

# Die post-fossile Mobilität

vor dem Hintergrund eines sich ändernden  
Energiesystems

**Christian Bach**

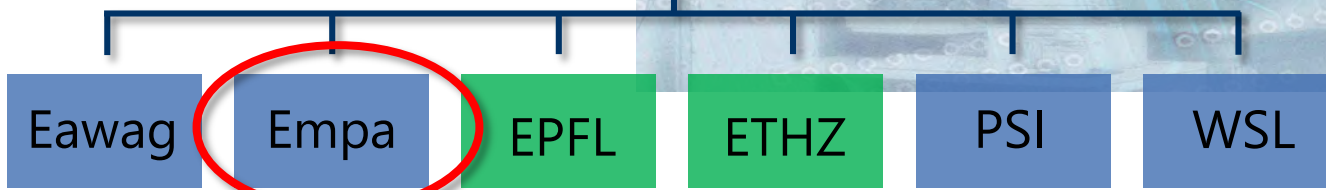
Abteilungsleiter Fahrzeugantriebssysteme

# Empa – eine Forschungsanstalt im ETH-Bereich

für Materialwissenschaften und Technologie

Eidgenössisches Departement für Wirtschaft,  
Bildung und Forschung WBF

ETH-Rat



**Guy Parmelin**  
Bundesrat



**Prof. Dr. Michael O. Hengartner**  
Präsident ETH-Rat



**Prof. Dr. Tanja Zimmermann**  
Direktorin Empa



*erneuerbare anstelle von fossiler Energie*

**Netto Null CO<sub>2</sub>**  
*Negative CO<sub>2</sub>-Emissionen*

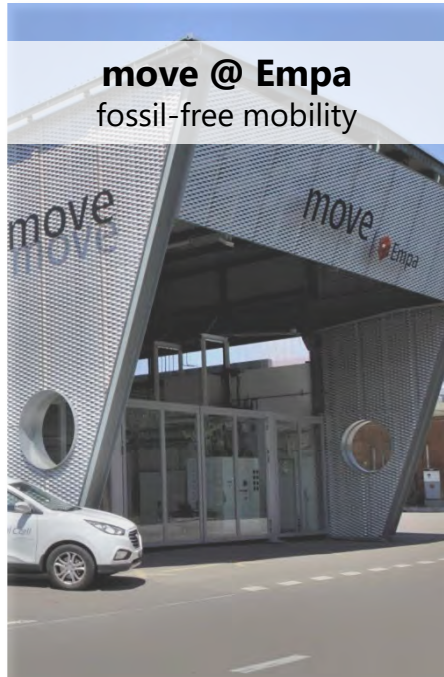
**bis 2050**

*Nutzung bestehender Handelsmechanismen  
und Infrastrukturen*

Bundesrat, 28.08.2019

# Future Mobility Demonstrator «move»

Die post-fossile Mobilität



**Personenwagen im Kurz- und Mittelstreckenbetrieb**  
Das neue «Standard-Fahrzeug» im PW-Bereich



**Lastwagen im Mittelstreckenbetrieb**  
Das neue «Standard-Fahrzeug» im Bereich des Strassengütertransports



**Langstrecken- und Lastmobilität**  
auf der Strasse, in der Luft und im Wasser

Forschung dazu  
an der Empa

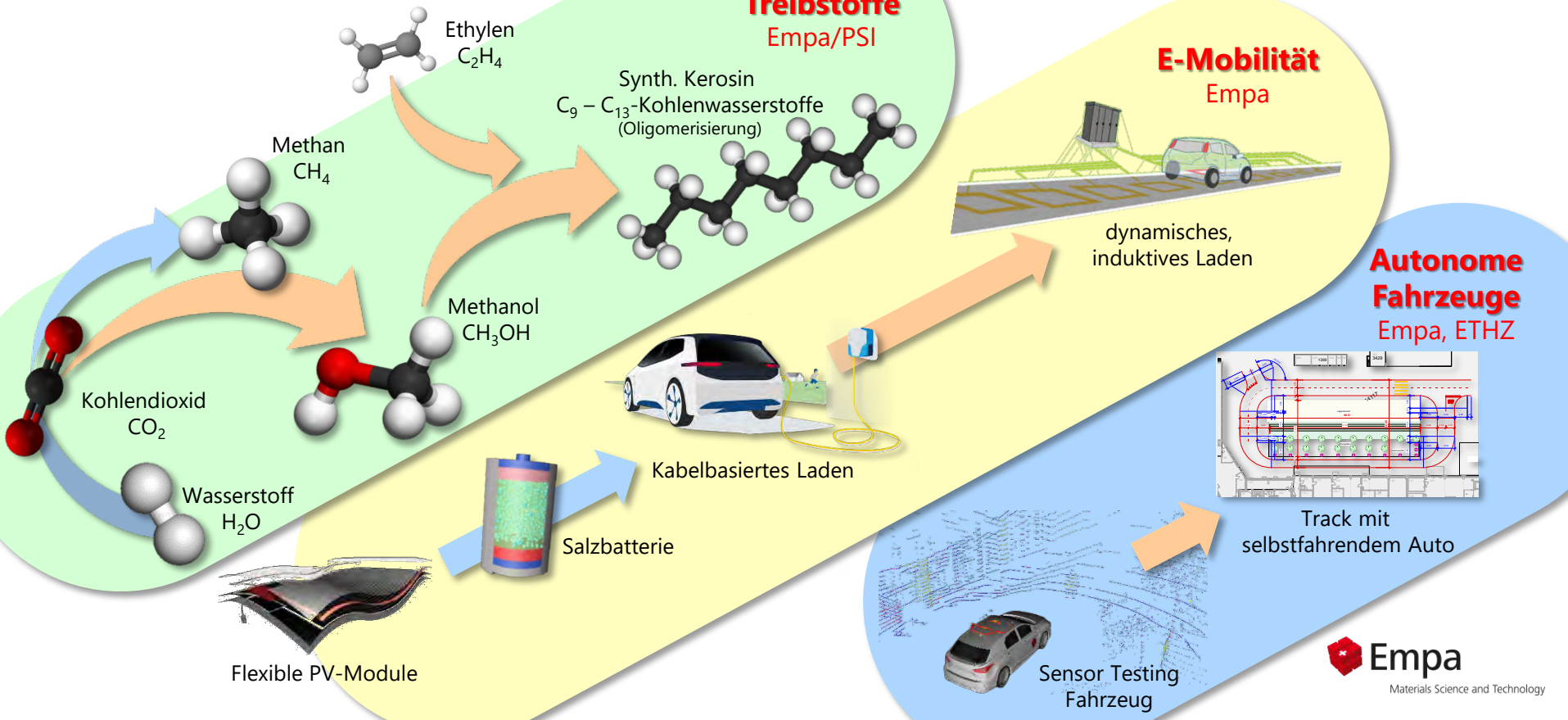
**Neue Batteriematerialien**  
**Ökobilanzierung**  
**Sicherheit**  
**Vehicle-to-Grid**  
**Simulation Energiesystem**

