

Thermoelektrische Generatoren (TEG) mit herausragender Leistungsdichte zur effizienten Nutzung von Sekundärenergie

6. ATZ-Fachtagung – Werkstofftechnik im Automobilbau

M. Kober

L. Heber

K. Oetringer

H. Friedrich

ATZ live

**Werkstofftechnik
im Automobilbau**

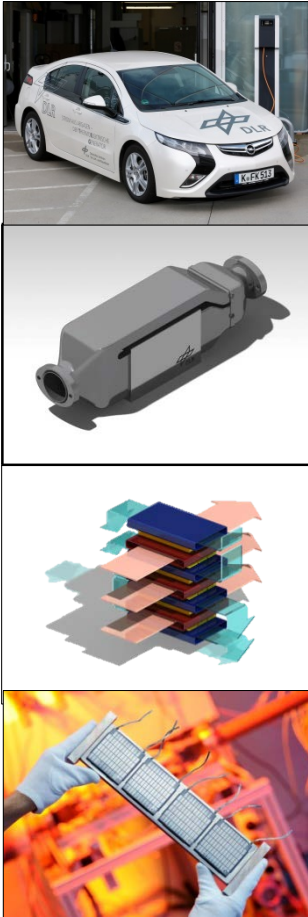
Institut für Fahrzeugkonzepte

Stuttgart, 28.10.2015



Wissen für Morgen



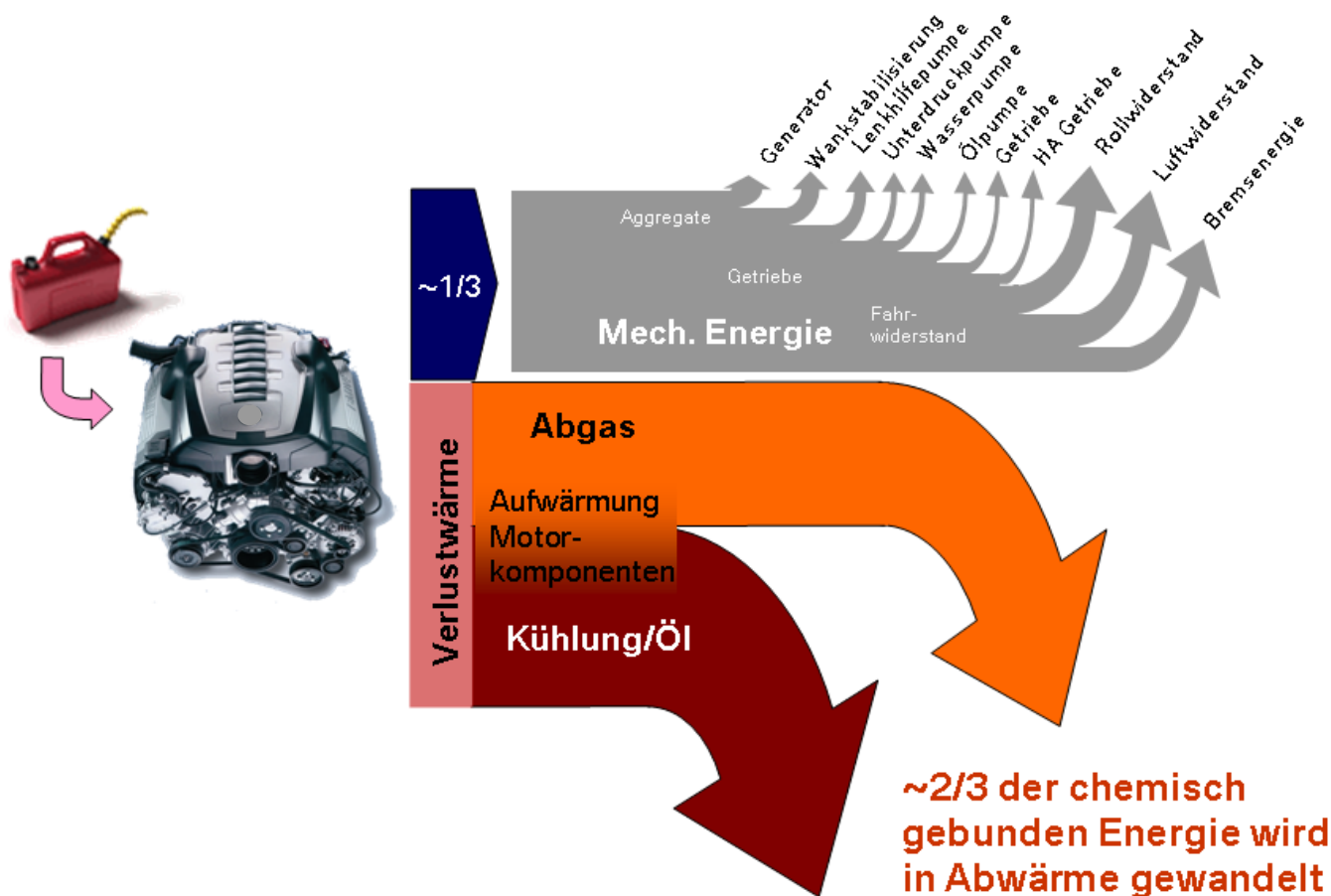


Gliederung

- Motivation Abwärmenutzung
- Thermoelektrische Materialien und deren Wirkungsgrade
- Methodisches Vorgehen zur Steigerung der Leistungsdichte
- Messergebnisse am Funktionsmuster
- Simulationsvalidierung

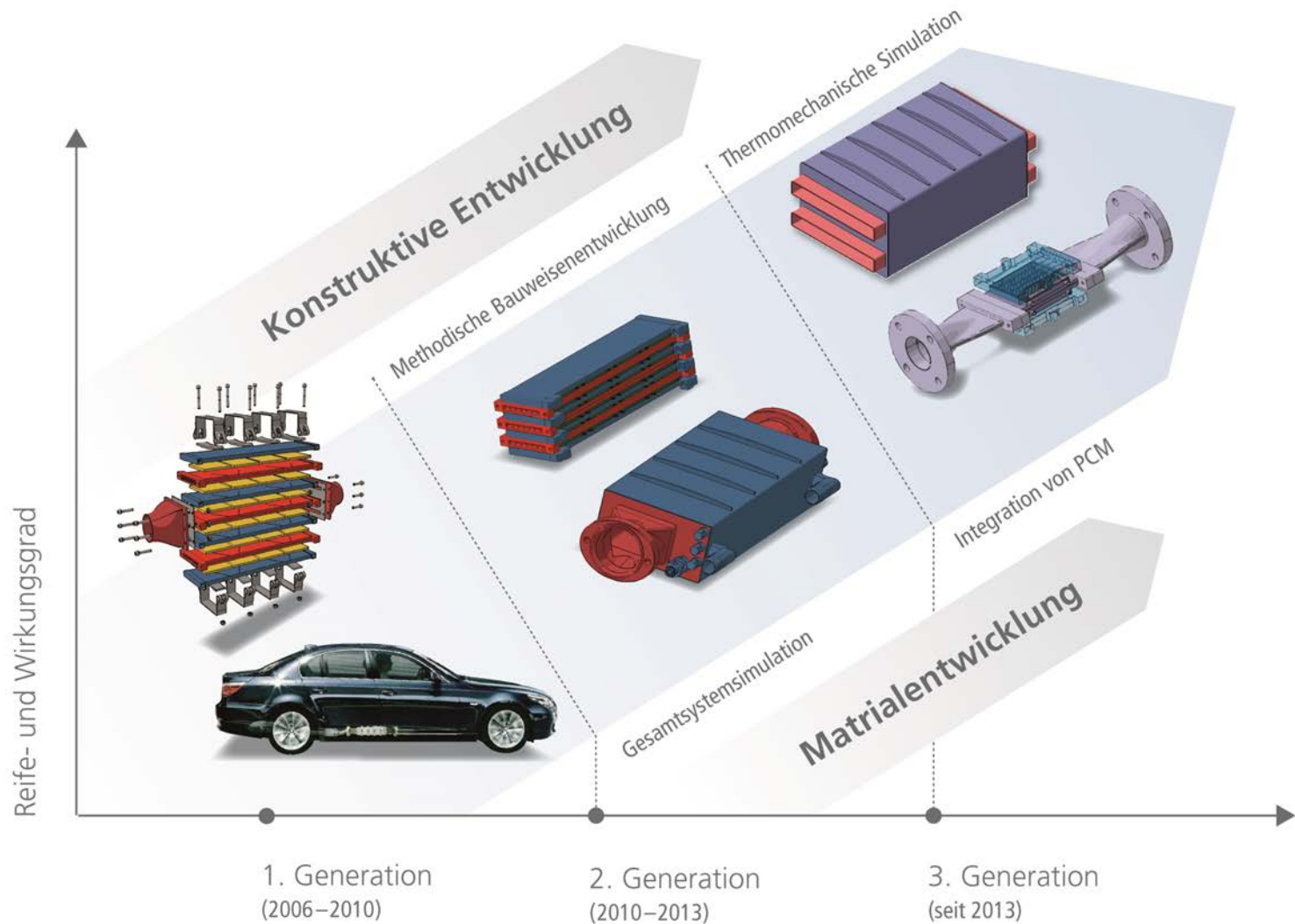
Motivation Abwärmenutzung

Energieflüsse Verbrennungsmotor



1) Treffinger P., Häfele Ch., Weiler T. DLR e.V. Stuttgart; Eder A., Richter R., Mazar B. BMW Group München: Energierückgewinnung durch Wandlung von Abwärme in Nutzenergie. 2008 VDI Tagung „Innovative Fahrzeugantriebe“, Dresden

TEG Entwicklung am DLR



Grundlagen Thermoelektrik

- Thermodiffusion von Elektronen bzw. Löchern zur kalten Seite
- Elektr. Potential proportional zu ΔT :

$$S = \frac{U}{\Delta T} \quad S \text{ Seebeck-Koeffizient}$$

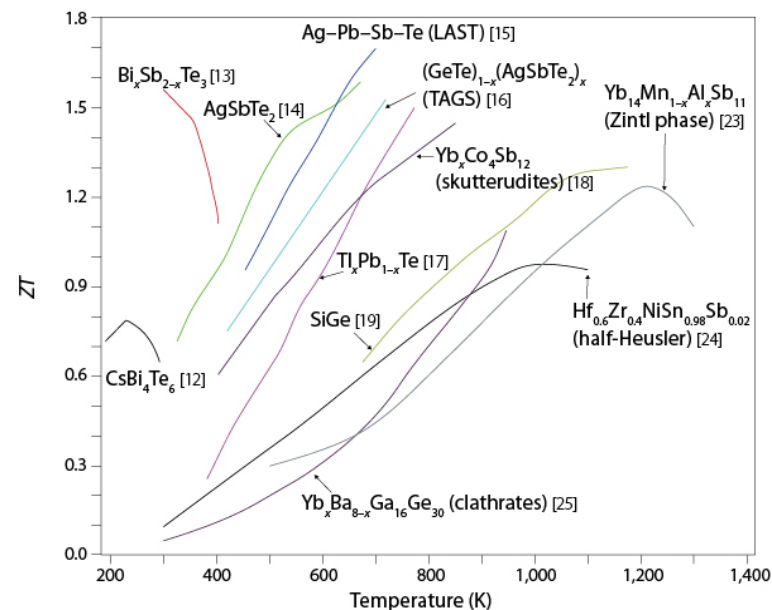
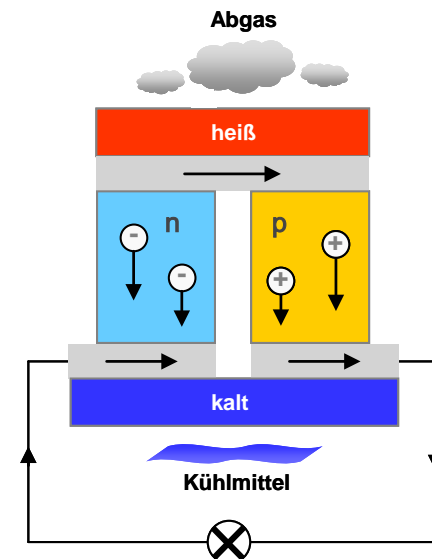
- Dimensionslose Gütezahl ZT:

$$ZT = \frac{S^2 \sigma}{\kappa} T$$

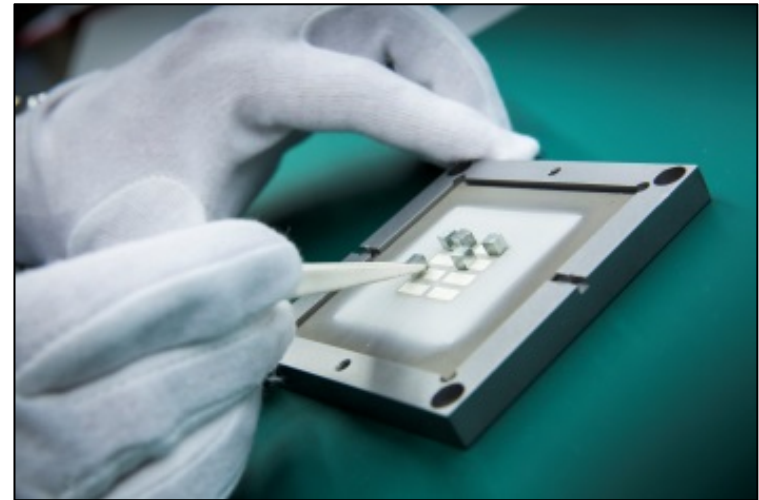
σ Elektrische Leitfähigkeit
 κ Thermische Leitfähigkeit
 T Temperatur

- Wirkungsgrad TE:

$$\eta = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{T_h - T_k}{T_h} \cdot \frac{\sqrt{ZT+1} - 1}{\sqrt{ZT+1} + \frac{T_k}{T_h}}$$

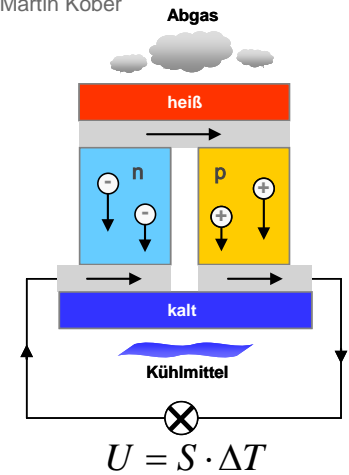
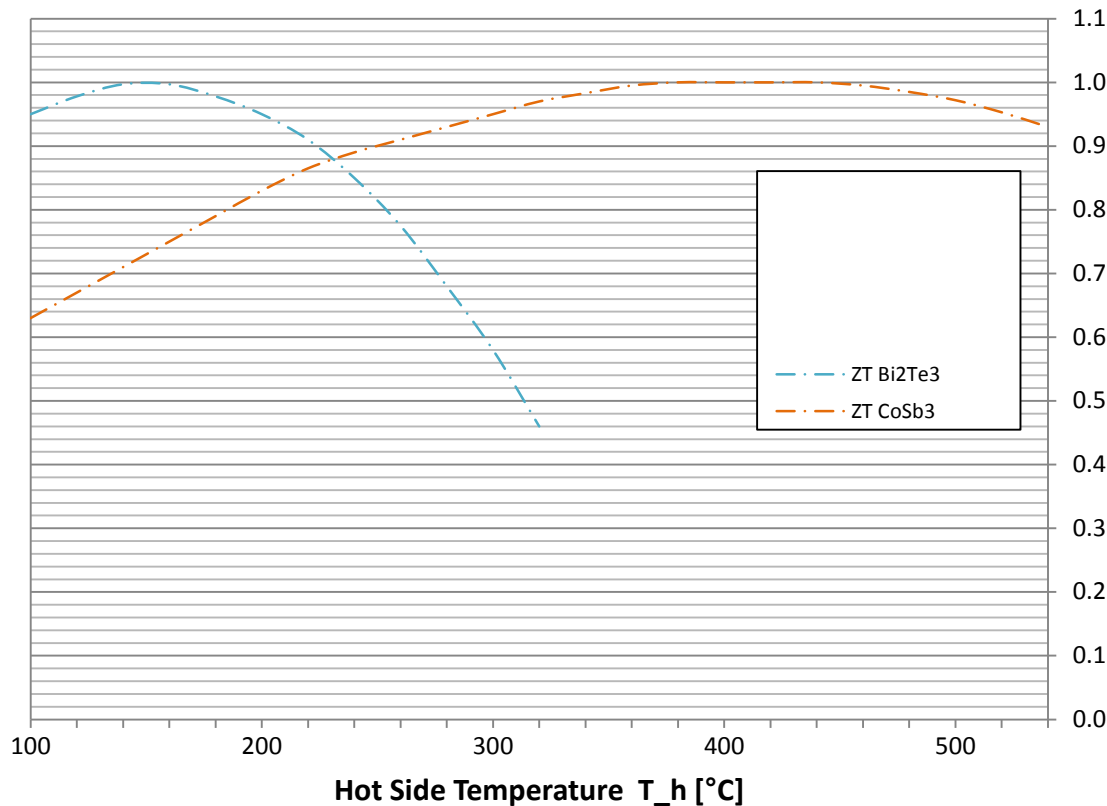


Welche Wirkungsgrade sind mit der Technologie Thermoelektrik erreichbar?



Wirkungsgrade der Thermoelektrik

- Vergleich zwischen Bismuttellurid (Niedertemperatur) und Skutterudit (Hochtemperatur)
- Im Labormaßstab verfügbare Materialien mit $ZT_{\max} \sim 1$



$$ZT = \frac{S^2 * \sigma}{\kappa} * T$$

$$\eta_{\max} = \eta_{\text{Carnot}} * \eta_{\text{ex}}$$

$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{T_h - T_c}{T_h}$$

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{\sqrt{1 + ZT_m} - 1}{\sqrt{1 + ZT_m} + T_c/T_h}$$

Figure of Merit ZT

Wirkungsgrade der Thermoelektrik

- Bismuttellurid mit $ZT_{max} \sim 1$
 → exergetischer Wirkungsgrad $\eta_{ex} \sim 17\%$
- Gesamtwirkungsgrad $\eta_{max} \sim 6\%$ (Niedertemperatur)

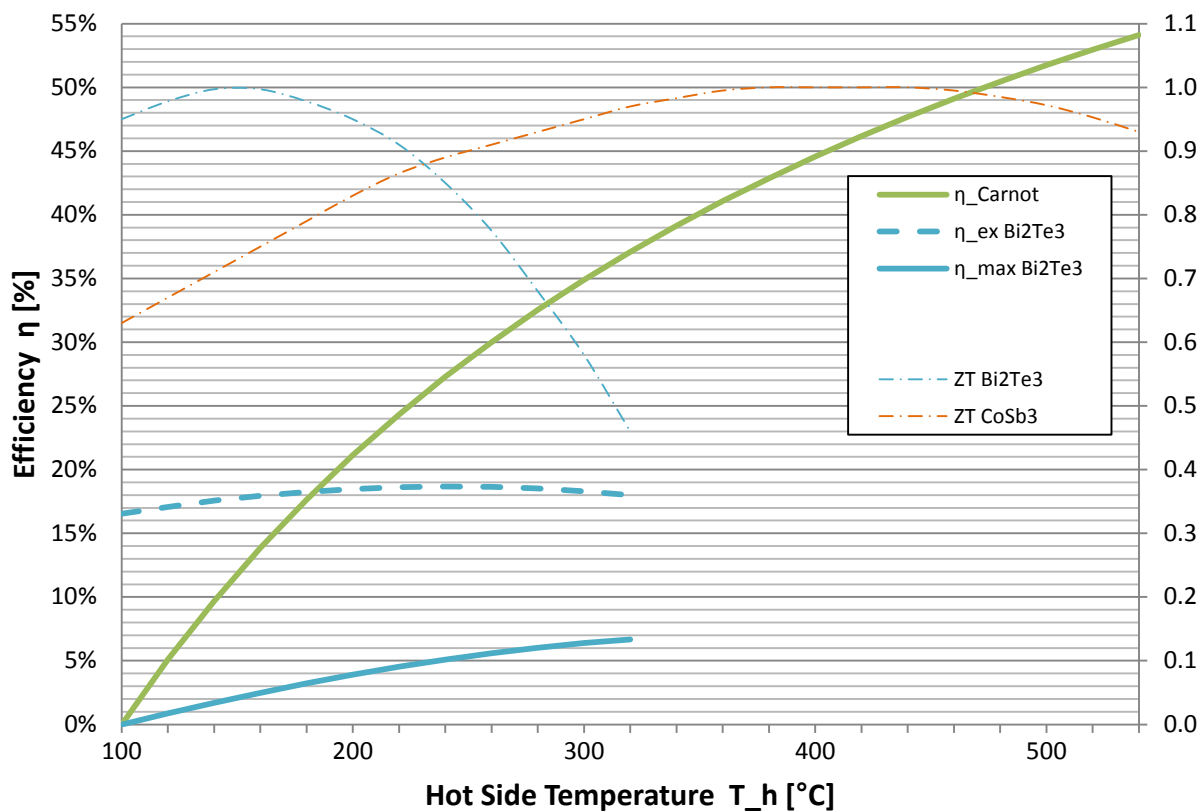
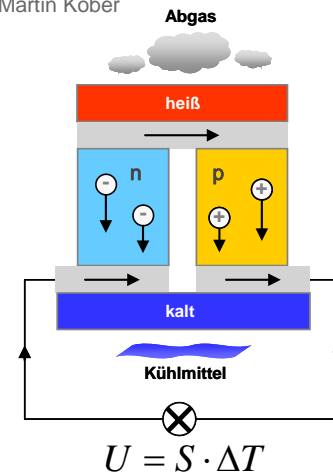


Figure of Merit ZT

$$ZT = \frac{S^2 * \sigma}{\kappa} * T$$

$$\eta_{max} = \eta_{Carnot} * \eta_{ex}$$

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_h - T_c}{T_h}$$

$$\eta_{ex} = \frac{\sqrt{1 + ZT_m} - 1}{\sqrt{1 + ZT_m} + T_c/T_h}$$

Cold Side Temperature $T_c = 100^\circ C$

Wirkungsgrade der Thermoelektrik

- Skutterudit mit $ZT_{max} \sim 1$
 → exergetischer Wirkungsgrad $\eta_{ex} \sim 20\%$
- Gesamtwirkungsgrad $\eta_{max} \sim 11\%$ (Hochtemperatur)

