



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Dezember 2024

Methodenbericht Ex-post-Analysen Energieverbrauch

Dokumentation des Modells für den
Sektor Verkehr



Bundesamt für Energie (BFE)

Methodenbericht

Dokumentation des in den jährlichen Ex-Post-Analysen des Energieverbrauchs verwendeten Verkehrsmodells

Bern, 6. November 2024

Dr. Brian Cox
Dr. Benedikt Notter

Impressum

Methodenbericht

Dokumentation des in den jährlichen Ex-Post-Analysen des Energieverbrauchs verwendeten Verkehrsmodells

Bern, 6. November 2024

Auftraggeber

Bundesamt für Energie (BFE)

Projektleitung

Pia Baumann (BFE)

Brian Cox (INFRAS)

Autorinnen und Autoren

Dr. Brian Cox

Dr. Benedikt Notter (INFRAS)

INFRAS, Sennweg 2, 3012 Bern

Tel. +41 31 370 19 19

info@infras.ch

Inhalt

1.	Einleitung	4
2.	Überblick	4
3.	Modell-Design	6
4.	Inputs und Outputs	7
5.	Qualitätssicherung	11
6.	Allgemeine Punkte	12
7.	Literatur	14

1. Einleitung

Seit mehreren Jahren lässt das Bundesamt für Energie (BFE) eine modellgestützte Analyse des Energieverbrauchs durchführen, um die statistisch beobachtete Entwicklung des Energieverbrauchs nach den wichtigsten Bestimmungsfaktoren und Verwendungszwecken zu erklären («Ex-Post-Analyse»). Diese Ex-Post-Analyse wird jährlich für die vier Verbrauchssektoren Private Haushalte (Prognos AG); Dienstleistungen und Landwirtschaft (TEP Energy GmbH); Industrie (Prognos AG) und Verkehr (INFRAS AG) durchgeführt und im Nachgang in einer Synthese zusammengeführt.

Die Ergebnisse der Ex-Post-Analyse werden jeweils in drei Teilberichten dokumentiert (Bestimmungsfaktoren, Verwendungszwecke und Sektor Private Haushalte). Diese Berichte enthalten keine Dokumentation der in der Analyse genutzten Bottom-up-Modelle. Um die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen, wurde zu jedem der vier Modelle ein eigenständiger Methodenbericht erstellt. Der Schwerpunkt in den Methodenberichten liegt auf der Beschreibung des Einsatzes der Modelle im Rahmen der Ex-Post-Analyse. Ursprünglich im Rahmen der Energieperspektiven für das BFE entwickelt, wurden die Modelle laufend weiterentwickelt und in der vorliegenden Form zuletzt bei den Energieperspektiven 2050+ zur Modellierung der Energienachfrage für die verschiedenen Szenarien eingesetzt. Punktuell wird in den Methodenberichten deshalb auch auf die Anwendung in den Energieszenarien eingegangen.

Der hier vorliegende Methodenbericht dokumentiert die für die Modellierung des Energieverbrauchs im Sektor Verkehr eingesetzten Modelle. Der Bericht beschreibt die Funktionsweise, die Abgrenzung, sowie die zentralen Inputs und Outputs. Der Aufbau und die abgedeckten Inhalte zur Beschreibung des Modells orientieren sich an einer Arbeit von Nägeli (2022).

2. Überblick

Ziel und Geltungsbereich (Scope)

Ziel ist die Abschätzung des inländischen Endenergieverbrauchs des Schweizer Verkehrssektors nach Kalenderjahr für die Zeitperiode ab 1990 bis zum jeweiligen letzten vergangenen Jahr mit verfügbaren Inputdaten. Das Modell erlaubt es, die Veränderung des Energieverbrauchs nach Energieträgern (z.B. Benzin, Diesel, Elektrizität, biogene Energieträger) und Verwendungszweck (bspw. Verkehrszweck, Verkehrsträger) mit der Entwicklung seiner wichtigsten Bestimmungsfaktoren (z.B. Mengeneffekte, Technik-/Politikeffekte etc.) zu korrelieren und entsprechend zu zerlegen.

Systemgrenzen

Geografisch gesehen erfolgt die Modellierung nach dem Territorialitätsprinzip. Das heisst, es werden grundsätzlich alle Verbräuche berücksichtigt, welche innerhalb der Schweizer Grenzen verursacht werden. Für den Strassenverkehr bedeutet das, dass auch der Verbrauch von ausländischen Fahrzeugen auf Schweizer Strassen mitgezählt wird, aber nicht der Verbrauch von Schweizer Fahrzeugen im Ausland. Das Gleiche gilt für den internationalen Schiffsverkehr auf dem Rhein. Der Tanktourismus (Verbrauch im Ausland getankter Treibstoffe im Inland oder umgekehrt) für Benzin und Diesel wird auch berücksichtigt.

Der Flugverkehr stellt eine Ausnahme dar, da die Ex-Post-Analyse nur nationale Flüge (Zivil und Militär) nach dem Absatzprinzip berücksichtigt. Das heisst, dass nur der in der Schweiz getankte Treibstoff mit eingerechnet wird. Internationale Flüge werden nicht berücksichtigt.