**Wasserstoffherzeugung**  
**Betankung**  
**Wasserstoff-Nutzung**

**Methanisierung**  
**Synthetisches Kerosin**  
**Brennverfahren für LKW-Motoren**

# Weiterentwicklung move 2023 – 2028

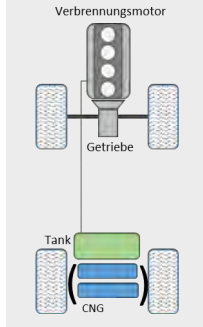
→ 2015-23; → 2023-28



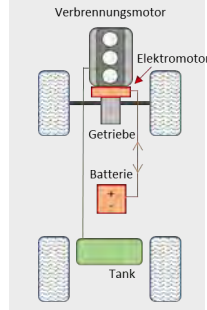
# Automobilantriebe und CO<sub>2</sub>-Emissionen

## Entscheidend ist der Umstieg auf erneuerbare Energie

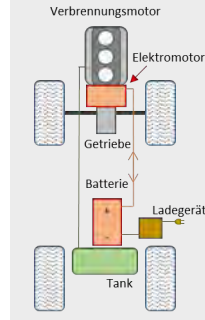
Benzin-/Diesel-/  
Gasfahrzeug



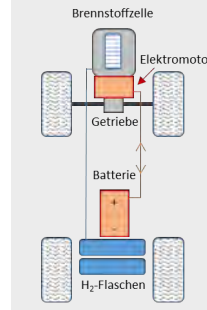
Hybrid-  
fahrzeug



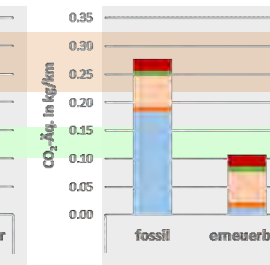
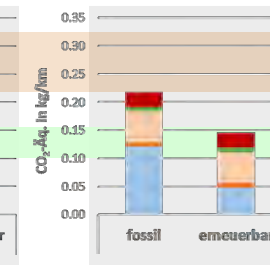
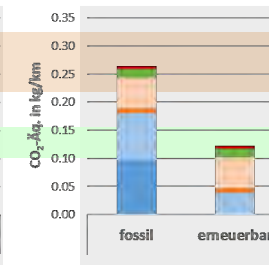
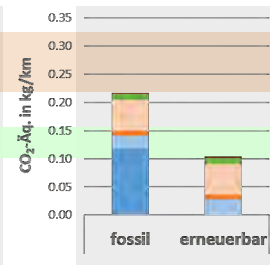
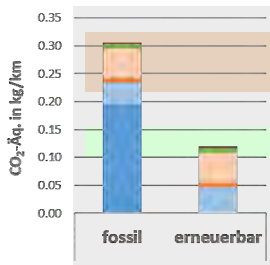
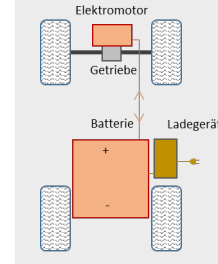
Plug-in-  
Hybrid-  
fahrzeug



Brennstoff-  
zellen-  
fahrzeug



Elektro-  
fahrzeug



Fossile Energie

Erneuerbare Energie

Quelle: calculator (PSI, 2020)  
Daten für Mittelklasse-PW



**Woher kommt  
die erneuerbare Energie?**

# Woher kommt die erneuerbare Energie?

Aus einheimischen und ausländischen Quellen

## erneuerbare **chemische** Energieträger

- Synthetische Kohlenwasserstoffe  
(Methan, Kerosin, Diesel, Benzin)



