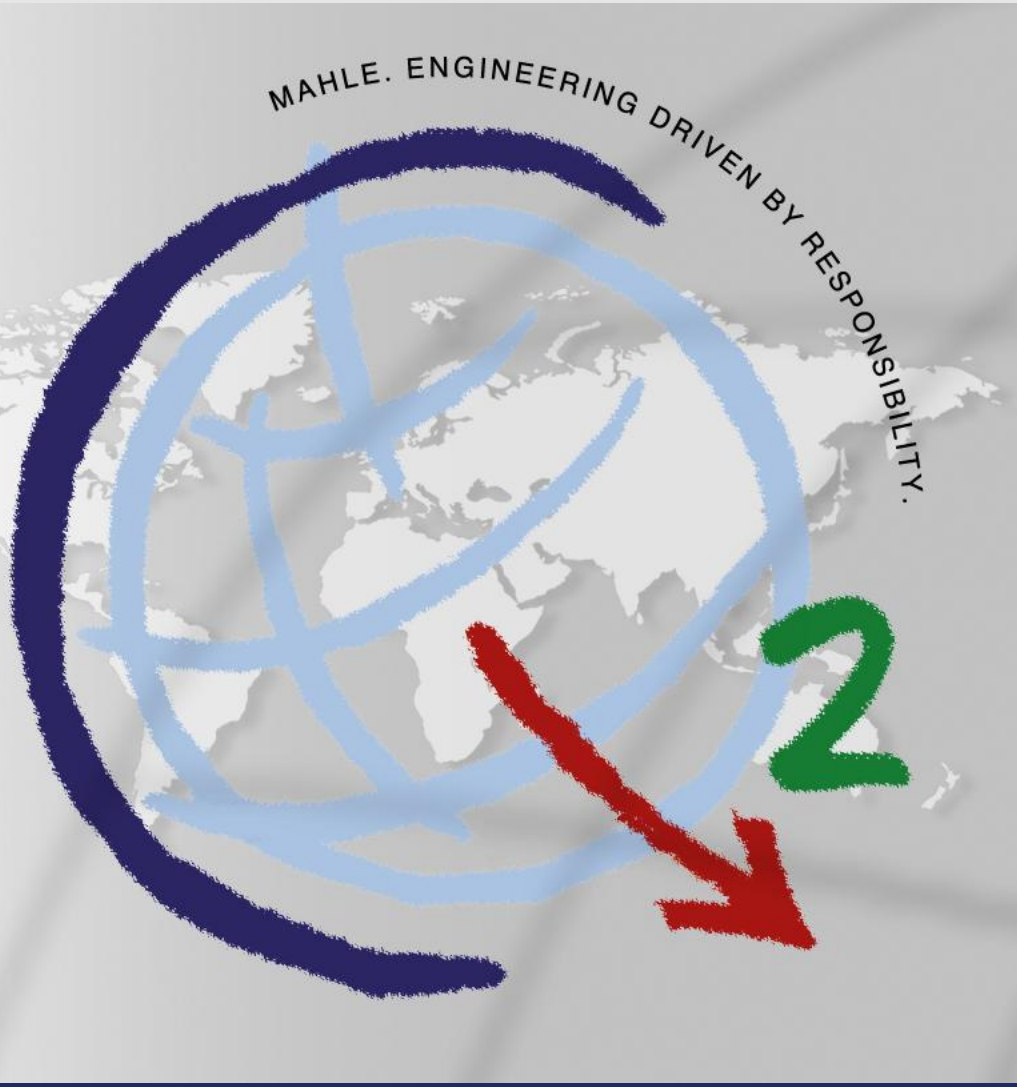
MAHLE

Driven by performance

3. Schweizer ORC-Symposium
Hochschule Luzern
11.11.2016

Systematische Entwicklung eines hermetisch dichten WHR-Systems für Nfz-Anwendungen



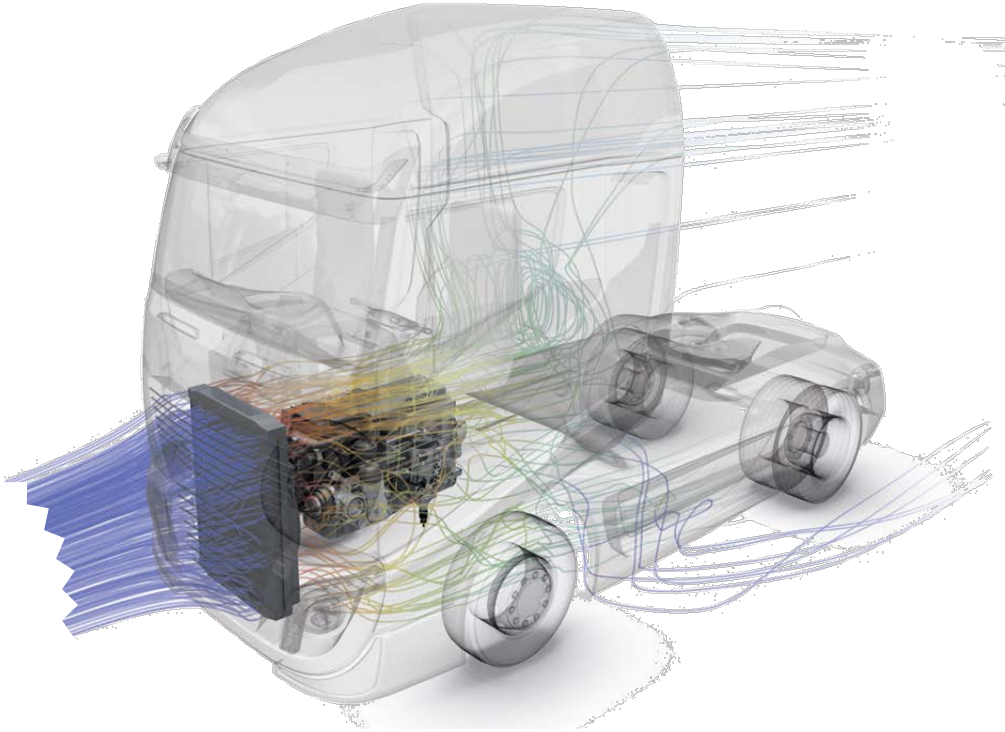
Holger Oechslen
Corporate Advanced Engineering
MAHLE International GmbH

© MAHLE

Agenda

Driven by performance

- Motivation für WHR im Nutzfahrzeug
- WHR Entwicklungsprozess bei MAHLE
  - Prozessstruktur
  - Systemsimulation
  - Komponenten
  - Systemtest
- Zusammenfassung

