

LEICHTBAU FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT – EINE GEWICHTIGE STRATEGIE?

Auswirkung von Leichtbau auf den Energiebedarf eines Elektrofahrzeugs

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning (FhG-ICT)

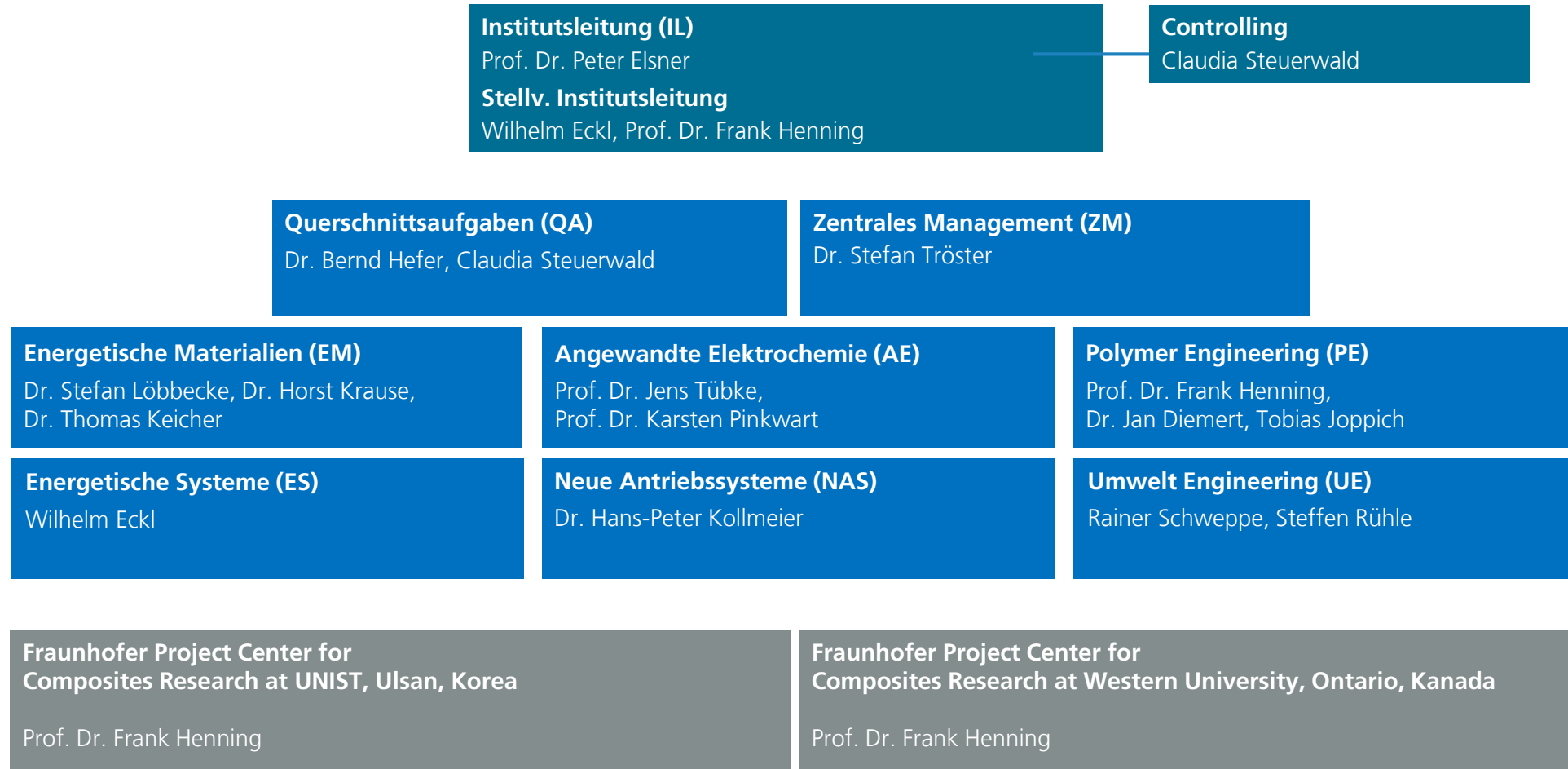
Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin (KIT-FAST)

Andreas Dollinger (FhG-ICT)

Tobias Burgert (FhG-ICT)



Organigramm des Fraunhofer ICT



Kooperation im Rahmen des Leistungszentrums Profilregion Mobilitätssysteme Karlsruhe

Kooperation im Bereich der Mobilitätsforschung



- **Kernbotschaft** – Zusammenschluss der Karlsruher Institutionen für Forschung und Lehre im Bereich der Mobilitätssysteme in einem Leistungszentrum und eine offene Innovationsplattform für den partnerschaftlichen Austausch mit Industrie, Wirtschaft, Politik und weiteren Netzwerken
- **Das Leistungsversprechen – Unsere Mission:**
 - Kompetenzen und Personen zur gemeinsamen Erforschung und Entwicklung von zukunftsweisenden Mobilitätslösungen disziplin- und organisationsübergreifend bündeln und vernetzen
 - Zentrale Anlaufstelle für Netzwerkpartner und Kunden anbieten
 - Impulse und Beratung für die Transformation des Mobilitätssystems geben
 - Transfer neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse in die wirtschaftliche und gesellschaftliche Umsetzung fördern

Lohnt sich Leichtbau bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen?

Einer **These** nach zuzufolge spielt das **Gewicht eines E-Fahrzeugs** nur eine **untergeordnete Rolle**. Die höhere benötigte Energie beim Beschleunigen, aufgrund des höheren Fahrzeuggewichts, könne bei diesen Fahrzeugen annähernd vollständig ausgeglichen werden, da die **kinetische und potentielle Energie** in den Batteriespeicher zurückgewonnen werden könne. Dadurch wären die hohen **Kosten** für konsequenten **Leichtbau** im Bereich der Elektromobilität **nicht zu rechtfertigen**. Vor allem da die Kosten für die Energiespeicher bereits sehr hoch sind.