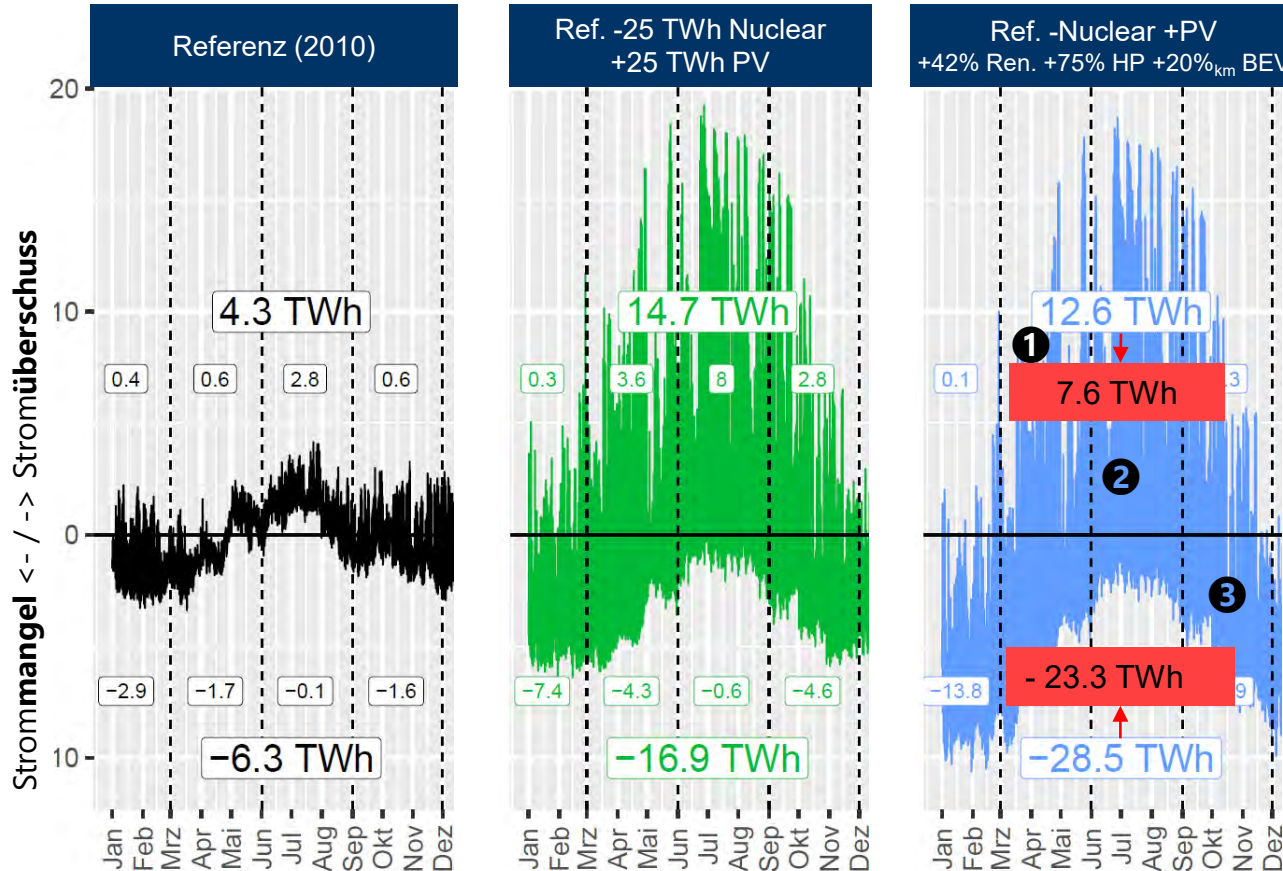
## erneuerbare **elektrische** Energie

- Wasserkraft
- Photovoltaik
- Windenergie



# Einheimische erneuerbare Elektrizität

Starke Sommer-Winter-Unterschiede bei der erneuerbaren Energie in Zukunft



## 1 Elektrofahrzeuge für den Tag-Nacht-Ausgleich

Erf. Speicherkapazität: 80 – 140 GWh

### Nutzung parkierter Elektroautos

3 Mio BEV → z.B. 60 GWh Speicher

## 2 Wasserstofffahrzeuge für die Nutzung von Stromüberschüssen

Verbl. Stromüberschuss: 7 – 8 TWh/a

### Wasserstoffproduktion für LKW

20'000 BZ-LKWs → 5.0 TWh<sub>H<sub>2</sub></sub> (8 TWh<sub>el</sub>)

## 3 Synth. Energieträger für Langstrecken LKWs und Winterstrom

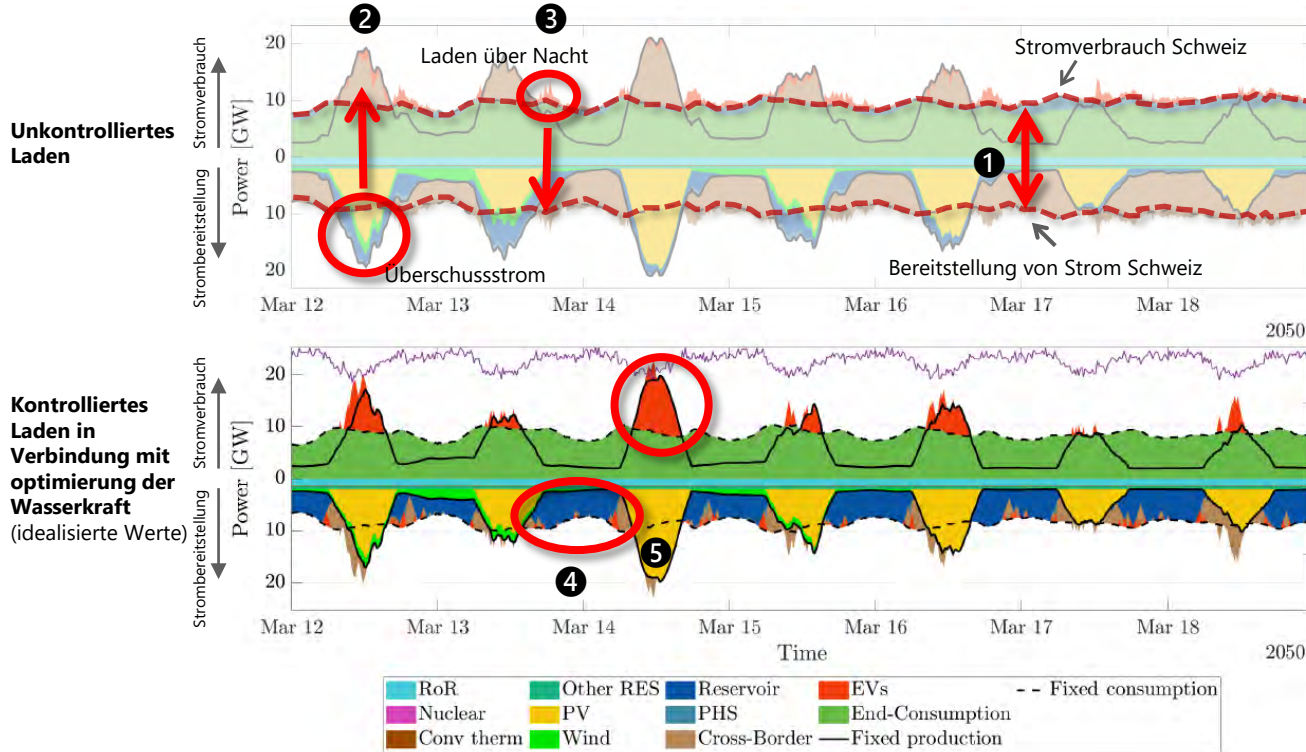
Stromimportbedarf: 10 - 20 TWh<sub>el</sub>

