

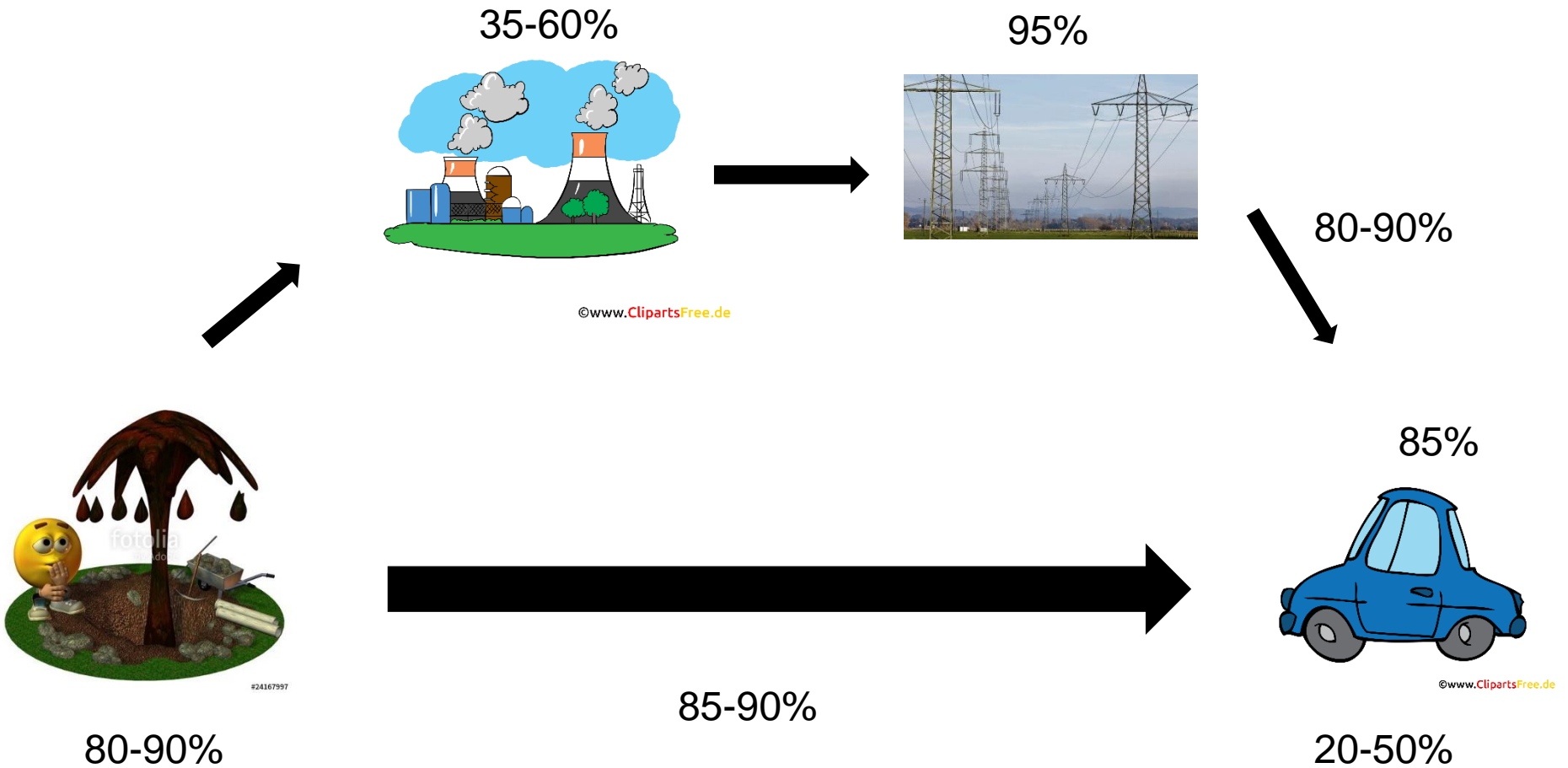


# Potentiale der Hybridisierung Wieviel Hybridisierung für wieviel Effizienzsteigerung

Prof. Dr. Christopher Onder

Institut für dynamische Systeme und Regelungstechnik  
(IDSC), ETH Zürich

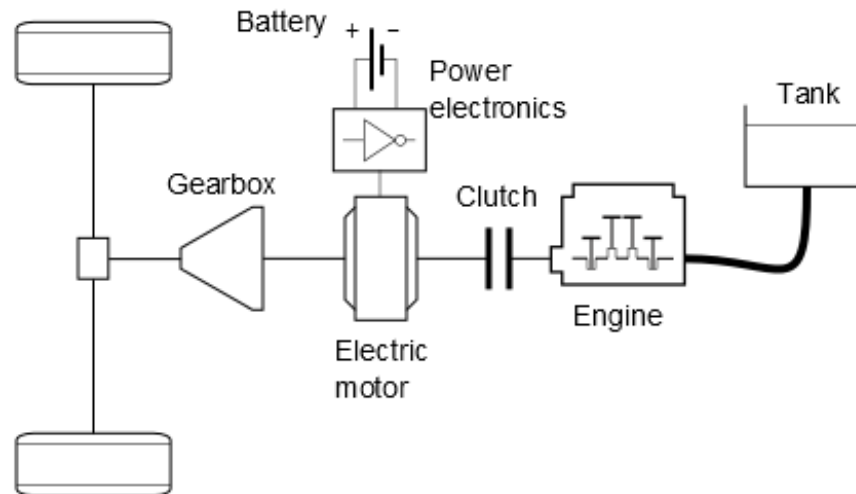
# Warum Hybrid?



# Hybride Antriebssysteme

- Wikipedia:  
Hybride Antriebssysteme bestehen aus einer Kombination von mindestens zwei verschiedenen und getrennten Energiespeicher- und Antriebssystemen.
- Zusätzlicher Freiheitsgrad kann zur Optimierung verwendet werden
- Zusätzliches System sollte komplementär sein, d.h. Stärken dort, wo das ursprüngliche System Schwächen hat

# Perfect Hybrid Vehicle



$$E_f = \frac{1}{\eta_{ft,max}} E_{diss}$$

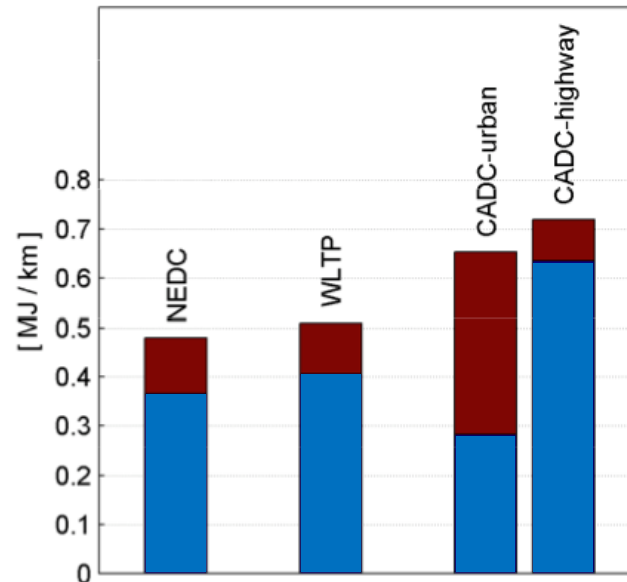
$E_{diss}$ : Dissipative Energie,  
Luftwiderstand + Rollreibung

