

# Dekarbonisierung des Strassentransportes

---

Prädiktiver Modellansatz zur Bestimmung von CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Modellierung von schweren Nutzfahrzeugen mit unterschiedlichen Antriebssystemen**
- **Entwicklung und Validierung eines prädiktiven CO<sub>2</sub>-Tools**
- **Implementierung in das Supply Chain Managementsystem des MGB**
- **Ausblick auf weiterführende Konzepte**

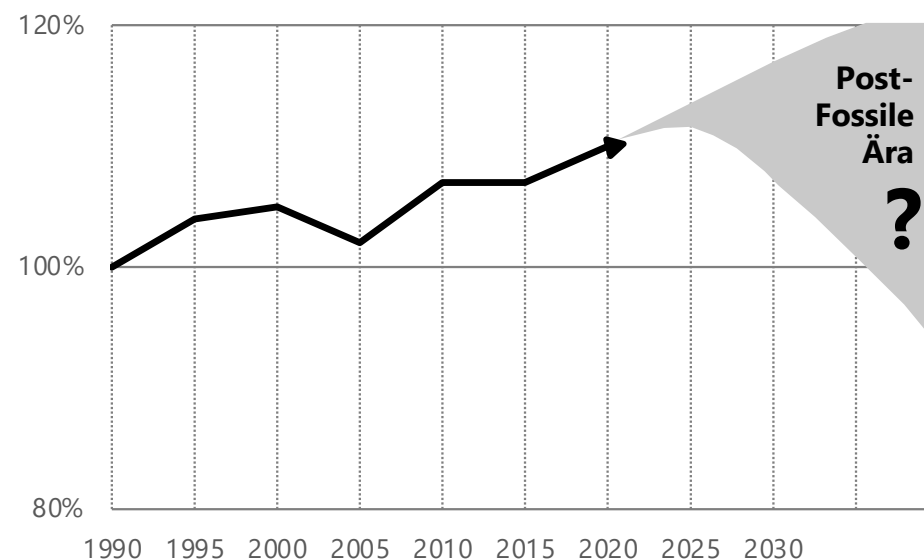
# Mindset "Dekarbonisierung im Transportsektor"

Quelle:  
Revidiertes CO<sub>2</sub>-Gesetz, Faktenblatt Nr 5., Gebäude und Mobilität  
BFE und BAFU, 2021

## CO<sub>2</sub>-Zielwerte für Fahrzeuge

Zielwerte	2015–2019	2020–2024	2025–2029	Ab 2030
Personenwagen	130 g CO <sub>2</sub> /km	95 g CO <sub>2</sub> /km	-15% ggü. EU 2021	-37,5% ggü. EU 2021
Lieferwagen und leichte Sattelschlepper bis 3,5t	Kein Ziel	147 g CO <sub>2</sub> /km	-15% ggü. EU 2021	-31% ggü. EU 2021
Schwere Fahrzeuge	Kein Ziel	Kein Ziel	-15% ggü. EU 2019/2020	-30% ggü. EU 2019/2020

