

**P. Domjan , M. Werner**

## **Kraftstoffverbrauch als Messgröße für komplexe Simulationsmodelle für den effektiven Schiffsbetrieb**

**Workshop Brennstoffverbrauchsmessung als Ansatzpunkt für Cross-Industry Innovation**

25.04.2018 auf dem Sunderhof in Seevetal

# Zum Thema „Simulationsmodelle“

## Kunden Herausforderungen

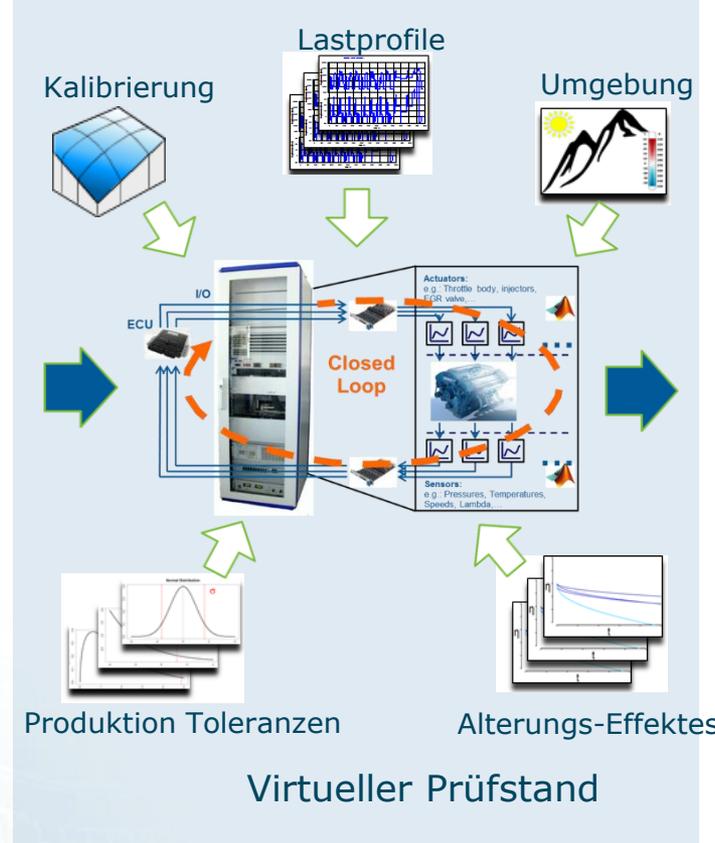


# Zum Thema „Simulationsmodelle“

## Virtueller Prüfstand als Ergänzung zu realen Prüfständen



Prüfstand



Virtueller Prüfstand



Fahrzeug Validierung

# Zum Thema „Simulationsmodelle“

## Simulation Regel

**IN**

schlechte Datenqualität  
(Messdaten)



**OUT**

schlechte Datenqualität  
(Modell Daten)



## **Kraftstoffverbrauchsmessung im Automobilbereich**

- Kundenforderungen für eine effiziente Versuchsplanung:
- AVL- FuelExact :Standard- Messsystem für den Kraftstoffverbrauch
- Einflussgrößen auf die Verbrauchsmessung
  - Begriffe zur Messunsicherheit
  - Messunsicherheitsbetrachtungen

## **Kraftstoffverbrauchsmessung im Marinebereich**

- Analyse derzeit ausgeführter Systemlösungen
  - Ausführungsvarianten
  - Messunsicherheitsbetrachtungen

## **AVL Fuel System Marine (FSM)**

- Systemkonzept
- Konstruktiver Aufbau
- Messunsicherheitsbetrachtungen
- Systemarchitekturen / Systemvariationen

## **Zusammenfassung**

## Lastenheft

**KVM\_2015\_V5.1**

Entwurfsänderungen vom 17.09.2015

## Kraftstoffverbrauchsmessung

Kraftstoffsystem und Kraftstoffverbrauchsmeßeinrichtung  
für Verbrennungsmotoren-Funktionsprüfstände

Version 5.1  
17.09.2015

### Detaillierte Anforderungen an:

- Informationsdichte
- Funktionalitäten
- Genauigkeiten
- Qualitätsstandards

### Anforderungsblatt

#### Kraftstoffverbrauchsmessung und Kraftstoffkonditionierung

Kraftstoffverbrauchsmessung und Kraftstoffkonditionierung mit höchster Genauigkeit und Reproduzierbarkeit zur kontinuierlichen Messung des Kraftstoffverbrauches von Motoren, insbesondere bei dynamischem Betrieb auf Prüfständen im Entwicklungsbereich.

