

Dekarbonisierung des Strassentransportes

Prädiktiver Modellansatz zur Bestimmung von CO₂-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge mit konventionellen und alternativen Antrieben

Philippe Zimmermann
Projektleiter
Fahrzeugantriebssysteme
Empa

Sursee, 01.09.2022

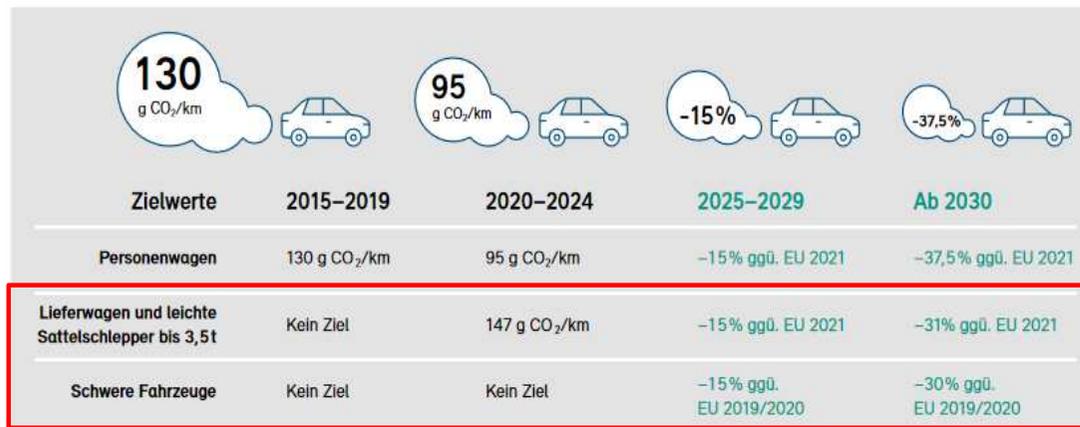
Agenda

- **Mindset "Dekarbonisierung im Transportsektor"**
- **Innovationspartnerschaft mit dem Migros-Genossenschaftsbund (MGB) und der Empa**
- **Methodik zur Energiebedarfs- und CO₂-Modellierung von schweren Nutzfahrzeugen mit unterschiedlichen Antriebssystemen**
- **Entwicklung und Validierung eines prädiktiven CO₂-Tools**
- **Implementierung in das Supply Chain Managementsystem des MGB**
- **Ausblick auf weiterführende Konzepte**

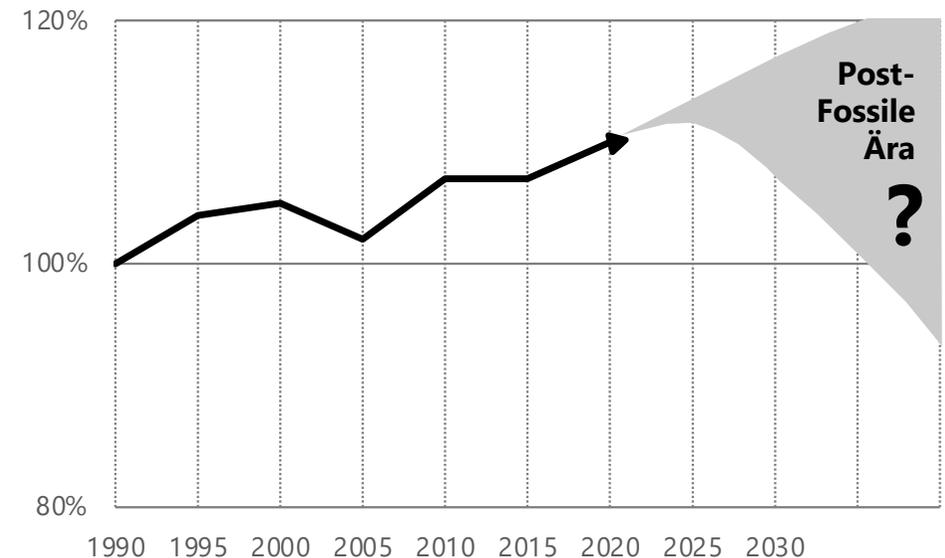
Mindset "Dekarbonisierung im Transportsektor"

Quelle:
Revidiertes CO₂-Gesetz, Faktenblatt Nr 5., Gebäude und Mobilität
BFE und BAFU, 2021

CO₂-Zielwerte für Fahrzeuge



Entwicklung der CO₂-Emissionen in der Schweiz Für die Nutzfahrzeugflotte (Basis 1990)



Quelle:
Kenngrößen zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Schweiz 1990–2019
BAFU, 2021
(eigene Darstellung)

Verkehrsperspektiven 2050

Entwicklungen Güterverkehr

+31%
Güterverkehr (Tonnenkilometer)