## Entwicklung der CO<sub>2</sub>-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)



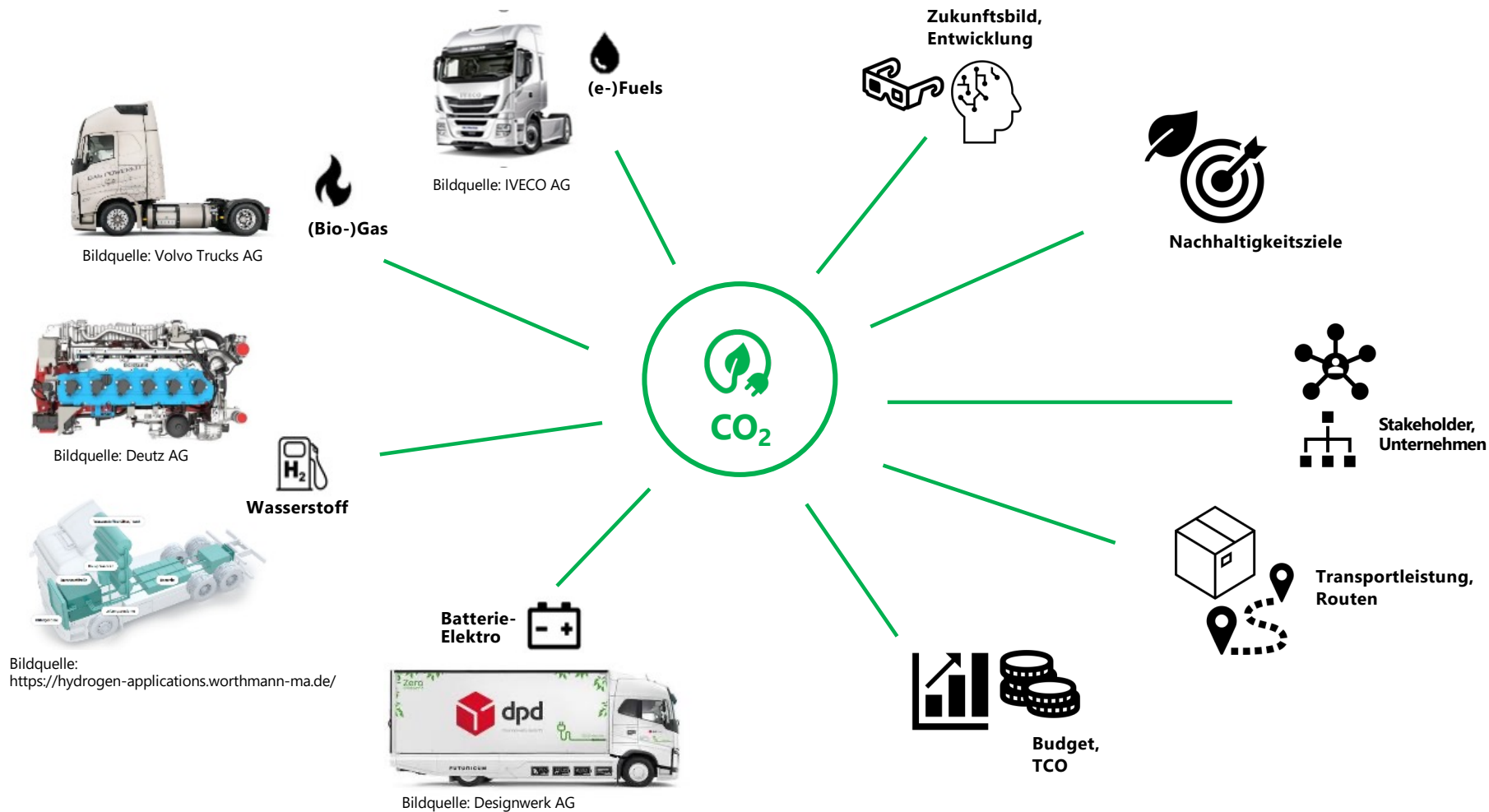
**+58%**  
Lieferwagen (Fahrzeugkilometer)



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 **CO<sub>2</sub>-Ansatzes** für schwere Nutzfahrzeuge mit den Antriebssystemen: **Diesel, Biodiesel, Biogas, Batterie-elektrisch und H<sub>2</sub>-Brennstoffzelle**
- **Integration** des Ansatzes in das Supply-Chain-Management-Tool der Migros (**Migros OPEX –Tower**<sup>1</sup>).