Bildquelle: www.carfacto.de; 10.09.2018

Lohnt sich Leichtbau bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen?

Studie zu unterschiedlichen Fahrzeuggewichten in E-Fahrzeugen

- Eine Studie des Center Automotive Research (CAR) der Universität Duisburg-Essen hat den **Energiebedarf** (auf 100 km) eines **Tesla S** und eines **BMW i3** mit **jeweils 300 kg zusätzliche Masse** verglichen. Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind:
 - Tesla S (Leermasse: 2108 kg): **17,77 kWh** (leer); **17,87 kWh** (+300 kg) : **+0,6%**
 - BMW i3 (Leermasse: 1320 kg): **13,1 kWh** (leer); **13,68 kWh** (+300 kg) : **+4,4%**

Diese Ergebnisse lassen zwei Interpretationen zu:

- **Je schwerer ein Fahrzeug im unbeladenen Zustand ist, desto weniger wirkt sich eine erhöhte Masse auf den durchschnittlichen Verbrauch aus.**
- **Aber: Je leichter ein Fahrzeug ist, desto weniger Verbrauch (nominal) ist damit zu erreichen. Und desto größer ist der Einfluss der Masse auf den Verbrauch.**

Quelle: www.n-tv.de; 15.02.18; „Das Ende der Diät – Macht Leichtbau bei E-Autos keinen Sinn?“

Zielfahrzeug

■ Volkswagen e-Golf (2017)



Fahrzeugdaten und Testparameter

[ADAC 2018]

Fahrzeugmasse mit Zuladung 1.680 kg – 1.980 kg

Stirnfläche 2,2 m²

Strömungswiderstandskoeffizient c_w 0,27

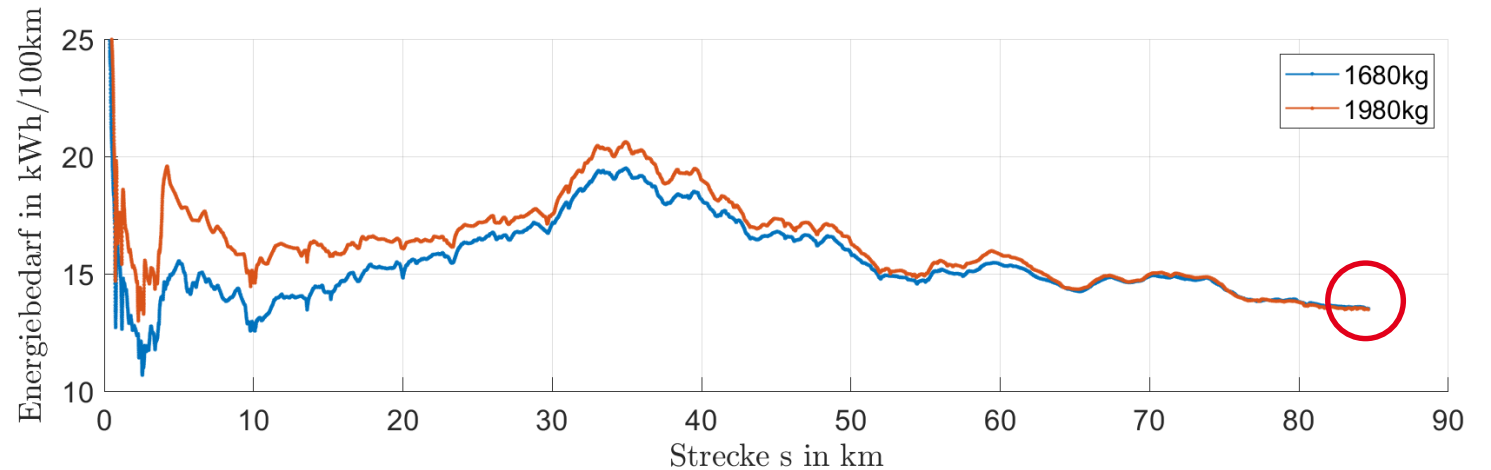
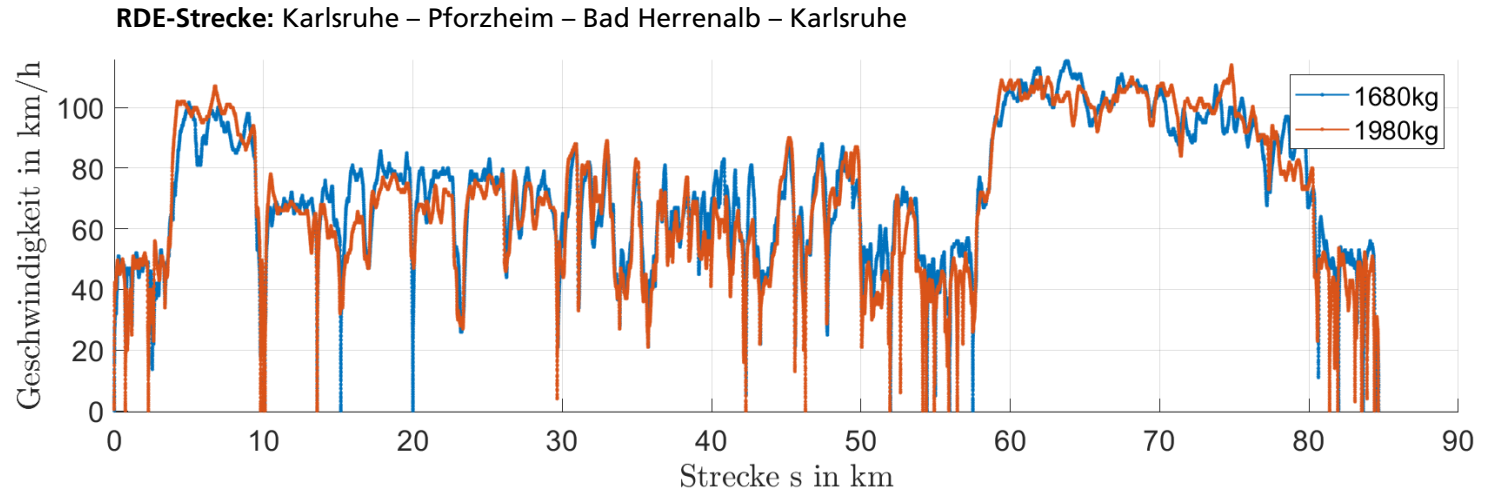
Reifendruck 2,5 bar