$E_{circ}$ : Zirkulierende Energie,  
was im konventionellen Fzg  
verbremst wird

# Simulated Energy Demand for Vehicle

## Full-Size Vehicle

$m_v$	1500 kg
$A_f * c_d$	0.7 m <sup>2</sup>
$c_r$	0.012
$P_{aux}$	300 W



**Mittlere NEFZ Leistung**

**7 kW**

Maximale NEFZ Leistung

30 kW

Leistung für 10s 0-100km/h

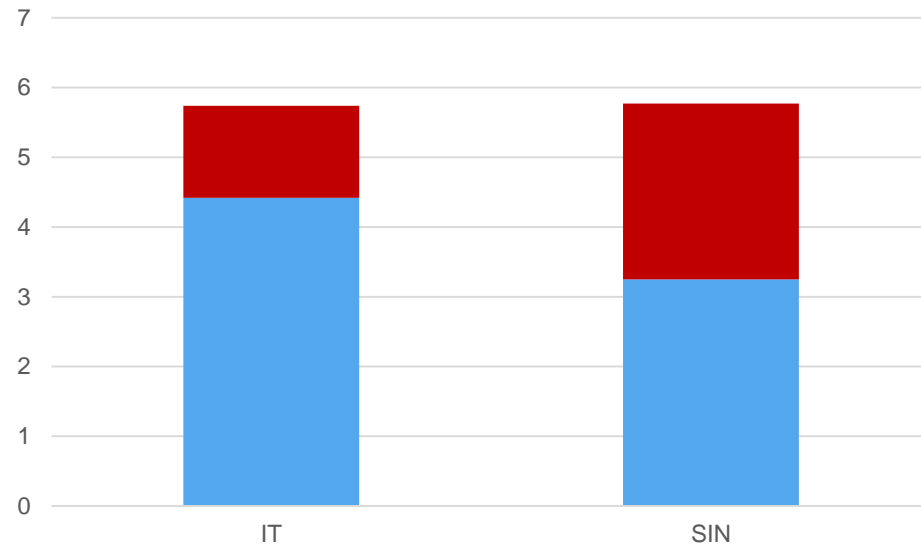
120 kW

# Another vehicle



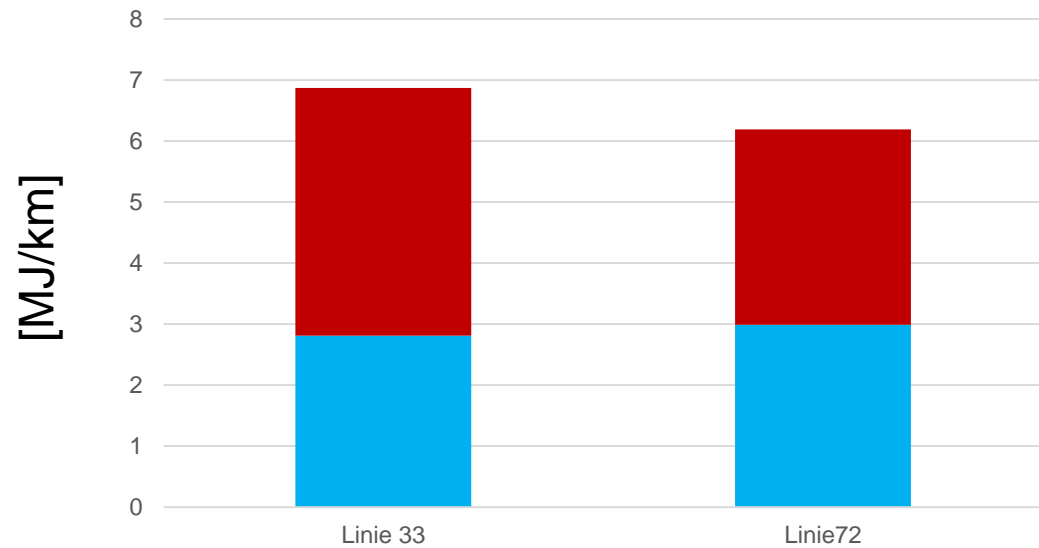
$m_v$	691 kg
$A_f * c_d$	1.1 m <sup>2</sup>
$c_r$	0.15
$P_{aux}$	2000 W

[MJ/km]



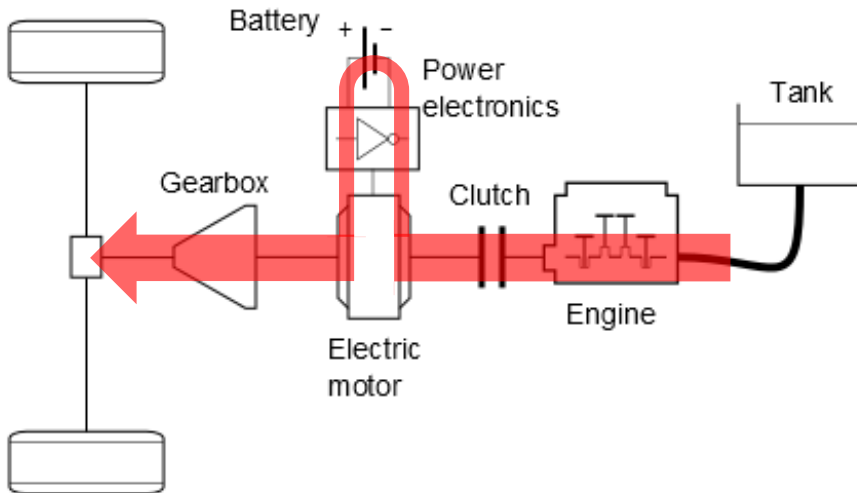
# And another one...