### Synthetische Energieträger & BHKW

5 GW<sub>el</sub> BHKW @ 4'000 FL-h/a

# Domestic renewable electric energy

## Potential of high impact by energy systemic battery charging



### «Antriebswede»

- 1 Strombereitstellung und Stromverbrauch müssen jederzeit ausgeglichen sein.
- 2 Überschüssiger Strom muss exportiert (hier dargestellt), umgewandelt oder abgeregelt werden.
- 3 Das nächtliche Laden kann den Bedarf an importiertem Strom erhöhen (ist potentiell fossiler Strom).

### «System-dienliche transformation»

- 4 Nachts kann der Strom aus den BEV-Batterien genutzt werden, um Haushalte mit Strom zu versorgen (und um das Auto anzutreiben).
- 5 Laden von BEVs während des Tages.

Quelle:  
Di Natale L. et al; The Potential of Vehicle-to-Grid to Support the Energy Transition: A Case Study on Switzerland; Energies (2022)

# Woher kommt die erneuerbare Energie?

Aus einheimischen und ausländischen Quellen

## erneuerbare **chemische** Energieträger

- Synthetische Kohlenwasserstoffe  
(Methan, Kerosin, Diesel, Benzin)



## erneuerbare **elektrische** Energie

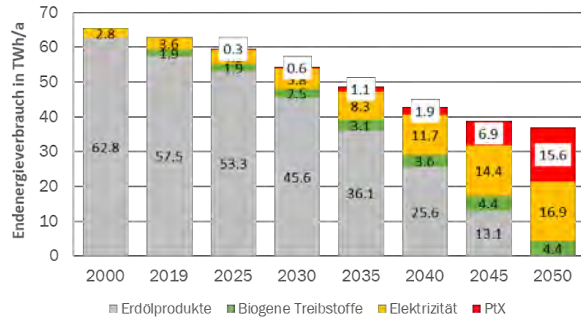
- Wasserkraft
- Photovoltaik
- Windenergie

# Dekarbonisierung von Strassen/Luftverkehr & Industrie

## BFE Energieperspektive 2050+

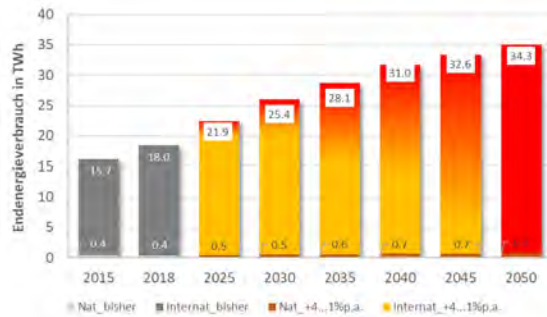
### Strassenverkehr

PtX-Bedarf: 16 TWh<sub>th</sub>/a bis 2050



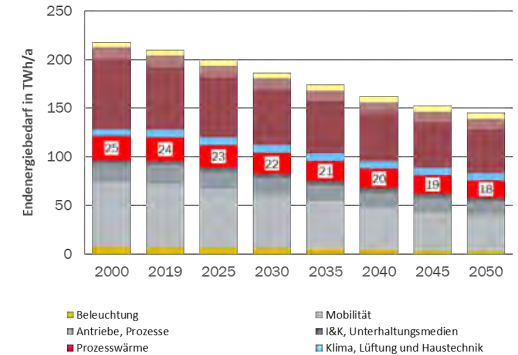
### Flugverkehr ab CH (National + International)

PtX-Bedarf: 1 bis >30 TWh<sub>th</sub>/a bis 2050



### Industrielle Prozesswärme in CH

PtX-Bedarf: bis 18 TWh<sub>th</sub>/a bis 2050



Quelle: BFE Energieperspektiven 2050+, Szenario «ZERO Basis»