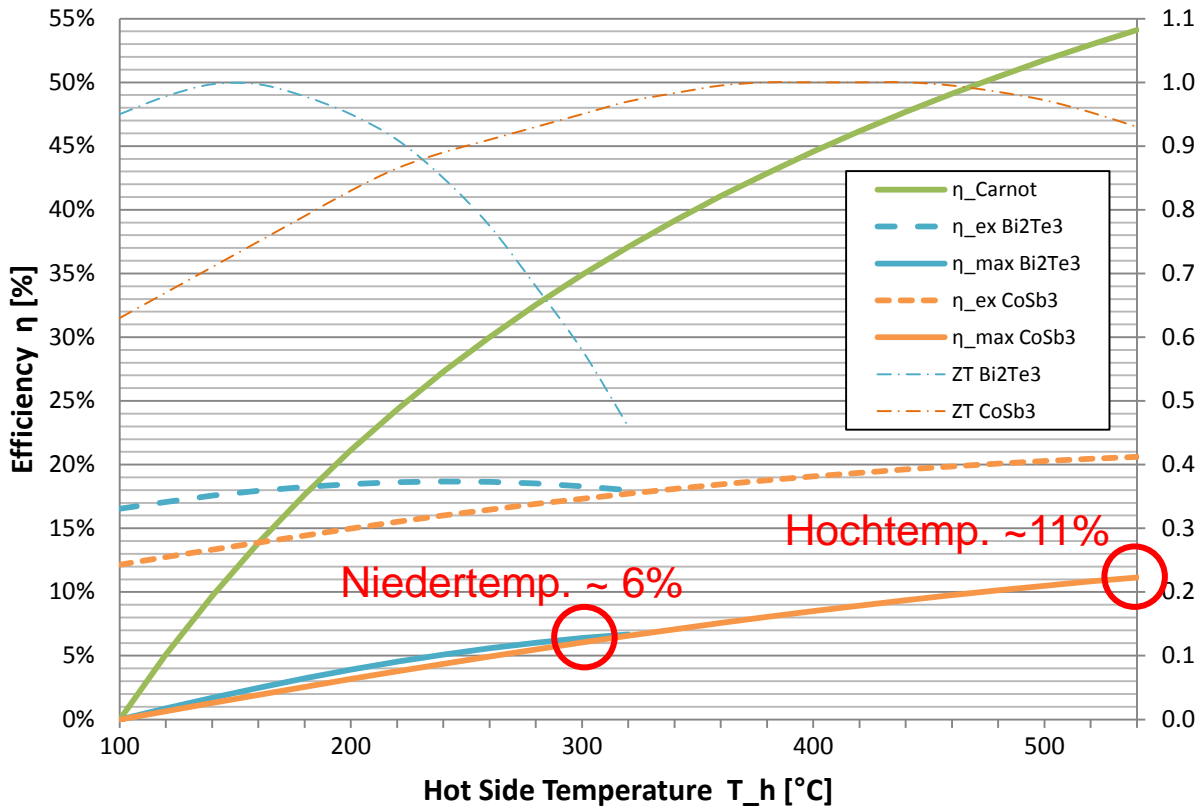
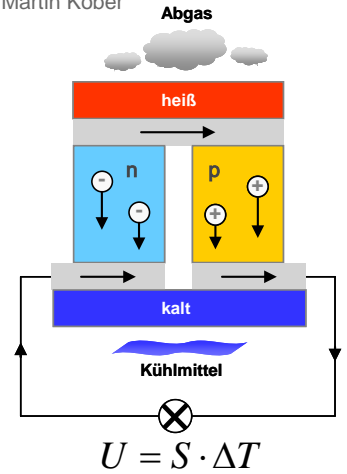


Figure of Merit ZT

$$ZT = \frac{S^2 * \sigma}{\kappa} * T$$

$$\eta_{max} = \eta_{Carnot} * \eta_{ex}$$

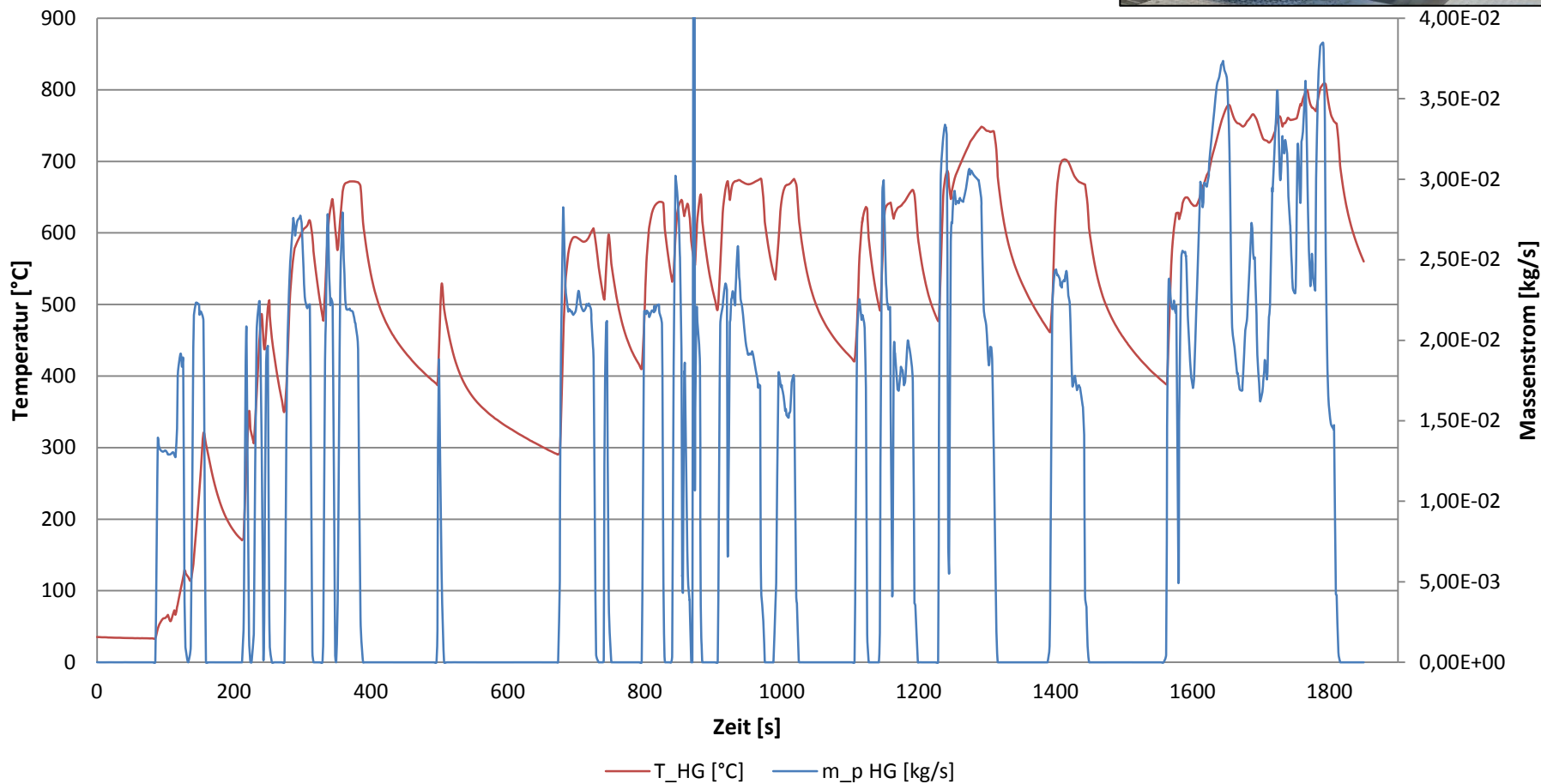
$$\eta_{Carnot} = \frac{T_h - T_c}{T_h}$$

$$\eta_{ex} = \frac{\sqrt{1 + ZT_m} - 1}{\sqrt{1 + ZT_m} + T_c/T_h}$$

Cold Side Temperature $T_c = 100^\circ\text{C}$

WLTP – Prüfzyklus

Opel Ampera 1.4 I Rex (63 kW)



- 1) Oetringer, Kerstin und Kober, Martin (2014) *Hat der TEG noch eine Berechtigung in einer Zeit der Elektromobilität?* VDI-Fachkonferenz Thermische Rekuperation in Fahrzeugen, 31. März - 01. April 2014, Nürtingen, Deutschland..