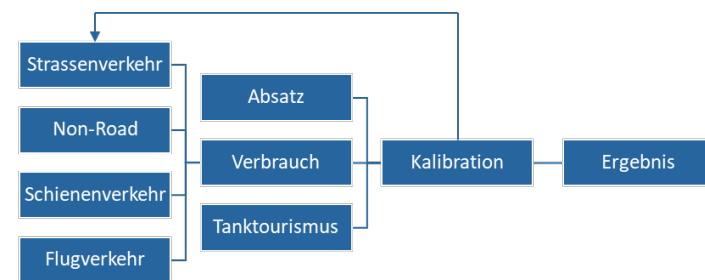
Grundlegende Modellstruktur

Der Energieverbrauch des Verkehrssektors wird in vier sektoriellen Modellen berechnet und anschliessend aggregiert (Abbildung 1):

- Der Strassenverkehr wird mit dem Handbuch für Emissionsfaktoren Strassenverkehr modelliert. Die aktuelle, ab Ex-Post-Analyse Jahr 2021 verwendete Version ist 4.2 (INFRAS et al. 2022).
- Non-Road-Verkehr und Nicht-Verkehr werden mit der Schweizer Datenbank Non-Road Maschinen (INFRAS 2015) modelliert.
- Der Schienenverkehr wird mit einem einfachen, nicht publizierten Exceltool modelliert.
- Der Flugverkehr basiert auf der Zivilluftfahrtstatistik des BAZL, Treibstoffverbrauch und Emissionen¹ auf der Kerosinabsatzstatistik der Gesamtenergiestatistik².

Die ersten drei Modelle folgen einem «Bottom-Up»-Ansatz: Der Verbrauch wird für detaillierte (nach Typ, Antriebstechnologie, Grössenklasse, Baujahr differenzierte) Fahrzeugtypen anhand der Aktivitäten (Fahrleistungen, Betriebsstunden) und dem Energieverbrauch pro Aktivitätseinheit berechnet. Für den Flugverkehr wird in der Ex-Post-Analyse nicht modelliert, sondern die Zivilluftfahrtstatistik des BAZL und der Kerosinabsatz verwendet. Die Energieverbrauchsergebnisse und der geschätzte Tanktourismus werden in einem Exceltool aggregiert und anschliessend mit dem nationalen Treibstoffabsatz und der Elektrizitätsstatistik verglichen. Anschliessend werden die Verbrauchsmodelle kalibriert (s. Kapitel 5) damit der «bottom-up» berechnete Energieverbrauch dem Treibstoffabsatz möglichst gut entspricht.

Abbildung 1 Darstellung der Modellstruktur



Grafik INFRAS.

Die Ergebnisse werden nach den folgenden Verwendungszwecken aggregiert:

- „Verkehr“ / „Nicht-Verkehr“: Der eigentliche Verkehrsbereich umfasst den Transport von Personen und Gütern. Der statistisch dem Verkehrssektor zugerechnete «Nicht-Verkehr» beinhaltet den Einsatz mobiler Arbeitsmaschinen bspw. in der Bau- oder Landwirtschaft.
- Innerhalb des eigentlichen Verkehrsbereichs
 - nach den verschiedenen Verkehrsträgern (Strasse, Schiene, Luft, Wasser),
 - innerhalb der Verkehrsträger nach Verkehrsarten (Personen-/ Güterverkehr),
 - und schliesslich darin wiederum nach Verkehrsmitteln (bei der Strasse nach PW/Motorräder/Busse bzw. Leichte/schwere Nutzfahrzeuge; und bei der Schiene nach Fern/Nahverkehr),
- Innerhalb des sog. Non-Road-Verkehrs nach Verbrauchergruppen (wie Land-, Forstwirtschaft, Baumaschinen etc.)
- überlagert nach „Energiotyp“ (fossile bzw. alternative Treibstoffe, Elektrizität).

Die nachstehende Abbildung visualisiert diese Kategorisierung.

¹ <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/querschnittsthemen/zivilluftfahrt.html>

² <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/gesamtenergiestatistik.html>

Abbildung 2 Aufteilung der Verbraucher nach Verwendungszweck

Road (Strassenverkehr)	Non-Road Verkehr	Non-Road Nichtverkehr
• Personenverkehr • Personenwagen • Reisebusse • Linienbusse • Motorräder / Mofas • Güterverkehr • Leichte Nutzfahrzeuge • Schwere Nutzfahrzeuge	Fossile/ biogene Treibstoffe • Schienenverkehr (v.a. Rangierbetrieb) • Schifffahrt • Flugverkehr (National: Zivil und Militär) Elektrizität • Schienenverkehr (Güter-, Personenverkehr)	• Landwirtschaft • Forstwirtschaft • Baumaschinen • Industrie • Militär • Mobile Geräte

Grafik INFRAS.

Räumliche und zeitliche Auflösung

Die Non-Road- und Schienenverkehrsmodelle werden nicht räumlich differenziert – die Modelle bilden die Verkehrsaktivitäten auf nationaler Ebene ab. Die Ergebnisse des BAZL für den Zivilluftverkehr werden auch auf nationaler Ebene übernommen. Die zeitliche Auflösung dieser drei Auswertungen ist jährlich, ohne weitere Unterteilung. Allerdings fließen in das Strassenverkehrsmodell HBEFA die nach detaillierten Strassenabschnitten differenzierten Verkehrsmengen aus dem Verkehrsmodell des UVEK³ sowie zeitlich (stündliche Ganglinien für verschiedene Tagestypen) differenzierte Informationen aus Verkehrszählungen⁴ ein, um die Anteile der verschiedenen Verkehrssituationen – nach denen sich der Energieverbrauch pro Fahrzeugkilometer unterscheidet – an den Gesamtfahrleistungen zu ermitteln. Diese Arbeiten finden jedoch in überjährigen Intervallen ausserhalb der Ex-Post-Analysen statt.