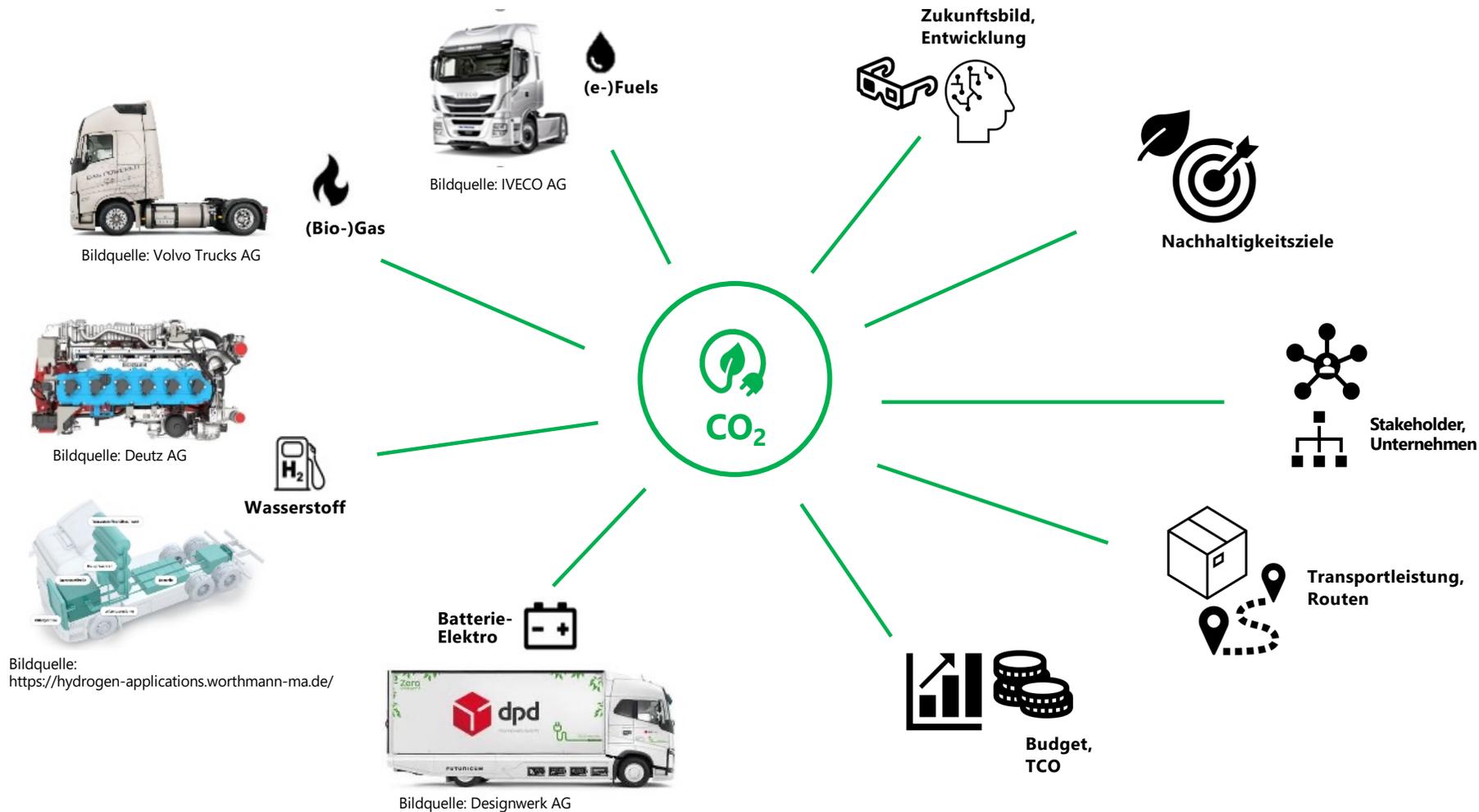
+58%
Lieferwagen (Fahrzeugkilometer)



Quellen:
Schweizerische Verkehrsperspektiven 2050, ARE, 2022
Gütertransportstatistik (GTS), BFS, 2021

Mindset "Dekarbonisierung im Transportsektor"

Perspektive des Flottenbesitzer



Innovationspartnerschaft mit der Migros



Projektrahmen der Partnerschaft zwischen Migros und Empa

- **Unterstützung** und **wissenschaftliche Begleitung** der Empa zur **Dekarbonisierung** des strassengebundenen Warentransportes der **Migros-Flotte**.
- Entwicklung eines modellbasierten **Energiebedarfs-** und **CO₂-Ansatzes** für schwere Nutzfahrzeuge mit den Antriebssystemen: **Diesel, Biodiesel, Biogas, Batterie-elektrisch und H₂-Brennstoffzelle**
- **Integration** des Ansatzes in das Supply-Chain-Management-Tool der Migros (**Migros OPEX –Tower**¹).