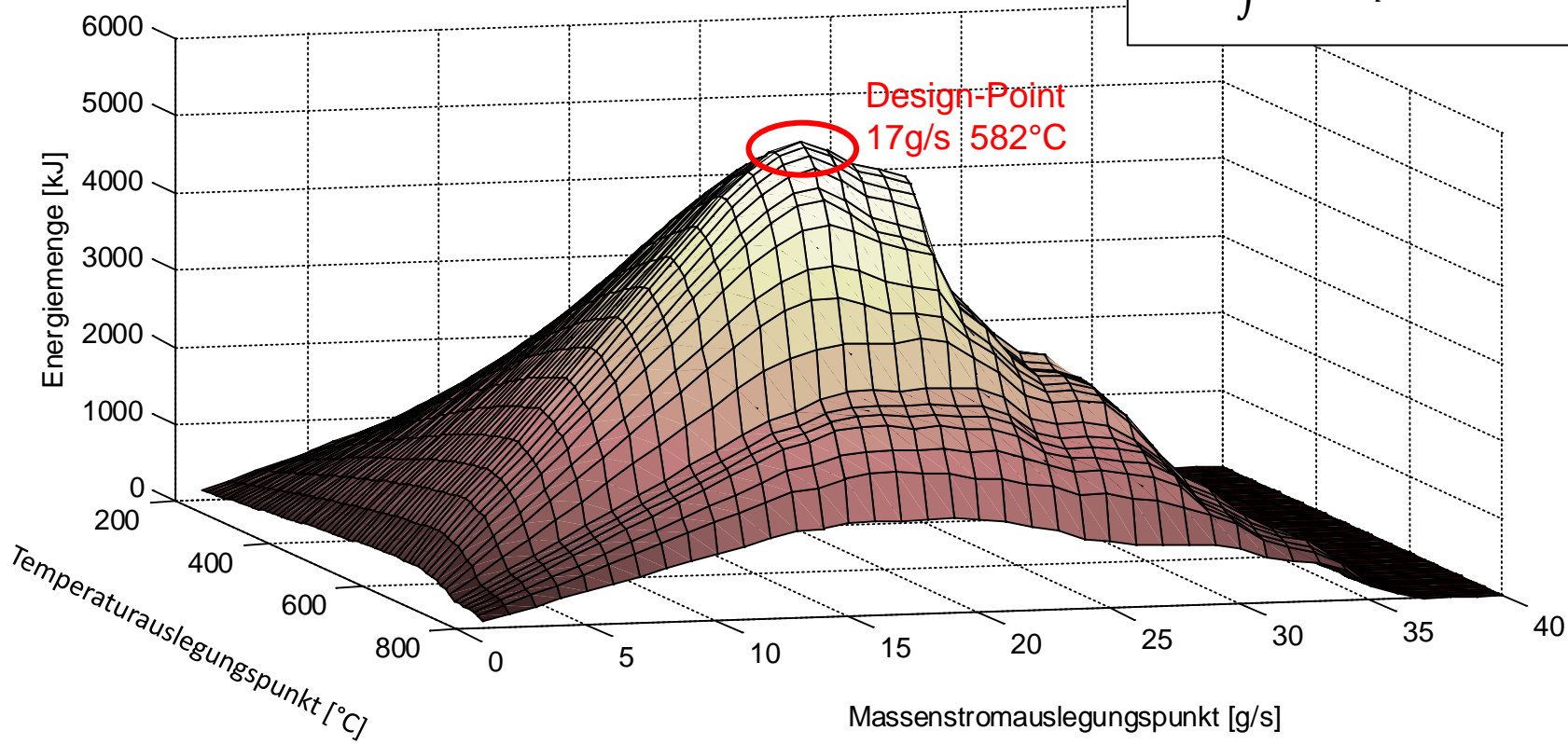
TEG-Design-Point

Niederlastiger Design-Point zur TEG-Auslegung



$$E = \int \dot{m}_u \cdot c_p \cdot (T_u - T_c)$$

Verwertbare Energiemenge im WLTP



Vorgehensweise zur Steigerung der Leistungsdichte

Ziel 1: Leistungssteigerung + Kostensenkung

Vorgehensweise: Neuartige thermodynamische Auslegungsmethode

- Holistische Auslegungsmethode für TEG

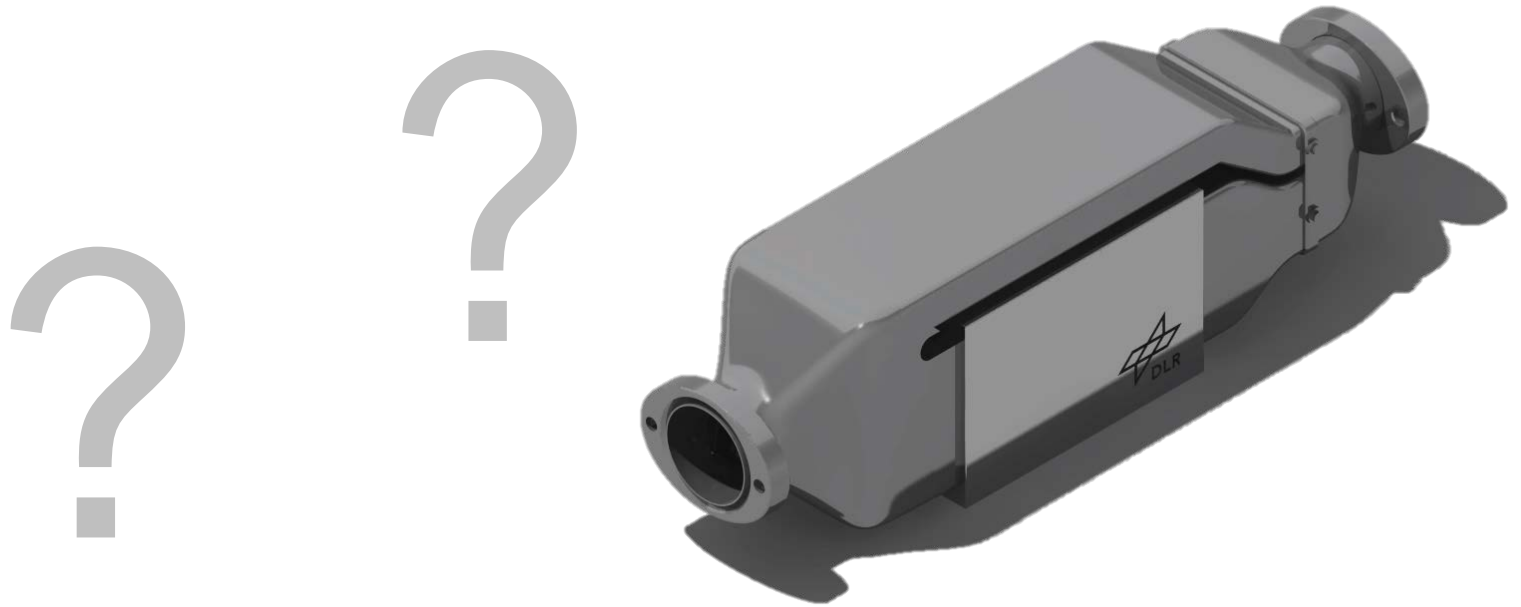
Ziel 2: Gewichts-/Volumenreduktion + Kostensenkung

Vorgehensweise: Konstruktive Entwicklung und thermomechanische Auslegung

- Hochintegrierte Bauweise



Wie kann eine holistische Auslegung durchgeführt werden?



Wechselwirkungen mit dem Fahrzeuggesamtsystem

Elektr. Leistungseinspeisung



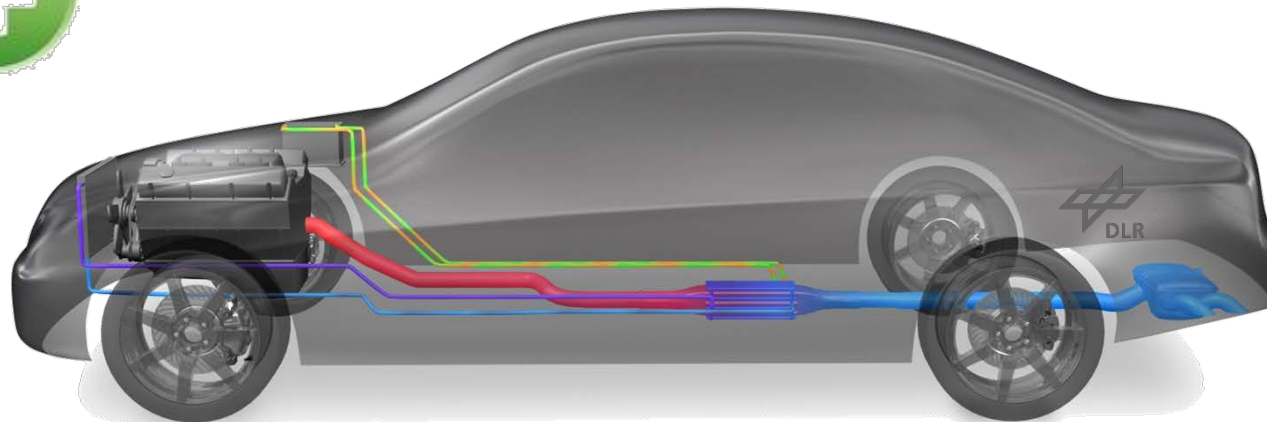
$$\Delta P_{in}$$

Verkürzung der Kaltstartphase



Kühllast

$$\Delta P_{co}$$



Abgasgegendruck



$$\Delta P_{pr}$$

Kühlung des Abgases



Roll- und

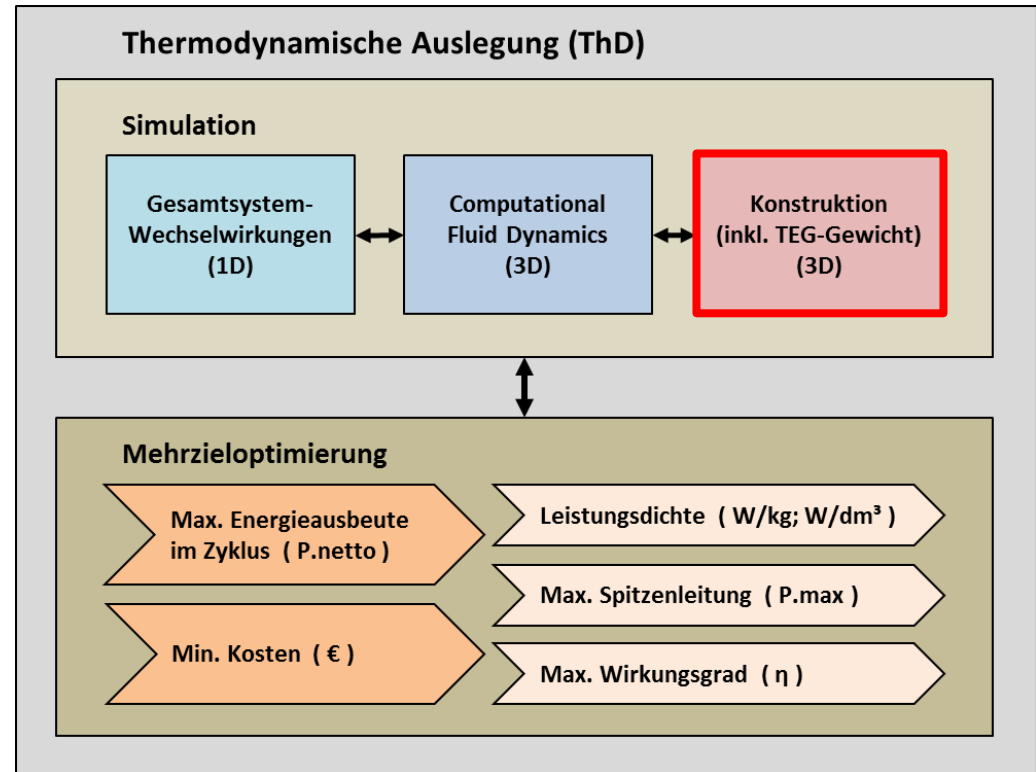
Beschleunigungswiderstand

$$\Delta P_{ro}$$

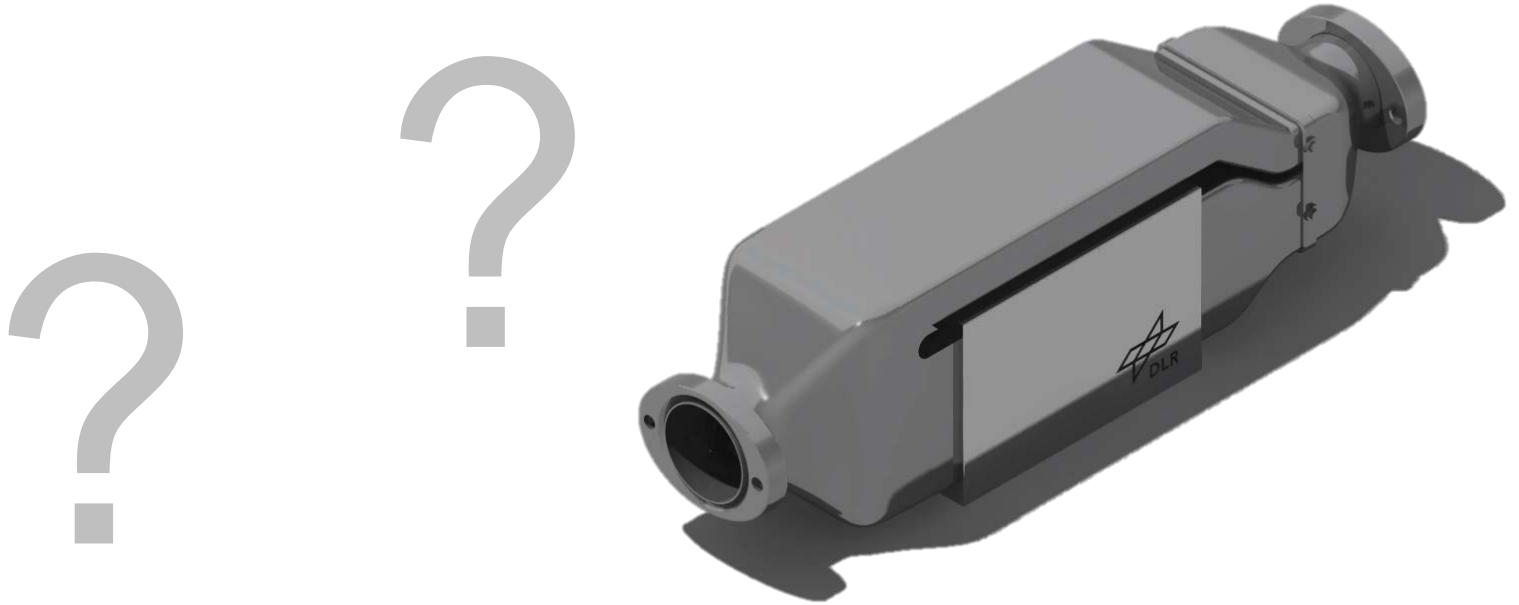


Holistische Auslegungsmethode für TEG

- TEG-Auslegung unter Berücksichtigung aller relevanten Einflüsse auf das Fahrzeug
- Nutzung von CFD-Simulation (3D) in Kombination mit einer Simulation der Fahrzeuggesamtsystem-Wechselwirkungen (1D)
- Mehrzieloptimierung adressiert die Zielgrößenkonflikte u.a. aus Leistung im Zyklus, Spitzenleistung und Kosten

