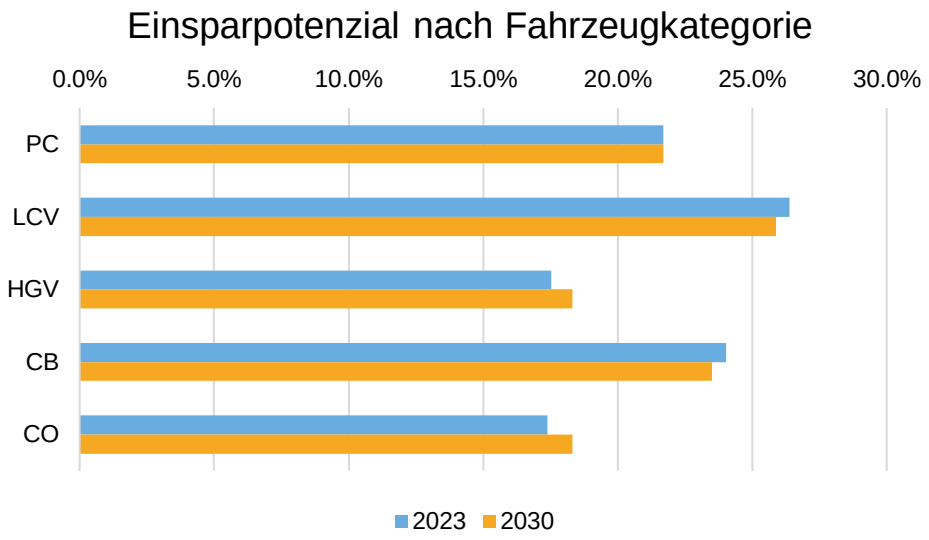


Abbildung 50: Einsparpotenzial nach Fahrzeugkategorie für die Jahre 2030 (in Orange) und 2023 (in Blau).

10.3 Gesamtes theoretisches Einsparpotenzial für den Energiebedarf des Strassenverkehrs

Die Abbildung 50 zeigt das gesamte theoretische Einsparpotenzial im schweizerischen Fuhrpark, d.h. für den Energiebedarf des Strassenverkehrs (ohne Motorräder). Das Einsparpotenzial beträgt 21.5% im Jahr 2023 und 21.6% im Jahr 2030. Da die Personenwagen am meisten Kilometer fahren, sind sie für den grössten Teil der Einsparungen im Jahr 2023 verantwortlich (14%). Danach folgen die Lastwagen mit 3.4%, die Lieferwagen mit 3.1%, die Stadtbusse mit 0.8% und schliesslich die Reisebusse mit 0.2%.

Die Reihenfolge der Fahrzeugkategorien nach Beitrag ihrem am gesamten Einsparpotenzial im Jahr 2030 ist fast gleich, aber die Personenwagen verlieren an Relevanz, während Lieferwagen und Lastwagen ein höheres Gewicht haben.

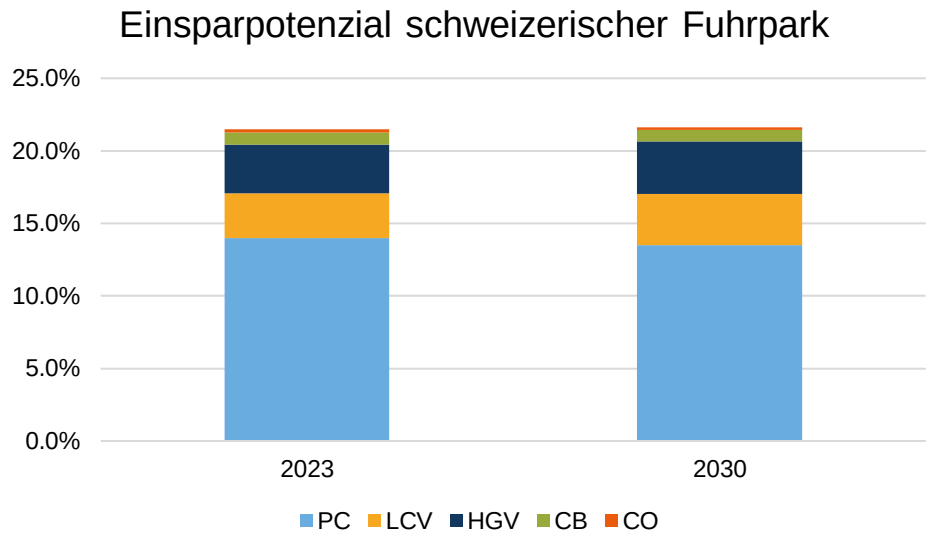


Abbildung 51: Theoretische Einsparpotenzial im schweizerischen Fuhrpark für die Jahre 2023 und 2030.

Die zeigt ebenfalls das gesamte theoretische Einsparpotenzial für die Jahre 2023 und 2030, aber die differenziert auch nach Jahreszeit. Da im Winter im Best Case Winterreifen mit einem höheren Reibungskoeffizienten montiert werden, ist das Einsparpotenzial im Winter kleiner als im Sommer. Ausserdem ist im Winter der Verbrauch von Nebenaggregaten höher (siehe Tabelle 14). Das Einsparpotenzial sinkt um 2.6% im Jahr 2023 und um 3% im Jahr 2030.