¹ Migros OPEX-Tower®, webpage, 2021, <https://ltopex.migros.net/tower/>

Methodik zur Energiebedarfsberechnung

Unter Berücksichtigung der Fahrzeugphysik und des Routenverlaufs



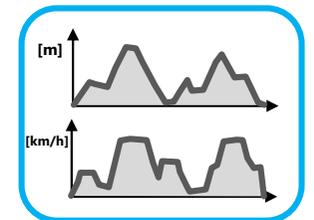
Antriebsleistung am Rad

$$P_{Rad}[kW] =$$

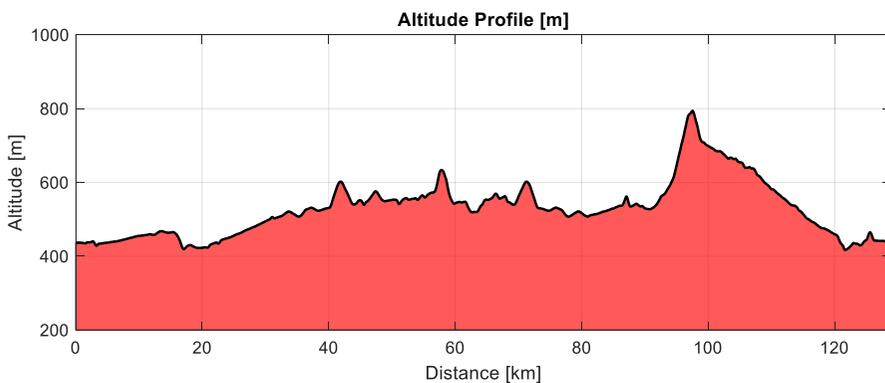
- Leistungsanteil infolge **aerodyn. Widerstand**
 - c_w - Aerodynamischer Widerstandskoeffizient
 - A_{FZ} - Anströmfläche
 - ρ_{Luft} - Umgebungsluftdichte
 - v^3 - (Geschwindigkeit)³
- Leistungsanteil infolge **Reibwiderstand**
 - c_R - Rollwiderstandskoeffizient
 - m_{FZ} - Fahrzeugmasse (inkl. Beladung)
 - v - Geschwindigkeit
- Leistungsanteil infolge **Trägheit**
 - m_{FZ} - Fahrzeugmasse (inkl. Beladung)
 - $\frac{dv}{dt}$ - Beschleunigung
 - v - Geschwindigkeit
- Leistungsanteil infolge **Strassensteigung**
 - m_{FZ} - Fahrzeugmasse (inkl. Beladung)
 - α - Strassensteigungswinkel
 - v - Geschwindigkeit