$m_v$	24000 kg
$A_f * c_d$	6.75 m <sup>2</sup>
$c_r$	0.009
$P_{aux}$	4000 W

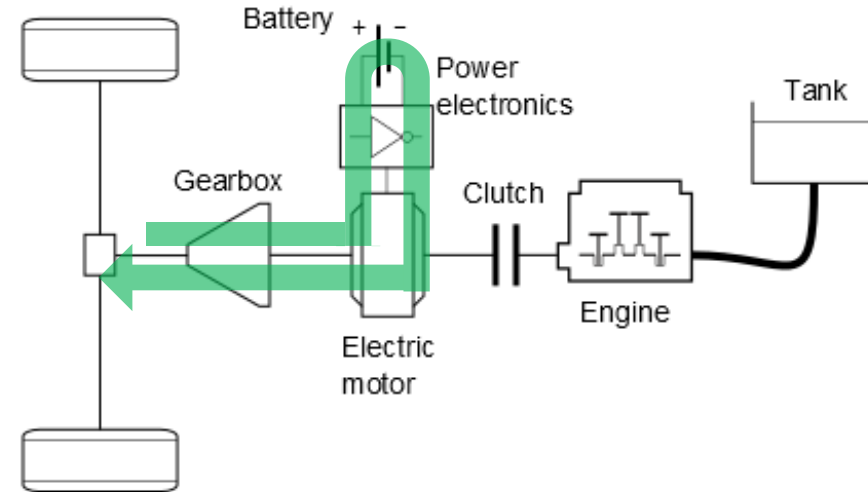


# Hybrid Vehicle

## Tank-to-Vehicle Efficiency ( $\eta_{ft}$ )



## Recuperation Efficiency ( $\eta_r$ )



$$E_f = \frac{1}{\eta_{ft}} (E_{diss} + (1 - \eta_r) \cdot E_{circ})$$

$E_{diss}$ : Dissipative Energie,  
Luftwiderstand + Rollreibung

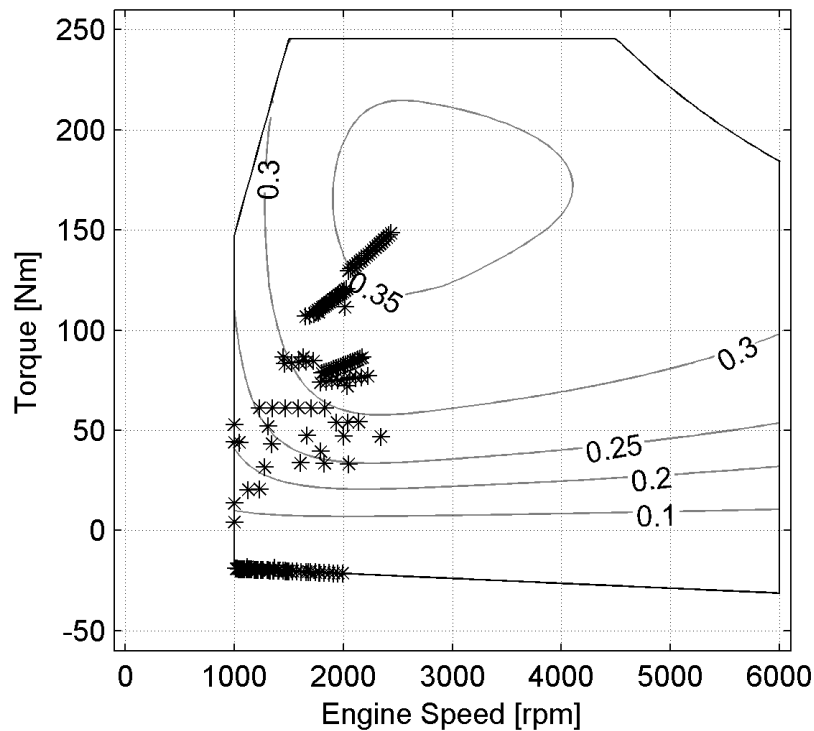
$E_{circ}$ : Zirkulierende Energie,  
was im konventionellen Fzg  
verbremst wird



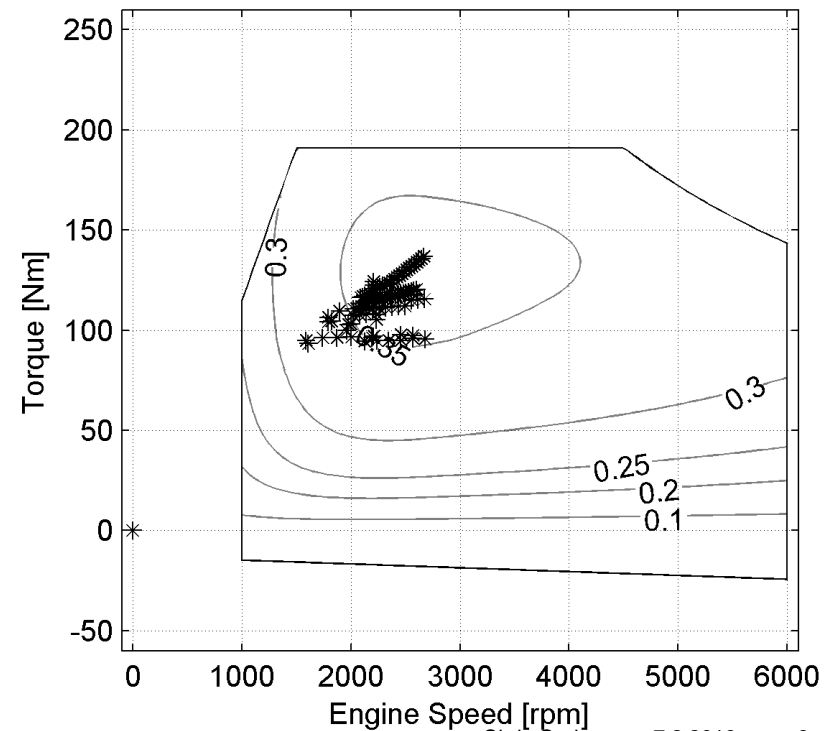
# Hybrid Vehicle

- Improvement of „Tank-to-Vehicle“ efficiency  $\eta_{ft}$  due to
  - Load-point-Shifting
  - Downsizing

Conventional,  $\eta_{ft} = 22\%$



Hybridization Ratio 25%,  $\eta_{ft} = 32\%$



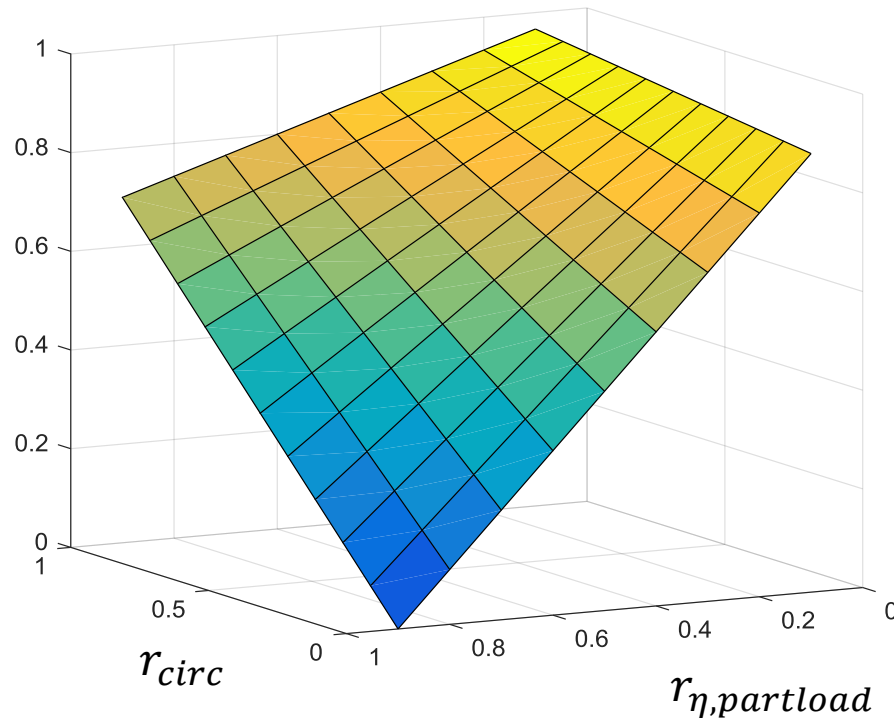
Recuperation Efficiency

$$E_{veh} = E_{diss} + (1 - \overset{\downarrow}{\eta_r}) \cdot E_{circ}$$

$$E_{chem} = \frac{E_{diss} + (1 - \eta_r) \cdot E_{circ}}{\eta_{ft}}$$

$$\frac{E_{chem,hyb}}{E_{chem,conv}} = \frac{(1 - \eta_r \cdot r_{circ}) \cdot r_{\eta,partload}}{r_{\eta,hyb}}$$