##### Anforderungen:

Kraftstoffarten: Diesel und Diesel-Methanol-Gemische, Biodiesel, Rapsöl etc.

Messbereich: a) 0,05 kg/h bis 200 kg/h nominal, max. 250 kg/h  
b) bis max. 1000 kg/h

Genauigkeit: 0,1 % vom Messwert

Nullpunktstabilität: 0,01 kg/h

Dichtemessung: Genauigkeit 0,002 g/cm<sup>3</sup>

Temperaturbereich: 10°C bis 45°C; Temperaturstabilität +/- 0,05°C

Druckbereich: 0,02 bar bis 0,1 bar (relativ); Genauigkeit +/- 1 mbar  
Optional: Vordruckregelung von -0,2 bar bis 2 bar (relativ)  
Optional: Rücklaufregelung auf 0 bar (relativ)

Messfrequenz: 20 Hz

Bedienung: lokal und fern

Schnittstellen: Digital I/O (Konditionierung EIN; Prüfbetrieb EIN; Betriebsmeldung)  
Analog I/O (Kraftstoffmassenstrom; Dichte; Temperatur; Druck)  
Alternativ Ethernet (AK); Seriell (RS232) (AK); Profibus DP

Vorgaben: Temperatursollwert  
Drucksollwert

20.07.2012

Ref.-Nr.:  
REF.-NO.  
Titel:  
TITEL:

520000 - Neues Prüfzentrum Großmotoren

Seite:  
PAGE:  
Version:  
VERSION:

1/43

1.012

## Großmotoren Projekt



## Kernforderungen

Mit dem Kraftstoffmesssystem ist kontinuierlich der Kraftstoff am Motorprüfstand zu konditionieren, der Verbrauch zu messen und statistisch behandelt an das Automatisierungssystem über relevante Schnittstellen zu übergeben.

Die Kraftstoffverbrauchsmessung ist neben der Lieferung erforderlicher Komponenten als Gesamtaufgabe zu verstehen.

Die erreichbaren Gesamtmessunsicherheiten bezogen auf den momentanen Verbrauchswert unter realen Betriebsbedingungen am laufenden Motor sind nach ISO/IEC Guide 98-3:2008-09 (GUM) rückführbar auf Nationale Normale zu belegen und durch entsprechende Dokumente nachzuweisen.

Die Messeinrichtung muss zugelassen sein für Messungen nach:

US EPA 40 CFR Part 1065  
UN ECE R49 (EU VI)

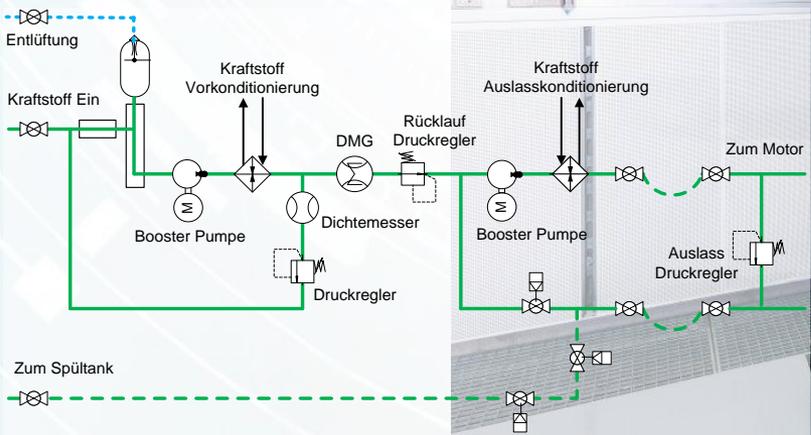
**Erkenntnis:**  
**Diese Anforderungen sind nur mit standardisierten Systemen zu erreichen um weltweit an jedem Prüfstand vergleichbare Messergebnisse zu gewährleisten.**