Umgebungstemperatur 5,5 °C

Luftdruck 1.006 hPa

Realfahrdaten

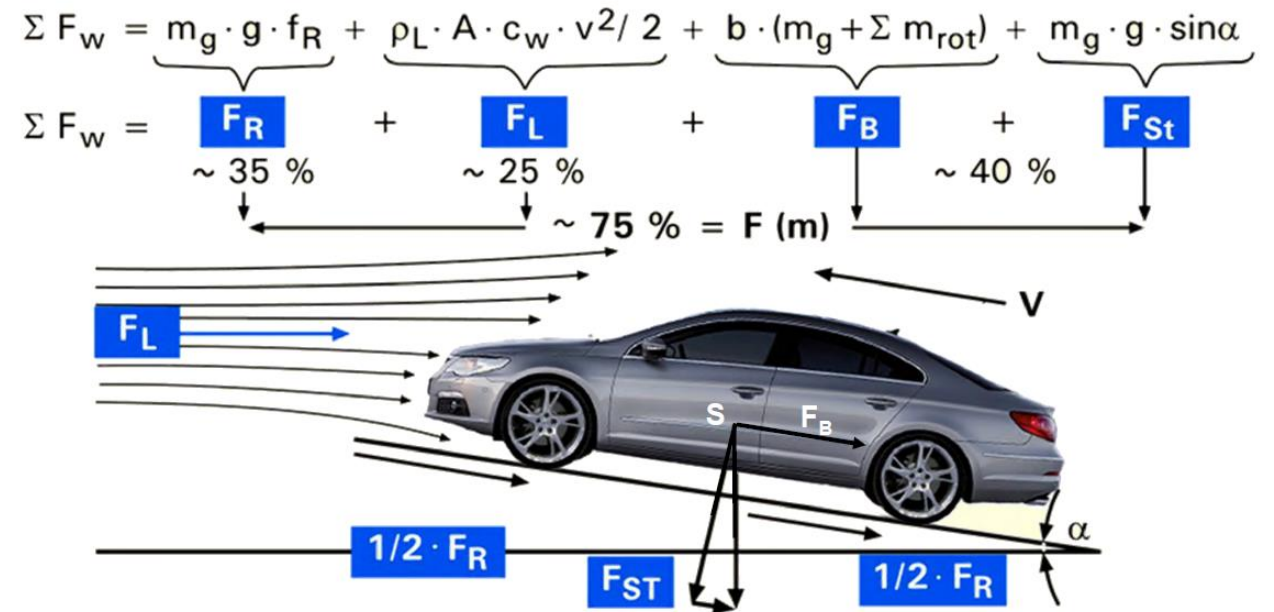
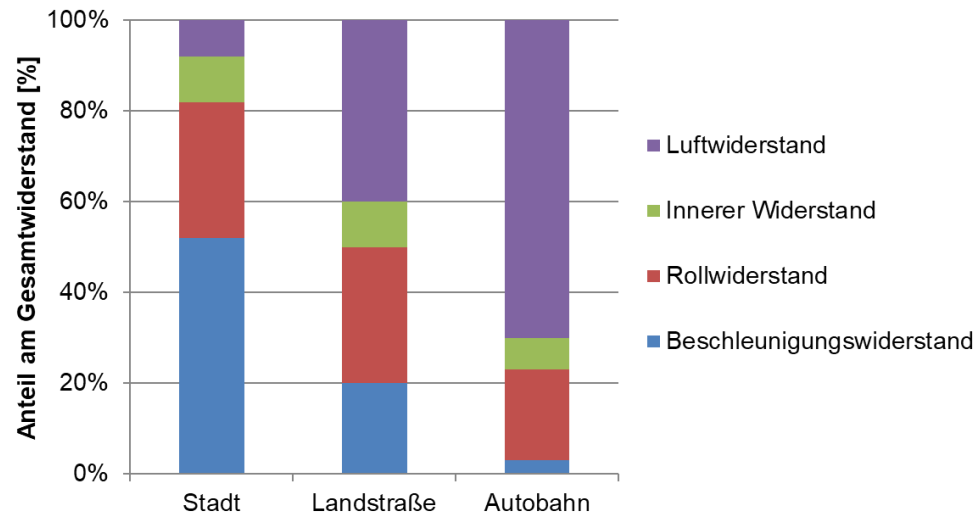
- Energiebedarf bei verschiedenen Beladungen gleich?
- Energiebedarf bei realer Fahrt abhängig von:
 - Fahrer
 - Verkehrsdichte
 - Wetter
 - Startbedingungen
 - usw.
- Fazit:
Reales Fahrexperiment führt zu nicht vergleichbaren Ergebnissen und somit zu Fehlaussagen!