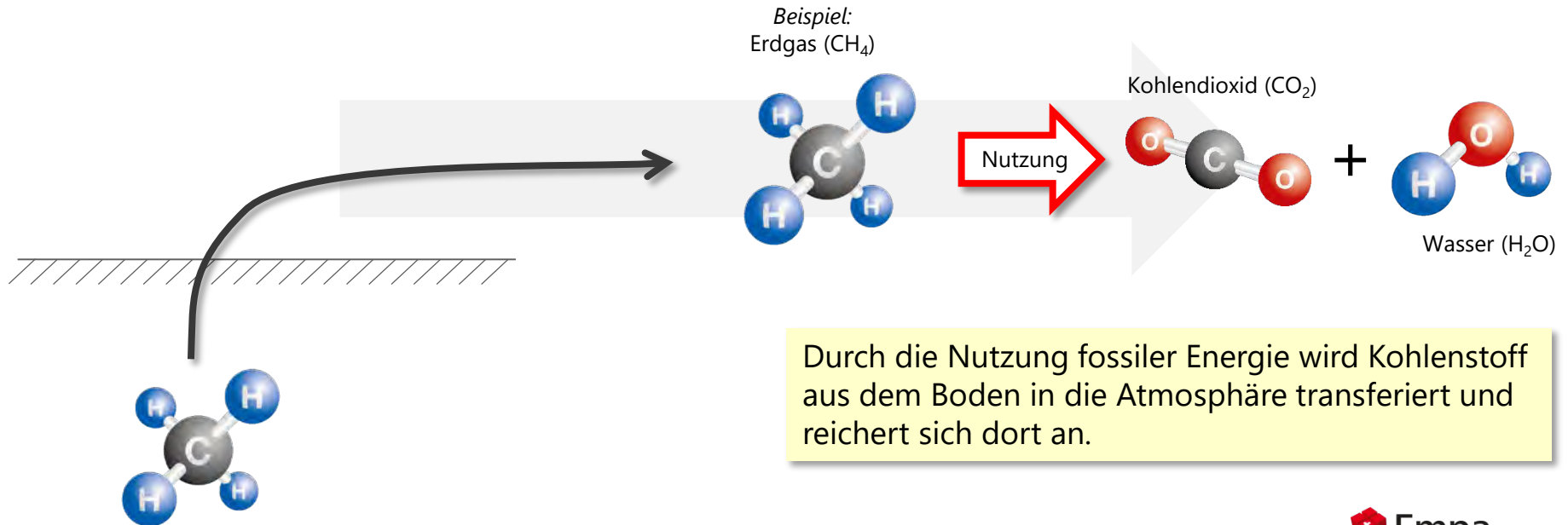
Quelle: BAFU THG-Inventar; ab 2020: +4 ... 1%p.a.

Quelle: BFE Energieperspektiven 2050+, Szenario «ZERO Basis»

Um den Strassen- und Luftverkehr sowie industriellen Hochtemperaturprozesse vollständig auf erneuerbare Energie umzustellen, werden **20 TWh an erneuerbarer elektrischer Energie** sowie **30 – 60 TWh an erneuerbaren chemischen Energieträgern** (oben rot eingefärbt) benötigt.

# Was sind fossile Energieträger?

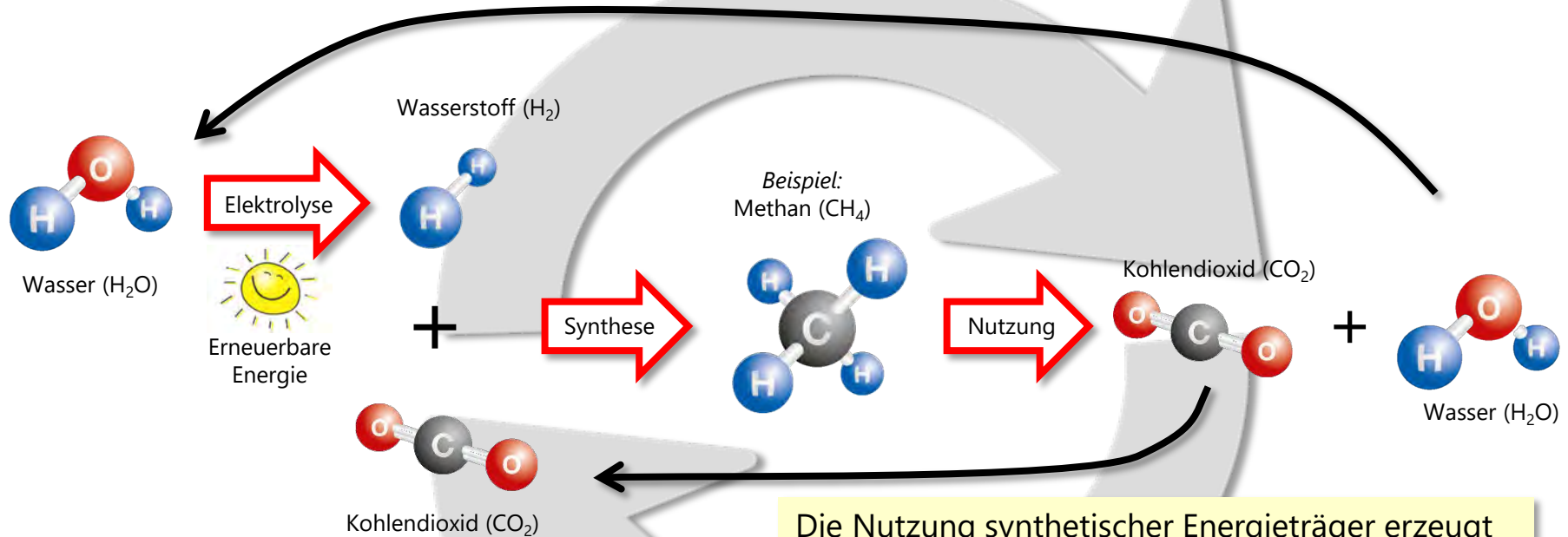
Fossile Energieträger mit linearem Kohlenstoff-Transfer in die Atmosphäre



Durch die Nutzung fossiler Energie wird Kohlenstoff aus dem Boden in die Atmosphäre transferiert und reichert sich dort an.