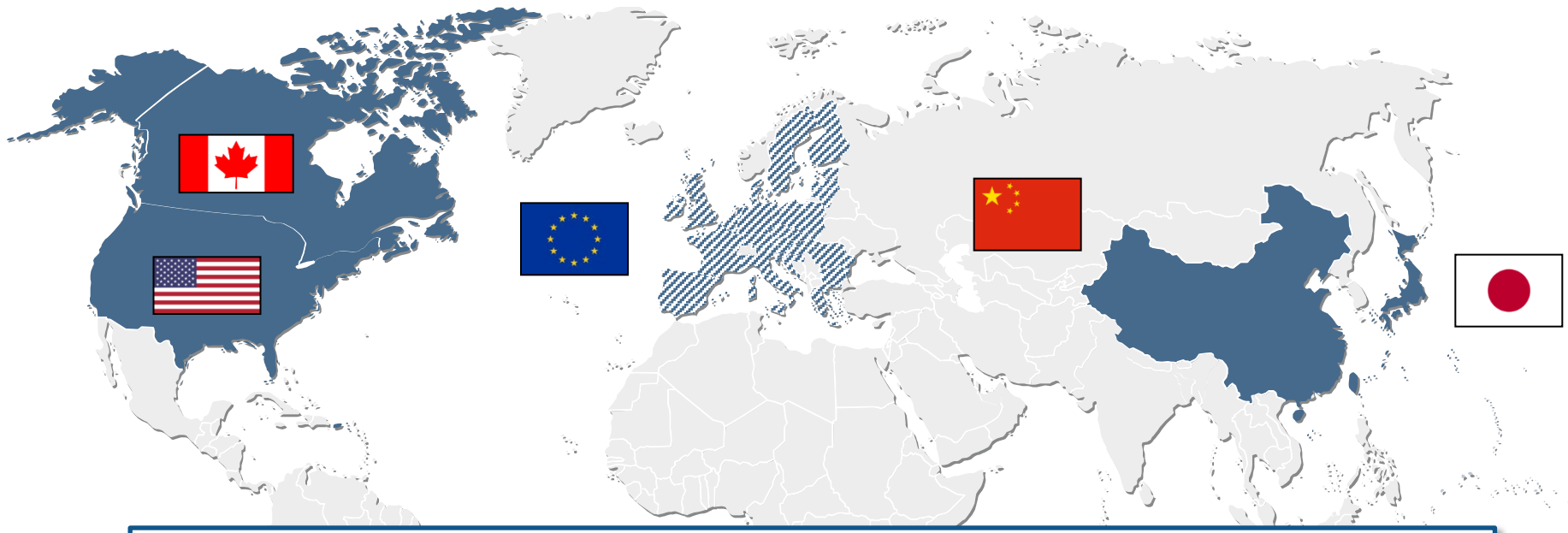


© MAHLE

MAHLE

Driven by performance

Motivation
Entwicklungstreiber



Weltweite CO_2-Gesetzgebungen für Nutzfahrzeuge erwartet

+ Reduktion Betriebskosten (Kraftstoffverbrauch)