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

# Methodik zur Energiebedarfsberechnung

Unter Berücksichtigung der Fahrzeugphysik und des Routenverlaufs



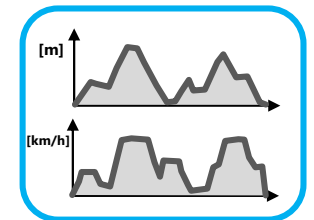
## Antriebsleistung am Rad

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

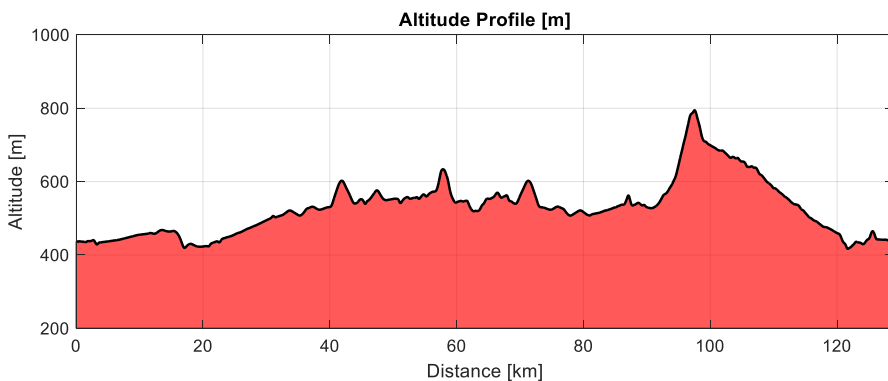
- Leistungsanteil infolge **aerodyn. Widerstand**
  - $c_w$  - Aerodynamischer Widerstandskoeffizient
  - $A_{FZ}$  - Anströmfläche
  - $\rho_{Luft}$  - Umgebungsluftdichte
  - $v^3$  - (Geschwindigkeit)<sup>3</sup>
- Leistungsanteil infolge **Reibwiderstand**
  - $c_R$  - Rollwiderstandskoeffizient
  - $m_{FZ}$  - 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)
  - $\alpha$  - Strassensteigungswinkel
  - $v$  - Geschwindigkeit