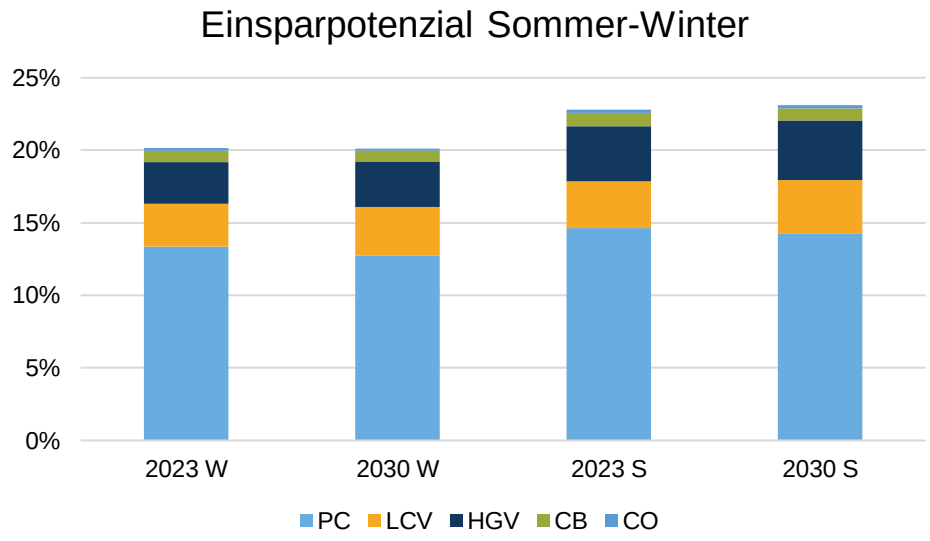


Abbildung 52: Gesamte Einsparpotenzial im schweizerischen Fuhrpark für die Jahre 2023 in Winter- und Sommerzeit.

10.4 Emissionen-Einsparpotenzial

Die Berechnung des theoretischen Emissionen-Einsparpotenzials wurde in Kapitel 9.8 beschrieben. Die resultierenden Emissionen nach Fahrzeugkategorie sind in Abbildung 53 dargestellt.

Wegen der Verbreitung von emissionsfreien Fahrzeugen sowie von Verbrennungsfahrzeugen mit höheren Effizienzklassen sinken die CO_2-Emissionen in der Schweiz bis zum Jahr 2030 von 13.1 auf 8.5 Milionen Tonnen.

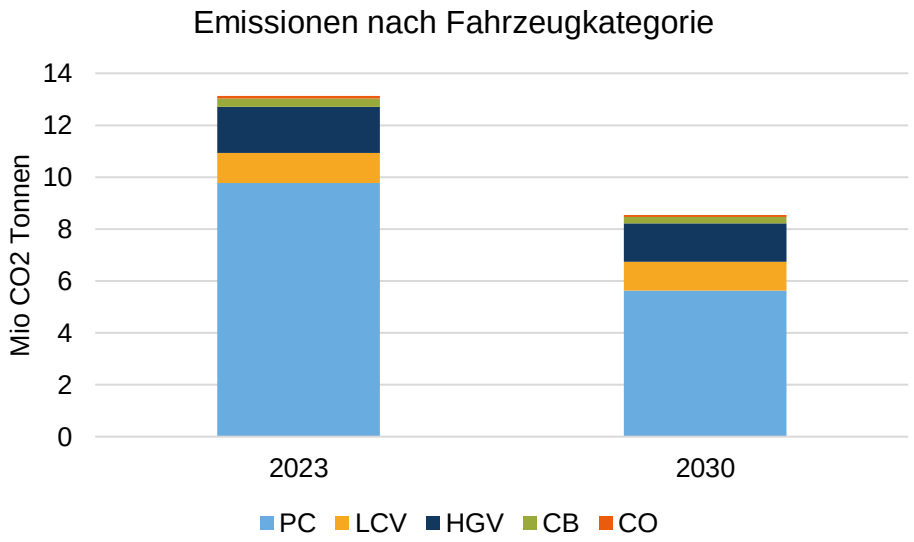


Abbildung 53: CO2-Emissionen nach Fahrzeugkategorie im Jahr 2023 und 2030.

Die Emissionen für jedes Jahr, jede Fahrzeugkategorie und Antriebstechnologie wurden mit den spezifischen Einsparpotenzialen nach Antriebstechnologie (siehe Kapitel 10.1) multipliziert. Daraus resultiert das Emissions-Einsparpotenzial im schweizerischen Fuhrpark. Dies ist in Abbildung 54 dargestellt.

Das theoretische Emissions-Einsparpotenzial beträgt 2.83 Milionen Tonnen CO_2 im Jahr 2023 und 1.86 Milionen Tonnen CO_2 im Jahr 2030.

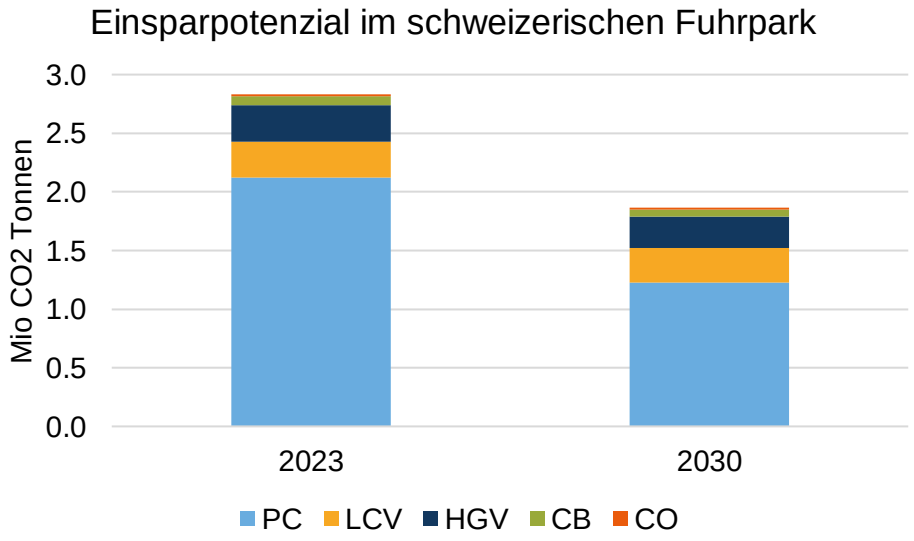


Abbildung 54: Emissionen-Einsparpotenzial im schweizerischen Fuhrpark.