➔ CO_2 Reduktion erforderlich

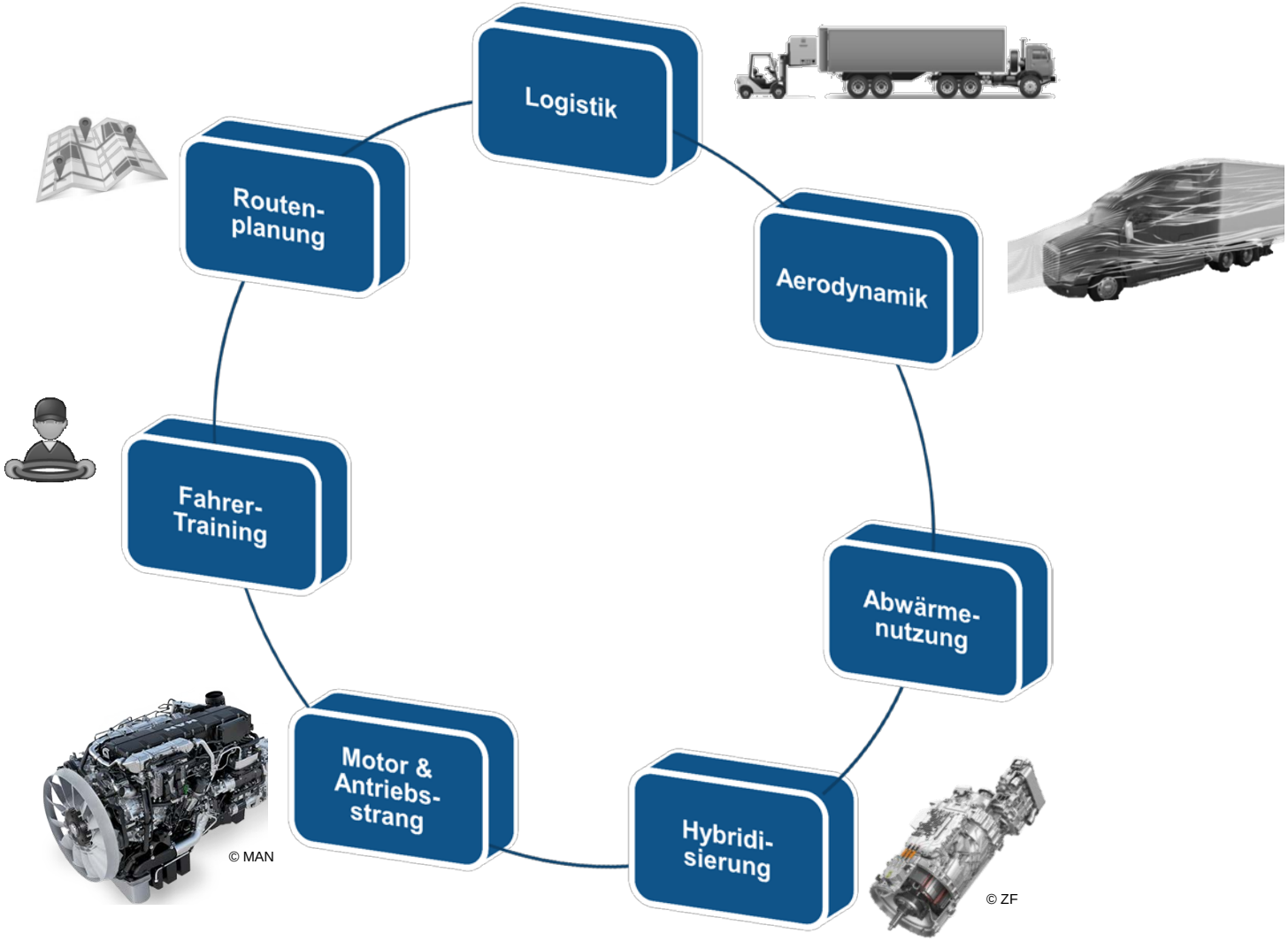
Quelle: ICCT

© MAHLE

Motivation

Mögliche Lösungen zur CO_2 Reduktion

Driven by performance

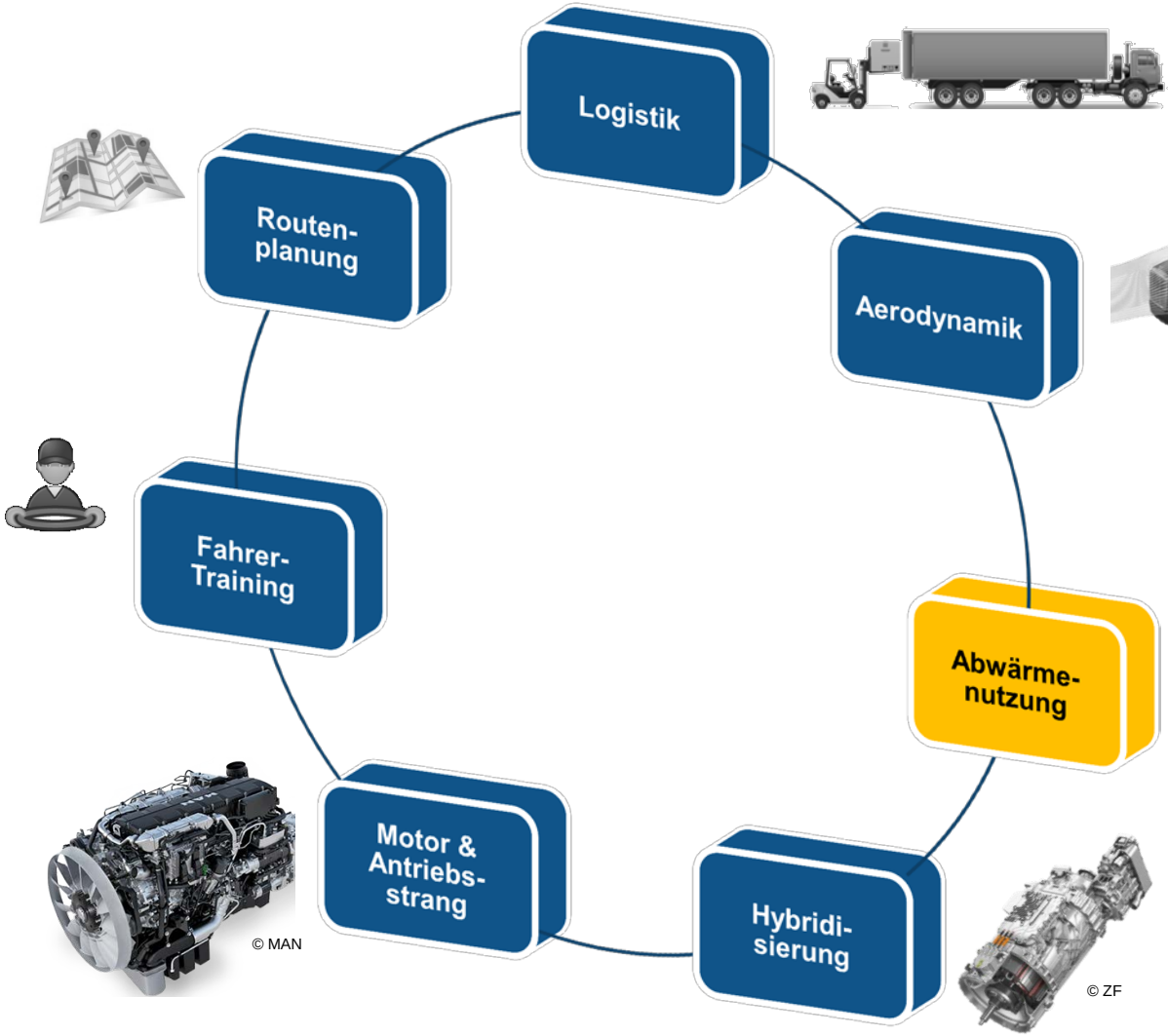


© MAHLE

Motivation

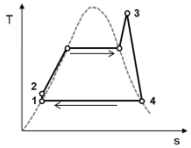
Mögliche Lösungen zur CO_2 Reduktion

Driven by performance



© Scania

- Turbo-Compound
- Thermoelektrik
- (Organic) Rankine Cycle

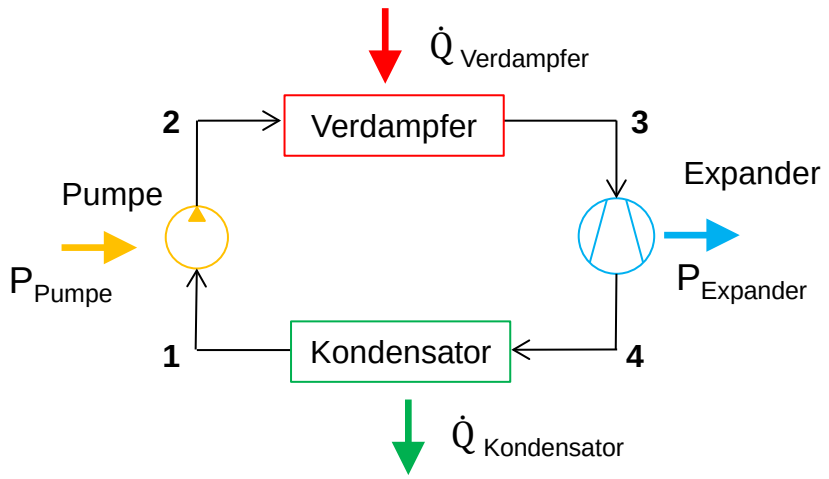


© MAHLE

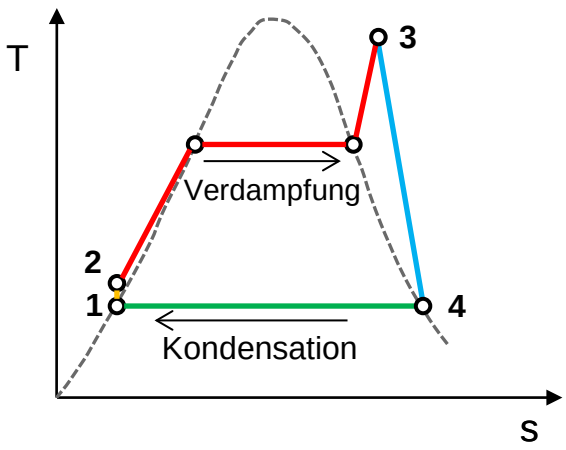
Abwärmenutzung mittels ORC im Nfz

MAHLE
Driven by performance

- Schematischer Rankine-Cycle



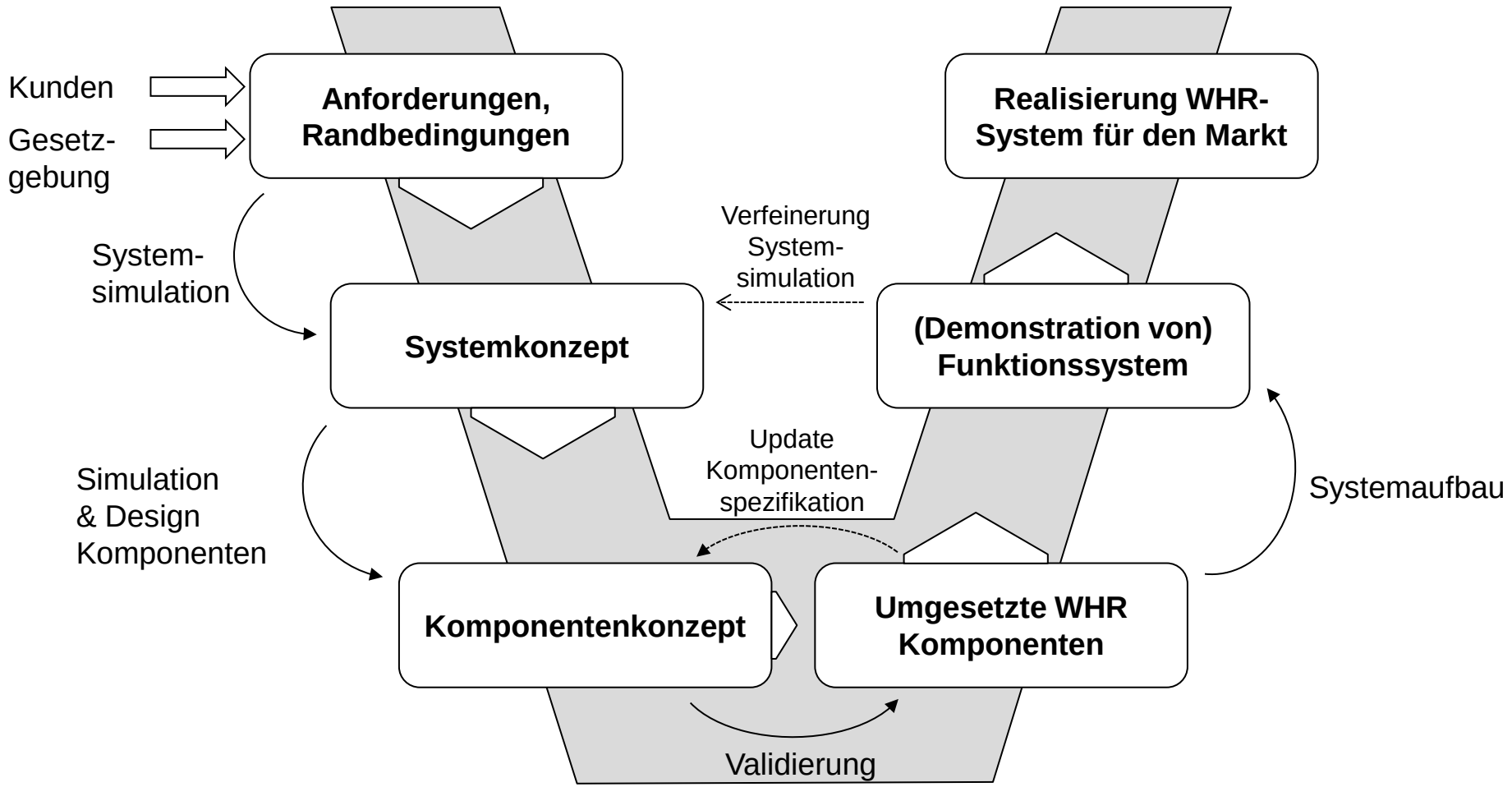
- T-s Diagramm Rankine-Cycle