Fahrzeug Daten

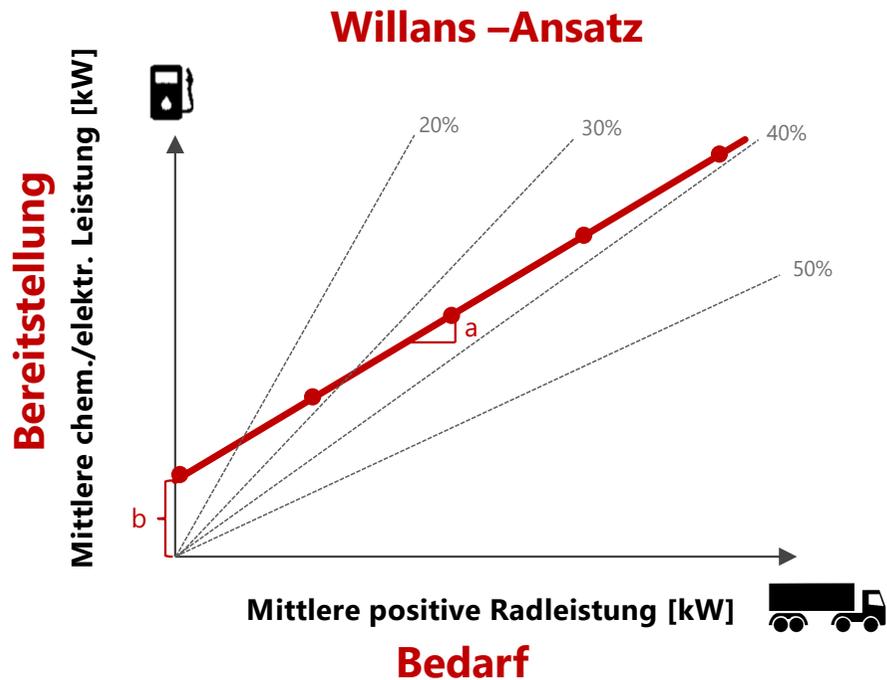


Routen
Informationen

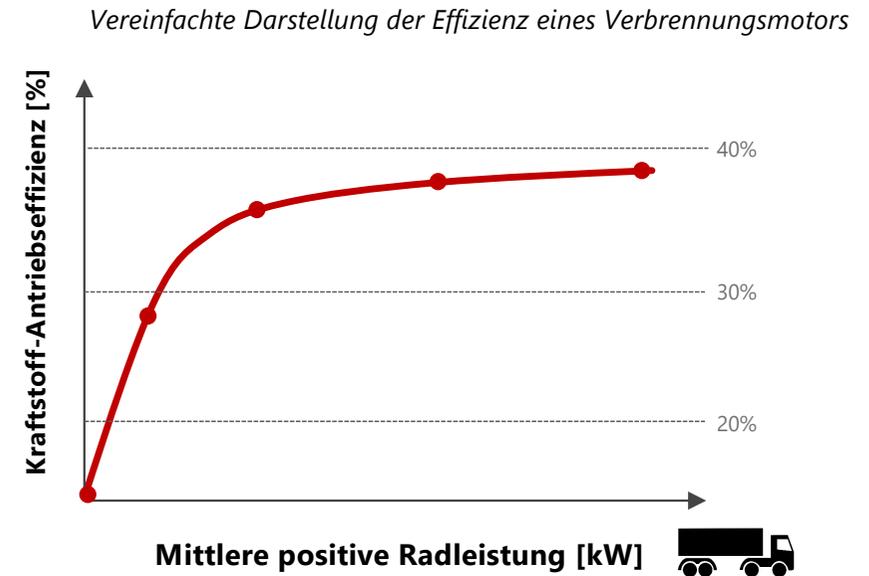


Methodik zur Energiebedarfsberechnung

Der Willans-Ansatz



$$\bar{P}_{chem,el}[kW] = a \cdot \bar{P}^+_{Rad} + b$$

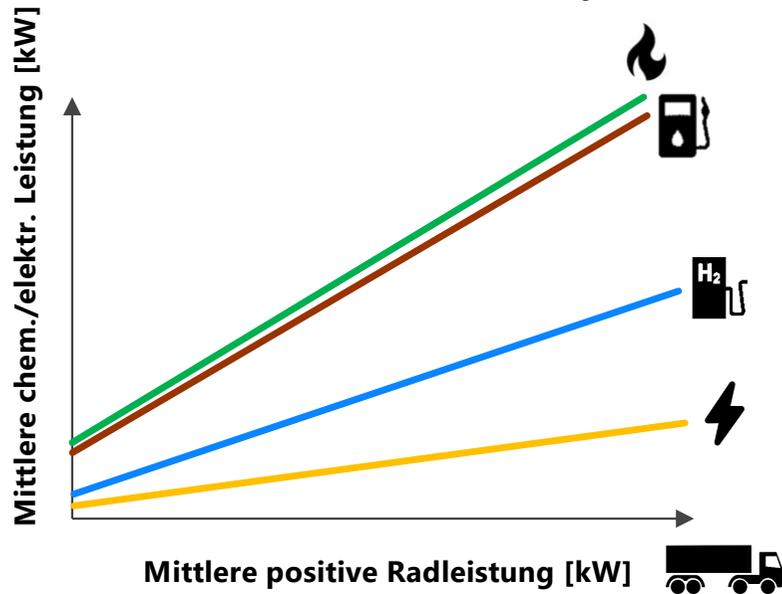


$$\eta_{Antrieb} = \frac{\bar{P}^+_{Rad}}{\bar{P}_{chem,el}}$$

Methodik zur Energiebedarfsberechnung

Anwendung auf verschiedene Antriebssysteme

Willans-Ansatz nach Antriebssystem



Bilderquelle: Migros

Leistungsbedarf: $\bar{P}_i [kW] = a_i \cdot \bar{P}_{Rad} + b_i$

Energiebedarf: $\bar{E}_i [kWh] = \int \bar{P}_i \cdot dt$

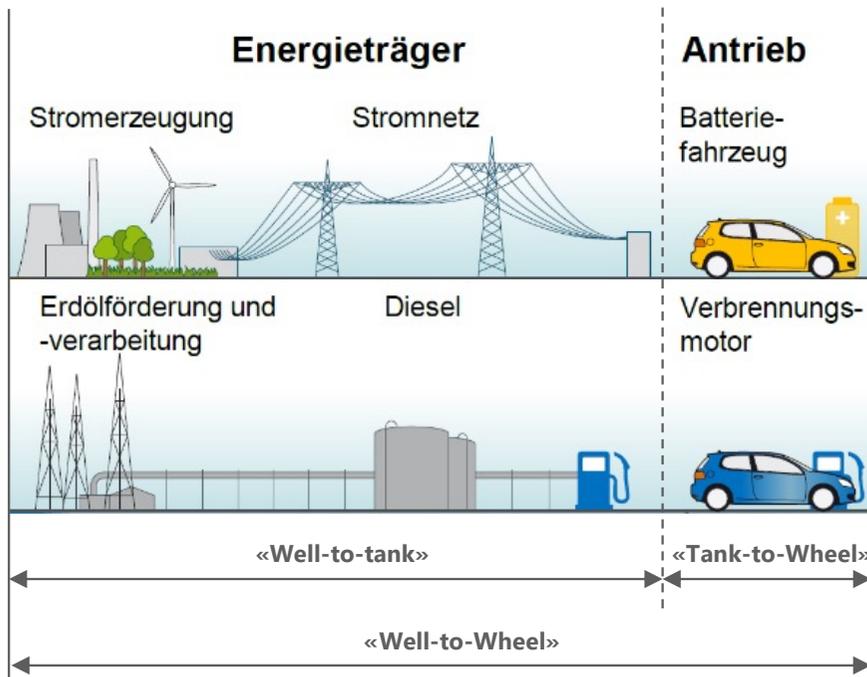
i : Antriebssystem

Literatur-Referenz:

"Decarbonizing passenger cars using different powertrain technologies: Optimal fleet composition under evolving electricity supply, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 95, 2018, L. Küng et al. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.09.003>

Entwicklung eines prädiktiven CO₂-Tools

Terminologie – "Well-to-Wheel"



Quelle: VW (2011), Darstellung Empa (2019)

Bezug "Tank-to-Wheel"

- **CO₂-Emissionen aus Betrieb des Fahrzeuges**
- Berechnung der **CO₂-Werte** mittels **Kohlenstoffanteil im Treibstoff** ¹
- Elektrische Energieträger und Wasserstoff haben **keinen Kohlenstoffanteil**

Bezug "Well-to-Tank"

- **CO₂-Emissionen der Vorkette** des Energieträgers:
 - Bereitstellung (Produktion & Transport)
 - Emissionsfaktoren basierend auf Angaben BFE ²
- **CO₂-Intensität** der Elektrizitätsproduktion