3. Modell-Design

Wie werden die zentralen Einheiten abgebildet?

Die zentralen Einheiten der Bottom-Up-Modelle sind die Fahrzeug- bzw. Maschinentypen:

- Im Strassenverkehrsmodell HBEFA sind sechs Fahrzeugkategorien (Personenwagen, Reisebusse, Linienbusse, Motorräder, leichte Nutzfahrzeuge und schwere Nutzfahrzeuge) abgebildet, die weiter nach Energietechnologie, Grössenklasse und Emissionskategorie in insgesamt 833 verschiedene «Subsegmente» unterteilt sind.
- Im Non-Road-Modell werden acht verschiedene Maschinengattungen modelliert (Baumaschinen, Industrie, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Gartenpflege/Hobby, Schiene, Schiffe, Militär) und weiter differenziert nach Maschinenkategorie, Motortyp, Leistungsklasse und Emissionsstufe, für insgesamt 1539 verschiedene Maschinentypen.
- Das Schienenverkehrsmodell berücksichtigt insgesamt sechs Schienenfahrzeugtypen: den öffentlichen Personennahverkehr (Tram, Trolley), den Schienenpersonenverkehr (Fernverkehr und Regionalverkehr) und den Schienengüterverkehr (Fernverkehr und Regionalverkehr).
- Im Luftverkehrsmodell ist die zentrale Einheit der in der Schweiz getankte Treibstoff, disaggregiert nach Zivilflügen (nationaler und internationaler) und militärischen Flügen.

Wie werden Einflüsse durch Akteure, Kosten und Umwelt berücksichtigt?

Die Einflüsse durch Akteure, Kosten und Umwelt werden indirekt, durch deren Einfluss auf den Fahrzeugbestand (Kaufentscheidungen) sowie die Fahrleistung pro Fahrzeug und die Gesamtfahrleistung

³ <https://www.are.admin.ch/are/de/home/mobilitaet/grundlagen-und-daten/verkehrsmodellierung.html>

⁴ <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/dokumentation/daten-informationsprodukte/verkehrsdaten/daten-publikationen/automatische-strassenverkehrszaehlung.html>

(Fahrverhalten), berücksichtigt. Weitere Einflüsse der Politik aufgrund der Umweltwirkungen des Verkehrs fliessen über die sich verändernden spezifischen Energieverbräuche und Antriebstechnologie-Anteile nach Fahrzeug-Baujahr (beeinflusst bspw. durch die CO₂-Gesetzgebung) ein.

Die relativen Treibstoffpreise in Grenzregionen (Verhältnis des Treibstoffpreises im nahen Ausland zu demjenigen in der Schweizer Grenzregion) werden für die Abschätzung der Entwicklung des Tanktourismus berücksichtigt. Wenn z.B. Treibstoff in der Schweiz gegenüber Nachbarländern günstiger wird, führt das zu einer Zunahme des Treibstoffabsatzes in der Schweiz, welche nicht unbedingt mit einer Zunahme von Fahrleistung und Verbrauch korreliert ist. Dieses Phänomen wurde 2015 detailliert untersucht (Keller 2015). Seither wird die relative Entwicklung anhand der Entwicklung der Treibstoffpreisunterschiede an der Grenze und Bankkartenumsätzen von Tankstellenshops in der Grenzzone abgeschätzt.

Welche Energienachfrage wird wie abgebildet?

Die Modelle bilden den Endenergieverbrauch ab. Für den Stromverbrauch von Elektrofahrzeugen werden Ladeverluste mitberücksichtigt.

Was sind die zentralen Treiber und wie werden Bestandsdynamiken (insbesondere die Faktorzerlegung) modelliert?

Die zentralen Treiber sind die Zusammensetzung der Fahrzeugflotte, die Jahresfahrleistung pro Strassenfahrzeug und die spezifischen Energieverbräuche der Fahrzeuge (Endenergie pro Fahrzeugkilometer).

Der Strassenfahrzeugbestand wird jedes Jahr aus dem Schweizer Informationssystem Verkehrszulassung (IVZ) des ASTRA gerechnet. Aus diesem Datensatz kann auch die Jahresfahrleistung pro Fahrzeug geschätzt werden, da der Datensatz auch die Fahrleistung bei der letzten Motorfahrzeugkontrolle beinhaltet, woraus die Jahresfahrleistung gerechnet werden kann. Die Gesamtfahrleistungen nach Fahrzeugkategorie werden auch gegenüber der nationalen Statistik kalibriert. Die spezifischen Verbräuche der Strassenfahrzeuge kommen aus Fahrzeugmessungen, die in HBEFA hinterlegt sind und alle paar Jahre mit einer neuen Version von HBEFA aufdatiert werden (Notter et al. 2022). Die spezifischen Verbräuche von Personenwagen und leichten Nutzfahrzeugen werden aber jährlich angepasst anhand einer Auswertung der Verbrauchs- und Treibhausgasemissionsdaten der Neuzulassungen aus den Typenprüfdaten.

Im Non-Road-Modell wurde die Bestandsdynamik 2015 (INFRAS 2015, BAFU 2015) modelliert und wird nicht jährlich aktualisiert. Stattdessen fliessen die damals prognostizierten Werte aus der Publikation direkt in die Ex-Post-Analyse ein. Im Schienenverkehrsmodell werden jährlich die Verkehrsleistungen und Energieverbräuche anhand von nationalen Statistiken aufdatiert. Für den Flugverkehr wird der getankte Treibstoff nach nationaler Statistik jährlich aufdatiert.