10.5 Absolutes Einsparpotenzial für Personenwagen

Für die Fahrzeugkategorie Personenwagen wurden nicht nur die relativen Energieeinsparungen berechnet, sondern auch die absoluten Einsparungen in Liter Benzinäquivalenten und elektrische Energie.

Der Treibstoffverbrauch korreliert direkt mit den verursachten direkten CO2-Emissionen. Für den Treibstoffverbrauch bzw. für das Treibstoffeinsparpotenzial wurde deshalb dieselbe Methodik wie für das Emissionen-Einsparpotenzial verwendet. Wie der heutige und zukünftige Verbrauch berechnet wurden, ist in Kapitel 9.8 erklärt. Gemäss der Verordnung des UVEK über Angaben zur Energieeffizienz neuer Personenwagen (730.022.22, Art. 3), entspricht 1 Liter Diesel 1.14 Liter Benzinäquivalente.

Der Verbrauch an elektrischer Energie der Steckerfahrzeuge kommt aus der Studie Verständnis Ladeinfrastruktur 2050 (EBP, 2023).

Der Verbrauch von Treibstoff und elektrischer Energie von Personenwagen ist in der Tabelle 34 gegeben.

	Treibstoffverbrauch Personenwagen [Mio. Liter Benzinäquivalente]		**Verbrauch elektrische Energie Personenwagen [GWh]**	
	2023	**2030**	**2023**	**2030**
Benzin	3’089	1’650	-	-
Diesel	1’085	667	-	-
Plug-in-Hybrid	52	115	225	945
Batterieelektrisch	-	-	675	3’555
Total Personenwagen	**4’225**	**2’432**	**900**	**4’500**

Tabelle 34: Absoluter jährlicher Energieverbrauch Personenwagen nach Antriebstechnologie.

Das absolute Einsparpotenzial an Treibstoffen für die Fahrzeugkategorie Personenwagen ist in der Tabelle 35 gegeben.

Treibstoff-Einsparpotenzial	**Einsparpotenzial 2023**		**Einsparpotenzial 2030**	
	Theoretisch	**Praktisch**	**Theoretisch**	**Praktisch**
Benzin	698.0	244-384	376.2	132-207
Diesel	207.2	73-114	128.8	45-71
Plug-in-Hybrid	10.2	4-6	22.8	8-13
Batterieelektrisch	-	-	-	-
Total Personenwagen	**915**	**320-504**	**528**	**185-290**

Tabelle 35: Absolutes jährliches Einsparpotenzial an Treibstoffen bei Personenwagen in Milionen Liter Benzinäquivalenten.

Das absolute Einsparpotenzial an elektrischer Energie für die Fahrzeugkategorie Personenwagen ist in der Tabelle 36 gegeben.

	Einsparpotenzial 2023		Einsparpotenzial 2030	
	Theoretisch	**Praktisch**	**Theoretisch**	**Praktisch**
Benzin	-	-	-	-
Diesel	-	-	-	-
Plug-in-Hybrid	44	15-24	187	65-103
Batterieelektrisch	142	50-78	754	264-415
Total Personenwagen	**186**	**65-102**	**941**	**329-517**

Tabelle 36: Absolutes jährliches Einsparpotenzial an elektrischer Energie bei Personenwagen in GWh.

10.6 Abschätzung des theoretischen Einsparpotenzials einzelner Massnahmen

Das im Rahmen von Sensitivitätsberechnungen ermittelte Einsparpotenzial der einzelnen Massnahmen ist ausführlich in Kapitel 8.3 vorgestellt. Diese Berechnungen wurden nicht für alle Kombinationen ausgeführt, sondern für einige beispielhafte Fahrzeuge und drei Zyklen. Alle drei Fahrzyklen (Innerorts, Ausserorts und Autobahn) nehmen eine Steigung von null und einen flüssigen Verkehrszustand an.

Der montierte Reifentyp spielt eine wesentliche Rolle für das Energie-Einsparpotenzial. Das Einsparpotenzial dieser Massnahme wurde deshalb separat hochgerechnet.

Für diese Hochrechnung wurden die Simulationsergebnisse aus dem Kapitel 8.3 verwendet. Für das Default Case wurde der Fall 2 für HGV und Busse (Reifentyp C) und der Durschnitt aus den Fällen 1 und 2 (Reifentyp D bzw. C) für PC und LCV genommen. Das Best Case entspricht hingegen dem Fall 6 (Reifentyp A).

Die Gewichtung der Fahrzyklen entspricht der Gewichtung nach Fahrgebiet (siehe Kapitel 9.6). Die beispielhaften Fahrzeuge für diese Simulationen wurden so ausgewählt, dass es ein Fahrzeug pro Fahrzeugkategorie und Antriebstechnologie gibt. Die Gewichtung der Fahrzeuge entspricht deshalb der Gewichtung nach Antriebstechnologie (siehe Kapitel 9.4).