1) Aus Treibstoffanalyse (treibstoff- und lieferantenspezifisch) oder aus gemittelten Annahmen, Empa, 2022
2) "Energieetikette für Personenwagen: Umweltkennwerte 2021 der Strom- und Treibstoffbereitstellung", BFE, 2021

Entwicklung eines prädiktiven CO₂-Tools

Emissionsfaktoren

Verbrauch

$$\left[\frac{kWh}{100km} \right]$$

$$\left[\frac{L}{100km} \right]$$

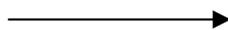
$$\left[\frac{kg}{100km} \right]$$

Emissionsfaktoren

$$\left[\frac{kgCO_2}{kg, L, kWh} \right]$$

Emissionsfaktoren

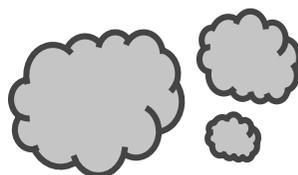
$$\left[\frac{kgCO_2}{kg, L, kWh} \right]$$



CO₂-Emissionen

$$\left[\frac{gCO_2}{km} \right]_{WtT}$$

$$\left[\frac{gCO_2}{km} \right]_{TtT}$$



■ Grundlegende Annahme:

Der **gesamte Kohlenstoff** im Brennstoff wird durch **idealen Verbrennung** in **CO₂** umgewandelt.

■ Emissionsfaktoren:

TtT basierend auf dem Fahrzeugbetrieb (=Kraftstoffverbrauch) gemäß obiger Annahme

WtT basierend "Umweltkennwerte" des BFE oder anderen Umweltdaten-Quellen (PSI, Empa, ecoinvent, etc.)

■ Beispiel für den Verbrennungsantrieb (Diesel):

$$TtT: 30 \frac{L}{100km} \cdot 0.84 \frac{kg}{L} \cdot \mathbf{3.115} \frac{kgCO_2}{kgFuel} \approx 780 \frac{gCO_2}{km}$$

$$WtT: 30 \frac{L}{100km} \cdot 0.84 \frac{kg}{L} \cdot \mathbf{0.583} \frac{kgCO_2}{kgFuel} \approx 147 \frac{gCO_2}{km}$$

Entwicklung eines prädiktiven CO₂-Tools

"Digitale" Flotte

Antriebssysteme

 Diesel
  (Bio-) Gas
  Electro
  H₂

Flotten-Struktur

3.5-7.5t



Städtische Verteilung, "Last Mile"