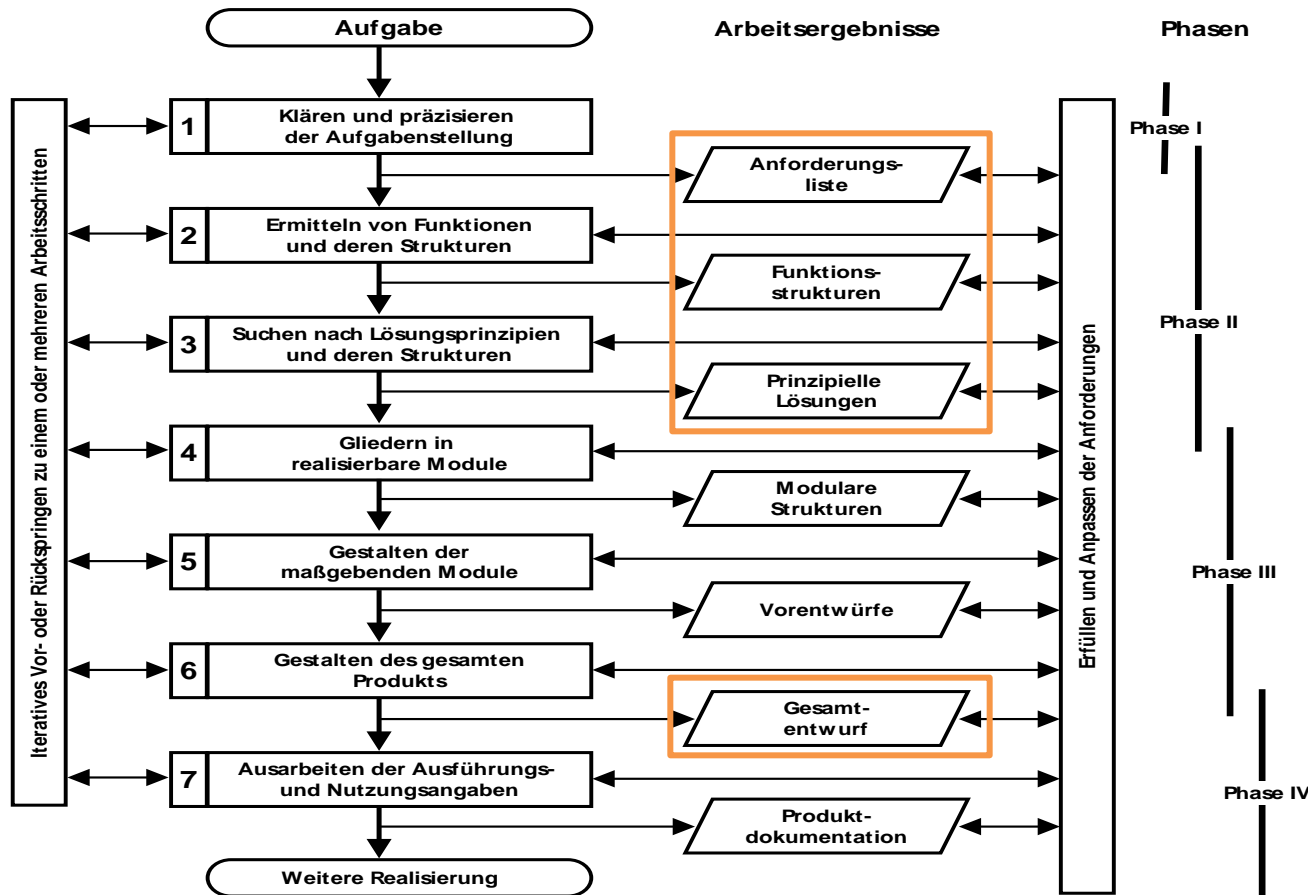


Wie kann das TEG-Gewicht deutlich reduziert werden?



Vorgehensweise TEG-Entwicklung allgemein

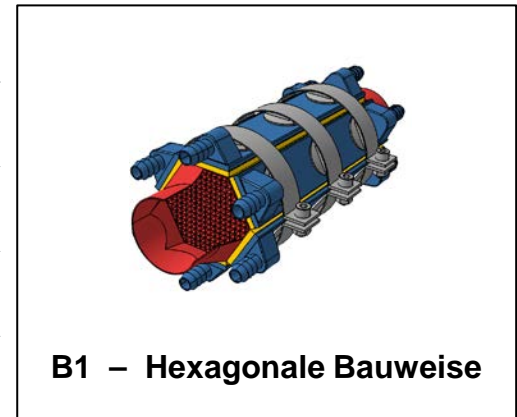
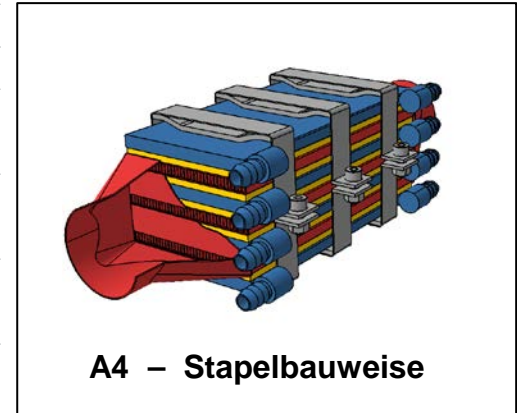
VDI Richtlinie 2221



Beispiel: Prinzipielle Lösungen

sub-functions	sub-solutions						
	1	2	3	4	5	6	7
feed/dissipate exhaust							
heat transfer							
conduct heat							
distribute heat smoothly							
dissipate electric energy							
conduct heat							
feed/dissipate coolant							
provide force							
distribute contact pressure smoothly							

A2
 E1
 A4
 B1
 A3
 A1
 D1
 C1
 B2

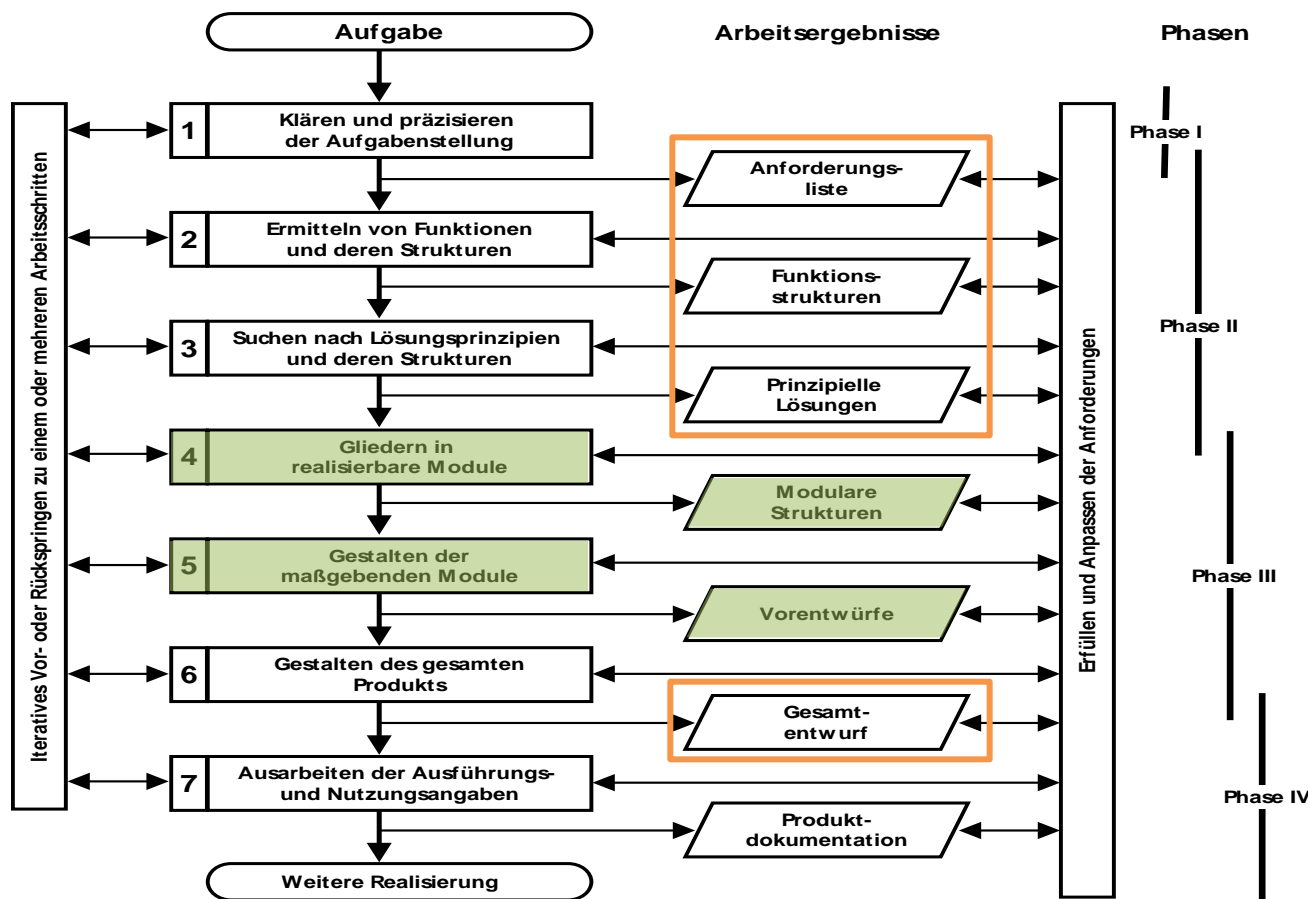


1) Kober, M. ; Häfele, C. ; Friedrich, H. E. (2012) Methodical Concept Development of Automotive Thermoelectric Generators (TEG). 3. International Conference 'Thermoelectrics goes Automotive', 2012, Berlin, Deutschland.