Für die Massnahme «Einsatz von Reifentyp A» konnte deshalb das hochgerechnete Einsparpotenzial ermittelt werden.

Für die anderen Massnahmen ist hingegen das Intervall der Ergebnisse aus Kapitel 8.3 gegeben.

Man kann die Einsparpotenziale nicht einfach addieren. Beispielsweise sind die Massnahmen «Start-Stop-System», «Tempomat» und «Eco-Fahrstil»

nicht unabhängig voneinander. In diesem Kapitel ist eine Übersicht der Ergebnisse gegeben. Die Tabelle 37 zeigt das Einsparpotenzial von einzelnen Massnahmen.

	Personenwagen	Leichtes Nutzfahrzeug	Schweres Nutzfahrzeug	Stadtbus	Reisebus
Vor der Fahrt					
Reifen: Effizienzklasse A montieren	5.8 %	6.4 %	11.9 %	10.9 %	6.3 %
Reifendruck erhöhen (+0.5 bar)	1–3 %	1–3 %	3–4 %	1–2 %	1–2 %
Leichtlauföl verwenden	1–3 %	1–3 %	1–2 %	1–2 %	1–2 %
Unnötige Ladung vermeiden (pro 20 kg)	0.7–2 %	0.7–2 %	0.1–0.2 %	0.1–0.2 %	0.2–0.4 %
Dachboxen entfernen	3–17 %	***	***	***	***
Gepäck-/Veloträger abmontieren	6–40 %	***	***	***	***
Langsamladen**	1–10 %	1–10 %	1–10 %	1–10 %	1–10 %
Während der Fahrt					
Ecodrive-Fahrstil anwenden	2–19 %	2–19 %	0.2–1 %	0–1 %	0.2–5 %
Motor im Leerlauf ausschalten	1.5–2.5 %	1.5–2.5 %	***	***	***
Fahrassistenzsysteme verwenden	1–3 %	0.5–5 %	***	***	***
Klimaanlage und Heizung optimal nutzen	1–10 %	1–9 %	0.5–3 %	0.5–10 %	2–10 %

* Berechnet für jeweils drei Fahrsituationen im Free Flow für wenige, beispielhafte Fahrzeuge pro Fahrzeugkategorie.
** Wurde in der Hochrechnung des theoretischen Einsparpotenzials nicht berücksichtigt.
*** Wurde nicht simuliert.

Tabelle 37: Energiesparpotenzial einzelner Massnahmen.

Der Wertebereich des Einsparungspotenzials ist manchmal sehr gross, da das Potenzial stark von der Fahrsituation (z.B. Eco Fahrstil), der Fahrzeugklasse (z.B. Verwendung von Klima und Heizung) oder der Antriebstechnologie (z.B. Heizung bei Elektrofahrzeugen) abhängig ist. Aus der Tabelle ist ebenfalls ersichtlich, dass das gesamte Einsparpotenzial nicht der Summe der Einsparpotenziale aller Massnahmen entspricht.

10.7 Einsparpotenzial in der Praxis

Die in den voranstehenden Kapiteln ermittelten Einsparungen berechnen sich aus der Differenz zwischen dem «Default» (keine Massnahmen) und dem «Best-Case»-Zustand, bei dem alle Massnahmen zu 100% umgesetzt werden, nicht nur unmittelbar nach einer «EcoDrive»-Schulung, sondern dauerhaft.

Die in der Praxis erzielbare Einsparungen sind aus zwei Gründen geringer (siehe auch die entsprechende Visualierung in der nachstehenden Abbildung 55)

— Erstens, weil viele Fahrzeughalter und -fahrer bestimmte Massnahmen bereits umgesetzt haben und mit den wichtigsten «EcoDrive»-Massnahmen vertraut gemacht wurden. Beispiele sind
  — EcoDrive-Schulung im Rahmen der Führerausweisausbildung
  — Wirkung des «AutoEnergieCheck» des AGVS

  - Freiwillige Umsetzung einzelner Massnahmen aus Umweltschutzgründen, beispielsweise Einsatz hochwertiger (Leichtlauf-)Motoröle durch den grössten Teil der Schweizer Garagen
  - Freiwillige Umsetzung einzelner Massnahmen aus rein finanziellen Gründen, beispielsweise Einsatz von Leichtlauföl und Reifen mit Effizienzklasse A durch Flottenmanager
- Zweitens, weil nie alle Fahrzeughalter erreicht werden können und oft nicht alle Massnahmen umgesetzt werden. Beispiele sind
  - Beschränkte Reichweite von Informationsangeboten aus sprachlichen, kulturellen und technischen Gründen
  - Über die Zeit nachlassende Umsetzungsquote
  - Erschwerung der Umsetzung durch Default-Einstellungen, beispielsweise wenn die Klimaanlage bei jedem Motorstart automatisch aktiviert wird
  - Verzicht auf einzelne Massnahmen wegen ungünstigem Kosten-Nutzen-Wirkungsverhältnis, beispielsweise Einsatz von Ganzjahresreifen (anstelle von Reifen mit Effizienzklasse A im Sommer)
  - Für bestimmte, seltene oder ältere Fahrzeugmodellvarianten und Ausführungsvarianten sind nicht alle Massnahmen umsetzbar, beispielsweise sind Reifen mit Effizienzklasse A in einigen selteneren Reifendimensionen nicht lieferbar.

Abbildung 55: Schematische Darstellung Energiesparpotenzial.