Fahrzeug Daten

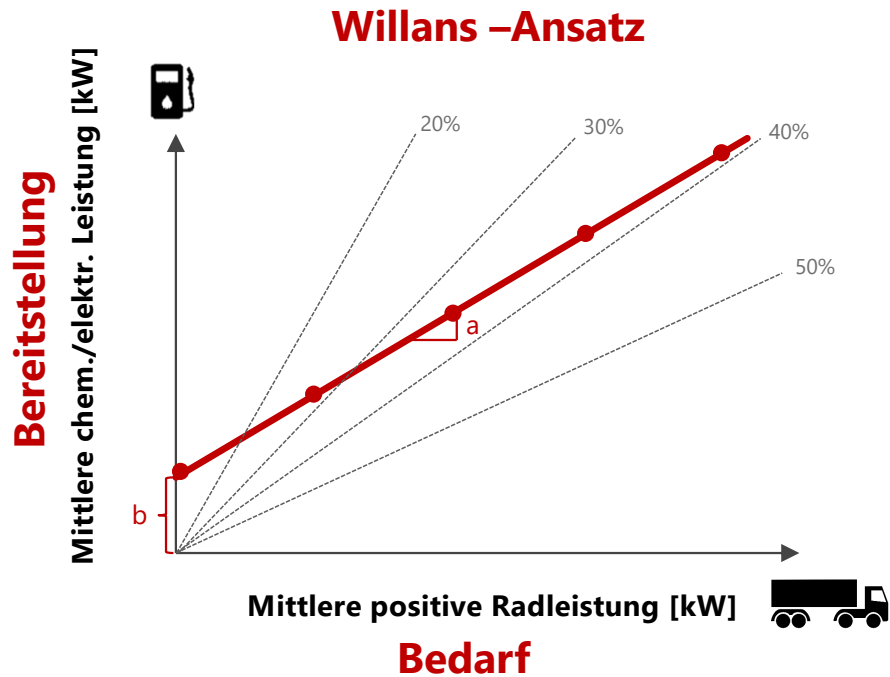


Routen  
Informationen

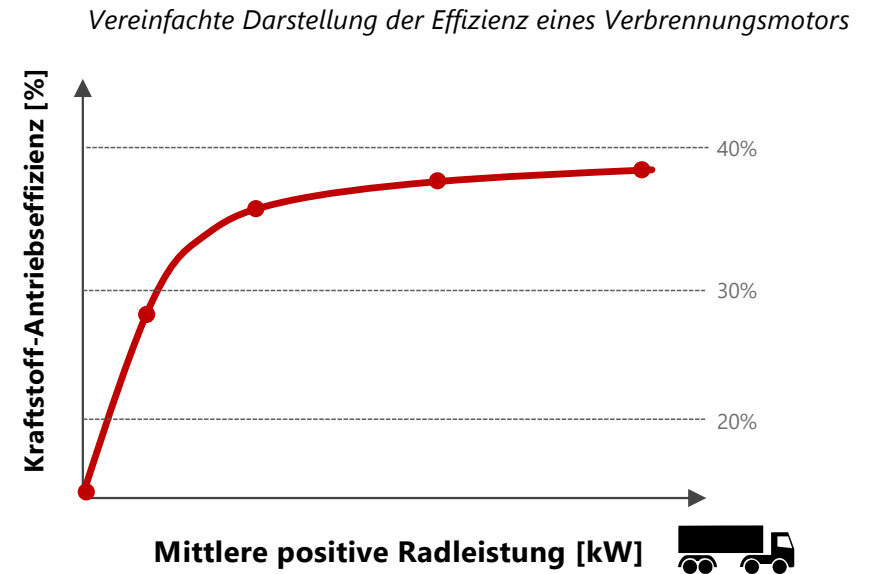


# Methodik zur Energiebedarfsberechnung

Der Willans-Ansatz



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

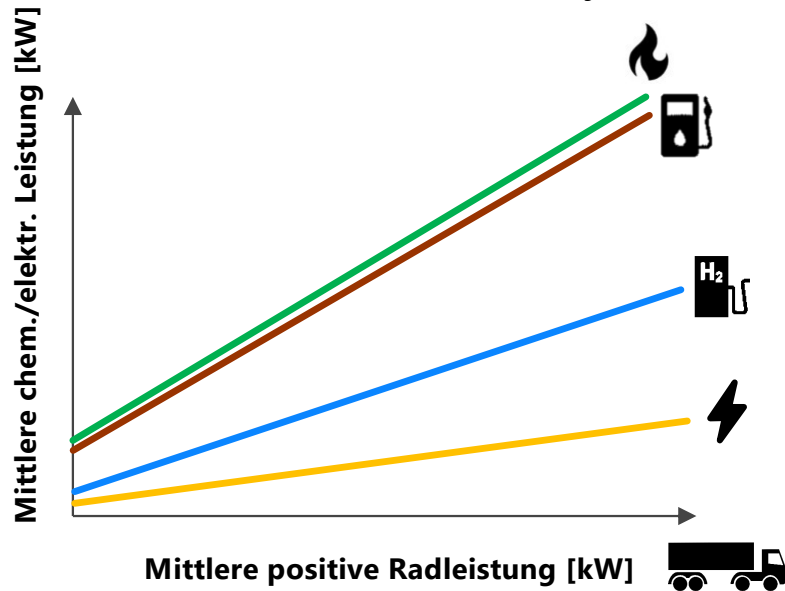


$$\eta_{Antrieb} = \frac{\bar{P}^+_{Rad}}{\bar{P}_{chem,el}}$$

# 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

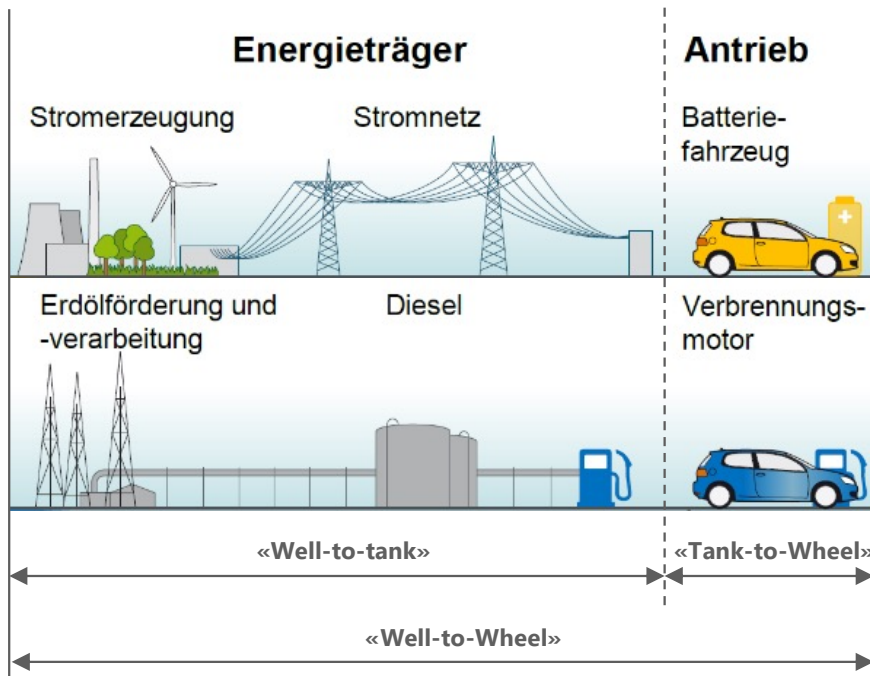
Literatur-Referenz:

"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 CO<sub>2</sub>-Tools

Terminologie – "Well-to-Wheel"