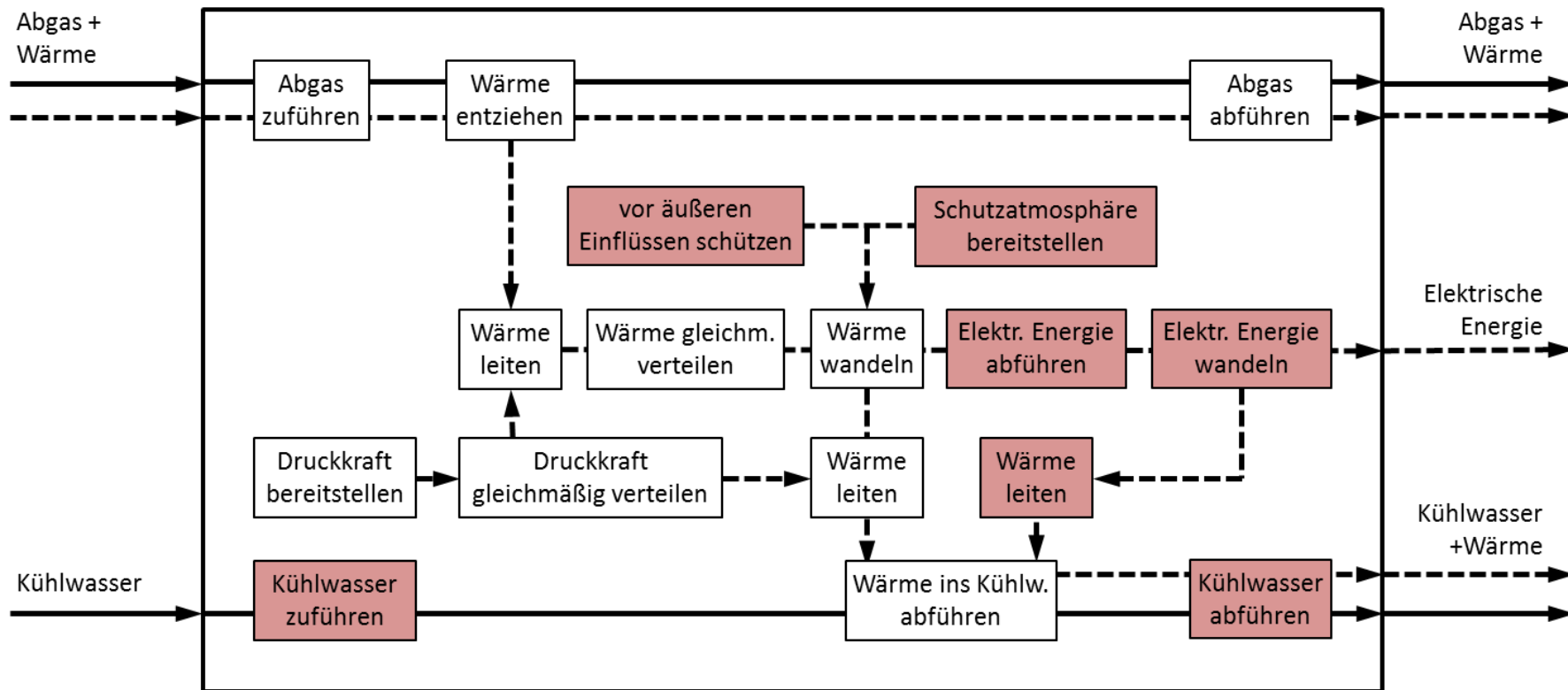
Vorgehensweise: Hochintegration der TEG-Bauweise

(VDI Richtlinie 2221 – Modulare Strukturen)



Funktionsstrukturen und Modulare Strukturen

Hochintegration von TEG-Gehäuse, Kühlmittelführung und Elektronik



Erweitert zu: 1) Kober, M. ; Häfele, C. ; Friedrich, H. E. (2012) Methodical Concept Development of Automotive Thermoelectric Generators (TEG). 3. International Conference 'Thermoelectrics goes Automotive', 2012, Berlin, Deutschland.