# Verbesserungspotential



$$r_{\eta,hyb} = 0.9$$

$$\eta_r = 0.7$$

$$1 - \frac{E_{chem,hyb}}{E_{chem,conv}} = 1 - \frac{(1 - \eta_r \cdot r_{circ}) \cdot r_{\eta,partload}}{r_{\eta,hyb}}$$

# Hybrid Vehicle

## All Contributions in Efficiency Gain

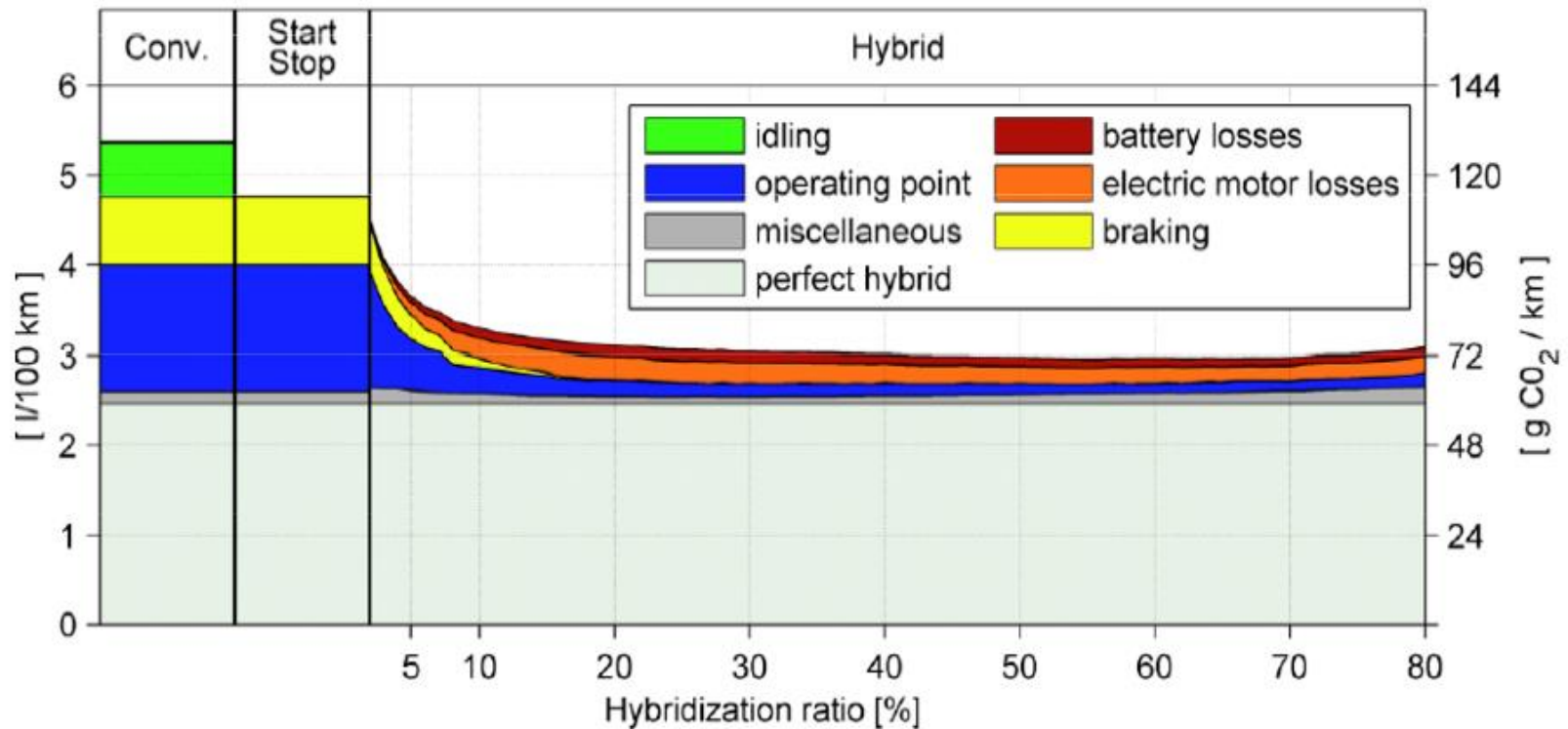


Figure 3: Fuel consumption on the MVEG-95 for a varying hybridization ratio

# Verbrauchseinsparungen eines hybriden Antriebssystems

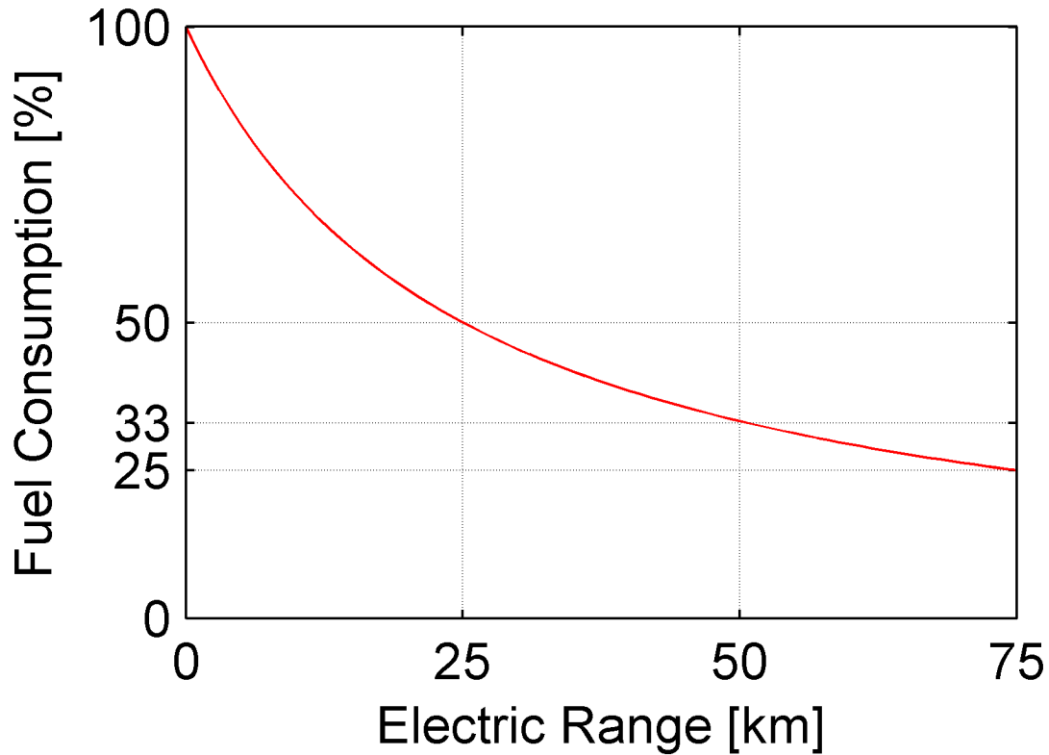
- Leerlauf
- Rekuperation
- Betriebspunktverschiebung
- Down-Sizing des Verbrennungsmotors