Die Entwicklung des Energieverbrauchs des Verkehrssektors wird in den Ergebnissen nach Bestimmungsfaktoren und Verkehrszwecken zerlegt. Mehr Informationen dazu sind im Kapitel 4 zu finden.

4. Inputs und Outputs

Was sind die zentralen Datenquellen?

Tabelle 1 listet die wichtigsten Datenquellen auf.

Tabelle 1: Zentrale Datenquellen der Modell-Inputdaten

Datenquelle	Zweck
Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (HBEFA) (www.hbefa.net)	Modellgerüst, Emissionsfaktoren, Spezifische Verbräuche
Schweizer Informationssystem Verkehrszulassung (IVZ) des ASTRA ⁵	Fahrzeugbestände Altersverteilungen Jahresfahrleistung pro Fahrzeug Altersabhängigkeit der Fahrleistung spezifische Verbräuche & Euroklassenanteile von Neuzulassungen
Angaben BFS: zu Fahrzeugbestand ⁶ , Leistungen in Personen- ⁷ und Güterverkehr ⁸	Fahrzeugbestand Gesamt-Fahrleistung & Verkehrsleistung der Schweiz Inland- und Auslandsanteile Aufteilung nach Verkehrsart (Güterverkehr)
Nationales Verkehrsmodell ⁹ (VM-UVEK)	Verteilung der Fahrleistung auf dem Schweizer Strassennetzwerk Innerorts/Ausserorts/Autobahn-Anteile
Verkehrszählungen des ASTRA ¹⁰	Wachstum der Gesamtfahrleistung Innerorts/Ausserorts/Autobahn-Anteile
Mikrozensus Mobilität und Verkehr ¹¹ 2010, 2015, 2021	Durchschnittliche Fahrtlänge Anteil Fahrleistung nach Fahrtenzweck
Leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe ¹² (LSVA) (Auswertung ARE)	SNF-Fahrleistung nach Gewichtsklasse, Euroklasse und Inland/Ausland
Gesamtenergiestatistik ¹³ (GEST)	Kalibration und Bioanteil des Treibstoffmix Kerosinabsatz für Flugverkehrsmodell
Absatzzahlen Erdgas, Biogas (BFE)	Kalibration und Bioanteil des Treibstoffmix
Absatzzahlen LPG, Ethanol, Biodiesel (BAZG)	Kalibration und Bioanteil des Treibstoffmix
Schweizerische Elektrizitätsstatistik ¹⁴	Elektrizitätsverbrauch Schienenverkehr
ÖV-Statistik ¹⁵ (BFS)	Mengengerüst Schienenverkehr
SBB-Statistikportal ¹⁶	Angaben zum spezifischen Verbrauch nach Zugstypen Mengengerüst Schienenverkehr
Non-Road-Datenbank (INFRAS 2015)	Mengengerüst und Verbrauch Non-Road-Modell
Zivilluftfahrtsstatistik ¹⁷ (BFS)	Verbrauch Flugverkehr
Tanksäulenpreise für Treibstoffe in den schweizerischen und ausländischen Grenzzonen ¹⁸ (BAZG)	Tanktourismus
Bankkartenumsätze an Tankstellenshops (interne Auswertung BFE)	Tanktourismus

Tabelle INFRAS.

⁵ <https://ivz-opendata.ch/opendata/>⁶ <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeuge/fahrzeuge/strassenfahrzeuge-bestand-motorisierungsgrad.html>⁷ <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/personenverkehr/leistungen.html>⁸ <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/gueterverkehr.html>⁹ <https://www.are.admin.ch/are/de/home/mobilitaet/grundlagen-und-daten/verkehrsmodellierung.html>¹⁰ <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/dokumentation/daten-informationsprodukte/verkehrsdaten/daten-publicationen/automatische-strassenverkehrszaehlung.html>¹¹ <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/erhebungen/mzmv.html>¹² <https://www.are.admin.ch/are/de/home/mobilitaet/grundlagen-und-daten/lsva.html>¹³ <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/gesamtenergiestatistik.html>¹⁴ <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/elektrizitaetsstatistik.html>¹⁵ <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/querschnittsthemen/oeffentlicher-verkehr.html>¹⁶ <https://reporting.sbb.ch/>¹⁷ <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/querschnittsthemen/zivilluftfahrt.html>

Welche Annahmen werden getroffen?

Die wichtigsten Annahmen, die jedes Jahr für die Ex-Post-Analyse getroffen werden müssen, sind die Weiterentwicklung einiger Zeitreihen, die vor Abschliessung der Analyse noch nicht publiziert sind. Deswegen muss deren Entwicklung im letzten Ex-Post-Jahr basierend auf dem vorletzten Jahr, sowie der Entwicklung von Proxy-Variablen prognostiziert werden. Der wichtigste Datensatz dazu ist die Gesamtfahrleistung. Die Entwicklung der Gesamtfahrleistung nach Fahrzeugkategorie wird mit Rücksicht auf die Entwicklung der Verkehrszählungen des ASTRA geschätzt, die einen Hinweis auf die Entwicklung der Gesamtfahrleistung geben.

Eine zweite wichtige Annahme, die getroffen werden muss, ist die Entwicklung des Tanktourismus. Der Tanktourismus wurde letztmals von Keller et al (2015) im Detail untersucht. Seither basiert die Entwicklung auf den relativen Entwicklungen von Gesamt-Treibstoffabsatz, Treibstoffpreisunterschieden an der Grenze und Umsätzen der Tankstellenshops in der Grenzregion.