Leichter ist immer energieeffizienter

Verringerung des Energiebedarfs durch verringerte Fahrwiderstände

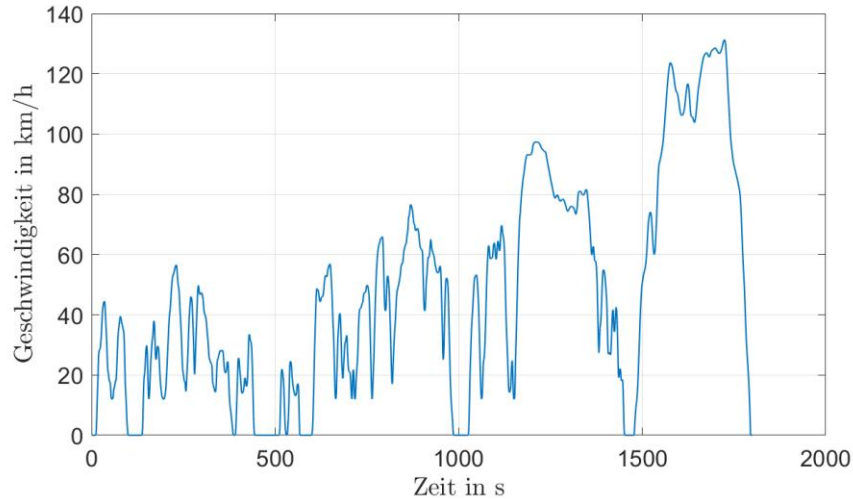
- Beschleunigungswiderstand
- Rollwiderstand
(Grundlast – keine Rekuperation möglich)
- Steigungswiderstand
- Luftwiderstand (nicht von Masse abhängig)



„Quelle: VW / Leichtbau in der Fahrzeugtechnik“ / Prof. Friedrich / Springer

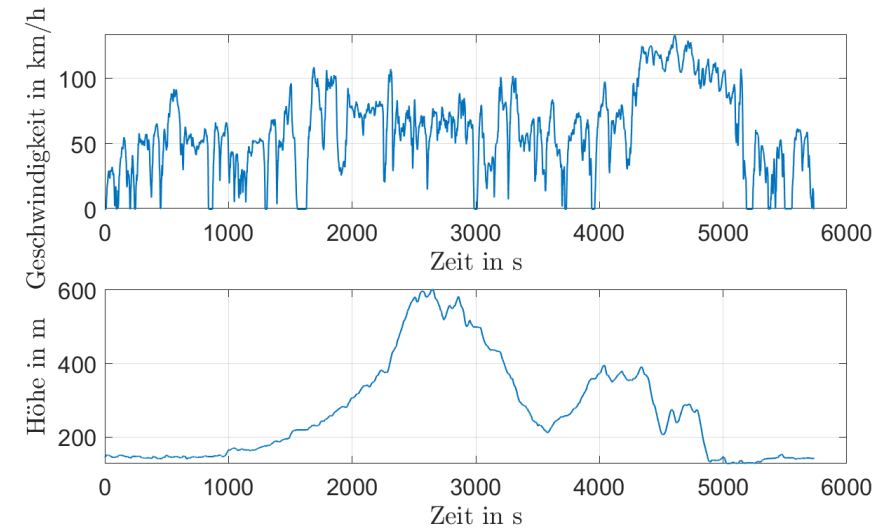
WLTP und RDE

■ Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure – WLTP



Die Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP) ist ein von Experten aus der Europäischen Union, Japan und Indien und nach den Richtlinien des World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UNECE) entwickeltes neues Messverfahren zur **Bestimmung der Abgasemissionen (Schadstoff- und CO₂-Emissionen) und des Kraftstoff-/Stromverbrauchs von Kraftfahrzeugen**. Das Testverfahren ist seit 1. September 2017 in der Europäischen Union eingeführt und gilt für Personenkraftfahrzeuge und leichte Nutzfahrzeuge. Hierzu gehört auch der neue Prüfzyklus **WLTC** (Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle).

■ Real Driving Emissions - RDE

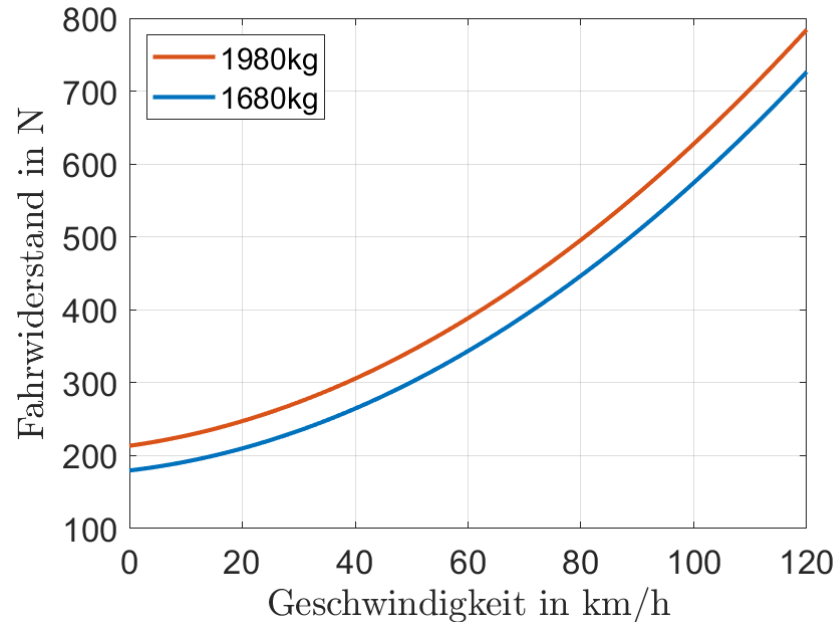


Um Emissionen auch im **realen Fahrbetrieb** bewerten zu können wurde ergänzend zum WLTP das RDE-Prüfverfahren (Real Driving Emissions) eingeführt. Bei der RDE-Fahrt wird das Fahrzeug mit PEMS-Messtechnik (Portable Emission Measurement System) ausgestattet, um Schadstoffemissionen nachzuweisen.