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

## Bezug "Tank-to-Wheel"

- **CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Betrieb des Fahrzeuges**
- Berechnung der **CO<sub>2</sub>-Werte** mittels **Kohlenstoffanteil im Treibstoff** <sup>1</sup>
- Elektrische Energieträger und Wasserstoff haben **keinen Kohlenstoffanteil**

## Bezug "Well-to-Tank"

- **CO<sub>2</sub>-Emissionen der Vorkette** des Energieträgers:
  - Bereitstellung (Produktion & Transport)
  - Emissionsfaktoren basierend auf Angaben BFE <sup>2</sup>
- **CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Tools

Emissionsfaktoren

## Verbrauch

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

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

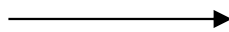
$$\left[ \frac{kg}{100km} \right]$$

Emissionsfaktoren

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

Emissionsfaktoren

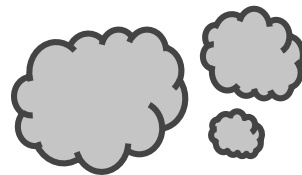
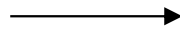
$$\left[ \frac{kgCO_2}{kg, L, kWh} \right]$$



## CO<sub>2</sub>-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 **CO<sub>2</sub>** 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):

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

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

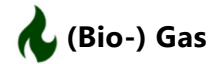
# Entwicklung eines prädiktiven CO<sub>2</sub>-Tools

"Digitale" Flotte

## Antriebssysteme



Diesel



(Bio-) Gas



Electro



H<sub>2</sub>

Flotten-Struktur

3.5-7.5t



Städtische Verteilung, "Last Mile"