Welche Daten werden wie verarbeitet?

Abbildung 3 zeigt den Aufbau des Strassenverkehrsmodells (HBEFA). Die Inputdaten für das Modell werden in Tabelle 1 beschrieben. Das Modell hat zwei Hauptteile:

Das **Flottenmodell** berechnet die Anteile der Fahrleistung, Starts & Stopps und Fahrzeuge je Fahrzeugschicht (d.h. differenziert nach Fahrzeugkategorie, Antriebstechnologie, Grössenklasse und Baujahr) der Schweizer Flotte in drei Schritten:

- In Schritt 1 wird der Fahrzeugbestand nach Fahrzeugkategorie, Antriebstechnologie, Grössenklasse und Baujahr gesplittet. Dies basiert hauptsächlich auf einer Auswertung der Schweizer IVZ-Daten. Alle Strassenfahrzeuge werden nach HBEFA-Fahrzeugsegmenten klassiert, inklusive Altersverteilungen. Der Gesamtfahrzeugbestand sowie Inland/Ausland-Anteile basieren auf Zahlen des BFS.
- In Schritt 2 werden die Verkehrsaktivitäten der Fahrzeuge hinzugefügt. Die spezifische Fahrleistung und Altersabhängigkeit der Fahrleistung wird auf Basis der IVZ-Daten ermittelt, da dieser Datensatz Angaben zum Kilometerstand und Fahrzeugalter bei der letzten Motorfahrzeugkontrolle beinhaltet. Die Anteile der Fahrleistung auf dem Schweizer Strassennetz und die Anteile innerorts/ ausserorts/Autobahn basieren auf einer Auswertung der Ergebnisse des nationalen Verkehrsmodells.
- In Schritt 3 werden die Daten weiter disaggregiert, um Emissionsstandards (Euro-Stufen) sowie die Fahrleistungsanteile in verschiedenen Modi (wie Plug-In-Hybride oder CNG-Benzin-Fahrzeuge) zu berücksichtigen. Die Euroklassenanteile werden auf Basis des Zulassungsjahrs aus den IVZ-Daten ermittelt. Die Aufteilung nach Fahrmodi für Multi-Technologiefahrzeuge basieren auf Standardannahmen im HBEFA. In Schritt 3 werden auch die spezifischen Verbräuche der Fahrzeuge auf die Schweizer Neuzulassungsdurchschnittswerte angepasst. Die Hauptdatenquelle hierfür sind die Typenprüfwerte der Neufahrzeugen. Diese Werte unterschätzen aber den realen Verbrauch um bis über 10-35% (Tietge et al. 2019, Dornoff et al. 2024). Deswegen werden diese Werte ggf. im Zuge der Modellkalibration (vgl. Kapitel 5), die den gerechneten Gesamtverbrauch nach Treibstoff mit den Absatzzahlen und dem geschätzten Tanktourismus vergleicht, angepasst.

Das Ergebnis des Flottenmodells sind die relativen Fahrleistungen und Energieverbrauchs-Korrekturfaktoren aller Fahrzeugschichten, von 1990 bis zum aktuellen Jahr, nach Fahrzeugkategorie, Antriebstechnologie, Grössenklasse und Baujahr.

Das **Emissionsmodell** multipliziert die detaillierten spezifischen Verbrauchs- und Korrekturfaktoren mit Aktivitätsdaten (Anzahl Fahrzeugkilometer und Kaltstarts). Diese basieren auf nationalen Statistiken zur

¹⁸ <https://www.bazg.admin.ch/dam/bazg/de/dokumente/abgaben/minoest-statistik/t4.4.pdf.download.pdf/Monatstabelle%20T%204.d%202021.11.pdf>

Fahrleistung, Anzahl Fahrzeuge und durchschnittliche Fahrtlänge und werden mittels aus dem Flottenmodell resultierenden Flottenanteilen auf die Ebene der Basis-Verbrauchsfaktoren disaggregiert. Ergebnis ist der Endenergieverbrauch je Fahrzeugschicht (Fahrzeugkategorie, Energietechnologie, Grössenklasse und Emissionskategorie). Somit können die Verbräuche je Verwendungszweck ohne Schwierigkeiten aggregiert werden.

Abbildung 3 Aufbau des Strassenverkehrsmodells



Grafik INFRAS.

Das Non-Road-Modell wird ausführlich in BAFU (2015) beschrieben.

Das Schienenverkehrsmodell ist im Vergleich zum Strassenverkehrs- und Non-Road-Modell sehr einfach umgesetzt. Berücksichtigt werden insgesamt sechs Schienenfahrzeugtypen: öffentlicher Personennahverkehr (Tram, Trolley), Schienenpersonenverkehr (Fernverkehr und Regionalverkehr) und Schienengüterverkehr (Fernverkehr und Regionalverkehr). Die Fahrleistungs-, Verkehrsleistungs- und Energieverbrauchsdaten werden der ÖV-Statistik des BFS¹⁹ entnommen.

Die Berechnung für den Luftverkehr ist ebenfalls sehr einfach. Der Menge an getanktem Treibstoff nach nationalen und internationalen Flügen sind in der BFS-Statistik zur Zivilluftfahrt vorhanden. Der Gesamtabatz von Kerosin beinhaltet auch den Flugtreibstoffverbrauch des Militärs. Der Unterschied zwischen Treibstoffverbrauch der Zivilluftfahrt und dem gesamten Kerosinabsatz wird dem Militär zugerechnet.