**Was noch?**

# Plug-in „trick“

## Legislation

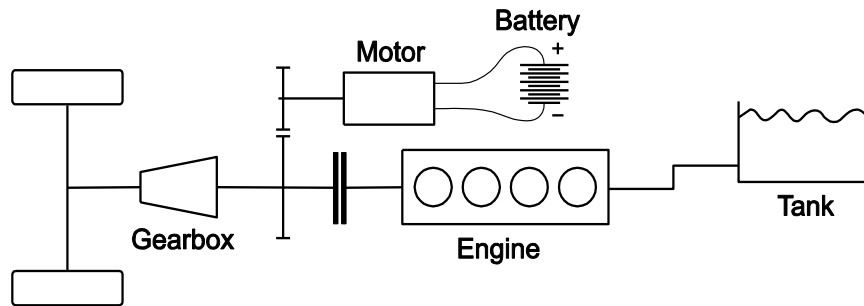
$$FC_{\text{plugIn}} = FC \frac{25 \text{ km}}{25 \text{ km} + \text{EV range}}$$



CO<sub>2</sub>-emissions of electricity are neglected !!

Attractive method to comply with any upcoming CO<sub>2</sub>-limitation

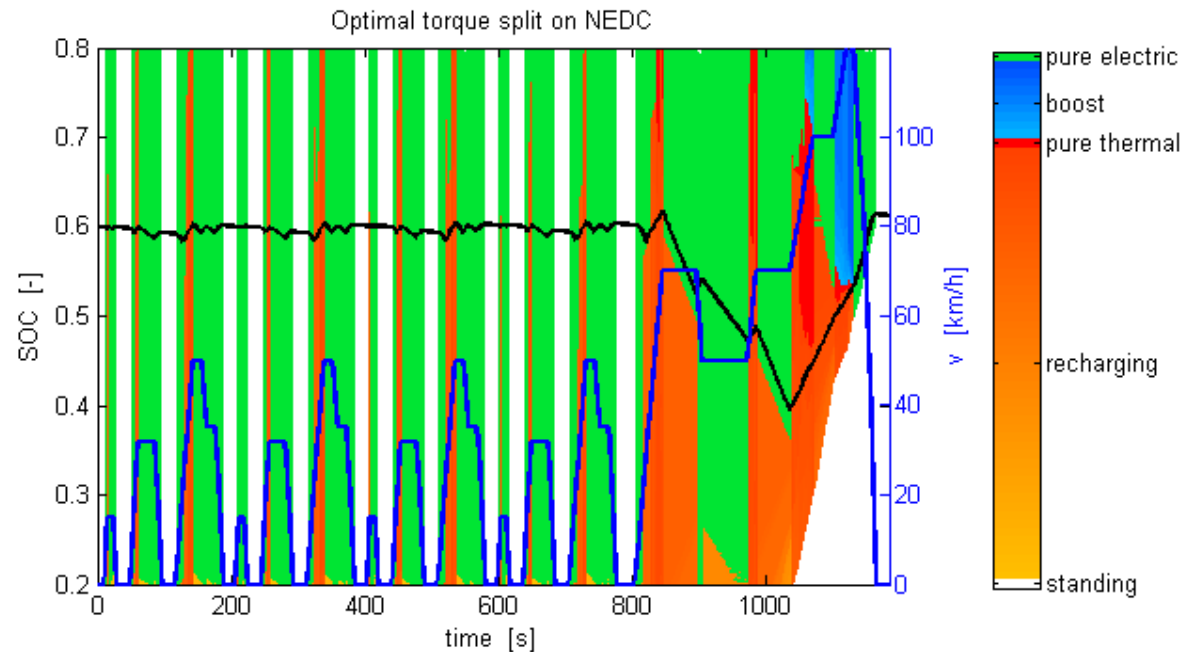
# Energy Management Strategies for HEVs



Development of real-time operation strategies for parallel hybrid electric vehicles (HEVs)

## Methods

- Dynamic Programming
- Optimal Control
- Pattern Recognition
- .....



## Wie gross muss Batterie sein?

■ Kinetische Energie	50 km/h	145 kJ	0.04 kWh
	100 km/h	580 kJ	0.16 kWh
	150 km/h	1.3 MJ	0.36 kWh
■ Potentielle Energie	100 m	1.47 MJ	0.4 kWh
	500 m	7.36 MJ	2 kWh
■ 25km elektrisch fahren		18 MJ	5 kWh



# AHEAD – results

## Vorfahrt für die Elektromobilität

Zumindest versuchsweise: HVG setzt Bus mit Hybridantriebssystem von Voith ein

Auf den ersten Blick ist es ein Bus wie jeder andere. Nur die Geräuschkappe ist anders. Es pfeift – was mit der pfiffigen Technologie zu tun hat, die da auf den Straßen Heidenheims als Testfall unterwegs ist und im Linienverkehr der HVG ihre Alltagstauglichkeit zeigen soll.

ERWIN SACHMANN

Die Versuchsanordnung geht auf Voith zurück. Das hier entwickelte Antriebssystem bildet das Herzstück des Dieselhybridbusses, der seit Oktober unter der Flagge der Heidenheimer Verkehrsgesellschaft fährt. Bei dem sechsmonatigen Einsatz soll geklärt werden, wie sich die neue Voith-Technik unter Praxisbedingungen verhält. Für Voith ein Hemmnis, eine Gastrolle spielt dabei der schweizerische Busanbieter Hess, der das Fahrzeug geliefert und das Hybridantriebssystem integriert hat. Letzteres basiert laut Voith auf der Grundlage aller Hybridantriebe: „Es geht darum, möglichst viel der beim Bremsen anfallenden Energie zu speichern und beim Beschleunigen wieder zu nutzen. Damit lässt sich Kraftstoff sparen und der Ausstoß an umweltschädlichen Kohlendioxid reduzieren.“