18t



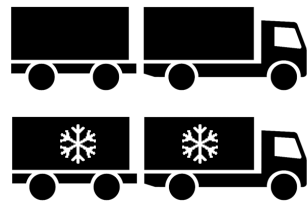
Regionale + Städtische Verteilung

32t



Lang-Distanz Transport

32t

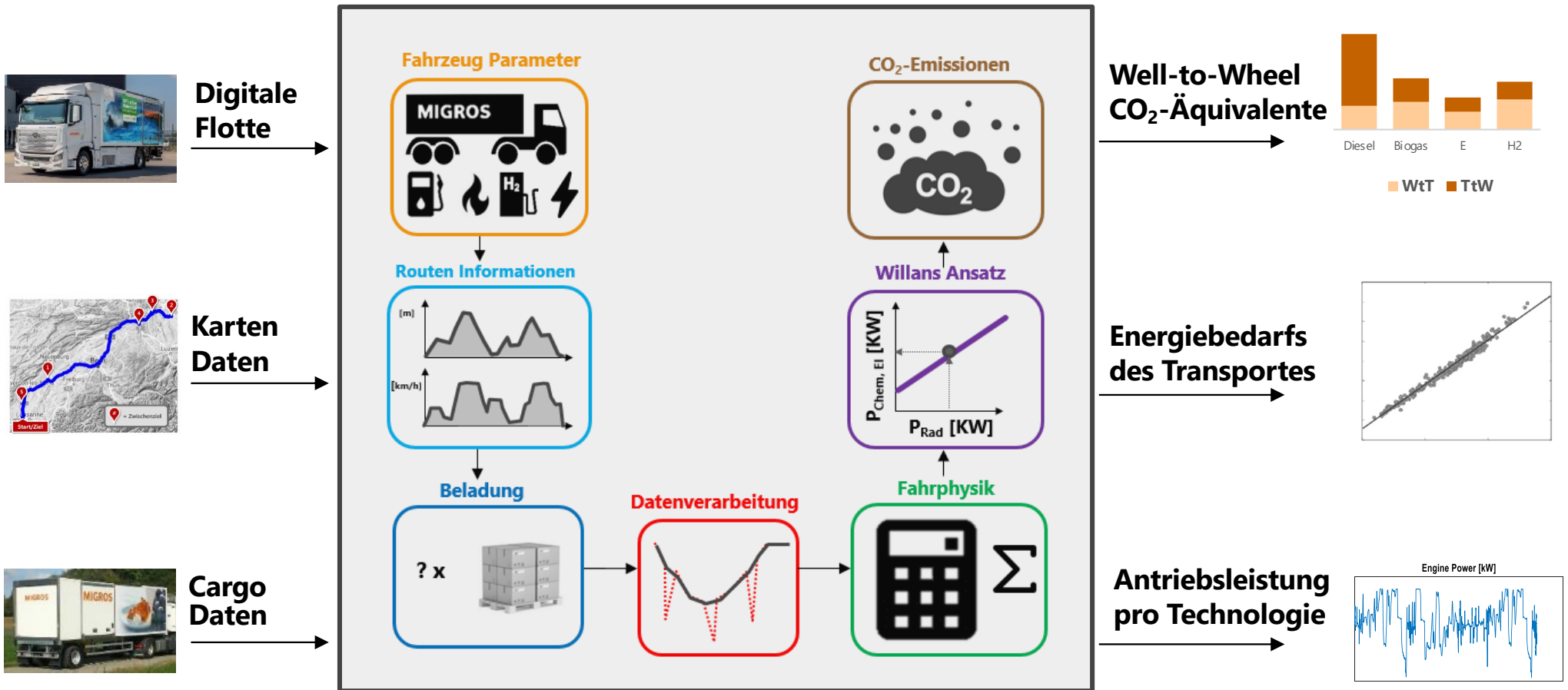


Lang-Distanz Transport



# Entwicklung eines prädiktiven CO<sub>2</sub>-Tools

Berechnungsschema (vereinfacht)

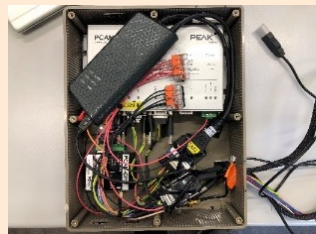


Bilderquelle: Migros

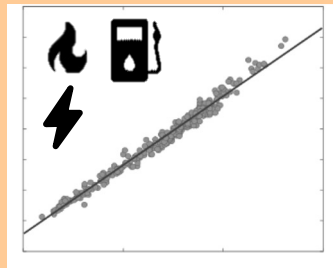
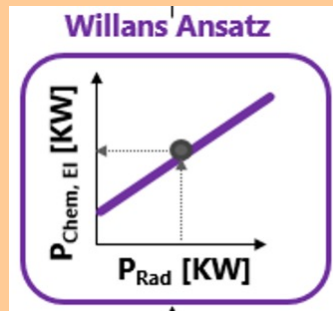
# Entwicklung eines prädiktiven CO<sub>2</sub>-Tools

Validierung des Algorithmus - Vergleich Modell vs. Messung

## Fahrzeug-Messungen



## Verifizierung der Willans-Parameter



## Berechnung Energiebedarf durch Modell, Vergleich mit Fahrzeug-Messung

Modell vs. Messung



$\Delta$  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 "CO<sub>2</sub>-Insights"

CO<sub>2</sub> Insights | CO<sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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
<b>Gesamt</b>	<b>15,25</b>	<b>54,55</b>	<b>20,05</b>	<b>14,33</b>

Technology usable:  BIO  DI  EL  H2

Daten von Routen und Fahrzeugkompositionen







Prädiktierte CO<sub>2</sub>-Emissionen für alle Antriebsvarianten

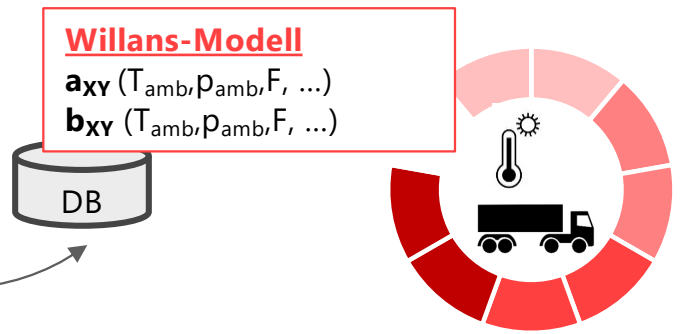
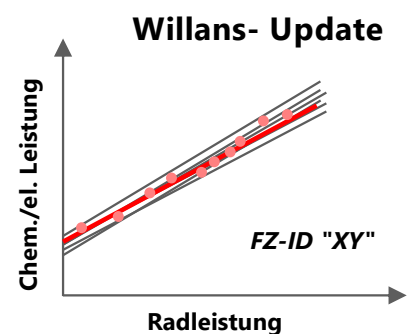
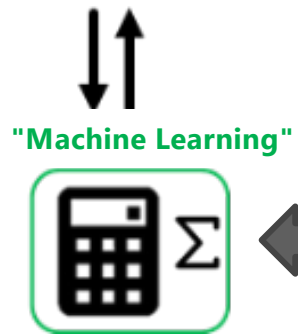
Routeninformation und prädiktierte Betriebszustände