18t



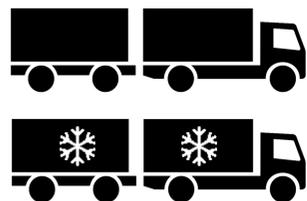
Regionale + Städtische Verteilung

32t



Lang-Distanz Transport

32t

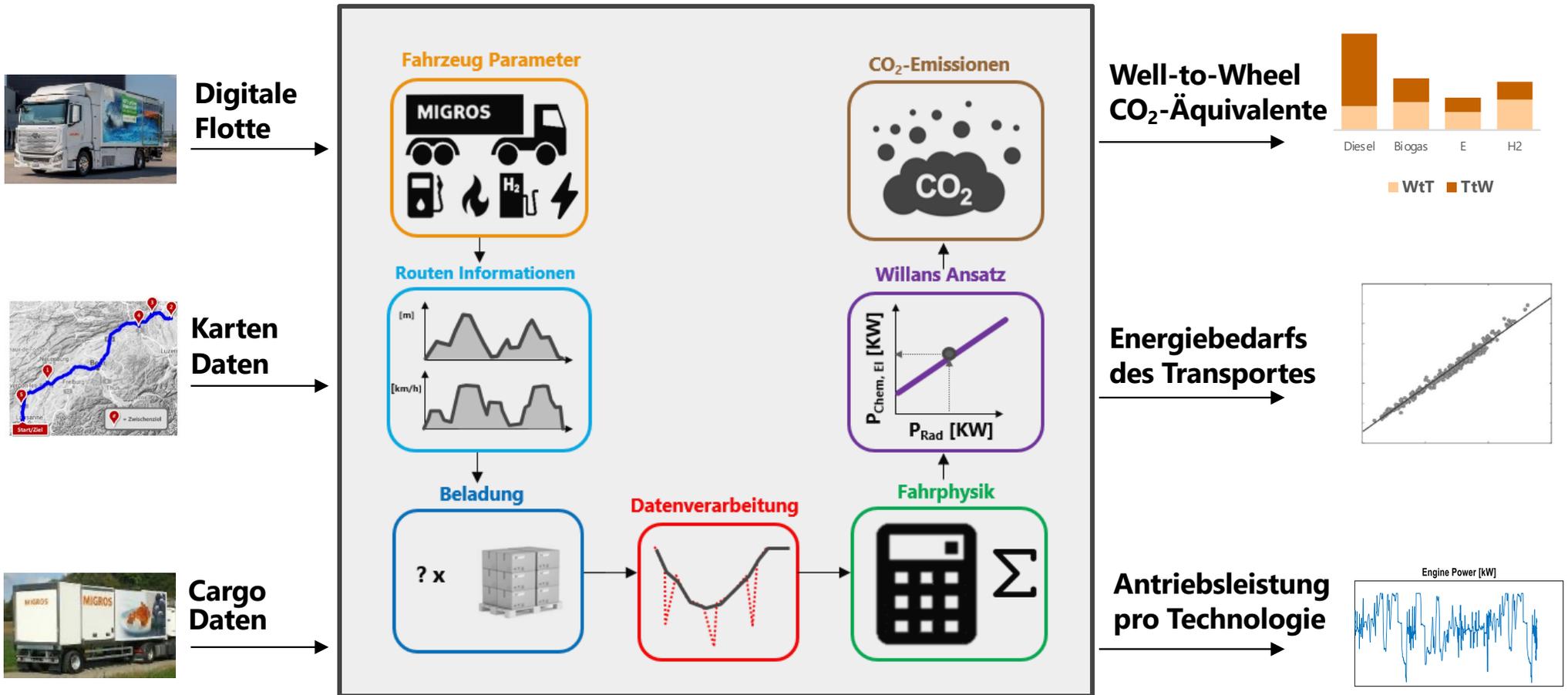


Lang-Distanz Transport



Entwicklung eines prädiktiven CO₂-Tools

Berechnungsschema (vereinfacht)



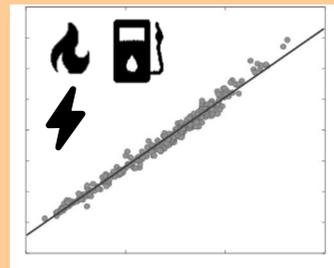
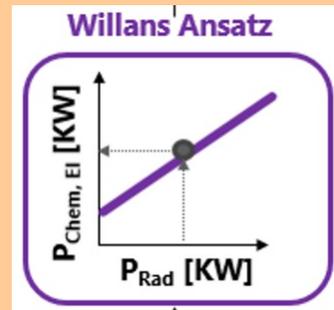
Entwicklung eines prädiktiven CO₂-Tools