Ein RDE-konformer Fahrzyklus muss eine bestimmte Streckenverteilung (Stadt, Landstraße, Autobahn) bzw. Geschwindigkeitsverteilung aufweisen. Außerdem sind **Kriterien für Standzeiten, Gesamtdauer, Gesamtstrecke, Umgebungstemperatur, Höhenprofil und Dynamik** zu erfüllen.

WLTP und RDE

■ Ausrollkurve



- Ermittlung des Rollwiderstands durch Ausrollversuch in beide Himmelsrichtungen
- Unterschiedliche Beladungen

■ Kennfeldvermessung auf Rollenprüfstand



- Aufzeichnung aller relevanten Parameter im stationären Betrieb
- Ableitung der Kennfelder für die Simulation

Übersicht Antriebsstrangkomponenten

- Die einzelnen Komponenten des Antriebsstranges haben Wirkungsgrade abhängig von Betriebspunkt, Außenbedingungen, etc.:



Batterie

Verluste:

Stromwärmeverluste (Lade- / Entladestrom, Temperatur, Ladezustand, ...)

Typ. Wirkungsgrad:

Maximal: > 99 %

Mittelwert im Zyklus: > 95 %

Leistungselektronik

Verluste:

Schaltverluste, Durchlassverluste, Sperrverluste, ...

Typ. Wirkungsgrad:

Maximal: > 97 %

Mittelwert im Zyklus: > 80 %

E-Maschine

Verluste:

Stromwärmeverluste, Eisenverluste, Reibungsverluste, ...

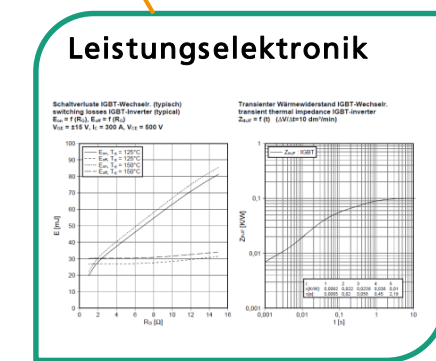
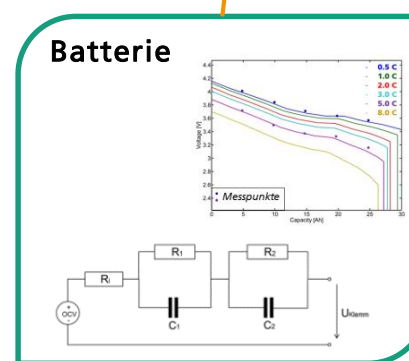
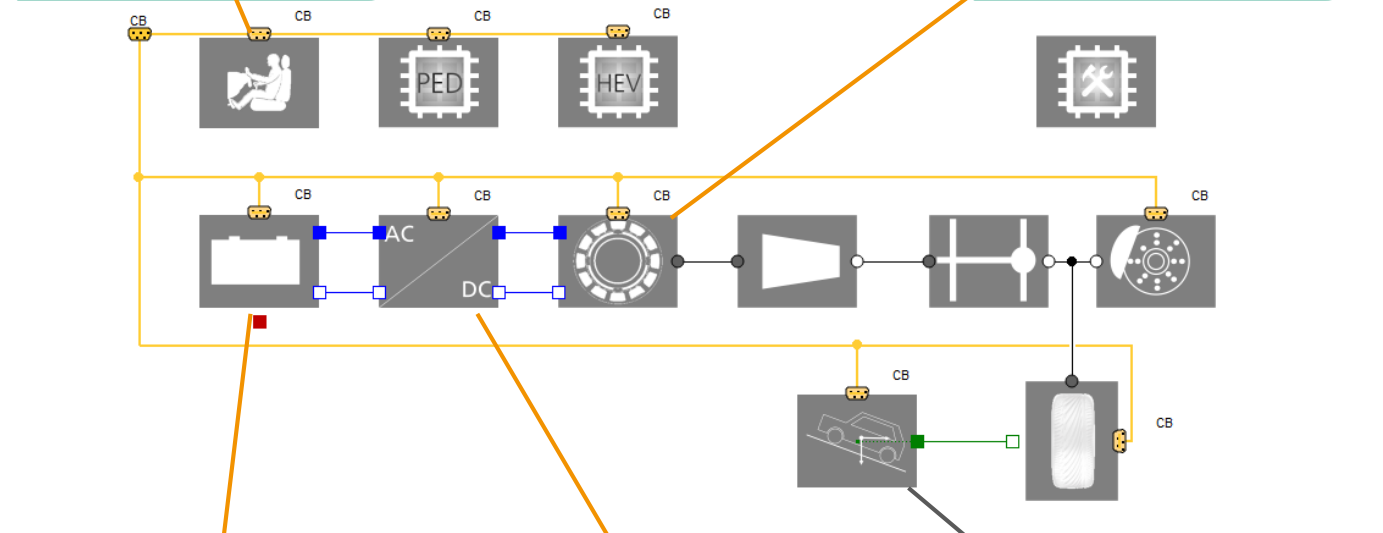
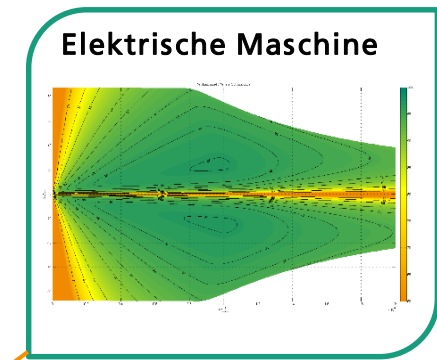
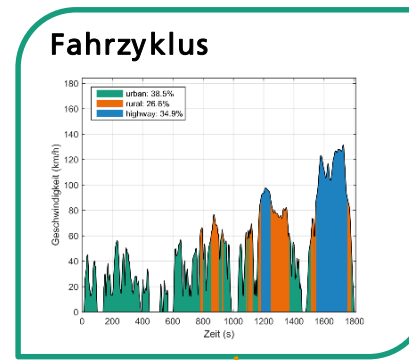
Typ. Wirkungsgrad:

Maximal: > 96 %

Mittelwert im Zyklus: > 80 %

Gesamtfahrzeugsimulation

- Nutzung der Messdaten von Prüfstand und Straße
- Objektorientierte, energiestrombasierte Modellierung in Dymola
- Validierung des Simulationsmodells anhand der Messdaten



- ### Fahrwiderstände
- Luftwiderstand
 - Rollwiderstand
 - Beschleunigungswiderstand
 - Steigungswiderstand

Simulationsergebnisse

- Eine Masseneinsparung von 100 kg führt zu einer Reduzierung des Kraftstoffverbrauches um ca. $0,3 - 0,45 \frac{l}{100 km}$!
Für einen VW Golf VII Golf 1.5 TSI ergibt sich eine Verbrauchsreduzierung um **5,8 – 8,7 %**
(Bezug: NEFZ, Antriebsstrang über Hubraum und Übersetzung angepasst) [Rohde-Brandenburger 2013]

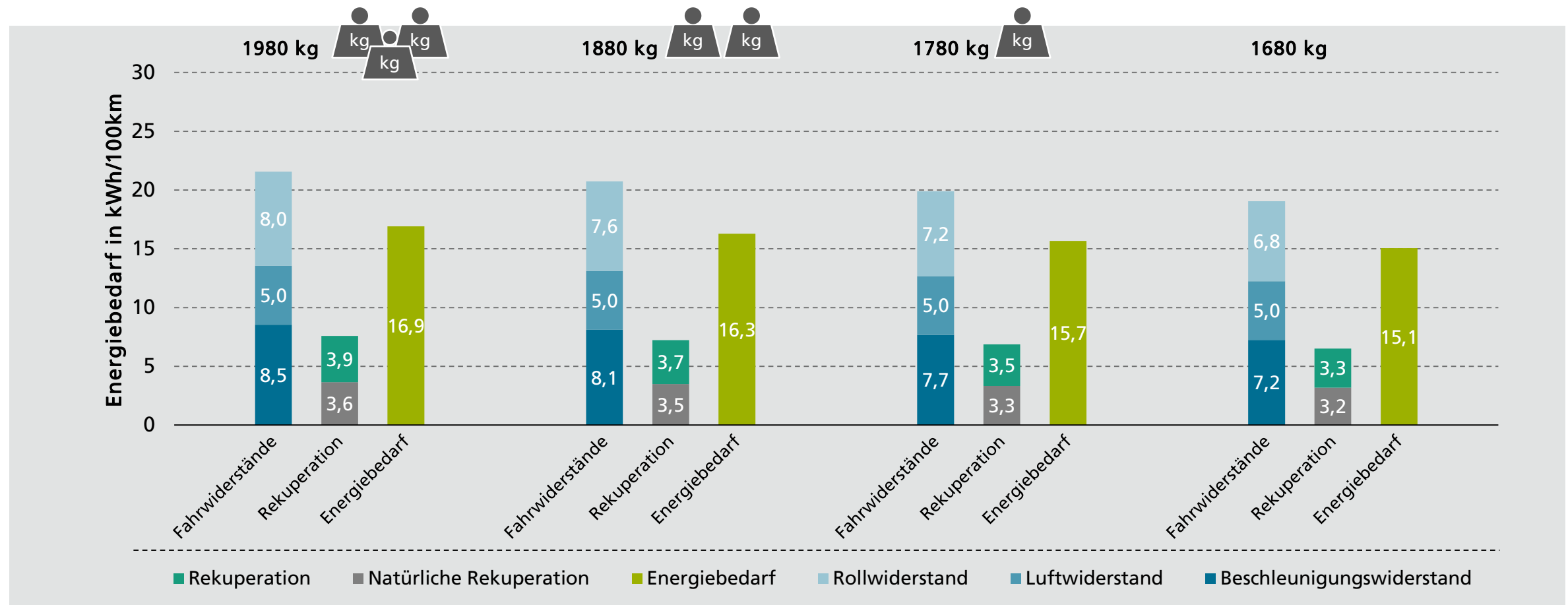
Simulationsbeispiel bei einer Massenreduzierung um 100 kg

	1.780 kg	1.680 kg	Differenz absolut	Differenz prozentual
Ohne Rekuperation im WLTC:	19,19 $\frac{kWh}{100 km}$	18,38 $\frac{kWh}{100 km}$	-0,81 $\frac{kWh}{100 km}$	-4,2 %
Mit Rekuperation im WLTC:	15,66 $\frac{kWh}{100 km}$	15,05 $\frac{kWh}{100 km}$	-0,61 $\frac{kWh}{100 km}$	-3,9 %
Ohne Rekuperation im RDE-Zyklus:	20,56 $\frac{kWh}{100 km}$	19,54 $\frac{kWh}{100 km}$	-1,02 $\frac{kWh}{100 km}$	-5,0 %
Mit Rekuperation im RDE-Zyklus:	16,10 $\frac{kWh}{100 km}$	15,40 $\frac{kWh}{100 km}$	-0,70 $\frac{kWh}{100 km}$	-4,4 %