Welche Ergebnisse werden erzeugt?

Die drei «Bottom-Up»-Modelle (Strassenverkehr, Non-Road, Schienenverkehr) ergeben detaillierte Verbrauchs- und Fahrleistungsergebnisse nach Fahrzeugtyp und Treibstoff. Für den Luftverkehr werden nur Zahlen zum Verbrauch nach Flugtyp (national, Militär) produziert. Diese Ergebnisse können dann nach Bedarf aggregiert werden, um die Verbräuche nach Verwendungszwecken (s. Abbildung 2) oder die Bestimmungsfaktoren (s. nächster Abschnitt) zu rechnen.

¹⁹ <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/querschnittsthemen/oeffentlicher-verkehr.html>

Wie werden die Entwicklungen nach Bestimmungsfaktoren zerlegt?

Um die Entwicklung des Energieverbrauchs besser verstehen zu können, werden die Ergebnisse nach verschiedenen Bestimmungsfaktoren zerlegt. Für den Verkehrssektor werden die folgenden Bestimmungsfaktoren berechnet:

Der **Mengeneffekt** berücksichtigt hier die Entwicklung der Fahrleistung und wird berechnet durch die Multiplikation des spezifischen Verbrauchs im Basisjahr mit dem Wachstum der Fahrleistung²⁰ (im neuen Jahr gegenüber dem Basisjahr):

$$\text{spez. Verbrauch}_{\text{Basisjahr}} \times (\text{Fahrleistung}_{\text{neues Jahr}} - \text{Fahrleistung}_{\text{Basisjahr}})$$

Der **Effekt der Technik und Politik** berücksichtigt die Entwicklung der Effizienz der Fahrzeuge und wird berechnet als Produkt der Fahrleistung im Basisjahr und der Veränderung des spezifischen Verbrauchs:

$$\text{Fahrleistung}_{\text{Basisjahr}} \times (\text{spez. Verbrauch}_{\text{neues Jahr}} - \text{spez. Verbrauch}_{\text{Basisjahr}})$$

Der **Substitutionseffekt** bildet beim Verkehrssektor vor allem die Entwicklung des Anteils der Antriebstechnologien ab. Der Substitutionseffekt wird berechnet anhand der Fahrleistung auf Ebene Fahrzeugkategorie im neuen Jahr, multipliziert mit dem spezifischen Verbrauch im Basisjahr (je Treibstoff) und der Veränderung des Fahrleistungsanteils im neuen Jahr ggü. dem Basisjahr. Der Fahrleistungsanteil je Treibstoff ist die Fahrleistung auf Ebene Energieträger dividiert durch die Fahrleistung auf Ebene Fahrzeugkategorie:

$$\text{Fahrleistung}_{\text{neues Jahr}}^{\text{FzKat}} \times \text{spez. Verbrauch}_{\text{Basisjahr}}^{\text{Treibstoff}} \times (\text{Fahrleistungsanteil}_{\text{neues Jahr}} - \text{Fahrleistungsanteil}_{\text{Basisjahr}})$$

Der **Joint-Effekt** weist den Grad der Nichtlinearität der Ergebnisse aus, d.h. die Differenz zwischen den in den Modellen kombinierten Effekten und der Summe der Einzeleffekte. Der Joint-Effekt wird als der Unterschied zwischen dem Wachstum des Verbrauchs (neues Jahr minus Basisjahr) und der Summe der Mengen-, Substitutions- und Technikeffekte berechnet:

$$(\text{Verbrauch}_{\text{neues Jahr}} - \text{Verbrauch}_{\text{Basisjahr}}) - (\text{Mengeneffekt} + \text{Substitutionseffekt} + \text{Technikeffekt})$$

Für den Spezialfall (nationaler) Flugverkehr wird der Mengeneffekt als Unterschied des Verbrauchs im neuen Jahr abzüglich des Wertes im Basisjahr berechnet. Substitutions-, Technik-, Politik- und Joint-Effekte werden für den Flugverkehr nicht mit eingerechnet.

Die Effekte der Entwicklung des **Tanktourismus** und des **internationalen Flugverkehrs** werden als Unterschied des Werts im neuen Jahr minus den Wert im Basisjahr berechnet und als eigenen Bestimmungsfaktor beschrieben.

5. Qualitätssicherung

Wie erfolgt die Kalibration und auf was wird kalibriert?

Die wichtigsten Kalibrationshebel des Modells sind die Verbräuche von Benzin und Diesel, die mit dem Gesamtabsatz kalibriert werden können. Dies erfolgt hauptsächlich durch die Anpassung des spezifischen

²⁰ Der Mengeneffekt für den Flugverkehr wird vereinfacht gerechnet als der Verbrauchsunterschied zwischen dem neuen und dem Basisjahr. Die anderen Bestimmungsfaktoren werden für den Flugverkehr nicht gerechnet.

Verbrauchs von Personenwagen und leichten Nutzfahrzeugen, aber auch durch Anpassungen anderer «un-exakter» Inputparameter und Annahmen wie Tanktourismus, Innerorts/Ausserorts/Autobahn-Anteile sowie Stauanteile. Der Stromverbrauch des Schienenverkehrs und der Trolleybusse wird mit Zahlen aus der Elektrizitätsstatistik²¹ kalibriert. Der Stromverbrauch der Strassenfahrzeuge kann leider nicht direkt kalibriert werden, da keine statistischen Daten dazu vorhanden sind. Um eine Doppelzählung zu vermeiden, wird der Stromverbrauch der Elektromobilität aus den anderen Sektoren, wo er geladen wird, rausgerechnet. Letztendlich wird der Gesamtstromabsatz über alle Sektoren kalibriert.