Eine Quantifizierung der obigen Effekte war nicht Gegenstand der vorliegenden Studie. Es ist aber wichtig zu kommunizieren, dass das theoretische Einsparpotenzial nicht vollständig realisiert werden kann. Als grobe Eingrenzung wird aufgrund von Expertenschätzungen davon ausgegangen, dass die Abweichungen des «Default Case» vom tatsächlichen Umsetzungsstand aller Ecodrive-Massnahmen in der Schweiz (in Abbildung 55: Dunkelblauer Balken rechts) ca. 10% betragen könnten; dies v.a. deshalb, weil Reifen mit besserer Effizienzkategorie eingesetzt werden dürften als für die Berechnungen des «Default Case» hinterlegt. Jener Teil des theoretischen Einsparpotenzials, der sich realistischerweise nicht umsetzen lässt (in Abbildung 55:

Dunkelblauer Balken links), setzt sich zusammen aus jenen Bevölkerungsteilen, welche mit den vorhandenen Kommunikationskanälen nicht erreicht werden können (grob geschätzt 10% bis 15%), auch aus sprachlichen Gründen, Misstrauen gegenüber staatlichen Handlungsempfehlungen, usw., der nur partiellen Umsetzung der Massnahmen (grob geschätzt 15% bis 25%), auch aus Gründen der Bequemlichkeit im Alltag oder der Umsetzung, und dem mit der Zeit nachlassenden Umsetzungsgrad (grob geschätzt 10% bis 15%). Insgesamt dürfte somit das praktische Einsparpotenzial 35% bis 55% des theoretischen Einsparpotenzials betragen.

10.8 Schlussfolgerungen

Das theoretische relative Energieeinsparpotenzial wird voraussichtlich bis im Jahr 2030 auf demselben Niveau wie heute bleiben. Einige Entwicklungen erhöhen das Einsparpotenzial, während andere es verringern. Insgesamt gleichen sich diese Effekte jedoch aus, sodass das theoretische Energieeinsparpotenzial im Jahr 2030 weiterhin bei 21.6% liegt. Von diesem Potenzial kann in der Realität nur zwischen 35% und 55% eingespart werden. Deswegen liegt das praktische Energieeinsparpotenzial zwischen 7.5% und 11.9%.

Das grösste Einsparpotenzial liegt derzeit in der Fahrzeugkategorie «Personenwagen». Allerdings wird die Fahrleistung in anderen Kategorien, insbesondere bei leichten Nutzfahrzeugen, in den nächsten Jahren stark zunehmen. Das Einsparpotenzial in diesen Kategorien wird grösser werden.

Ein bedeutender Teil des Einsparpotenzials entsteht vor der Fahrt, zum Beispiel durch die Wahl des Reifentyps, des Reifendrucks oder des Dachträgers. Die Verbreitung von Fahrassistenzsystemen hat positive Effekte (z.B. Einsatz von Tempomat, und automatische Start-Stopp-Systeme welche das manuelle Abschalten des Motors ersetzen). In allen Fahrzeugkategorien bietet das Montieren von Reifen der Effizienzklasse A ein grosses Energiesparpotenzial.

Die wichtigste Entwicklung im Fahrzeugbestand in den nächsten Jahren wird die Verbreitung von batterieelektrischen Fahrzeugen sein. Das Energieeinsparpotenzial bleibt auch bei diesen Fahrzeugen hoch, jedoch gewinnen neue Massnahmen an Bedeutung, wie beispielsweise das Bevorzugen von langsamen Ladevorgängen oder die effiziente Nutzung von Heizsystemen (Sitzheizung statt Luftheizung).

Mit dem steigenden Anteil an emissionsfreien Fahrzeugen werden die Einsparungen bei fossilen Treibstoffen sinken, während Stromeinsparungen zunehmen. Es wird immer noch eine ähnliche Menge an relativen Energieeinsparungen geben, aber das in CO_2-Emissionen ausgedrückte Reduktionspotenzial wird abnehmen. Während es bei Benzin und Diesel ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Energiemenge und den Umweltbelastungen gibt, hängt dies bei Elektrizität stark vom Produktionsmix und allfälligen Umwandlungen und Speicherungen ab. Es wird deshalb empfohlen, in Zukunft die Einsparung an Endenergie als relevante Zielgrösse zu betrachten.

A1 Literaturverzeichnis

ARE (2022): Bundesamt für Raumentwicklung, Schweizerische Verkehrsperspektiven 2050, 2022

Bai (2016): Peng Bai et al., Transition of lithium growth mechanisms in liquid electrolytes, 2016.

Barkenbus (2010): Jack N. Barkenbus, Eco-driving: An overlooked climate change initiative, 2010.

Bartlomiejczyk (2020): Mikolaj Bartlomiejczyk und Robert Kolacz, The reduction of auxiliaries power demand: The callenge for electromobility in public transportation, 2020.

Bast (2023): Bundesanstalt für Strassenwesen, BASt-Archiv elektronischer Medien (ELBA), 2023.

Berjoza (2022): Dainis Berjoza et al., Research into the Regenerative Braking of an Electric Car in Urban Driving, 2022.

BFE (2007), Bundesamt für Energie: Energiesparende Fahrweise: begleitende Evaluation des Vollzugs und der ersten Auswirkungen des Obligatoriums für Neulenker (Vorstudie). Bern, 23. Nov. 2007, 42 Seiten

BFS (2023), Bundesamt für Statistik, Leistungen im Personenverkehr, 2023

Birkl (2016): Christoph R. Birkl et al., Degradation diagnostics for lithium ion cells, 2016.