# Was sind synthetische Energieträger?

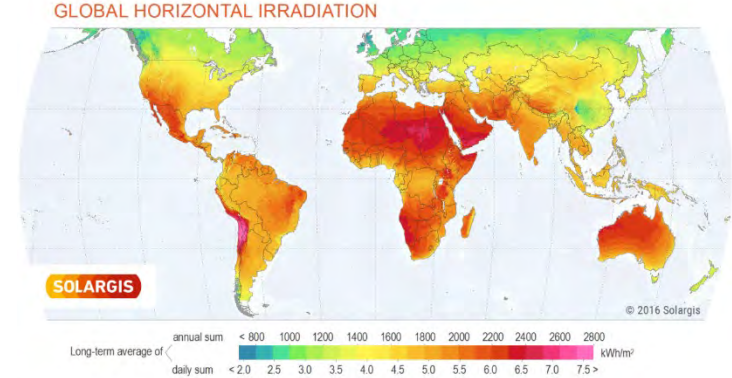
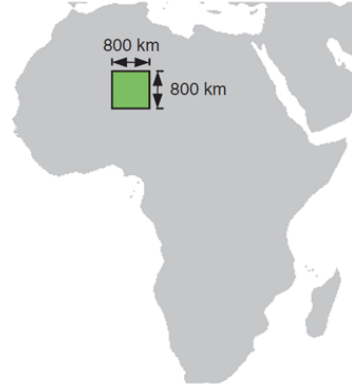
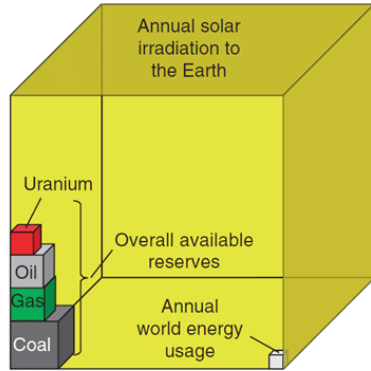
**Synthetische** Energieträger mit zirkulärer CO<sub>2</sub>- (und Wasser-)Nutzung



Die Nutzung synthetischer Energieträger erzeugt nur soviel CO<sub>2</sub>, wie zuvor für die Herstellung aus der Atmosphäre entzogen wurde.

# Woher kommt die erneuerbare Energie

Die Welt hat kein Energieproblem (sondern ein CO<sub>2</sub>-Problem)



Schweiz  
1'100 kWh/m<sup>2</sup>/a



Oman  
2'200 kWh/m<sup>2</sup>/a

Die Sonne «schickt» pro Jahr sehr viel mehr (Sonnen-)Energie auf die Erde, als die Welt je brauchen wird.

Quelle: Burlafinger Klaus; Development of a High Irradiance Setup for Precisely Controlled Accelerated Photo-Degradation of Organic Solar Cells; Doktorarbeit Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Riesige ungenutzte Flächen und doppelte Sonneneinstrahlung im Sonnengürtel.

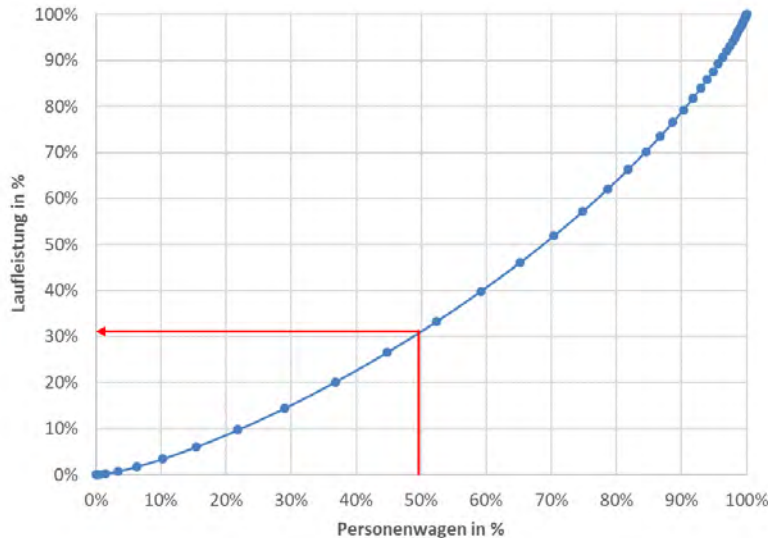
A high-angle, nighttime photograph of a severe traffic jam on a city street. The scene is filled with numerous cars, their headlights and taillights glowing in the dark. A large bus is visible on the right side of the frame. The overall atmosphere is one of congestion and urban activity.

**Wie werden Fahrzeuge  
betrieben?**



# Wie werden Fahrzeuge betrieben?

Hohe Relevanz der Langstreckenfahrzeuge



## Analyse von 1.5 Mio Autscout24 Personenwagen Inseraten (nur Privatfahrzeuge)

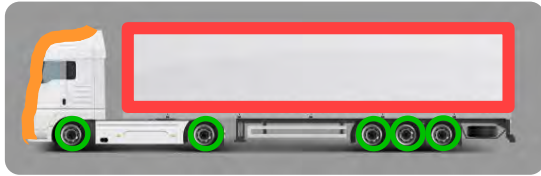
- 50% der Personenwagen sind für 31% der Fahrleistung aller Personenwagen verantwortlich (durchschnittliche Fahrleistung: ca. 10'000 km/a).
- Die anderen 50% der Personenwagen sind für 69% der Fahrleistung aller Personenwagen verantwortlich (durchschnittliche Fahrleistung: ca. 22'000 km/a).