© MAHLE

WHR Entwicklungsprozess bei MAHLE

Prozessstruktur

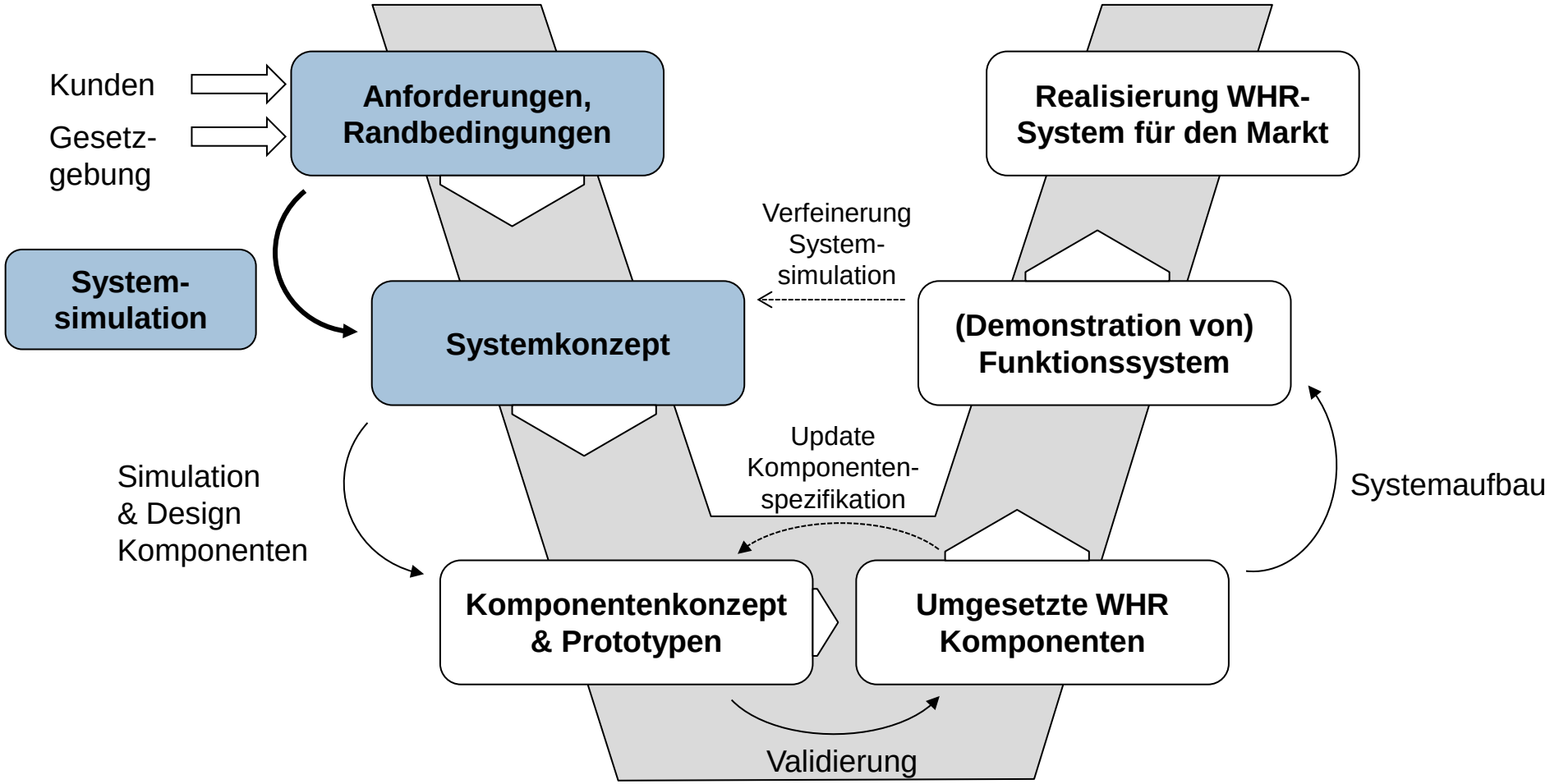


© MAHLE

WHR Entwicklungsprozess bei MAHLE

Systemsimulation

MAHLE
Driven by performance

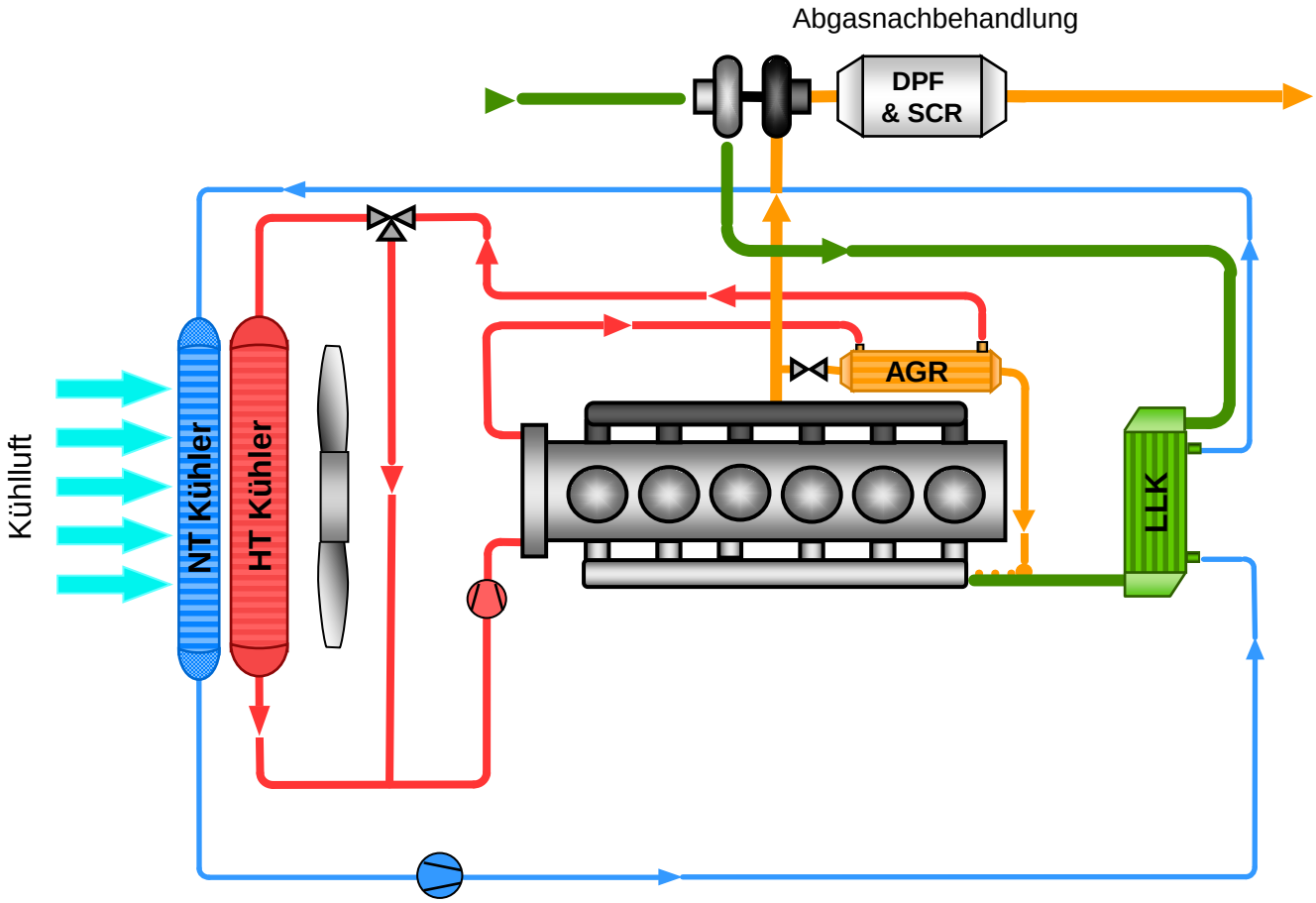


© MAHLE

Systemsimulation
Randbedingungen

MAHLE
Driven by performance

- Architektur Fahrzeug (beispielhaft)



	Ladeluft
	Abgas
	Kühlwasser HT-Kreislauf
	Kühlwasser NT-Kreislauf
NT	Niedertemperatur
HT	Hochtemperatur
AGR	Kühler Abgasrückführung
LLK	Kühler Ladeluft (indirekt)
DPF	Dieselpartikelfilter

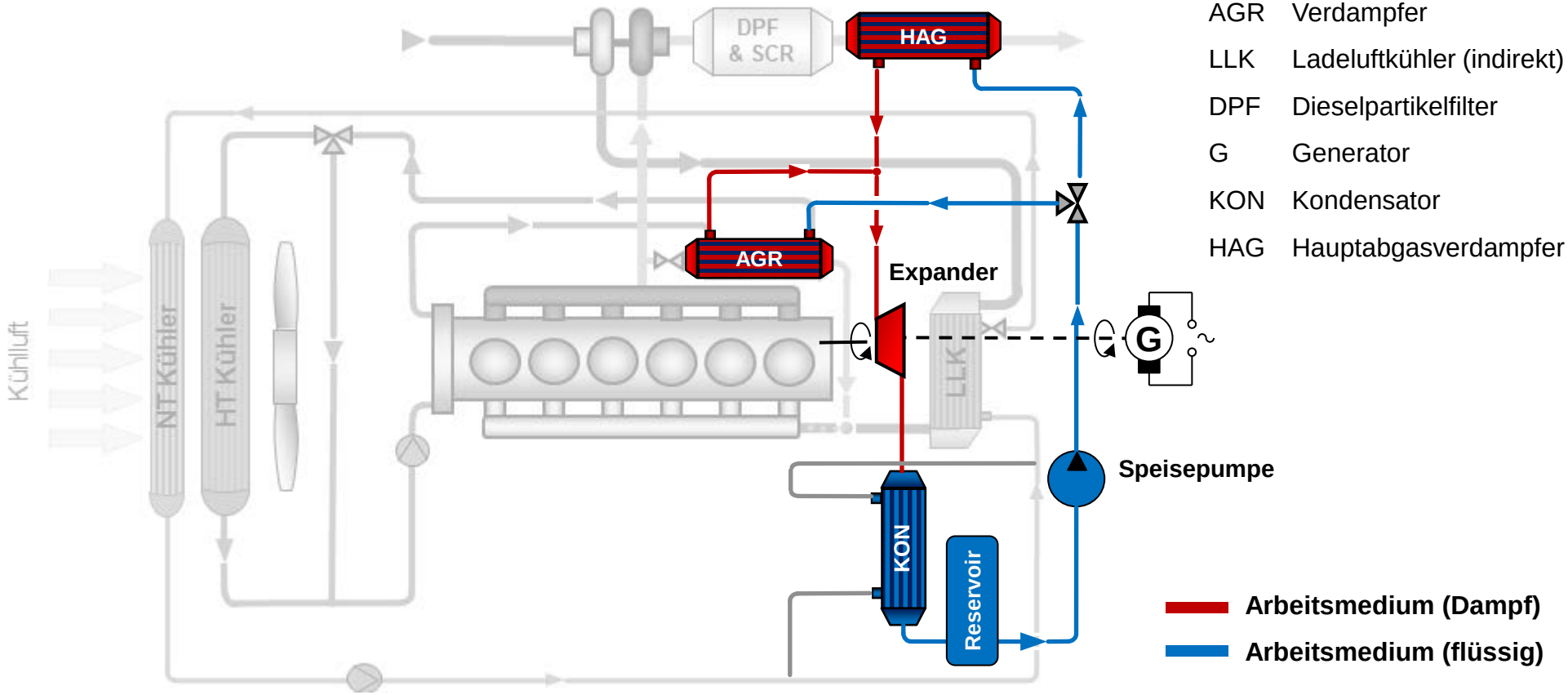
© MAHLE

Systemsimulation
Randbedingungen

MAHLE
Driven by performance

- ORC-System (beispielhaft)

NT	Niedertemperatur
HT	Hochtemperatur
AGR	Verdampfer
LLK	Ladeluftkühler (indirekt)
DPF	Dieselpartikelfilter
G	Generator
KON	Kondensator
HAG	Hauptabgasverdampfer



© MAHLE

Systemsimulation
Beispielhafte Anwendung

MAHLE
Driven by performance

Fahrzeug- & Motorspezifikation

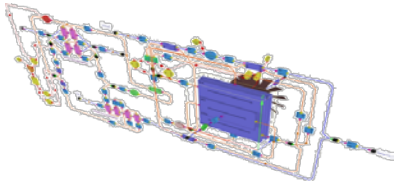
- Euro VI Heavy Duty Truck
- Common-Rail Einspritzsystem
- Turbo-Aufladung
- Spezifischer Hubraum: ~2 L/Zylinder
- Spezifische Leistung: 26 kW/L
- AGR, DPF, SCR

ORC-Systemarchitektur

- ORC-Arbeitsmedium: Ethanol
- Wärmeaufnahme: Hauptabgas- und AGR-Verdampfer (parallel)
- Wärmeabgabe: ORC-Kondensator in Motorkühlungskreislauf