# AVL FuelExact: Standard Mess-System für Prüfstände



**Standardisierte Systemlösungen bieten Vergleichbarkeit von Messergebnissen an Prüfständen zu kalkulierbaren Kosten**

- ca. 6000 vergleichbare Systeme in unterschiedlichen Applikationen weltweit im Einsatz
- Motor- nah adaptiert
- Derzeit konzipiert für Motorgrößen bis 2,5MW
- Globale Serviceaktivitäten



# AVL FuelExact: Standard Mess-System für Prüfstände

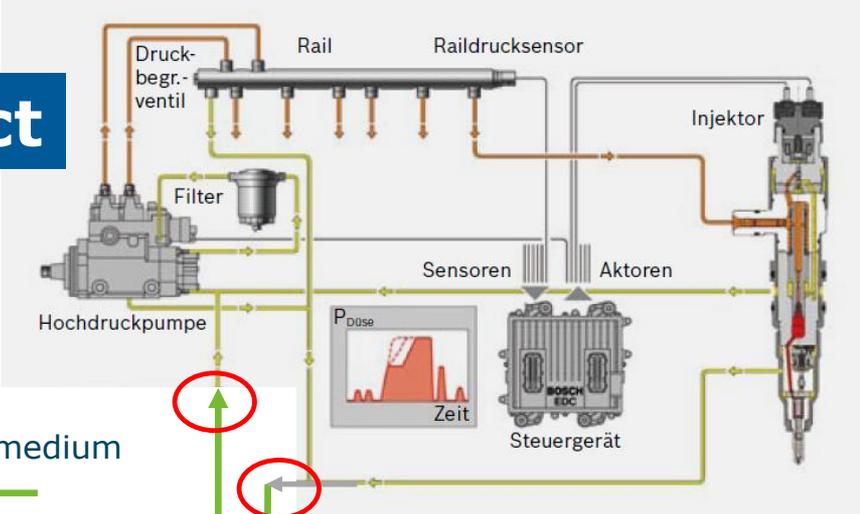


# AVL FuelExact: Standard Mess-System für Prüfstände

## Common Rail System CRSN4-25

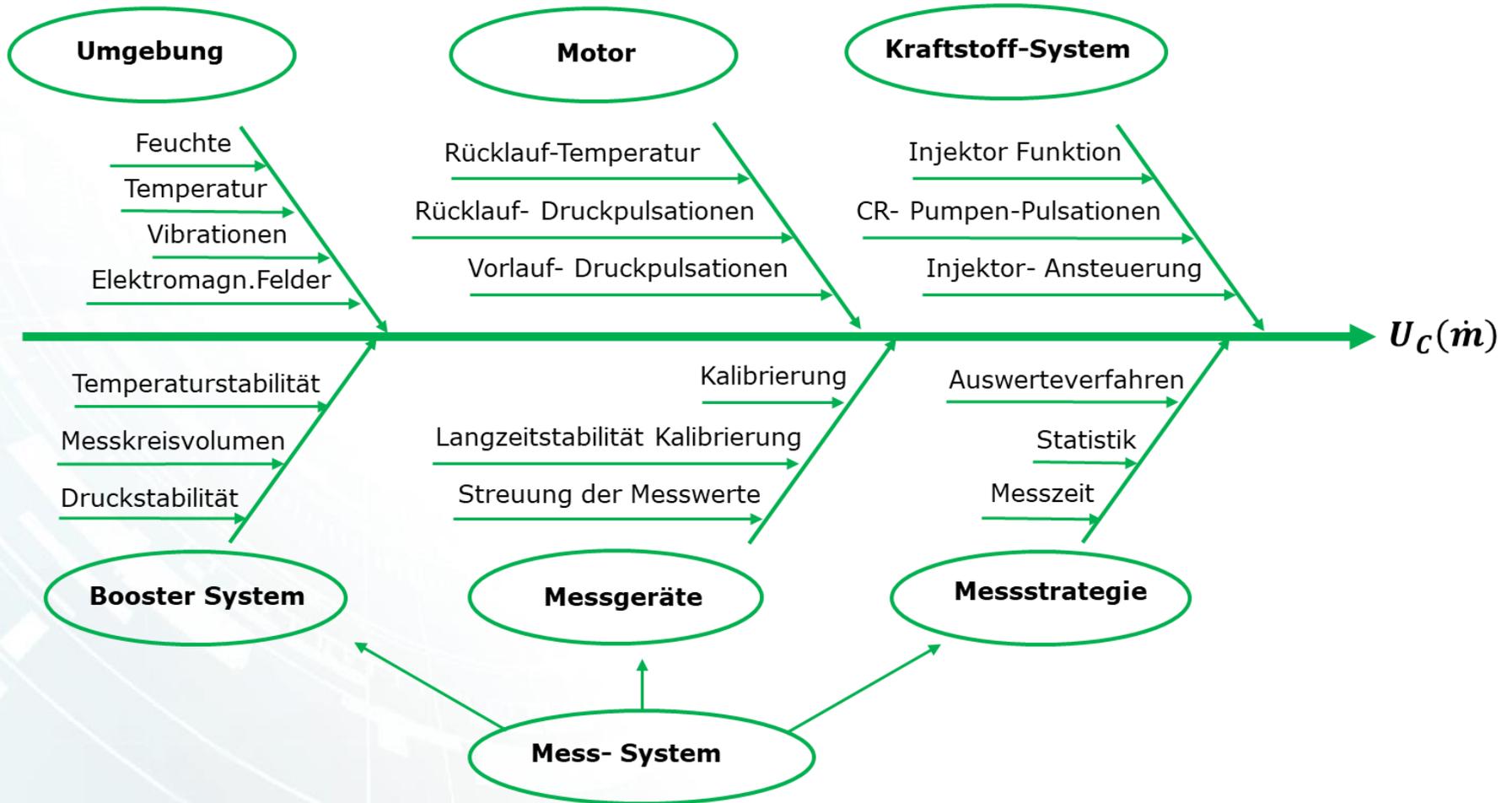


### FuelExact



- Schnittstellen-Parameter nach Kundenanforderung
  - Temperaturen
  - Drücke
  - Umlaufmengen
- Spülen & Entlüften in Spültank
- Kraftstoff- Wechsel in Spültank

# Einflussgrößen auf die Kraftstoffverbrauchsmessung (Ichikawa Diagramm)



## Grundlagen (Leitfaden „GUM“) zur Bestimmung von Messunsicherheiten

**GUM ist die Abkürzung für den 1993 veröffentlichten und zuletzt 2008 überarbeitete ISO/BIPM – Leitfaden „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (ISO/IEC Guide 98-3:2008)**