Quelle: Empa/PSI (2018)

# Realverbrauchs-Bestimmung von LKWs

Ziel: CO<sub>2</sub>-Emissionen als Dispositionsgrösse für den Einsatz von Distributions-LKWs

## Fahrzeugparameter

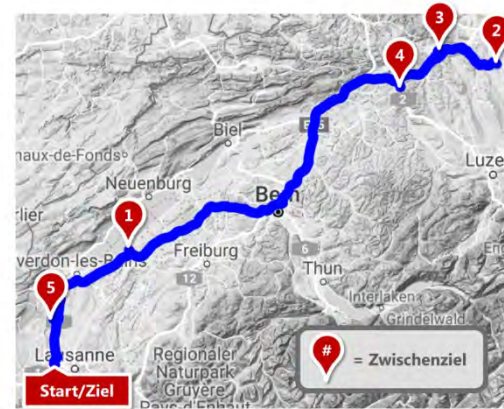


Die folgenden Widerstände müssen von der Antriebskraft überwunden werden, um einen LKW zu beschleunigen :

- Luftwiderstand  $F_L$ :  $F_L = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$
- Rollwiderstand  $F_R$ :  $F_R = \mu \cdot m \cdot g$
- Beschleunigungswiderstand  $F_B$ :  $F_B = m \cdot \frac{dv}{dt}$
- Steigungswiderstand  $F_A$ :  $F_A = m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$

$c_w$  = drag coefficient;  $\rho$  = air density;  $A$  = frontal area;  $v$  = speed;  $\mu$  = rolling resistance coefficient;  $m$  = vehicle mass;  $t$  = time;  $g$  = gravity;  $\alpha$  = slope;  $M_{mot}$  = engine torque;  $i_G$  = gear ratio;  $i_D$  = axle ratio;  $\eta$  = efficiency;  $r_{Rad}$  = Radius drive wheel

## Routeninformation

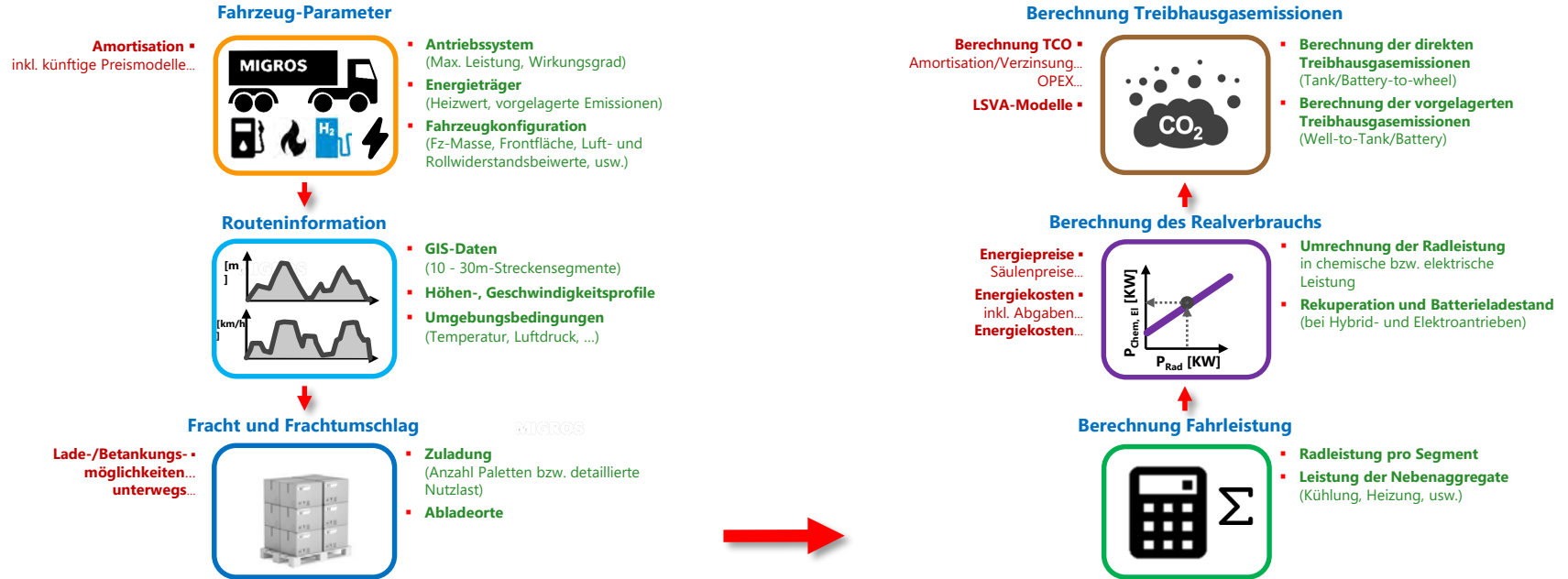


### GIS-Datenauswertung

- Topographisches Profil
- Die Verkehrssignalisierung wird zur Berechnung des hypothetischen Geschwindigkeitsprofils verwendet

# Realverbrauchs-Bestimmung

Routen- und Einzelfahrzeugspezifische Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und TCO

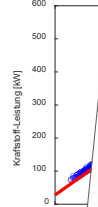
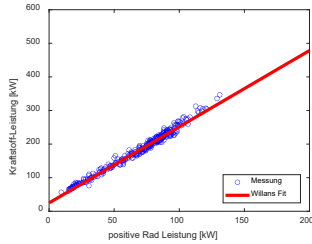