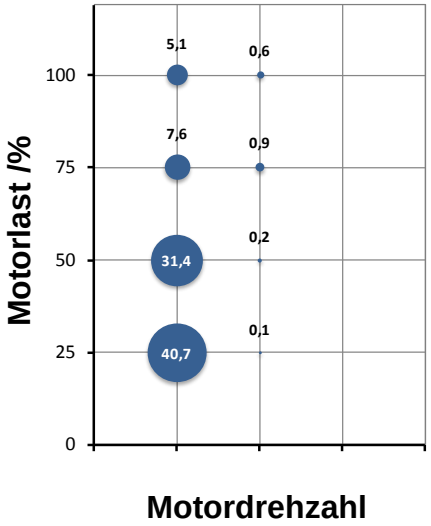
Systemsimulation

- Simulationsmodell



- Fahrzyklus: Europa, Langstrecke

Häufigkeitsverteilung* /%



Ergebnis

- CO_2 Reduktion
- Input / Anforderung Komponenten-konzepte

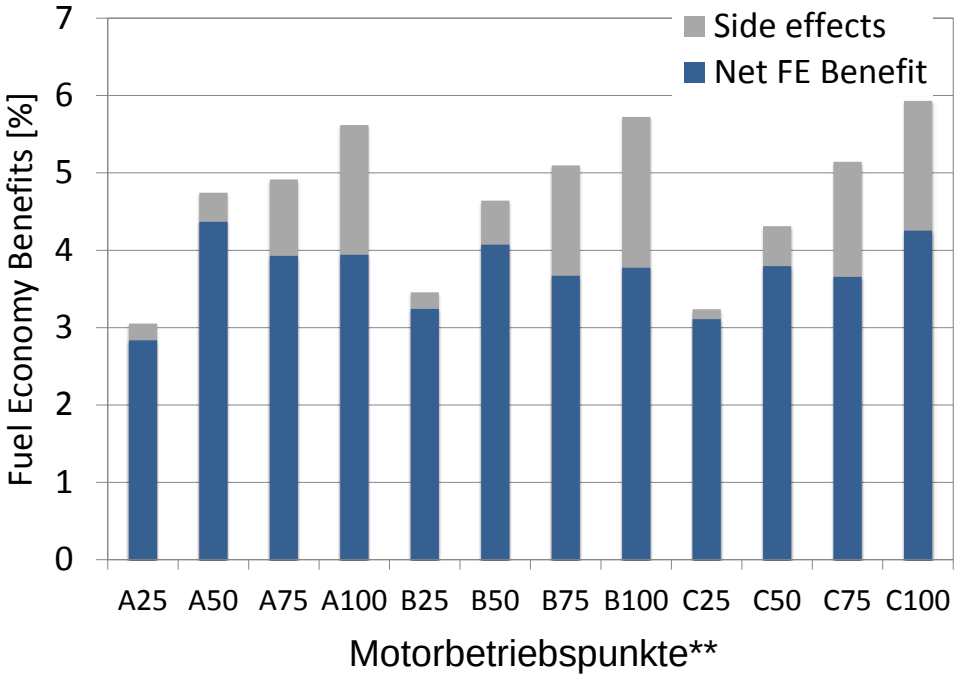
*basierend auf Methodik des European Stationary Cycle (ESC)

© MAHLE

Systemsimulation
Ergebnis: Kraftstoffeinsparung

MAHLE
Driven by performance

- Stationäre ORC-Systemleistung* relativ zur Motorleistung
  - ➔ Brutto-Benefit: 3 … 6% kennfeldweit
- Leistungsminderung aufgrund von
  - – erhöhtem Lüftereinsatz
  - – zusätzlichem Abgasgegendruck
  - – Erhöhter Ladelufttemperatur
  - ➔ Netto-Benefit 2,8 … 4,2% kennfeldweit
- Transienter Benefit bei typischem Fahrprofil (Europa, Langstrecke)
  - ➔ Mittlere Kraftstoffeinsparung ~3,8%

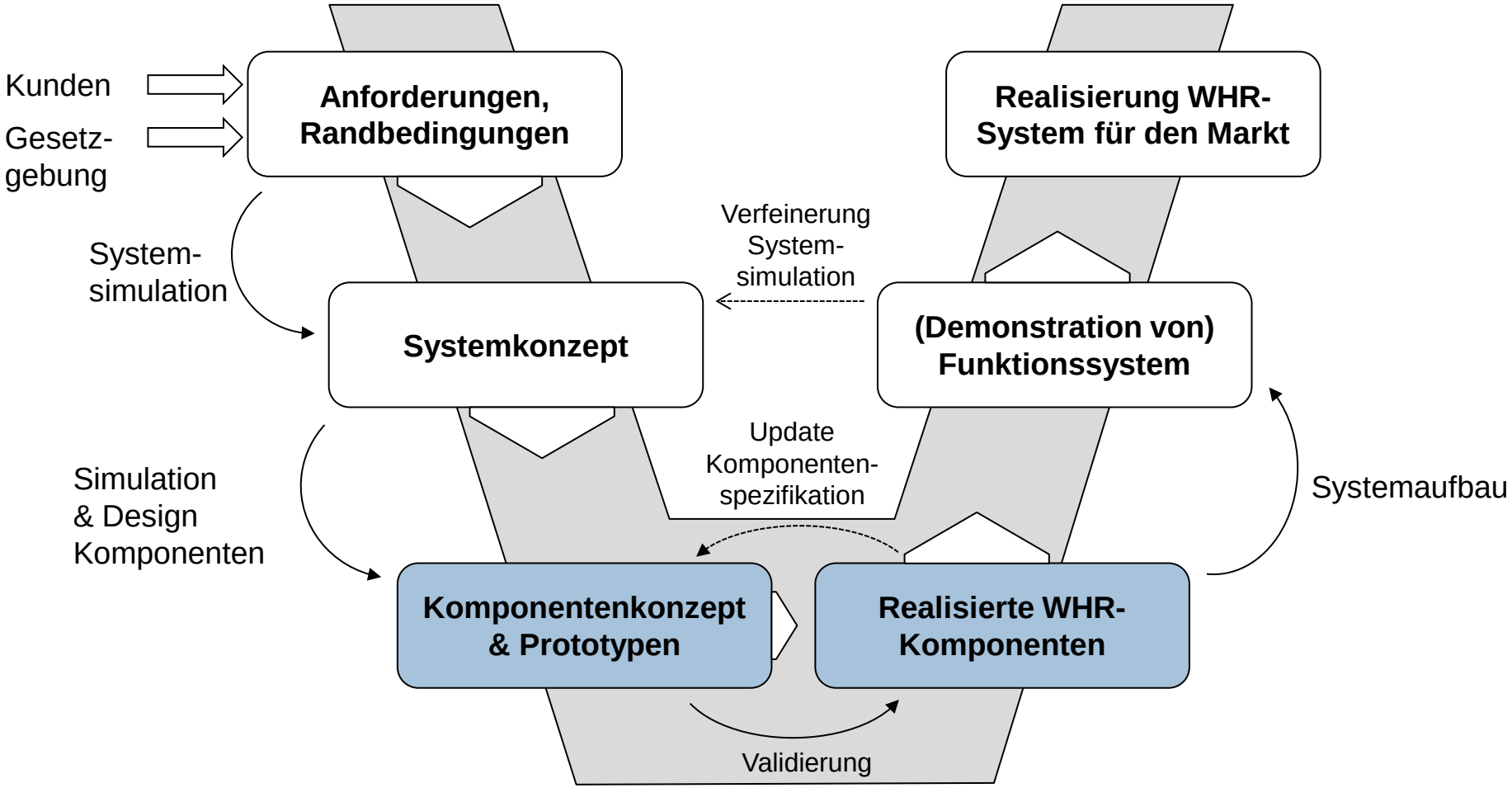


* Expanderleistung – Pumpenleistung
** basierend auf Methodik des European Stationary Cycle (ESC)