# Ausblick auf weiterführende Konzepte

Selbstlernender, adaptiver Willans Ansatz – "Digital Twin"

## Database für Fahrzeug XY

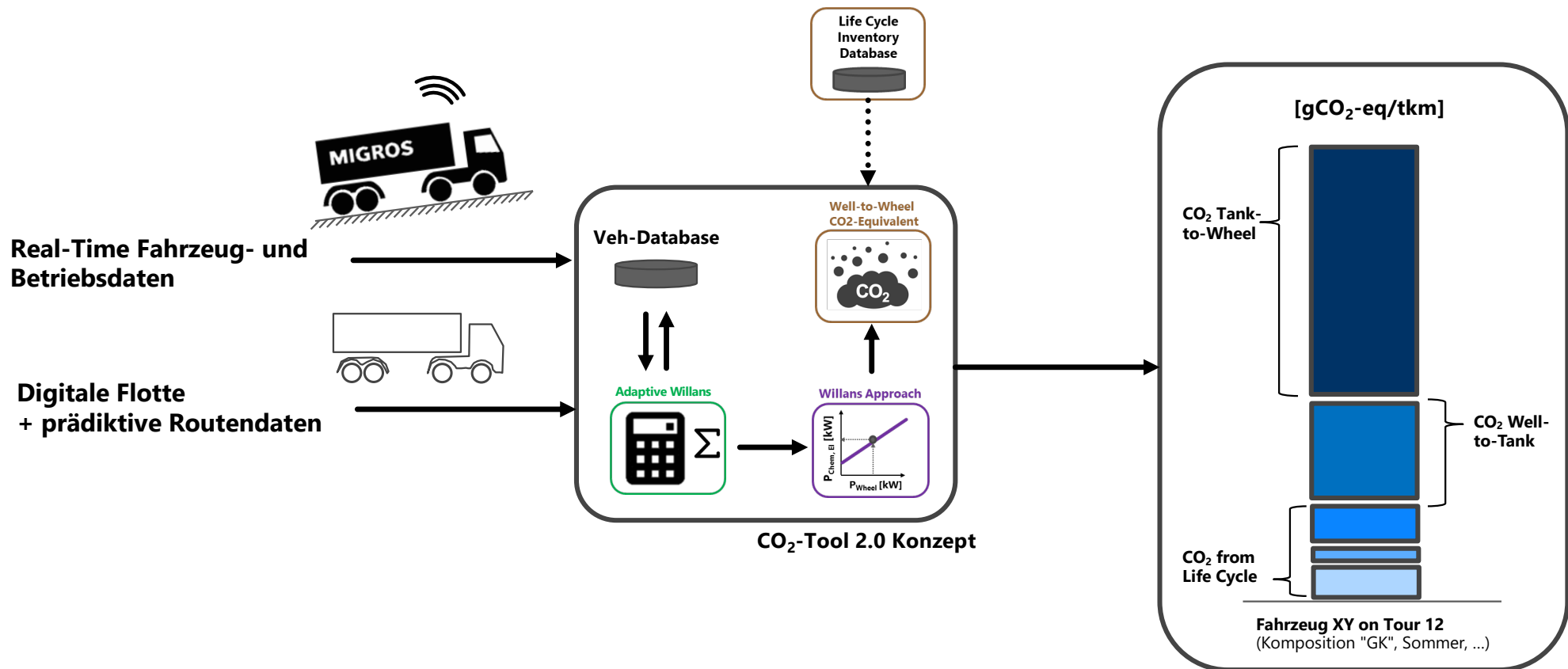
Zeit	Routen Nr.						
01.04.21	12	ZF + GK	55km/h	33 L/100km	15°C	12.3t	146kW
02.04.21	5	ZF + MK	60km/h	29 L/100km	15°C	10.2t	88kW
02.04.21	2	ZF + GK(TK)	45km/h	35 L/100km	15°C	15.5t	102kW
03.04.21	14	ZF + GK	50km/h	30 L/100km	15°C	14.2t	75kW
...	...	...	...	...	...	...	...



"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](mailto: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