Validierung des Algorithmus - Vergleich Modell vs. Messung

Fahrzeug-Messungen

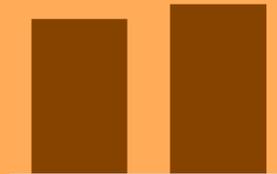


Verifizierung der Willans-Parameter



Berechnung Energiebedarf durch Modell, Vergleich mit Fahrzeug-Messung

Modell vs. Messung



Δ in [%]

Modell Messung

■ kWh/100km od. L/100km

Gute Übereinstimmung der Modellrechnung zur Fahrzeugmessung!
Durchschnittliche **Abweichung** geringer als **5%** (Streuband bei ca. $\pm 10\%$)

Implementierung in das Supply Chain Managementsystem des MGB

Prototyp "CO₂-Insights"

CO₂ Insights | CO₂ Reporting

Date: 01.01.2021 - 31.12.2022

Tour ID: Alle

Fuel type: Alle

Vehicle type: Alle

Origin: Alle

Total tours: 26

Selected tours: 1

| Tour ID | Date | Vehicle type | Fuel type | Origin | Length [km] |
|---------|------------|--------------|-----------|-----------|-------------|
| F3030 | 18.02.2022 | TT | EL | Agno | 27,7 |
| F3030_3 | 18.02.2022 | TT | EL | Agno | 27,7 |
| F3030_4 | 18.02.2022 | TO | EL | Agno | 27,7 |
| F3024 | 17.02.2022 | TT | EL | Giubiasco | 13,0 |
| F3024_3 | 17.02.2022 | TT | EL | Giubiasco | 13,0 |
| F3024_4 | 17.02.2022 | TO | EL | Giubiasco | 13,0 |
| F2082 | 12.02.2022 | TT | EL | Giubiasco | 203,0 |
| F2082_3 | 12.02.2022 | TT | EL | Giubiasco | 203,0 |
| F2082_4 | 12.02.2022 | TO | EL | Giubiasco | 203,0 |
| F2038 | 09.02.2022 | TT | EL | Giubiasco | 50,1 |
| F2038_3 | 09.02.2022 | TT | EL | Giubiasco | 50,1 |
| F2038_4 | 09.02.2022 | TO | EL | Giubiasco | 50,1 |

| CO ₂ emission | BIO | DI | EL | H2 |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Infrastructure | 4,09 | 4,64 | 4,84 | 4,03 |
| Production/Disposal | 3,84 | 4,36 | 13,25 | 7,33 |
| Tank to wheel | 0,00 | 38,64 | 0,00 | 0,00 |
| Well to tank | 7,32 | 6,91 | 1,96 | 2,97 |
| Gesamt | 15,25 | 54,55 | 20,05 | 14,33 |

| Technology usable | BIO | DI | EL | H2 |
|-------------------|-----|----|----|----|
| | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

Altitude profile

Altitude [meters a.s.l.] vs Distance [km]

Power / Fill level

Power [kW] vs Distance [km] and Fill level [%]

Daten von Routen und Fahrzeugkompositionen

Prädiktierte CO₂-Emissionen für alle Antriebsvarianten

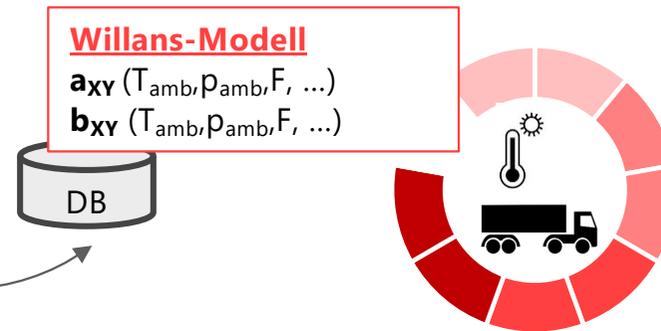
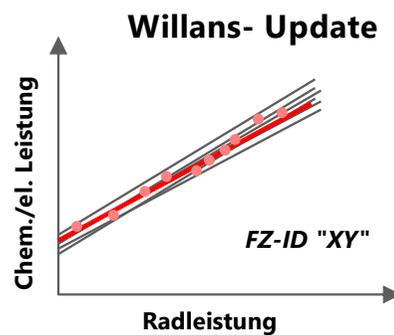
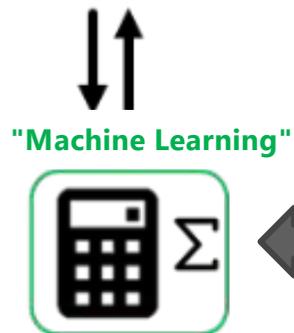
Routeninformation und prädiktierte Betriebszustände

Ausblick auf weiterführende Konzepte

Selbstlernender, adaptiver Willans Ansatz – "Digital Twin"