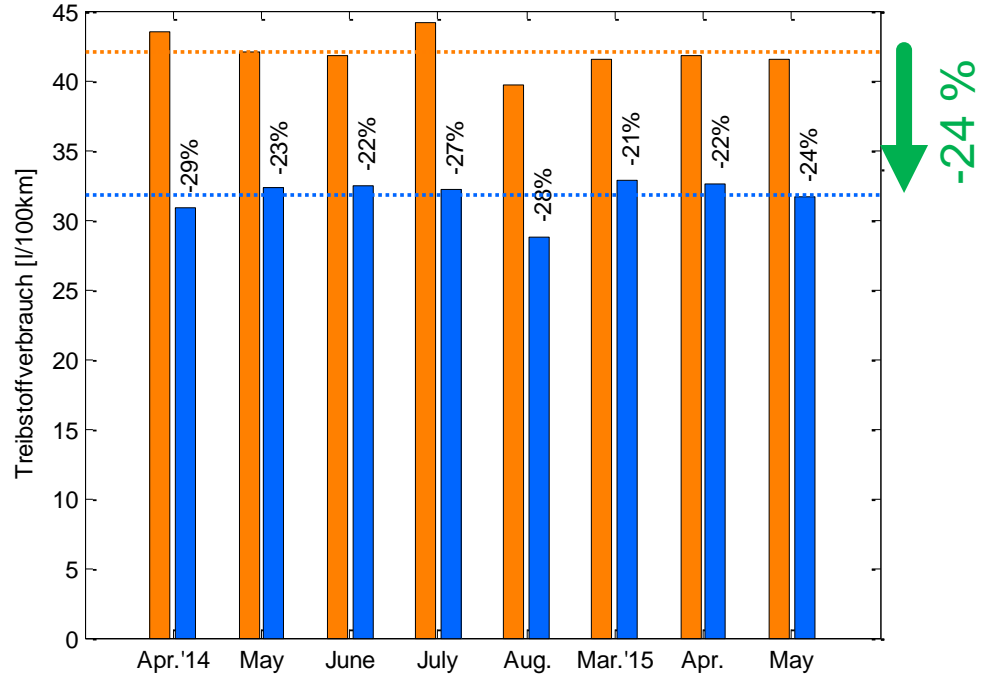
Bei diesem seriellen Hybrid ist es nicht mehr der Verbrennungsmotor, der das Fahrzeug direkt antreibt. Der Dieselmotor übernimmt die Rolle eines Generatorantriebs, der bei niedrigeren Strom reduziert, der wiederum in Batterien auf dem Dach des Busses gespeichert wird – wo auch die beim Bremsen erzeugte Energie zurückfließt. Den Antrieb der Räder übernehmen elektrische Radnabenmotoren, was zu einem besonderen Wirkungsgrad als bei konventionellen Antrieben führt.

Der Modellbetrieb wird vom Bundesverkehrsministerium innerhalb des Projekts „Modellregionen Elektromobilität“ gefördert. Die vor der grossräumigen praktischen Ergebnisse werden im Auftrag des Ministeriums erfaßt und mit anderen Versuchsfahrzeugen in den Modellregionen verglichen.



Nur ausnahmsweise auf Extrafahrt: Im Alltag ist der Dieselhybridbus im ganz normalen Liniennetz eingebunden. HVG-Betriebsleiter Ralf Kuschel und Werkstatthelfer Klaus Peter Kling (Bild oben, v. links), begleiten den Modellbetrieb ebenso aufmerksam wie Ulrich Jochem, der auch selbst am Steuer sitzt. Der Blick von oben offenbart die 770 Kilo schweren Batterien auf dem Dach des Busses. Foto: Oliver Vogel

Insfern sind denn auch die HVG-Fahrgäste im Dienste der Wissenschaft unterwegs, wenn sie den von Voith an das Nahverkehrsunternehmen verleihten Bus besteigen. Der ist ganz normal im Stadtverkehr auf der Linie 1 und damit auf einer gleichbleibenden Strecke eingesetzt, wo herkömmliche Stadtbusse als Vergleichsfahrzeuge herangezogen werden können. Die Touren werden von Stop-and-go-Verkehr bestimmt, bei dem der Hybridbus seinen Vorteil voll auszunutzen vermag, kann er dabei doch erheblich mehr Energie zurückgewinnen als im Überlandverkehr. Am Steuer wechselt sich mehr als 60 Fahrer ab, die in einer speziellen Schulung mit den Besonderheiten dieses elektrisch betriebenen Stadtbusses vertraut gemacht worden sind. Ähnliches gilt für sechs HVG-Mechaniker, die vor Beginn des Modellbetriebs im Hause Voith hospitiert haben. Auch die Fahrer zeigen sich überzeugt. Ulrich Jochem ist stellvertretender Betriebsleiter, kennt den Hybridbus mit seinem ungewöhnlichen Aufbau und Bremsverhalten aber auch aus der Perspektive des Fahrgastes. „Er fährt sich sehr gut, sehr fein, sehr angenehm“, so sein Urteil über das stufenlos beschleunigende Fahrzeug, das manchmal geradezu föhlich lautlos daherkommt und darum nicht von ungefähr mit einer Straßenbahnklingel als Warnung für Passanten ausgerüstet ist. Auch aus Kreisen der Fahrgäste hat man bei der HVG bislang nichts Negatives gehört. Überhaupt, gehört: Still und leise fährt der Hybridbus an, nur beim Beschleunigen macht's ein „Klack“, das manche aus Bussen-Fahrern früherer Zeiten erinnern mag. Doch bei Voith wie bei der HVG geht der Blick in die Zukunft, und schon jetzt wird ein interessanter Aspekt der noch bis Februar laufenden Erprobung deutlich: Ralf Kuschel: „In den ersten einsechshalb Monaten haben wir 29 Prozent Spitz eingespurt.“



Heidenheimer Zeitung, Mi. 27. Nov. 2014

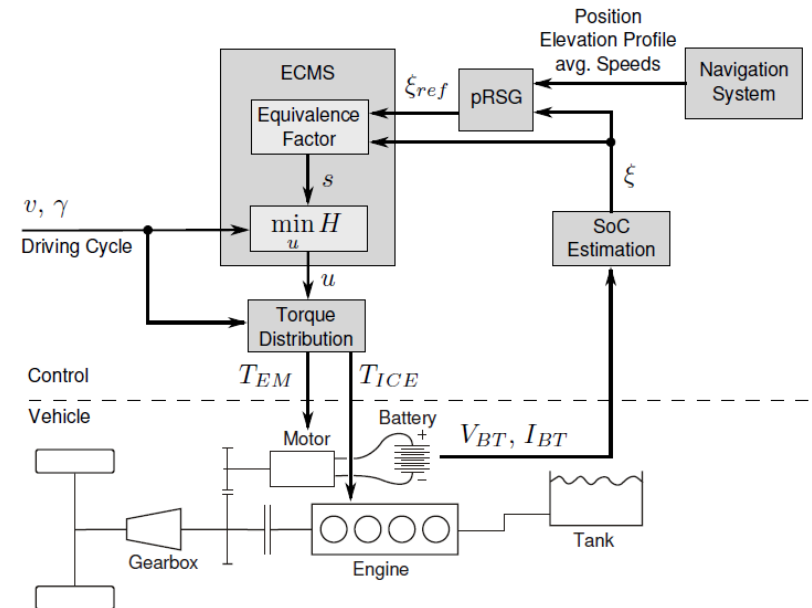
Dieselsbus > Hybridbus

# Predictive Energy Management

Use navigational data to synthesis a SoC reference signal for the ECMS to follow

Required information:

- average speeds (rural, urban, highway)
- elevation profile
- Solve optimization problem to find best SoC reference



Cycle	Strategy	FC (Strategy/DP) [l/100km]	$r_{EC}$ [%]
FTPelv	ECMS	4.55 / 4.20	+8.3
	pRSG-ECMS	4.42 / 4.20	+5.2
US06elv	ECMS	8.07 / 7.64	+5.7
	pRSG-ECMS	7.45 / 7.45	+0.0(2)
SWISSelv	ECMS	3.90 / 3.54	+10.1
	pRSG-ECMS	3.63 / 3.54	+2.4