© MAHLE

WHR Entwicklungsprozess bei MAHLE

MAHLE
Driven by performance



© MAHLE

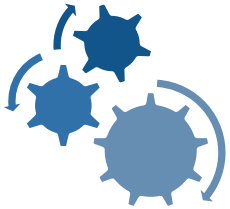
Komponentenkonzept
Speisepumpe

Pumpe – Verdampfer – Expander – Kondensator

MAHLE
Driven by performance

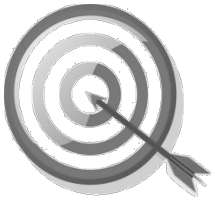
Hauptanforderungen

- Passende Versorgung WHR-System mit Arbeitsmedium zu jeder Zeit
- Hermetisch dicht
- Ölfreies ORC-Fluid möglich
- Für verschiedene Systemarchitekturen einsetzbar



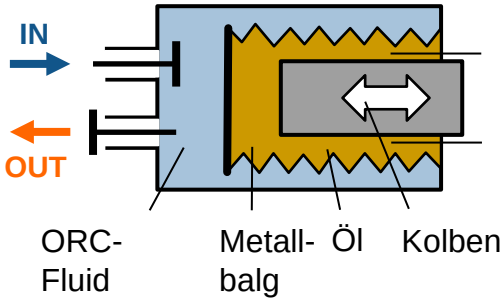
Konzeptbewertung

- Kriterien: Robustheit, Effizienz, Kavitation, Kosten



Ergebnis

- Antrieb: elektrisch
- Hydraulik: axiale Metallbalgpumpe



© MAHLE

MAHLE-Komponenten
Speisepumpe

Pumpe – Verdampfer – Expander – Kondensator

MAHLE
Driven by performance

- Hauptmerkmale
  - Antrieb: Sensorloser BLDC-Motor
  - Kommunikation: CAN-Bus
  - Hydraulik: Axialkolbenpumpe
  - Hermetische Trennung zwischen ORC-Fluid und Öl
  - Alle Arbeitsmedien möglich, auch ölfrei!
  - Alle Expandertypen möglich

➔ Universell einsetzbar!

Prototyp MAHLE Speisepumpe

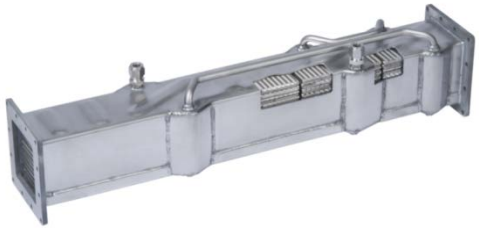
© MAHLE

MAHLE-Komponenten
Wärmeübertrager

Pumpe – Verdampfer – Expander – Kondensator

MAHLE
Driven by performance

- Allgemein
  - Hochtemperaturgelöteter Edelstahl
  - Skalierbar für unterschiedliche Leistungsklassen
  - Adaptierbar für unterschiedliche Arbeitsmedien
- Verdampfer
  - Hohe Leistungsdichte und Festigkeit
  - Druckfest bis zu 50bar (Arbeitsmedienseite)
  - AGR-Verdampfer
    - Ersetzt AGR-Kühler (Packaging und Funktion)
    - Patentiertes 3-Block-Design
  - Hauptabgasverdampfer
    - Abgasseitig sehr niedriger Gegendruck
- (Indirekter) Kondensator
  - Strukturiertes Plattendesign für hohe Leistungsdichte



Prototyp MAHLE AGR-Verdampfer

Prototyp MAHLE Hauptabgasverdampfer

Prototyp MAHLE Kondensator

© MAHLE

MAHLE-Komponenten
Expander

Pumpe – Verdampfer – Expander – Kondensator

MAHLE
Driven by performance

- Turbine
  - Axiale Impulsturbine
  - Teilbeaufschlagung
  - Auslegungsdrehzahl: 60‘000 U/min
  - Drehmomentenübertragung über Magnetkupplung
    - Hermetische Abtrennung ORC-Fluid
    - Design ölfrei
- Axialkolbenexpander
  - 6 Zylinder, 200 cm³ Gesamthubvolumen
  - Gussgehäuse
  - Hohlkolben
  - Integriertes Bypass-Ventil (Heat up / start, stop)
  - Schmierung mit Arbeitsmedium (Ethanol + Öl)