Wie wird mit Unsicherheiten umgegangen?

Unsicherheiten werden grundsätzlich in den Modellen nicht abgebildet. Die Unsicherheiten des Strassenverkehrsmodells wurden aber kürzlich für das UBA Deutschland analysiert – siehe Allekotte et al. (2023) für weitere Infos.

Welche Beschränkungen ergeben sich?

Die Haupteinschränkung des Modells sind vermutlich die unzureichenden Angaben, die für eine Berechnung des Tanktourismus benötigt werden. Vor allem zu grauen Treibstoffimporten von Schweizern aus dem benachbarten Ausland fehlt aktuell eine Datengrundlage.

Das Fehlen der Kalibrationsgrösse für die Elektromobilität ist ebenfalls eine wichtige Einschränkung, die zukünftig vermutlich wichtiger wird.

Eine weitere Einschränkung ist, dass das Non-Road-Modell seit 2015 nicht aufdatiert worden ist. Die Mengengerüste beruhen seit diesem Jahr auf Prognosen anhand der Entwicklung verschiedener Grössen wie Bevölkerung, Wirtschaftswachstum, Landwirtschafts- und Forstflächen. Weiter werden elektrische Maschinen in diversen Maschinengattungen relevant, die bisher noch nicht im Non-Road-Modell abgebildet sind. Die Aktualisierung des Non-Road-Modells ist aktuell beim BAFU in Planung.

6. Allgemeine Punkte

Welche Software und Programmiersprache werden genutzt?

Das Strassenverkehrsmodell (www.hbefa.net) ist aktuell in MS Access implementiert, wird aber in der nächsten Version in Python umgesetzt. Das Non-Road-Modell (INFRAS 2015) ist in MS Access umgesetzt. Das Schienenverkehrsmodell und die Flugverkehrsberechnungen sind in Excel implementiert.

Transparenz – wie wurde das Modell entwickelt und finanziert?

Die Entwicklung von HBEFA wird von den Umweltbundesämtern von sechs europäischen Ländern mitfinanziert. Die Aktualisierung der länderspezifischen Inputdaten des HBEFA für die Schweiz werden von BAFU und BFE finanziert. Weitere Entwicklungen des Modells werden durch INFRAS eigenfinanziert. Das Non-Road-Modell wurde im Rahmen mehrere BAFU-Projekte entwickelt (FOEFL 1996, FOEN 2008, BAFU 2015). Das Schienenverkehrsmodell und die Flugverkehrsberechnungen wurden im Rahmen der Ex-Post-Analysen und der Arbeiten der Energieperspektiven entwickelt (Prognos 2012, Prognos et al. 2021).

Wo und wofür wird das Modell genutzt?

Ausser in den Ex-Post-Energieverbrauchsanalysen, wurden die Teilmodelle auch für die Energieperspektiven der Schweiz (Prognos 2012, Prognos et al. 2021) eingesetzt. HBEFA wurde weiter für die Berechnung der Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs für das BAFU verwendet (BAFU 2010, INFRAS 2017, Notter

²¹ <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/elektrizitaetsstatistik.html>

et al. 2024). Weiter werden HBEFA und das Non-Road-Modell für die Berechnung von Luftschadstoffen auf Stadt- oder Kantonsniveau (z.B. INFRAS 2021, INFRAS 2024) eingesetzt.

Schliesslich werden Emissionsfaktoren aus HBEFA und das Non-Road-Modell immer wieder als Datenquelle für Lebenszyklusanalysen angewendet, z.B. (Ecoinvent 2023, Sacchi und Bauer 2023, Cox et al. 2020). Ein Teil der hier beschriebenen Funktionalität des HBEFA ist auch als publizierte Software erhältlich²², welche von Ingenieurbüros und Universitäten für Emissions- und Energieverbrauchsberechnungen in verschiedenen Kontexten eingesetzt wird.

Vom Non-Road-Modell existiert ein vom BAFU publiziertes Online-Abfragetool, welches ebenfalls von Ingenieurbüros und Forschern für beliebige Zwecke genutzt werden kann²³.

²² www.hbefa.net

²³ <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/zustand/non-road-datenbank.html>