**ISO: International Organisation for Standardisation**  
**BIPM: Bureau International des Poids et Mesures**

## Ausgewählt für die weiteren Betrachtungen:

$u_K$  = Einfluss der Kalibrierung

$u_L$  = Einfluss der Langzeitstabilität der Kalibrierung

$u_D$  = Einfluss der Dichte

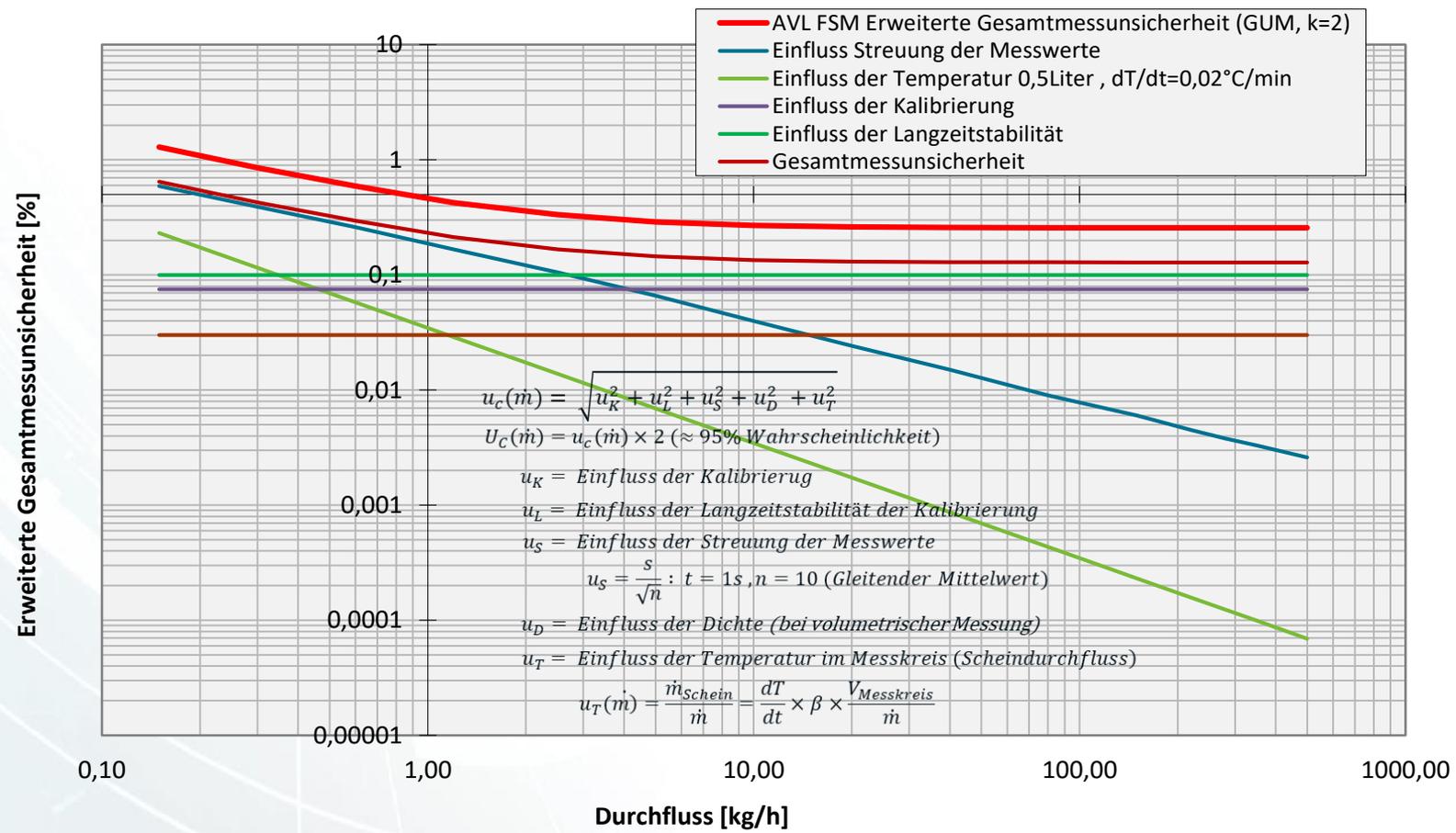
$u_S$  = Einfluss der Streuung der Messwerte (Standardabweichung =  $f(t, \dot{m})$ )

$$u_S = \frac{s}{\sqrt{n}} : t = \text{z.B. } 1\text{s Messzeit}, n = \text{z.B. } 10 \text{ (Gleitender Mittelwert)}$$

$u_T$  = Einfluss der Temperatur im Messkreis (Scheindurchfluss)

$$u_T = \frac{\dot{m}_{\text{Schein}}}{\dot{m}} = \frac{dT}{dt} \times \beta \times \frac{V_{\text{Messkreis}}}{\dot{m}}$$

## Erweiterte Gesamtmessunsicherheit FuelExact (GUM , k=2) Nach Kundenanforderungen aus der Automobilindustrie





## Kraftstoffverbrauchsmessung im Automobilbereich

- Kundenforderungen für eine effiziente Versuchsplanung:
- AVL- FuelExact :Standard- Messsystem für den Kraftstoffverbrauch
- Einflussgrößen auf die Verbrauchsmessung
  - Begriffe zur Messunsicherheit
  - Messunsicherheitsbetrachtungen