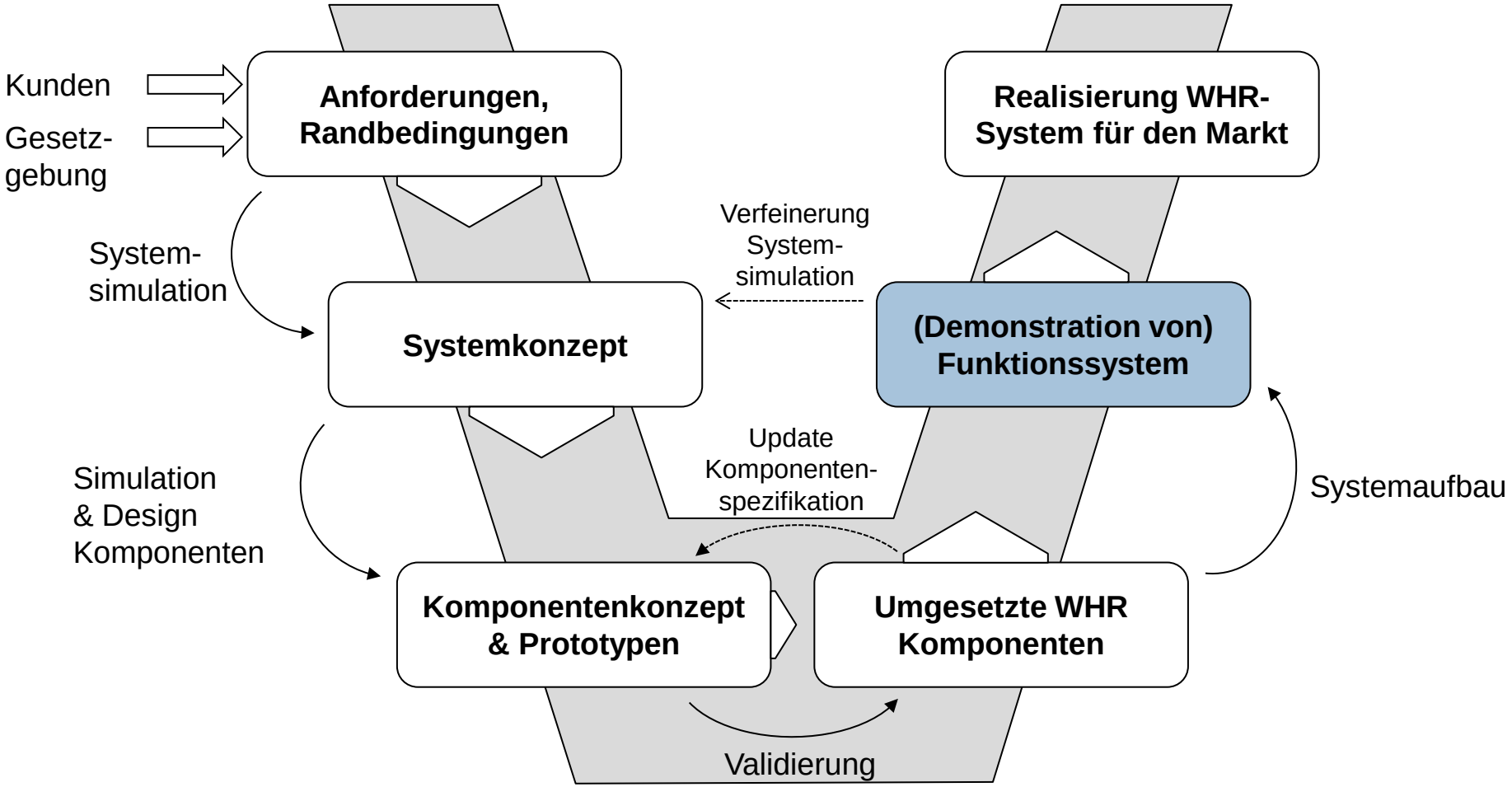
Prototyp MAHLE Turbinenexpander

Prototyp MAHLE Axialkolbenexpander

© MAHLE

WHR Entwicklungsprozess bei MAHLE

MAHLE
Driven by performance

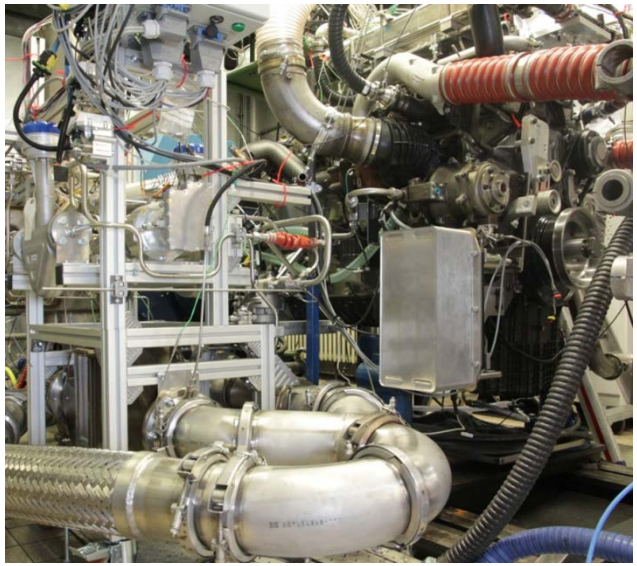


© MAHLE

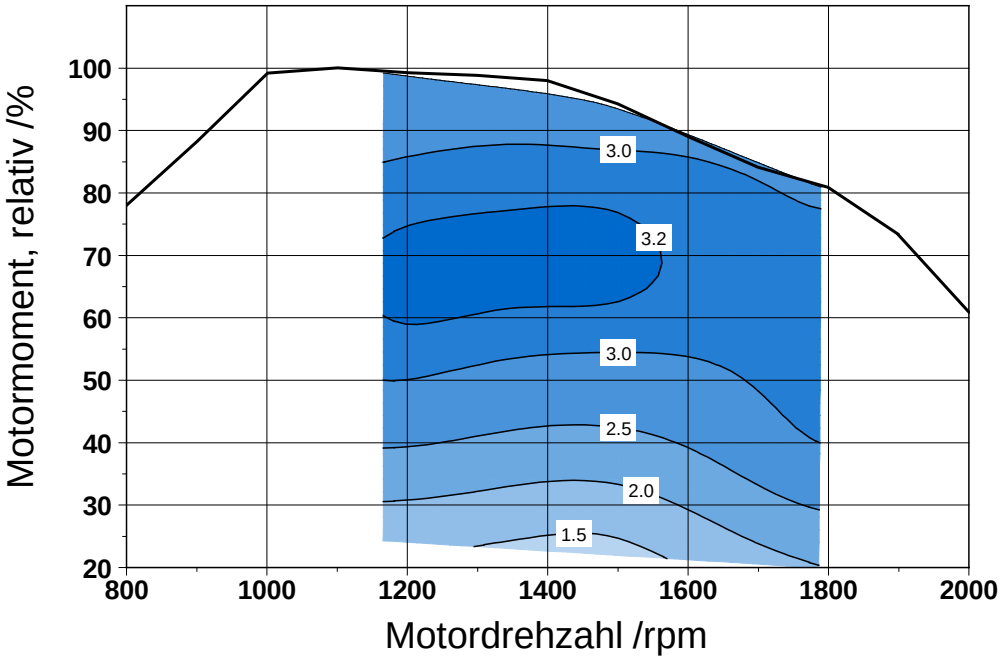
MAHLE WHR-Systemtest am Motorprüfstand

Driven by performance

- MAHLE Motorprüfstand
  - Motor
    - Heavy-Duty Diesel, ~12l
  - ORC-System
    - Hauptabgasverdampfer
    - Axialkolbenexpander mit mechanischer Einkopplung



- Ergebnis
  - Verbrauchsreduktion /%



  - Mit AGR-Verdampfer: +1%

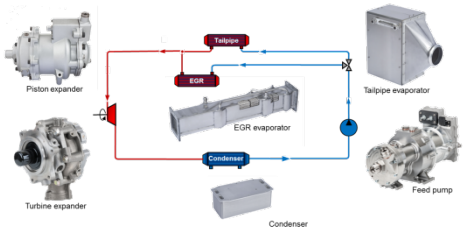
© MAHLE

Zusammenfassung
MAHLE WHR-Kompetenz

MAHLE
Driven by performance

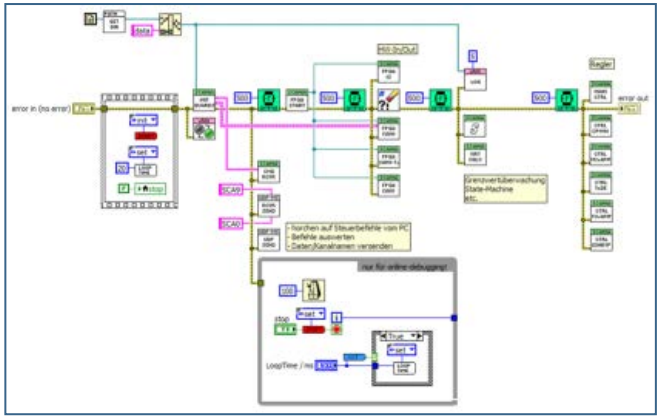
1 System Layout

- System-Design
- Komponentenentwicklung



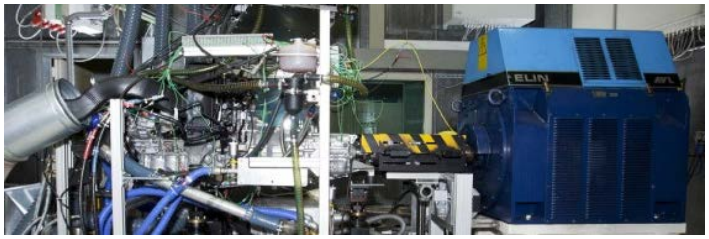
3 Aufbau System und Fahrzeug

2 WHR Regelung



4 Testing

- Heißgasprüfstand
- Motorprüfstand
- Windkanal



© MAHLE

MAHLE

Driven by performance

- Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

© MAHLE