7. Literatur

- Allekotte, M., Knörr, W., Kräck, J., Notter, B., Schäppi, B., Soini, M., Hausberger, S., Tödling, M., Schadler, D. 2023:** Neubewertung der Unsicherheiten der mit den zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen im Verkehrssektor verwendeten Parameter und Methoden. Umweltbundesamt Deutschland (UBA). [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/152_2023_texte_neubewertung_der_unsicherheiten.pdf].
- BAFU 2010:** Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1990-2035. Aktualisierung 2010. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern. [<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/publikationen-studien/publikationen/luftschadstoff-emissionen-des-strassenverkehrs-1990-2035.html>].
- BAFU 2015:** Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des Non-Road-Sektors. Studie für die Jahre 1980-2050. Umwelt-Wissen Nr. 1519. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern. [<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/publikationen-studien/publikationen/energieverbrauch-und-schadstoffemissionen-des-non-road-sektors.html>].
- Cox, B., Althaus, H.-J., Bauer, C., Sacchi, R., Mutel, C., Faist-Emmenegger, M., Spiegel, B. 2020:** Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext. Bern, Villigen, Zürich. [https://www.stadt-zuerich.ch/content/dam/stzh/gud/Deutsch/UGZ/gesundheitschutz/schadstoffe_laerm_strahlen/luft/dokumente/bericht_umweltauswirkungen_fahrzeuge.pdf].
- Dornoff, J., Valverde Morales, V., Tietge, U. 2024:** On the way to 'real-world' co2 values? The european passenger car market after 5 years of WLTP. International Council on Clean Transportation (ICCT). [https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/01/ID-76-%E2%80%93EU-WLTP_final.pdf].
- Ecoinvent 2023:** Ecoinvent Database v3.10. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. [www.ecoinvent.ch].
- FOEFL 1996:** Non-road fuel consumption and air pollutant emissions. Federal Office for Environment, Forestry and Landscape (FOEFL), Ittigen.
- FOEN 2008:** Non-road fuel consumption and pollutant emissions. Study for the period 1980 to 2020. Environmental studies no. 0828. Federal Office for the Environment (FOEN), Ittigen.
- INFRAS 2015:** Online Datenbank Schweizer Non-Road Maschinen. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Ittigen. [<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/zustand/non-road-datenbank.html>].
- INFRAS 2017:** Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs in der Schweiz 1990-2050. Schlussbericht. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Ittigen. [https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/externe-studien-berichte/Bericht_Luftschadstoffemissionen_des_Strassenverkehrs_der_Schweiz_1990_2050.pdf.download.pdf/Bericht_Luftschadstoffemissionen_des_Strassenverkehrs_der_Schweiz_1990_2050.pdf].
- INFRAS 2021:** Strassenverkehrsemissionen Basel-Stadt und Basel-Landschaft 2016-2040. Update Luftmodul GVM. Schlussbericht. Lufthygieneamt beider Basel (LHA), Bern.
- INFRAS 2024:** Verkehrsemissionen im Kanton Luzern. Jahr 2022. Bau-, Umwelt- und Wirtschaftsdepartement des Kantons Luzern. [https://cdn.prod.website-files.com/6207922a2acc01004530a67e/65e0b75fcf4bdcf32dfd9840_INFRAS2024_Verkehrsemissionen_Kt_LU_2022.pdf].
- INFRAS, TUG, ifeu, HSDAC, WSP 2022:** HBEFA. Handbook of emission factors for road transport 4.2. INFRAS, Technical University of Graz (TUG), Institute for Energy and Environment Heidelberg (ifeu), Heinz Steven Data Analysis and Consulting (HSDAC) and WSP Sweden, commissioned by the Swiss Federal Office for the Environment (BAFU), the German Federal Office for the Environment (UBA-DE), the Austrian Federal Office for the Environment (UBA-AT), the French Agency for Ecological

Transition (ADEME), the Swedish Transport Administration (Trafikverket) and the Norwegian Environment Agency (Miljødirektoratet), Bern. [<https://www.hbefa.net>].

Keller, M. 2015: Tanktourismus und Eurokurs, Studie im Auftrag der Erdöl-Vereinigung. [https://www.av-energy.ch/images/pdf/Studie_Tanktourismus_d.pdf].

Nägeli, C., Camarasa, C., Delghust, M., Fennell, P., Hamilton, I., Jakob, M., Langevin, J., Laverge, J., Reyna, J. L., Sandberg, N. H., Webster, J. 2022: Best practice reporting guideline for building stock energy models. [<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111904>].

Notter, B., Cox, B., Graf, C., Tapia-Dean, V. 2024: Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1990–2060. Bundesamt für Umwelt (BAFU). [<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/publikationen-studien/publikationen/luftschadstoff-emissionen-des-strassenverkehrs-1990-2060.html>].

Notter, B., Cox, B., Hausberger, S., Matzer, C., Weller, K., Dippold, M., Politschnig, N., Lipp, S., Knörr, W., Allekotte, M., André, M., Gagnepain, M., Hult, C., Jerksjö, M. 2022: HBEFA 4.2. Documentation of updates. Bundesamt für Umwelt BAFU (CH), Umweltbundesamt UBA (DE), Umweltbundesamt UBA (AT), Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie ADEME (FR), Trafikverket (SE), Miljødirektoratet (NO). [https://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA42_Update_Documentation.pdf].

Prognos 2012: Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050. Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 2000 - 2050. Ergebnisse der Modellrechnungen für das Energiesystem. Bundesamt für Energie (BFE). [http://www.prognos.com/uploads/tx_atwpubdb/120912_Prognos_Bundesamt_fuer_Energie_Energieperspektiven_Schweiz_2050.pdf].

Prognos, INFRAS, TEP, Ecoplan 2021: Energieperspektiven der Schweiz 2050+. Bundesamt für Energie (BFE). [<https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.html>].

Sacchi, R., Bauer, C. 2023: mobitool-Faktoren v3.0. Die Excel-Datenbank mit aufbereiteten ecoinvent-Umweltdaten und Emissionsfaktoren (Update 2023). Verein mobitool (SBB, swisscom, öbu, energieschweiz, BAFU). [<https://www.mobitool.ch/de/tools/mobitool-faktoren-v3-0-25.html?tag=18>].

Tietge, U., Diaz, S., Mock, P., Bandidavekar, A., Dornoff, J., Ligterink, N. 2019: From laboratory to road: A 2018 update of official and “real-world” fuel consumption and CO2 values for passenger cars in Europe. International Council on Clean Transportation (ICCT). [https://theicct.org/sites/default/files/publications/Lab_to_Road_2018_fv_20190110.pdf].