Ciuffo (2021): Biagio Ciuffo et al., Requiem on the positive effects of commercial adaptive cruise control on motorway traffic and recommendations for future automated driving systems, 2021.

Dimopoulos Eggenschwiler (2021): Panayotis Dimopoulos Eggenschwiler et al., Thermomanagement of Li-Ion Battery Cells During Charge/discharge Processes: Experiments and Simulations, 2021.

Dudenhöffer (2009): Ferdinand Dudenhöffer, Eva Maria John, EU-Normen für Verbrauchsangaben von Autos: Mehr als ein Ärgernis für Autokäufer, 2009.

EBP (2023): EBP im Auftrag Bundesamt für Energie, Programm Energie-Schweiz: Verständnis Ladeinfrastruktur 2050, 2023

EBP (2022): Electric and Hydrogen Mobility Scenarios Switzerland 2022. 16. Mai 2022, 35 Seiten.

EBP (2021): Realverbrauch von Personenwagen im Alltag, Modellversion 2021. Zürich, 30. Juni 2021, 13 Seiten.

EC (2023): European Commission, Tyre label, 2023.

EEA (2023): European Environmental Agency, Monitoring of CO2 emissions from heavy-duty vehicles, 2023.

EnergieSchweiz (2023): Glossar: Fahr mit dem Strom, 2023.

Ericsson (2019): Eva Ericsson et al., Work programme 2016 - 2018 for HBEFA Version 4.1, Report of the work carried out for work package 2, 2019.

EU (2020): EU-Kommission, Verordnung 2020/740, 2020.

EU (2019b): EU-Kommission, Verordnung 2019/1242, 2019.

EU (2019a): EU-Kommission, Verordnung 2019/318, 2019.

EU (2018): EU-Kommission, Verordnung 2018/956, 2018.

Fleming (2018): James Fleming et al., Driver Modeling and Implementation of a Fuel-Saving ADAS, 2018.

Fonseca (2011): Natalia Fonseca et al., Influence of the stop/start system on CO2 emissions of a diesel vehicle in urban traffic, 2011

Gu (2022): Ziqing Gu et al., Integrated eco-driving automation of intelligent vehicles in multi-lane scenario via model-accelerated reinforcement learning, 2022.

Gunter (2019): George Gunter et al., Are commercially implemented adaptive cruise control systems string stable?, 2019.

Guzzella (2013): Lino Guzzella, Antonio Sciarretta, Vehicle Propulsion Systems, 2013.

Hausberger (2009): Stefan Hausberger et al., Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3, 2009.

Hausberger (2003): Stefan Hausberger et al., Simulation of Real World Vehicle Exhaus Emissions, 2003.

He (2020): Yinglong He et al., The energy impact of adaptive cruise control in real-world highway multiple-car-following scenarios, 2020.

ICCT (2024): On the way to “real-world” CO2 values? The European passenger car market after 5 years of WLTP. The international Council on Clean Transportation, January 2024, 23 pages.

ICCT (2022a): Real-world usage of plug-in hybrid vehicles in Europe. A 2022 update on fuel consumption, electric driving, and CO2 emissions. The international Council on Clean Transportation, with Fraunhofer ISI. White paper, June 2022, 55 pages.

ICCT (2022b): European vehicle market statistics, Pocketbook 2022/23. The International Council on Clean Transportation, 2022, 45 pages.

ICCT (2021a): The International Council on Clean Transportation, Truck eco-driving programs: current status in latin america and international best practices, 2021.

ICCT (2021b): The International Council on Clean Transportation, CO2 emissions from trucks in the EU: an anlysis of the heavy-duty CO2 standards baseline data, 2021.

ICCT (2020): On the way to “real-world” CO2 values: The European passenger car market in its first year after introducing the WLTP. The International Council on Clean Transportation. White paper, May 2020, 30 pages.

ICCT (2019): From laboratory to road – A 2018 Update. International Council on Clean Transportation, 20 Jan. 2019, 50 Seiten.

ICCT (2017): The International Council on Clean Transportation, Fuel efffficiency technology in european heavy-duty vehicles: baseline and potenzial for the 2020-2030 time frame, 2017.

ICCT (2016): The International Council on Clean Transportation, Driving resistances of light-duty vehicles in Europe: present situation, trends and scenarios for 2025, 2016.

InsideEVs (2021): Tom Moloughney, Lucid Air DC Fast Charge Follow Up: Charging Losses Explained, 2021

Jayawardana (2022): Vindula Jayawardana, Cathy Wu, Learning Eco-Driving Strategies at Signalized Intersections, 2022.

Jia (2020): Yanzhao Jia et al., An LSTM-Based Speed Predictor Based on Traffic Simulation Data for Improving the Performance of Energy-Optimal Adaptive Cruise Control, 2020.

Jiang (2022): Xia Jiang et al., Eco-driving for Electric Connected Vehicles at Signalized Intersections: A Parameterized Reinforcement Learning approach, 2022.

JRC (2016): Joint Research Center of the European Comission, Review of in use factors affecting the fuel consumption and CO2 emissions of passenger cars, 2016.

JRC (2021): Joint Research Center of the European Comission, Future CO2 reducing technologies in VECTO, 2021.

JRC (2022): Joint Research Center of the European Comission, CO2 emissions of the European heavy duty vehicle fleet, 2022.

Kamalanathsharma (2012): Raj Kishore Kamalanathsharma, Hesham Rakha, Agent-based modeling of Eco-Cooperative Adaptive Cruise Control systems in the vicinity of intersections, 2012.