- Roll-, Beschleunigungs- und Steigungswiderstand verringern sich signifikant
- Durch geringere kinetische Energie ist bei geringerem Gewicht weniger Potential zur Rekuperation vorhanden
- Durch eine Reduzierung des Fahrzeuggewichts um 100 kg kann der Energiebedarf des angenommenen Zielfahrzeugs um **ca. 4 %** verringert werden

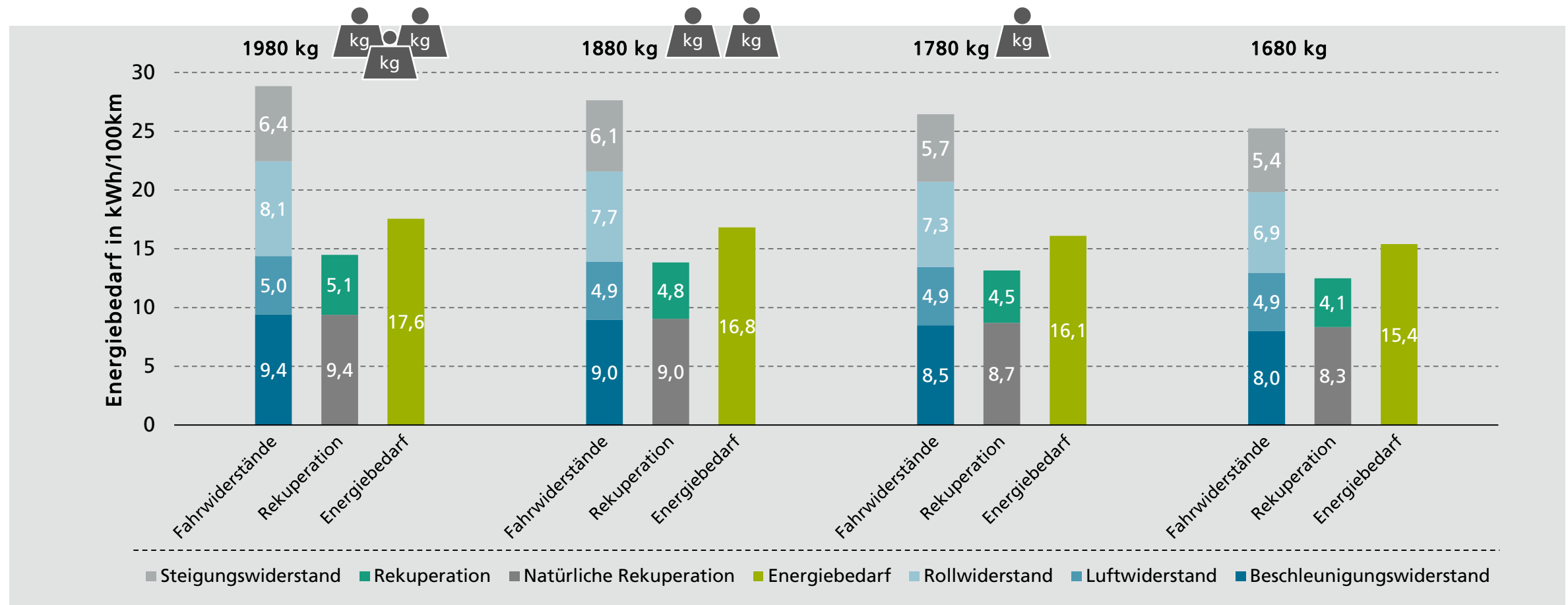
Simulationsergebnisse WLTC

■ Simulationsergebnisse basierend auf Zielfahrzeug



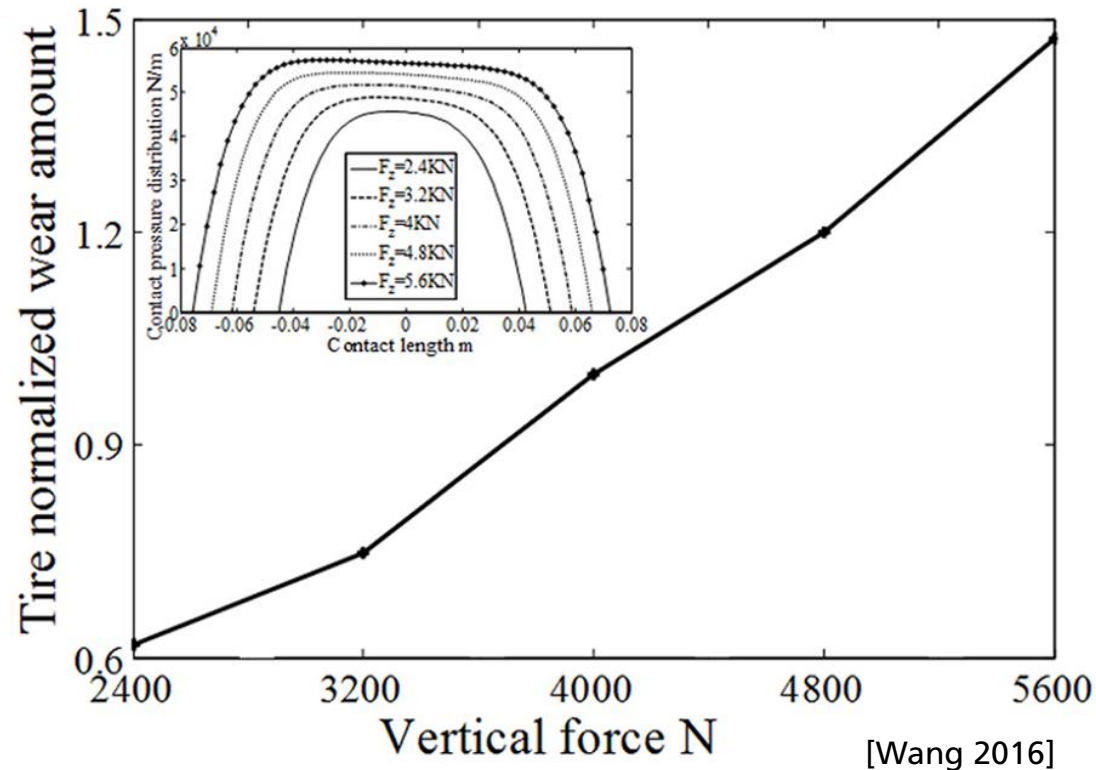
Simulationsergebnisse RDE-Fahrprofil

- Simulationsergebnisse basierend auf Zielfahrzeug, ca. 1.100 kumulierte Höhenmeter