Database für Fahrzeug XY

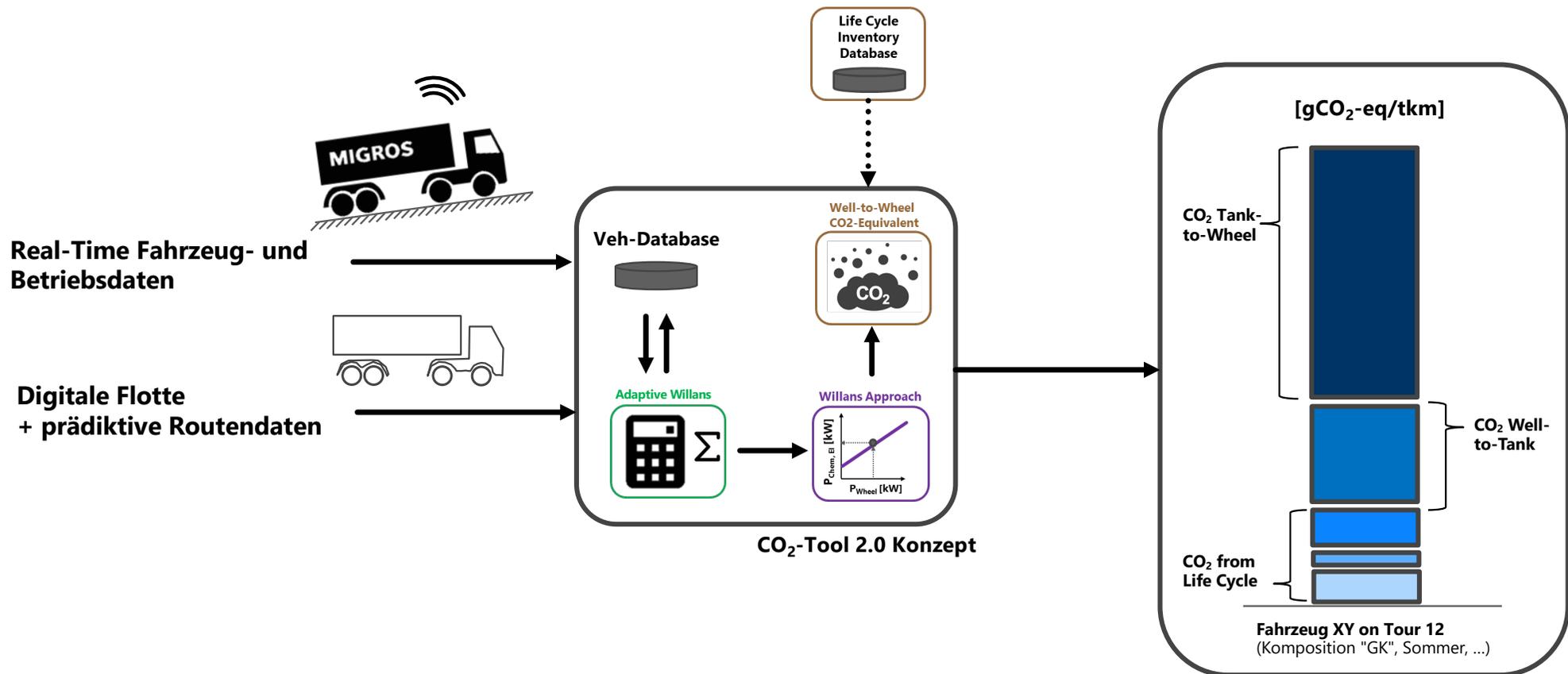
| Zeit | Routen Nr. |  |  |  |  |  |  |
|----------|------------|---|---|---|---|---|--|
| 01.04.21 | 12 | ZF + GK | 55km/h | 33 L/100km | 15°C | 12.3t | 146kW |
| 02.04.21 | 5 | ZF + MK | 60km/h | 29 L/100km | 15°C | 10.2t | 88kW |
| 02.04.21 | 2 | ZF + GK(TK) | 45km/h | 35 L/100km | 15°C | 15.5t | 102kW |
| 03.04.21 | 14 | ZF + GK | 50km/h | 30 L/100km | 15°C | 14.2t | 75kW |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |



"Digital Twin"

Ausblick auf weiterführende Konzepte

Einbezug von detaillierten LCA Daten für Fahrzeuge und Antriebsvarianten



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!



Philippe Zimmermann

Empa
Abt. Fahrzeugantriebssysteme
Überlandstrasse 129
8600 Dübendorf

philippe.zimmermann@empa.ch

Speziellen Dank geht an:

Rainer Deutschmann

Thomas Wunderli

Tobias Geisser

MIGROS

Migros-Genossenschafts-Bund

Direktion Sicherheit & Verkehr

Limmatstrasse 152

8005 Zürich