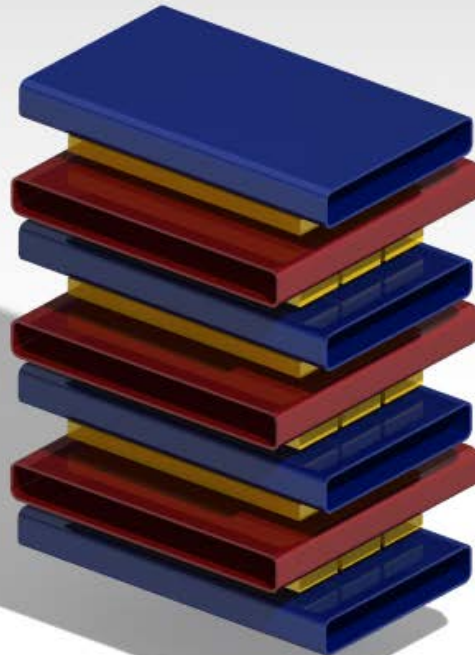


Vorentwurf der Modularen Struktur als Kreuzstromwärmeübertrager

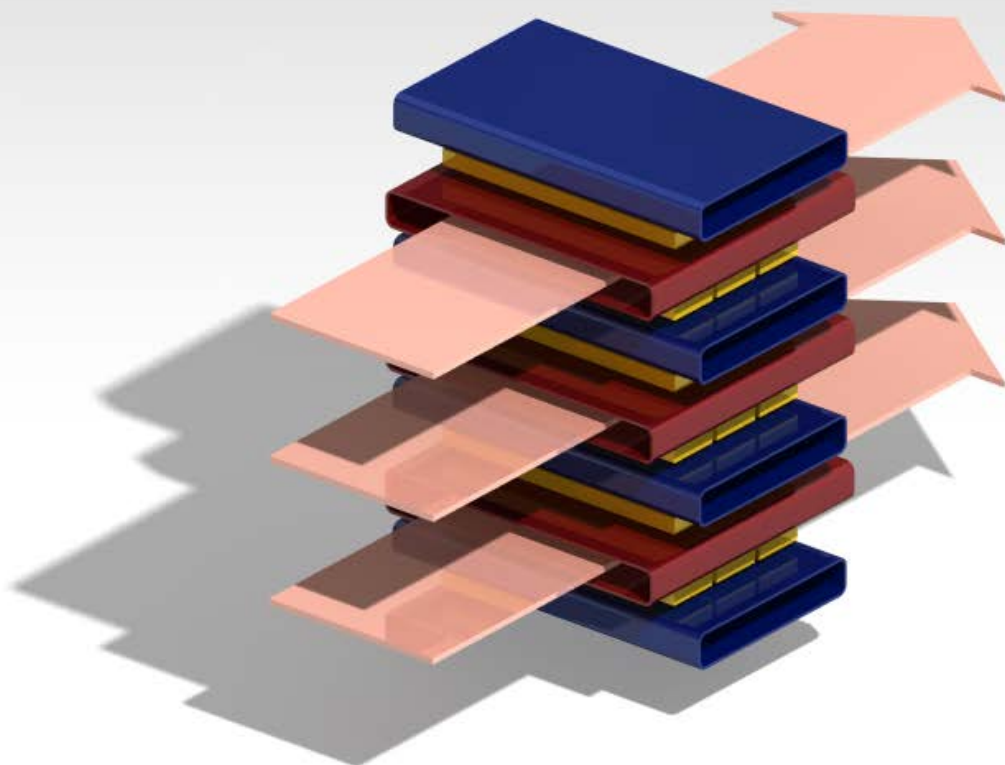
Kühlwasser-
wärmeübertrager

Längliche Thermo-
elektrische Module

Heißgas-
wärmeübertrager



Vorentwurf der Modularen Struktur als Kreuzstromwärmeübertrager



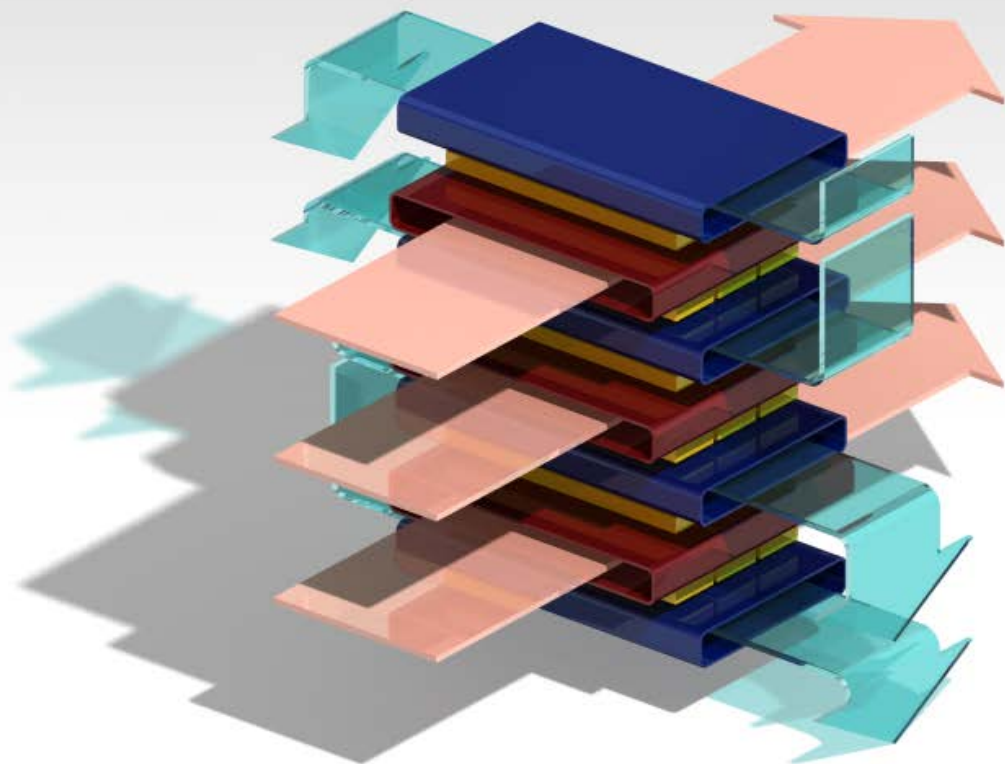
Kühlwasser-
wärmeübertrager

Längliche Thermo-
elektrische Module

Heißgas-
wärmeübertrager

Heißgas

Vorentwurf der Modularen Struktur als Kreuzstromwärmeübertrager



Kühlwasser-
wärmeübertrager

Längliche Thermo-
elektrische Module

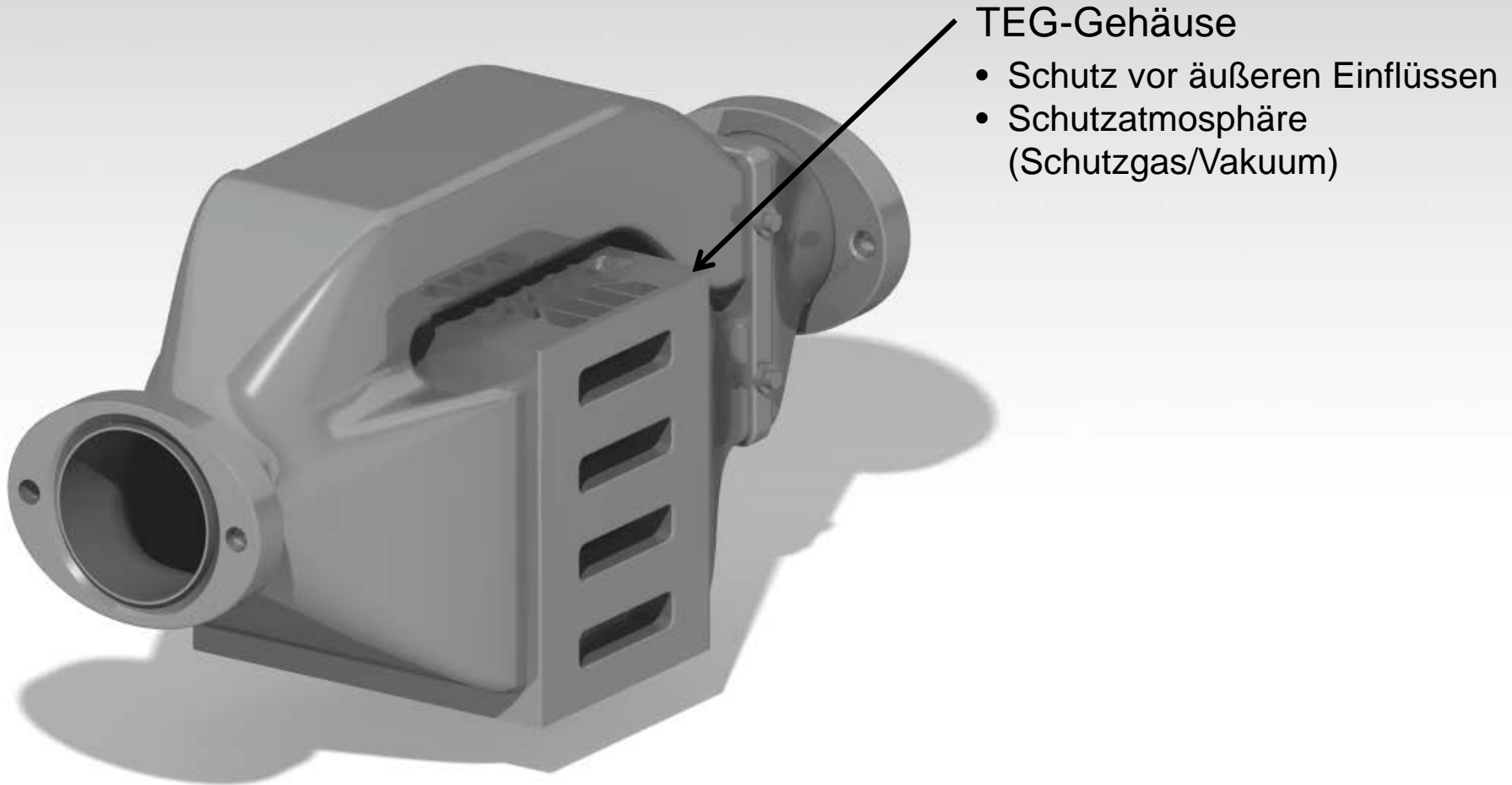
Heißgas-
wärmeübertrager

Heißgas

Kühlwasser

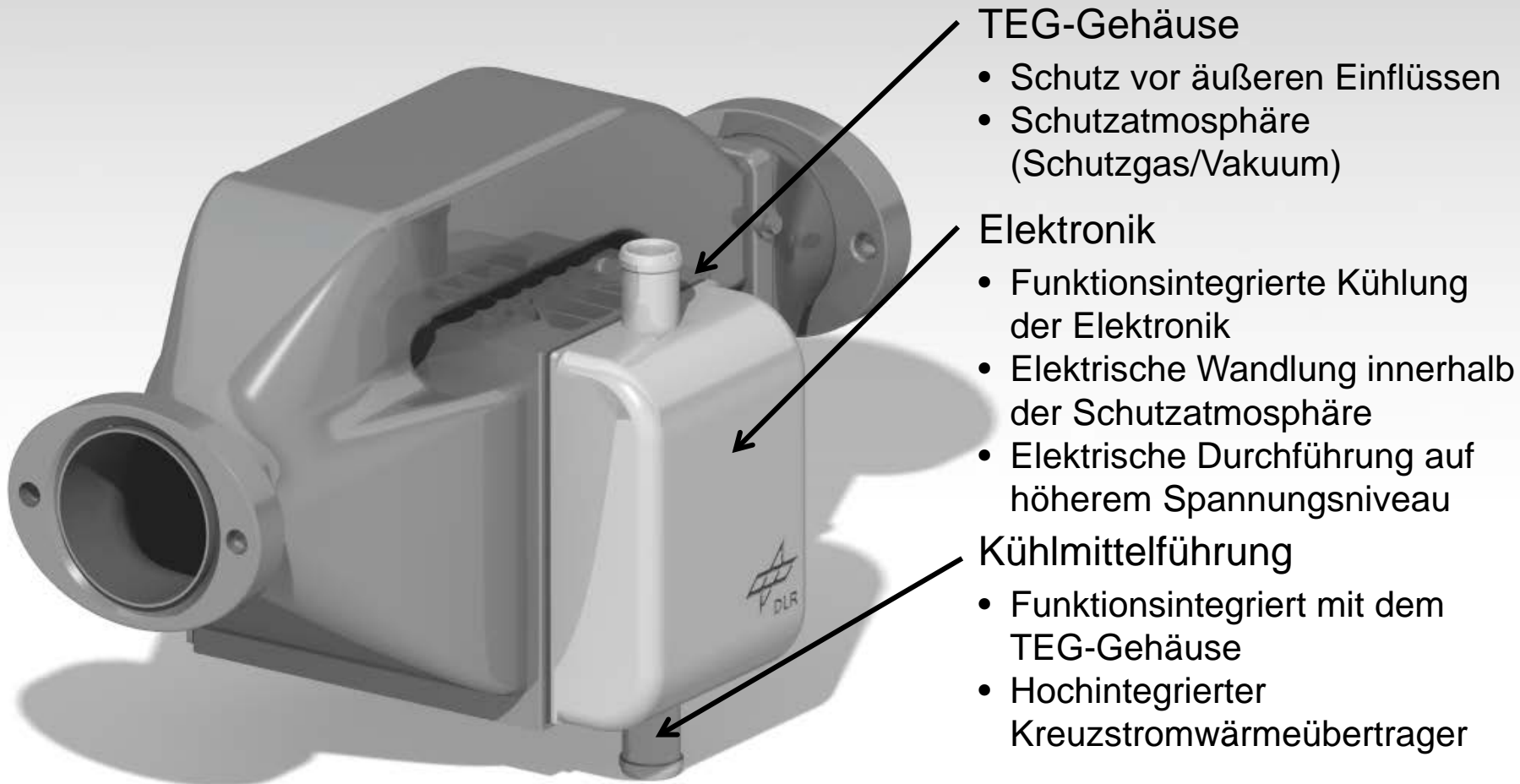
Gesamtentwurf

Hochintegrierter TEG als Kreuzstromwärmeübertrager



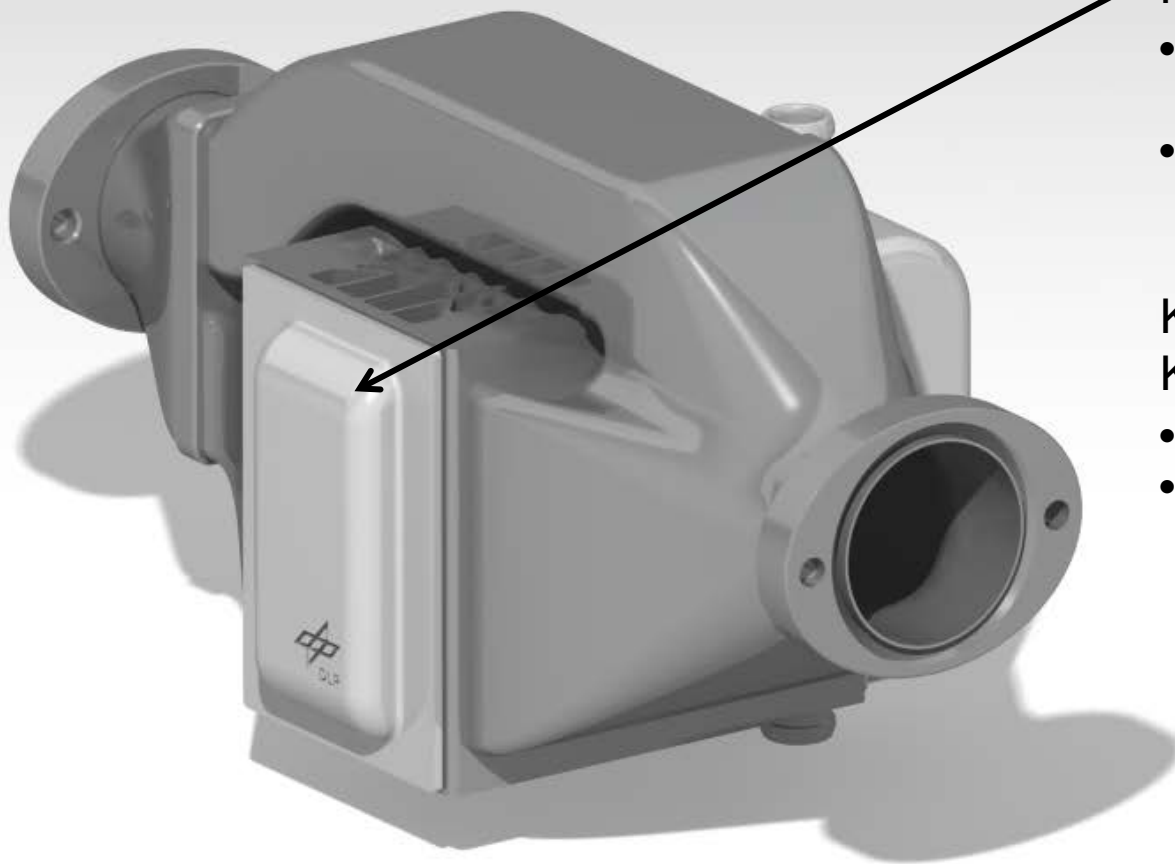
Gesamtentwurf

Hochintegrierter TEG als Kreuzstromwärmeübertrager



Gesamtentwurf

Hochintegrierter TEG als Kreuzstromwärmeübertrager



Kühlmittelführung

- Funktionsintegrierte Kühlmittelumlenkung
- Kühlwasserwärmeübertrager: 2 x parallel und 2 in Reihe

Kühlmittelführungen als Kunststoff-Spritzgussbauteil

- Geringes Gewicht
- Geringe Kosten

Kenngößen aus der Simulation der hochintegrierten Bauweise

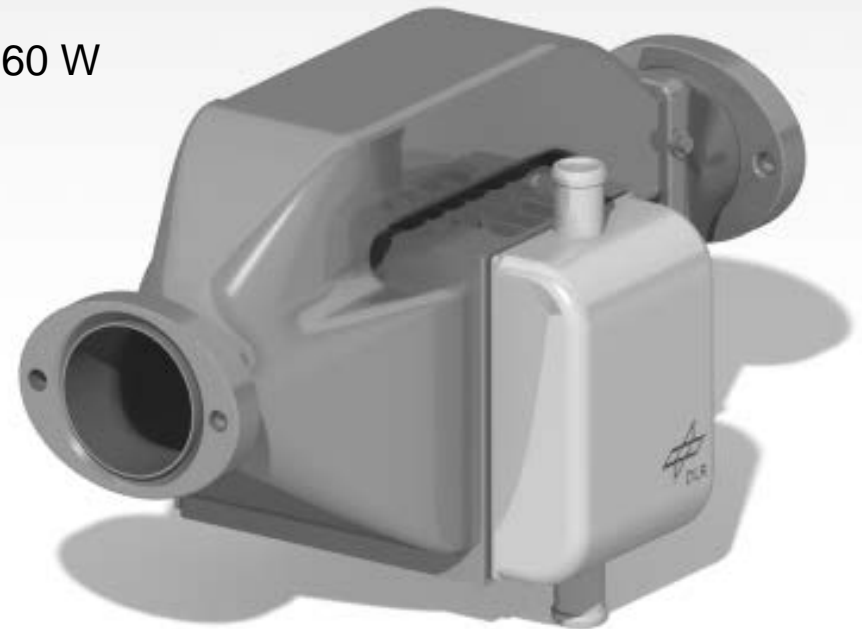
TEG

- Gewicht < 8 kg (ohne Bypass)
- Volumen < 3 dm³ (ohne Bypass und Diffusoren)
- El. Spitzenleistung > 400 W
- El. Leistung im Design-Point (Niederlast) > 160 W

Leistungsdichte TEG:

- Gravimetrische Leistungsdichte > 50 W/kg
- Volumetrische Leistungsdichte > 130 W/dm³

TEG-Optimierung auf den niederlastigen Design-Point und nicht auf Spitzenleistung.
Bei reiner Maximierung der Spitzenleistung könnten noch bessere Leistungsdichten erreicht werden.