Reifenabrieb

- Ergebnisse eines Simulationsmodells für einen Reifen der Abmessung 205/55 R 16 [Wang 2016]:



- Vertical load impacts linearly on tyre wear [Le Maitre et al. 1998]:

Initiale Kraft: $F_z = 4000 \text{ N}$

Erhöhung der Reifenlast um 20 %



Erhöhung des Verschleiß um 20 %

→ Hohe Auswirkungen auf den Reifenverschleiß



Reifenabrieb

Weniger Reifenabrieb = weniger Feinstaub

Ein **höheres Fahrzeuggewicht** führt zu **höherem Verschleiß** der Reifen und damit zu einer erheblichen Feinstaubemission je gefahrenem Kilometer. Etwa **84% des Feinstaubes** in 2015 in Stuttgart (durch Autos) kommen **vom Abrieb der Reifen, der Bremsen und durch Aufwirbelung**.

Quelle: www.stuttgart-nachrichten.de; 22.11.2016; „Es gibt Besseres als Fahrverbote“

Radlastabhängige (Ultra-)Feinstaubemission gemessen bei 30 km/h ohne Einflüsse von Kurvenfahrten auf einem Rollenprüfstand mit Radlasten **zwischen 0 N** (Fahrzeugleergewicht) **und 7000 N** (Zuladung). In dem betrachteten Bereich ergibt sich eine **Steigerung der Partikel** (Durchmesser: 10,8 nm) pro cm³ **um 75%**.



Quelle: Publikation KIT-fast; 09.06.2017; „Investigation of Ultra Fine Particulate Matter Emission of Rubber Tires “

Aktuell aus der Presse

■ Leichtbau ist auch in Zukunft wichtig

„Weil die Energie beim Bremsen eben nicht komplett zurückgewonnen werden kann, ist die Masse eines Fahrzeugs nicht gleichgültig. Leichtbau hat auch in Zukunft eine Bedeutung.“

C. M. Schwarzer (heise.de)
21.03.2019



The screenshot shows a webpage from heise AUTOS. The header is red with the logo '@heise AUTOS' and a dropdown menu 'Fahrberichte'. Below the header, there is a breadcrumb 'heise Autos > Technik'. The article title is 'Bremsenergierückgewinnung und ihr Wirkungsgrad' by Christoph M. Schwarzer, dated 21.03.2019 at 07:30 Uhr. The article text discusses energy recovery in electric vehicles, mentioning that the motor acts as a generator to store energy in the battery. It also notes that this technology was first used in hybrid vehicles to improve efficiency and reduce emissions. The article is on page 2 of 2, as indicated by the 'Seite 2' label and the navigation icons. There are two images: one of a silver car parked on a cobblestone street, and another of two cars parked in front of a graffiti-covered wall.

Zusammenfassung – Leichtbau bleibt essentiell für eine effiziente Mobilität

- Durch eine Reduzierung der Fahrzeugmasse um 100 kg kann der Energiebedarf des angenommenen Zielfahrzeugs um ca. 4 % verringert werden
 - Roll-, Beschleunigungs- und Steigungswiderstand verringern sich signifikant
 - Der Mehraufwand durch das höhere Gesamtgewicht kann nur zu einem geringen Anteil durch Rekuperation zurückgewonnen werden
- Durch Reduzierung der Reifenlast um 20 % **verringert** sich auch der **Verschleiß um 20 %** – zudem signifikante Verringerung von Feinstaub durch Gewichtsreduktion
- Höheres Gewicht: erhöhte Crashesicherheitsmaßnahmen / reduzierte Fahrdynamik / höherer Verschleiß / höhere Emissionen
- Zulässiges Gesamtgewicht bei Führerschein (3,5 t), Gütertransport (4,25 t) und Parkhäusern (2,5 t)
- Leichte Fahrzeuge, leichter Antriebsstrang – weniger Batteriekapazität bei gleicher Reichweite = Kosteneinsparung



Danksagung

- Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – Institut für Fahrzeugsystemtechnik
Teilinstitut Fahrzeugtechnik
- Fraunhofer ICT – Neue Antriebssysteme



Quellen:

- [ADAC 2018]: A. Lidl, ADAC autotest: VW e-Golf: Fünftürige Schräghecklimousine der unteren Mittelklasse, Stirnfläche und cw-Wert, www.adac.de, Stand: Januar 2018
- [Rohde-Brandenburger 2013]: Dr.-Ing. Klaus Rohde-Brandenburger, VW AG: „Was bringen 100 kg Gewichtsreduzierung im Verbrauch? Eine physikalische Berechnung“, ATZ 07-08 / 2013, 115. Jahrgang, Seiten 584-591
- [Le Maitre et al. 1998]: Le Maitre, O.; Süssner, M.; Zarak, C. (1998) – Evaluation of Tire Wear Performance, SAE Technical Paper 980256
- [Wang et al. 2016]: Wang et al (2016) – The influence of the contact features on the tyre wear in steady-state conditions, Journal of Automobile Engineering