Knoop (2019): Victor L. Knoop et al., Platoon of SAE Level-2 Automated Vehicles on Public Roads: Setup, Traffic Interactions, and Stability, 2019.

Kropiwnicki (2013): Jacek Kropiwnicki, Zbigniew Kneba, Carbon Dioxide Potenzial Reduction Using Start-Stop System in a Car, 2013.

Küng (2019): Lukas Küng et al., How much energy does a car need on the road?, 2019.

Li (2022): Guoqiang Li et al., Online Optimization of Gear Shift and Velocity for Eco-Driving Using Adaptive Dynamic Programming, 2022.

Lin (2016): Yu-Chen Lin et al., An eco-cruising control systems using nonlinear predictive control approach, 2016

Liu (2021): Teng Liu et al., Effect of thermal environments on fast charging Li-ion batteries, 2021.

Lu (2013): Languang Lu et al., A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles, 2013.

Luz (2013): Raphael Luz und Stefan Hausberger, User Guide for the Model PHEM, Version 11.2, 2013.

Macian (2014): Vicente Macian et al., Assessment of the effect of low viscosity oils usage on a light duty diesel engine fuel consumption in stationary and transient conditions, 2014.

Macian (2015): Vicente Macian et al., Potenzial of low viscosity oils to reduce CO2 emissions and fuel consumption of urban buses fleets, 2015.

Makridis (2020): Michail Makridis et al., Empirical Study on the Properties of Adaptive Cruise Control Systems and Their Impact on Traffic Flow and String Stability, 2020.

Makridis (2021): Michail Makridis et al., OpenACC. An open database of car-following experiments to study the properties of commercial ACC system, 2021.

Milanes (2014): Vicente Milanes, Steven E. Shladover, Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data, 2014.

Murphey (2012): Yi Lu Murphey et al., Intelligent Hybrid Vehicle Power Control—Part I: Machine Learning of Optimal Vehicle Power, 2012.

Murphey (2013): Yi Lu Murphey et al., Intelligent Hybrid Vehicle Power Control—Part II: Online Intelligent Energy Management, 2013.

Na (2022): Xiaoxiang Na, David Cebon, Quantifying fuel-saving benefit of low-rolling-resistance tyres from heavy goods vehicle in-service operations, 2022.

NREL (2021): national Renewable Energy Laboratory (NREL), U.S. Department of Energy, Heat generation concerns associated with extreme fast charging, 2021.

Park (2013): Sangjun Park et al., Fuel Economy Impacts of Manual, Conventional Cruise Control, and Predictive Eco-Cruise Control Driving, 2013.

Ramsey (2022): David Ramsey et al., Energy consumption of a battery electric vehicle in winter considering preheating, 2022.

Restrepo (2019): Eliette Restrepo et al., Historical Penetration Patterns of Automobile Electronic Control Systems and Implications for Critical Raw Materials Recycling, 2019.

Tanyeri (2019): M. Nicem Tanyeri und S. Caglar Baslamisli, Prediction of the annual heat load of an articulated electric urban bus, 2019.

T & E (2016), Transport und Environment: Mind the gap 2016. Dezember 2016, 20 Seiten.

TNO (2013): TNO, TUG, Study on Tyre Pressure Monitoring Systems (TPMS) as a means to reduce LightCommercial and Heavy-Duty Vehicles fuel consumption and CO2 emissions, 2013.

Tomaszewska (2019): Anna Tomaszewska et al., Lithium-ion battery fast charging: A review, 2019.

Tormos (2019): Bernardo Tormos et al., Fuel economy optimization from the interaction between engine oil and driving conditions, 2019.

TUG (2019): TUG, Further development of VECTO, Final Report, 2019.

TUG (2023): TUG, Updated saving potenzials ADAS in-the-loop simulations for Long Haul cycle (unpublished), 2023.

Tunnell (2018): Jordan A. Tunnell et al., Towards Improving Vehicle Fuel Economy with ADAS, 2018.

UVEK (2017): UVEK, Roadmap to climate-friendly land freight and buses in Europe, 2017.

Saniul Alam (2014): Md. Saniul Alam, Aonghus McNabola, A critical review and assessment of Eco-Driving policy & technology: Benefits & limitations, 2014.

Siemens (2018): Siemens Press Release, Research project "FastCharge": ultra-fast charging technology ready for the electrically powered vehicles of the future, 2018.

SSM (2014): Schweizerische Studiengesellschaft für Motorbetriebstoffe, SSM Informationen, 2014.

uCARe (2022a): TUG, Software for online and for trip analysis in post-processing with car owner guidelines, 2022.

uCARe (2022b): VUB MOBI, INFRAS, Updated ranking of measures, reflecting likeliness of success, 2022.

Vasebi (2023): Saeed Vasebi et al., A Literature Review of Energy Optimal Adaptive Cruise Control Algorithms, 2023.

Vasiljevic (2022): S. Vasiljevic et al., Regenerative braking on electric vehicles: working principles and benefits of application, 2022.

VECTO (2023): European Comission, Vehicle Energy Consumption calculation Tool, 2023.

Wang (2018): Ziran Wang et al., A Review on Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) Systems: Architectures, Controls, and Applications, 2018.

Zacharof (2023): Nikiforos Zacharof et al., The impact of bus passenger occupancy, heating ventilation and air conditioning systems on energy consumption and CO2 emissions, 2023.

Zallinger (2010): Michael Zallinger, Mikroskopische Simulation der Emissionen von Personenkraftfahrzeugen, 2010.