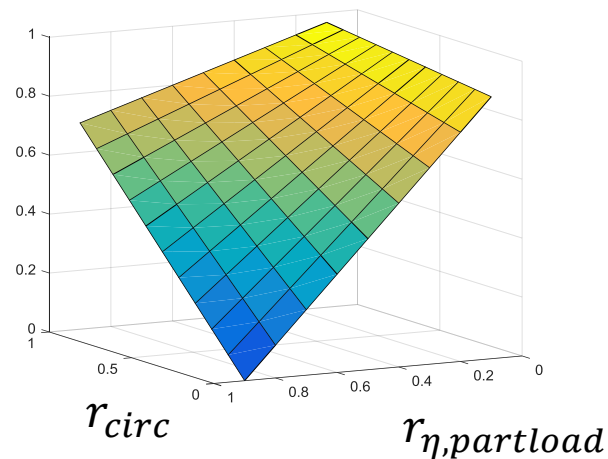
## First conclusions

- Hybridisierung ist vom Verbrauchsgesichtspunkt immer vorteilhaft
- Je grösser der Anteil zirkulierender Energie im Fahrprofil um so grösser ist der Gewinn
- Je tiefer der Zykluswirkungsgrad des Ausgangsfahrzeugs um so grösser ist der Gewinn
  
- Aufpassen, dass die gleiche Wiese nicht zweimal gemäht wird
- Energiemanagement muss korrekt gemacht werden, idealerweise mit Streckeninformationen

# Worst Case for Hybrid?

- Keine zirkulierende Energie,  $r_{circ} = 0$
- Ausgangspowertrain hat sehr hohen Zykluswirkungsgrad,  $r_{\eta,partload} = 0.9$

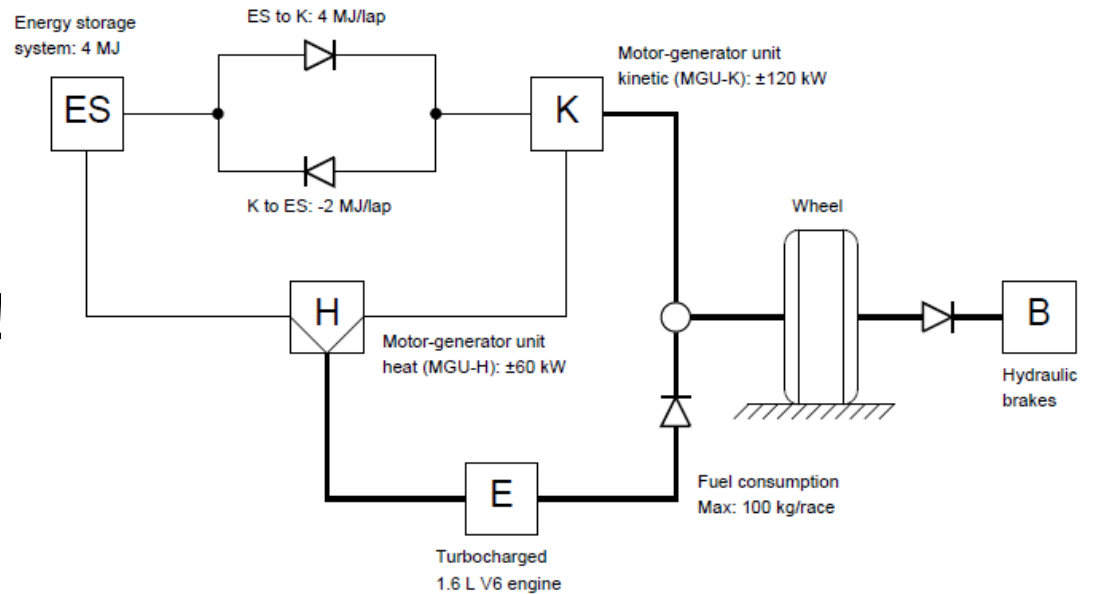
## Verbesserungspotential



# Which Vehicle?

- Longhaul Truck
- Race Car

Was tun?  
Andere Hybridisierung!



## Wie weiter?

$$m_{CO_2} = \frac{c_{CO_2}}{\eta_{ft}} \cdot (E_{diss} + (1 - \eta_r) \cdot E_{circ})$$

Energiebedarf reduzieren

Bestwirkungsgrad des Verbrennungsmotors verbessern

Alternative Kraftstoffe

Strecke lernen

## Vom Energiebedarf zum CO<sub>2</sub>

- Jeder Energieträger hat einen CO<sub>2</sub>-Gehalt in g CO<sub>2</sub> / MJ
- Erdgas (Methan) hat einen um 25% tieferen CO<sub>2</sub>-Gehalt wie Benzin/Diesel
- Regenerativ erzeugtes Methan (P2G) hat 0 g CO<sub>2</sub> / MJ
- Diese CO<sub>2</sub> Reduktion ist unabhängig von der Hybridisierung

# «Unkonventionelle» hybride Antriebssysteme



# SwissTrolley plus

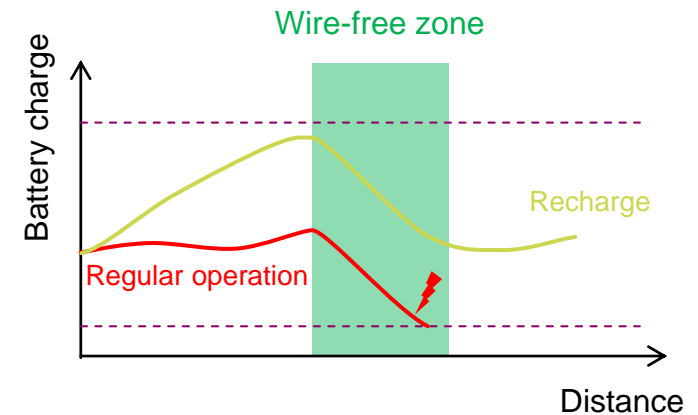
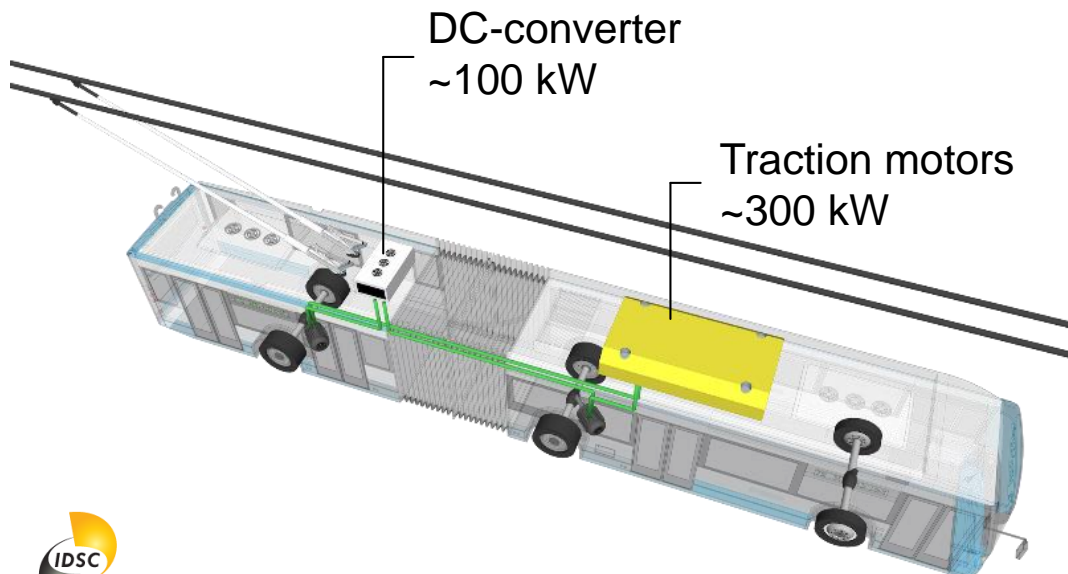