# Realverbrauchs-Bestimmung

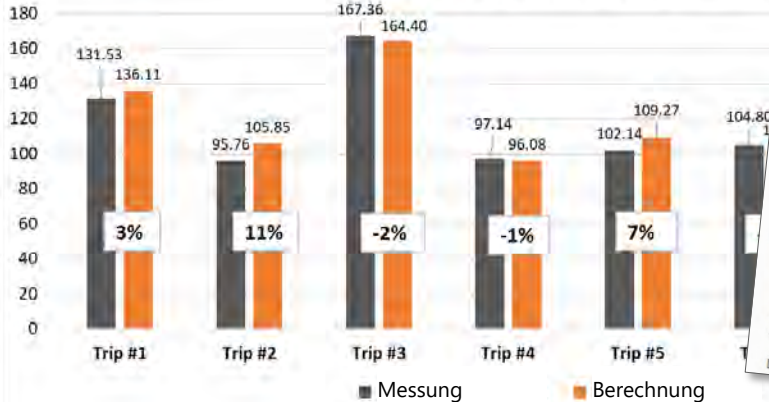
Validierung

## Antriebsmodell

### Diesel



## Verbrauchsmessung und -Berechnung



## Software für Fuhrparkmanager LKW-Flotten möglichst ökologisch betreiben

20.01.2022 | CHRISTIAN BACH, RAINER KLOSE

Der Navigationssoftwarekonzern HERE übernimmt ein Software-Tool der Migros, das diese gemeinsam mit der Empa entwickelt hat und macht dieses weltweit verfügbar. Mit dem Tool lassen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Lastwagen mit verschiedenen alternativen Antriebssystemen für beliebige Routen berechnen. Es kann Logistikern weltweit aufzeigen, auf welchen Routen am besten Wasserstoff-, Elektro-, Biogas- oder Biodiesel-Lastwagen eingesetzt werden und wie hoch deren CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zu dieselbetriebenen Pendanten sind.



Alternative Antriebe senken den CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Güterverkehr: Wasserstoff- und Biogas-LKW der Migros. Bild: Migros  
Die Umstellung von Lastwagenflotten auf erneuerbare Energie ist ein Ziel vieler Flottenbetreiber weltweit. Das hat auch der global Gefährliche Distanz...

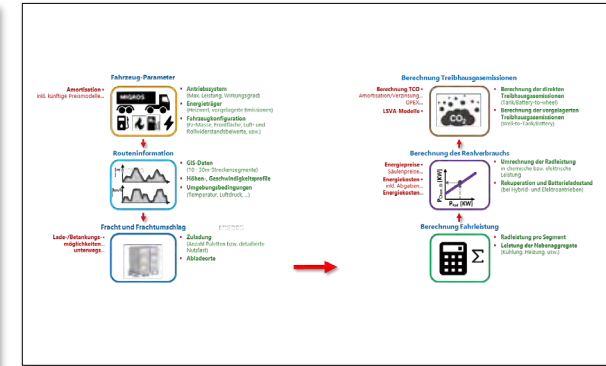
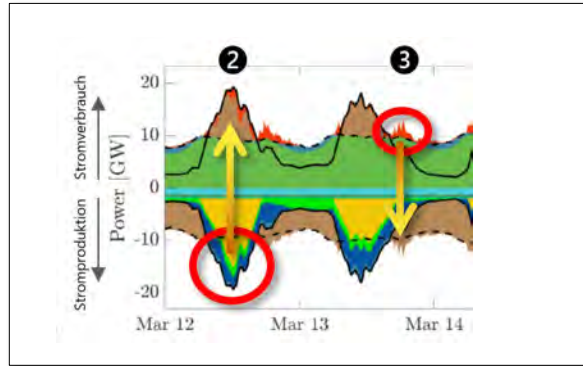
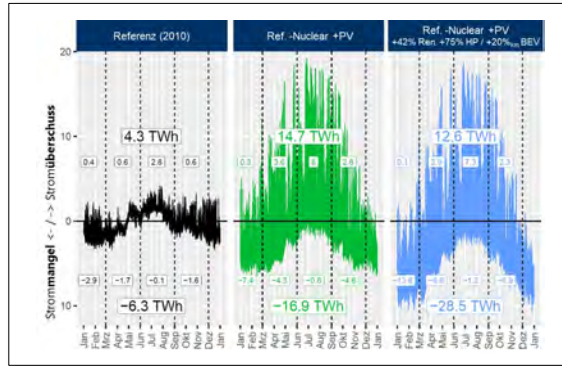
V)

Messung  
Wilans Fit

200

# Zusammenfassung

Eine ganzheitliche Sicht ist notwendig!



Der Umstieg von fossiler auf erneuerbare Energie ist notwendig aber nicht hinreichend für eine CO<sub>2</sub>-Reduktion!

**Das Ziel der Mobilität der Zukunft sollte deshalb sein, dass mehr erneuerbare Energie in das Energiesystem integriert werden kann (Speicherung, Nutzbarmachung von Überschüssen, Import synth. Treibstoffe).**

Wir müssen es "richtig" machen! Eine reine Antriebsstrangumstellung allein bringt möglicherweise keine wesentlichen CO<sub>2</sub>-Einsparungen.

**Wenn es gelingt, den Energieverbrauch zeitlich mit der regenerativen Energieproduktion zu koppeln, können Elektroautos hohe zusätzliche CO<sub>2</sub>-Einsparungen ermöglichen. Dies würde aber zum Beispiel dynamische Strompreismodelle erfordern.**

Die system-dienliche Transformation von Fahrzeugflotten ist anspruchsvoll.

**Software-gestützte Transformationskonzepte ermöglichen die Minimierung von Risiken und Kosten und die Maximierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen.**

# Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

**Dank KollegInnen:** Thomas Büttler  
Dr. Sinan Teske  
Dr. Martin Rüdisüli  
Dr. Florian Kiefer  
Dr. Brigitte Buchmann

**Bei Fragen:**  
[christian.bach@empa.ch](mailto:christian.bach@empa.ch)