Zapf (2016): Martin Zaph et al., Kosteneffiziente und nachhaltige Automobile: Bewertung der realen Klimabelastung und der Gesamtkosten – Heute und in Zukunft, 2016.

Zhang (2017): Fengqi Zhang et al., Real-Time Energy Management Strategy Based on Velocity Forecasts Using V2V and V2I Communications, 2017.

Zhao (2017): Yan Zhao et al., Preventing lithium ion battery failure during high temperatures by externally applied compression, 2017.

Zhu (2022): Rencheng Zhu et al., Effects of a start-stop system for gasoline direct injection vehicles on fuel consumption and particulate emissions in hot and cold environments, 2022.

BFE 2007. Energiesparende Fahrweise: Begleitende Evaluation des Vollzugs und der ersten Aus-wirkungen des Obligatoriums für Neulenker (Vorstudie). 23. Nov. 2007, 42 Seiten

BFE 2022. **Energieverbrauch und Energieeffizienz der neuen Personenwagen und leichten Nutzfahrzeuge 2021**. 26. Berichterstattung im Rahmen der Energieeffizienzverordnung. Bern, 23. Juni 2022 (62 Seiten).

de Haan et al. 2007. **Lenkungsabgaben zur Senkung des CO_2-Ausstosses beim Neuwagenkauf** – Hintergrund, Mechanismen, Prognosen. ETH Zürich, IED-NSSI, Peter de Haan, Michel Müller, Anja Peters, Andrea Hauser, im Auftrag Bundesamt für Energie Forschungsprogramm Energie Wirtschaft Gesellschaft. Zürich, Dezember 2007. Download-Link BFE (1.2 MB, 153 Seiten)

Dudenhöffer Ferdinand und John Eva-Maria, 2009b. Warum der offizielle Kraftstoffverbrauch von Neuwagen erheblich von der Realität abweicht. Arbeitsbericht zu „Studie Kraftstoffverbrauch“ des ÖkoGlobe-Instituts der Universität Duisburg-Essen, 11 Seiten.

EBP 2020. **Automatisiertes Fahren in der Schweiz: Das Steuer aus der Hand geben?** Im Auftrag TA-Swiss Stiftung für Technologiefolgen-Abschätzung. vdf Verlag, Zürich, 2020. ISBN 978-3-7281-3996-2, DOI 10.3218/3996-2. Download PDF (6.0 MB, 328 Seiten)

EBP 2018. **Relevante Faktoren für ein Mobilitätssystem mit geringen Umweltwirkungen**. Im Auftrag Bundesamt für Umwelt (BAFU). Zollikon, 17.12.2018. Download PDF (1.0 MB, 47 Seiten)

EBP, Ecoplan und e’mobile 2018. **Förderinstrumente für effiziente Fahrzeuge: Auswirkungen auf Kauf und Nutzung von Autos**. Im Auftrag SVI und ASTRA. Download-Link mobilityplatform.ch (3.4 MB, 157 Seiten)

EBP, Fraunhofer ISI und UZH 2016. **Die Effizienzlücke beim Autokauf: Zielgruppenspezifische Gründe und Massnahmen**. EBP, Fraunhofer ISI und Universität Zürich im Auftrag Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Energie-Wirtschaft-Gesellschaft, 29. Juni 2016. Download-Link Researchgate (3.0 MB, 106 Seiten)

EBP 2021. **Realverbrauch von Personenwagen im Alltag**: Modellversion 2021. EBP-Hintergrundbericht. Download von Website EBP-Grundlagendokumente: Download-Link (0.5 MB, 13 Seiten)

EBP und Ecoplan 2015. **Fehlanreize im Mobilitätsbereich aus Sicht des Energieverbrauchs**. EBP und Ecoplan im Auftrag Bundesamt für Energie (BFE), 30. Sep. 2015, Download-Link (116 Seiten)

EMPA 2010 Ausschalten der Klimaanlage hilft Sprit sparen. Zusammenfassung der Empa-Studie zum Treibstoffverbrauch durch Klimaanlagen. 22. Juni 2010, http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/95958/---/l=1

ETH 2003. Auswirkungen von Eco-Drive bei Fahrzeugen im Jahr 2010. ETH Zürich, Institut für Mess- und Regelungstechnik, im Auftrag BFE. Oktober 2003, 36 Seiten

ICCT 2019.From laboratory to road. A 2018 update of official and «real-world» fuel consumption and CO_2 values for cars in Europe. International Council on Clean Transportation (ICCT) in collaboration with TNO and Ifeu, Washington D.C., January 2019, 56 Seiten (online verfügbar von www.theicct.org)

Peters et al. 2006. **Akzeptanz und Wirkung von Massnahmen zur Erhöhung der Treibstoffeffizienz**. Ergebnisbericht im Rahmen des Projekts "Entscheidungsfaktoren beim Kauf treibstoff-effizienter Neuwagen". ETH Zürich, IED-NSSI, Anja Peters, Peter de Haan, Michel Müller. Zürich, 21. November 2006. Download-Link ETH Zürich (0.3 MB, 41 Seiten)

UBA (Umweltbundesamt) 2015. **Rebound-Effekte: Ihre Bedeutung für die Umweltpolitik.** Juni 2015, 112 Seiten. Download von der Website des UBA (2.2 MB): Link

UBA (Umweltbundesamt) 2016: **Rebound-Effekte: Wie können sie effektiv begrenzt werden? Ein Handbuch für die umweltpolitische Praxis**. Juni 2016, 39 Seiten. Download von der Website des UBA (0.5 MB): Link