Messergebnisse

Simulationsvalidierung

- Zielwert: < 8kg
inkl. Elektronik (nicht im Projekt umgesetzt)
exkl. Bypass
exkl. Messtechnik

- Funktionsmuster: 8,3 kg
Messtechnik: - 2,1 kg
Elektronik (Annahme): + <1,5 kg

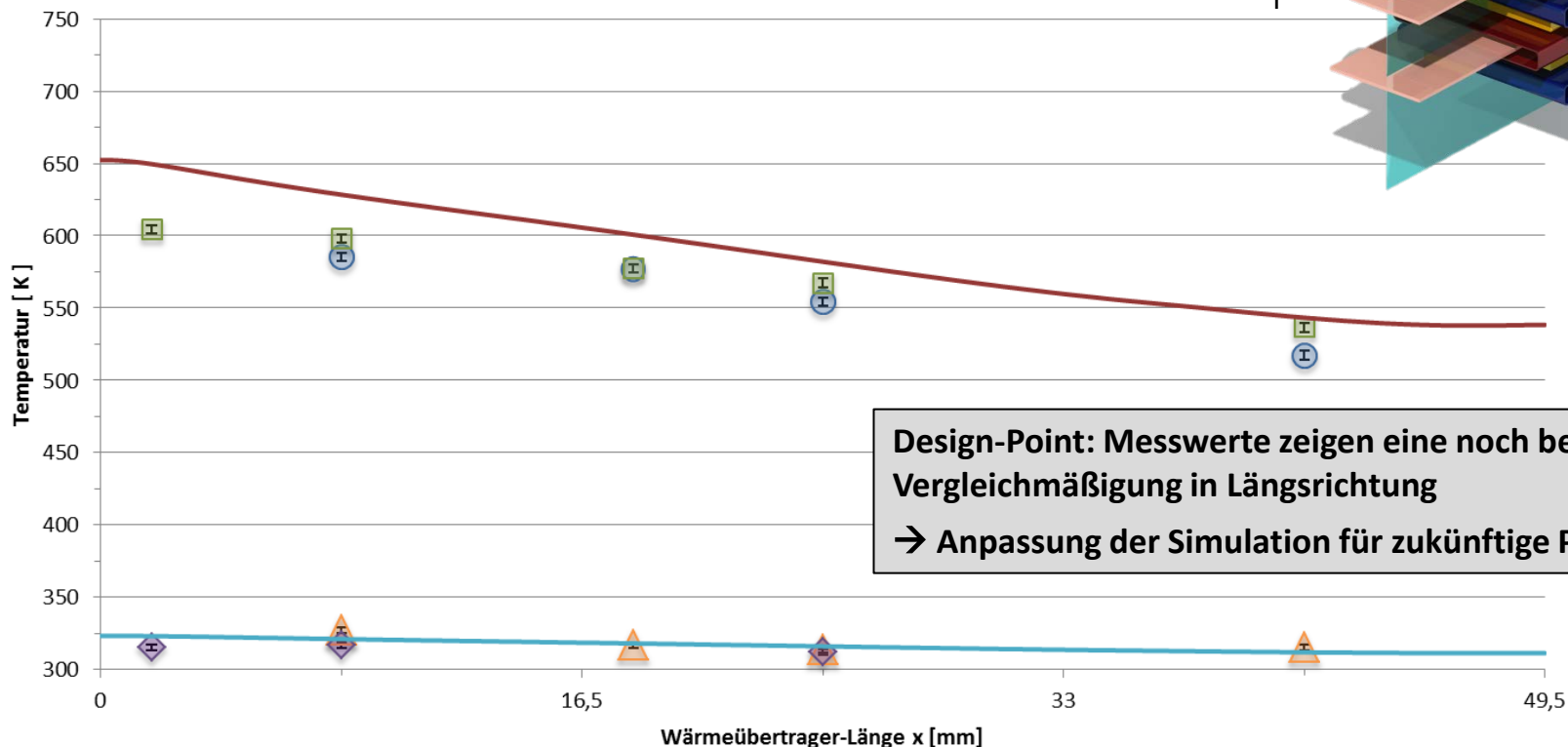
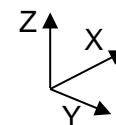
→ erreichtes Gewicht <7,7 kg



Messergebnisse

Simulationsvalidierung - Design-Point

Schnittebene in TEG-Längsrichtung



Design-Point: Messwerte zeigen eine noch bessere Vergleichmäßigkeit in Längsrichtung
 → Anpassung der Simulation für zukünftige Projekte

● Th_HGWUE_mess - Ebenen:Ersatzmodul	▲ Tc_KWWUE_mess - Ebene:Ersatzmodul	■ Th_HGWUE_mess - Ebene:TEM
◆ Tc_KWWUE_mess - Ebene:TEM	— Th_HGWUE_simu	— Tc_KWWUE_simu

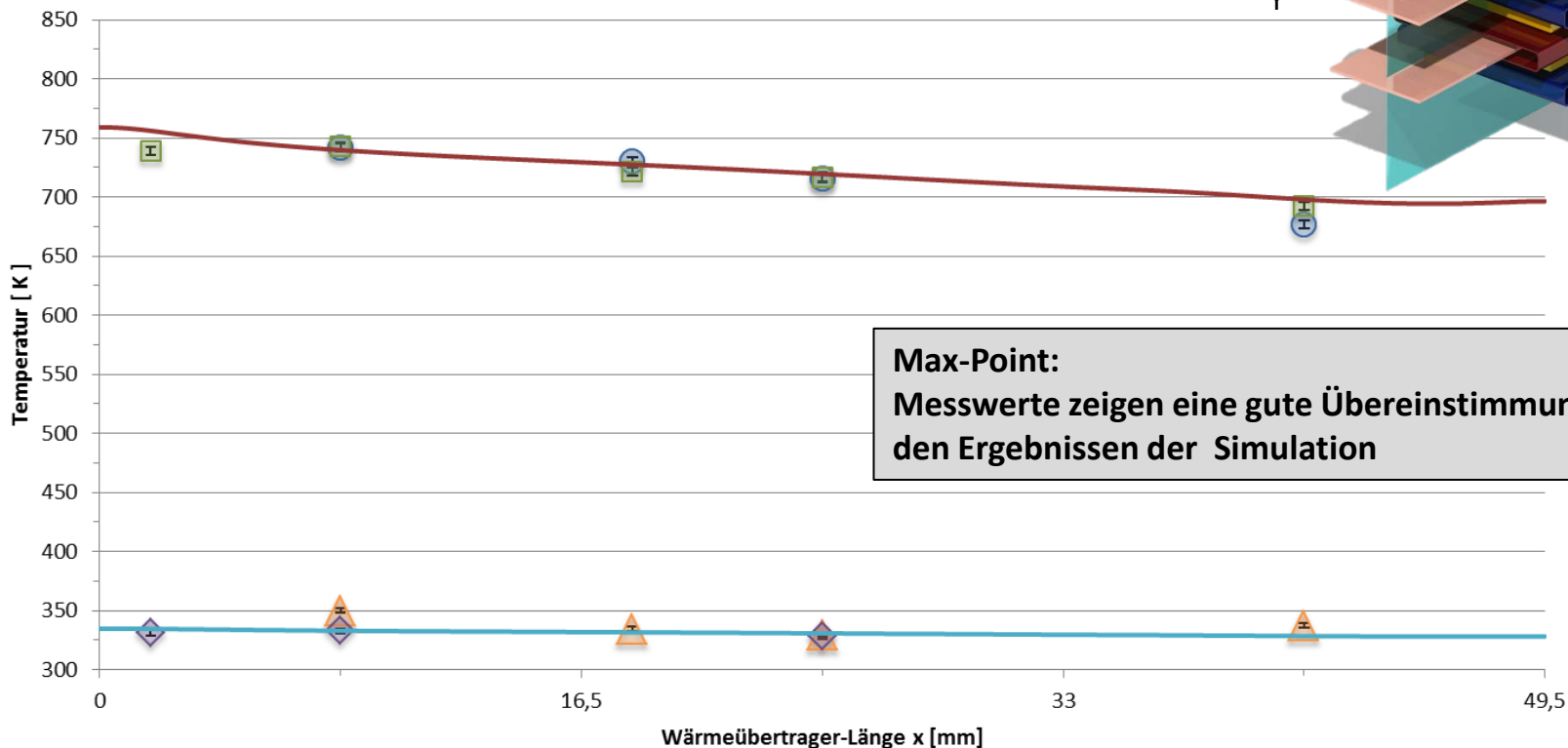
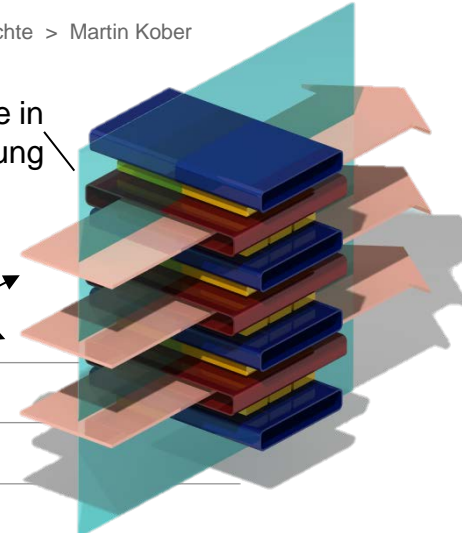
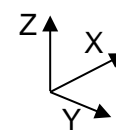
Vergleich der Messung und CFD-Simulation der Heißeite (Th) und Kaltseite (Tc) am Messpunkt 1 - Design-Point



Messergebnisse

Simulationsvalidierung - Max-Point

Schnittebene in TEG-Längsrichtung



Max-Point:
Messwerte zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Simulation

- Th_HGWUE_mess - Ebenen:Ersatzmodul ▲ Tc_KWWUE_mess - Ebene:Ersatzmodul ■ Th_HGWUE_mess - Ebene:TEM
- ◆ Tc_KWWUE_mess - Ebene:TEM — Th_HGWUE_simu — Tc_KWWUE_simu

Vergleich der Messung und CFD-Simulation der Heißseite (Th) und Kaltseite (Tc) am Messpunkt 9 - Max-Point



Zusammenfassung

- Vorgehen zur Steigerung der Leistungsdichte
- Vorstellung einer neuen holistischen Auslegungsmethode
- Vorstellung einer hochintegrierten TEG-Bauweise
- Vergleich von Mess- und Simulations-Ergebnissen



Projekt RExTEG



Baden-Württemberg
MINISTERIUM FÜR FINANZEN UND WIRTSCHAFT

Danksagung

Diese Arbeit wurde finanziert vom Ministerium für Finanzen und Wirtschaft in Baden-Württemberg mit Mitteln der Baden-Württemberg Stiftung.

Institut für Fahrzeugkonzepte
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart

Dipl.-Ing.(FH) Martin Kober
Tel.: +49 - 711 6862 - 457
martin.kober@dlr.de
www.DLR.de/fk