Traction Battery

- Highly energy efficient
- Remove infrastructure at crossings
- Extend bus lines beyond grid

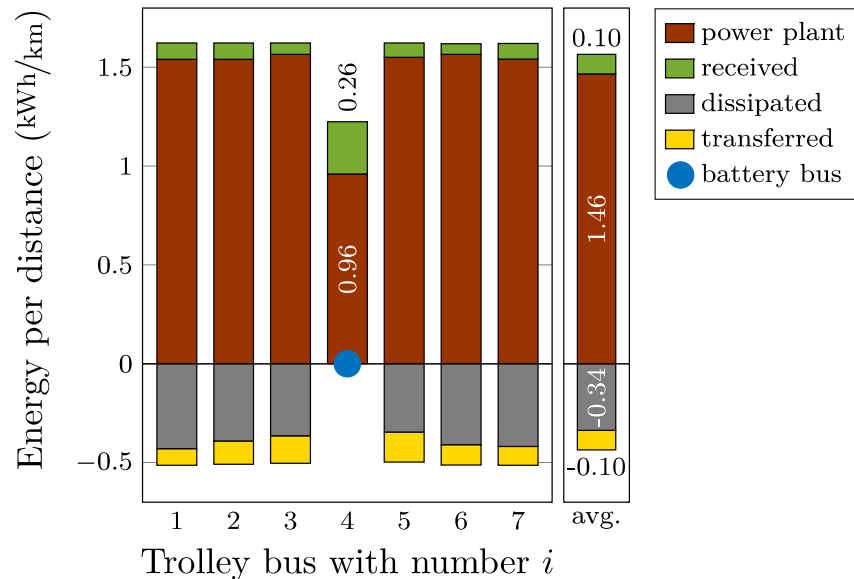
# New Degree of Freedom Requires Control

- Energy Management Tasks:
  - Provide always enough power
  - Provide enough charge for wire-free zones

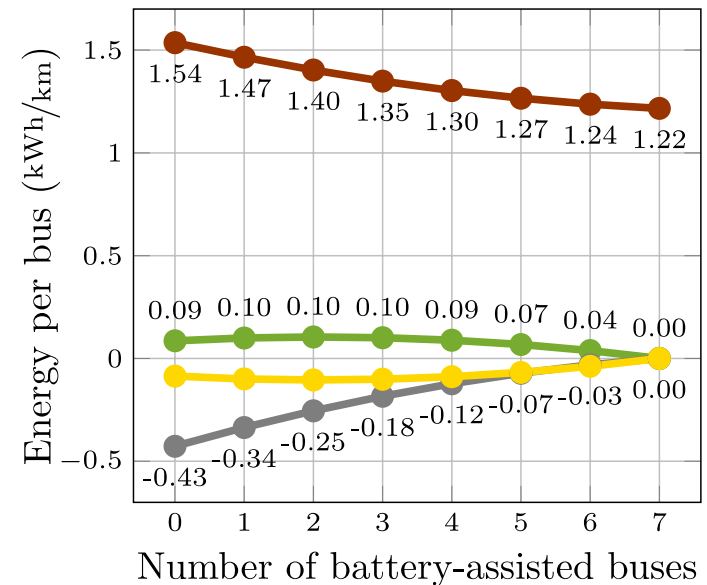


# Energy Saving Potential

Total Energy of the Individual Buses



Resulting Energy Allocation



One battery-assisted bus  
needs **36 %** less energy.

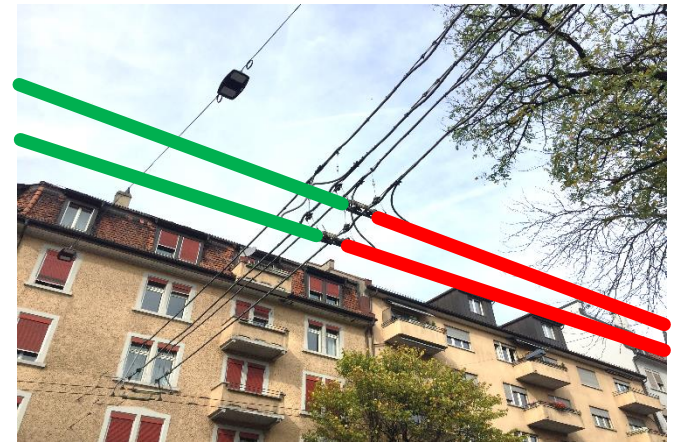
All battery-assisted buses  
reduces total energy  
by **20 %**.

## Vorteile SwissTrolley+

- Oberleitungen können reduziert werden
- Linien können in oberleitungsfreie Zonen verlängert werden
- Reduzierter Energiebedarf
- Oberleitungstrenner können erkannt und berücksichtigt werden (weniger Lichtblitze)
- Tiefere elektrische Spitzenleistung
- Bus wird kostengünstiger

# «SwissTrolley plus» – Example Application: Avoiding arc flashes at grid sector changes

## Electrical arcing from gaps



### Situations:

- crossings with trams/trolleys
- merging of lines
- different grid sectors

# Conclusion

- Hybridisierung ist immer sinnvoll
- Die realisierbare Verbesserung hängt stark vom Ausgangssystem und dem Verwendungszweck ab
- Hybridisierung ist nicht nur die Kombination von Verbrennungsmotor und Elektromotor
- Der zusätzliche Freiheitsgrad ermöglicht oft Vorteile an unerwarteten Stellen
- Aufpassen, dass die gleiche «Schwäche» nicht mehrfach angegangen wird
- Alternative Kraftstoffe hervorragend mit Hybridisierung kombinierbar
- Plug-in Erdgas hybrid ist Antriebssystem welches bei gutem Wirkungsgrad die meisten Optionen für die Zukunft bereithält
- Immer auch auf zusätzliche Vorteile achten



## MAS | CAS ETH in Mobilität der Zukunft

*systemic – multimodal – at the cutting edge of  
innovation*

D MAVT

### For flexible Thinkers & Experts

- project managers, other management personnel, technical/strategic decision-makers
- in the areas of transport and transportation
- persons in related fields
- and persons from other sectors

### Develop Career Perspectives

- assume more complex tasks and more responsibility
- change from operative to strategic positions
- work interdisciplinary and cross-sectoral
- Take actively part in shaping transport systems for the future.

### Modular Structure offers Flexibility

- start with the MAS
- or with a CAS and upgrade to a MAS later

**Started 23th of January 2017**

**Apply: [www.mas-mobilitaet.mavt.ethz.ch](http://www.mas-mobilitaet.mavt.ethz.ch)**➔

# Questions?