## Kraftstoffverbrauchsmessung im Marinebereich

- Analyse derzeit ausgeführter Systemlösungen
  - Ausführungsvarianten
  - Messunsicherheitsbetrachtungen

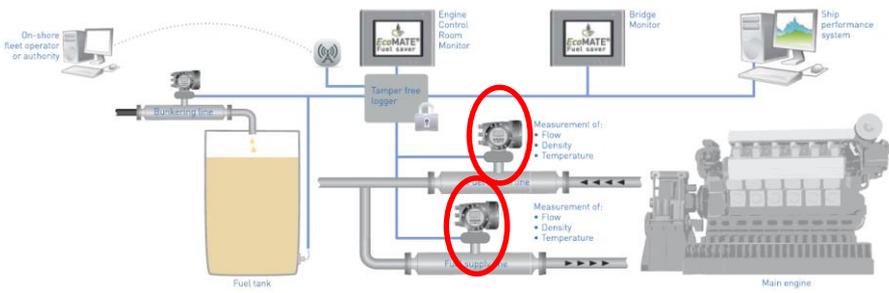
## AVL Fuel System Marine (FSM)

- Systemkonzept
- Konstruktiver Aufbau
- Messunsicherheitsbetrachtungen
- Systemarchitekturen / Systemvariationen

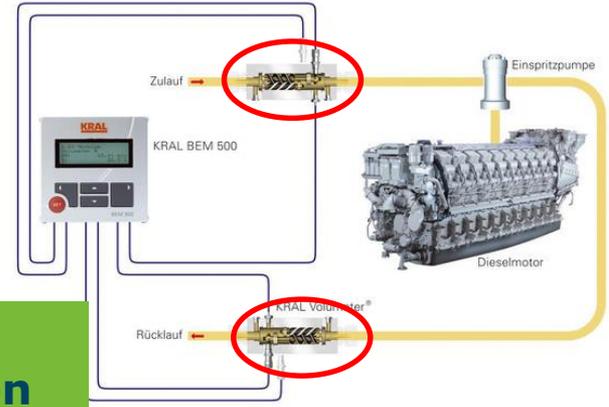
## Zusammenfassung

# Analyse ausgeführter Lösungen

**KROHNE**  
Skarpenord

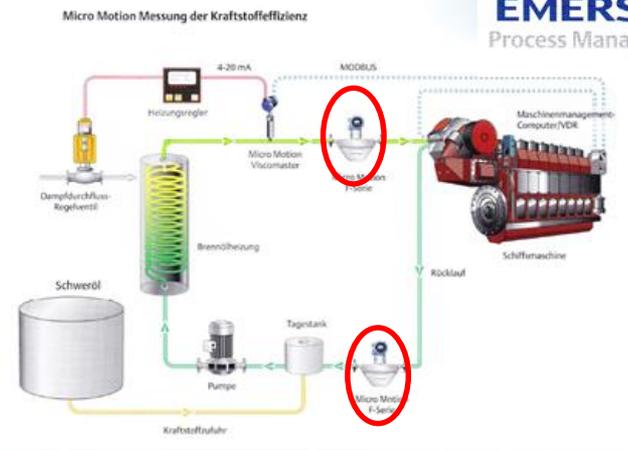


**KRAL** ■ Durchflussmesstechnik

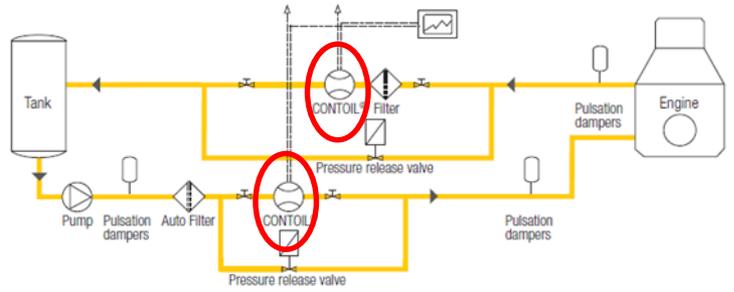


**Keine standardisierten Systemlösungen  
Nur Integration von Durchflussmessgeräten**

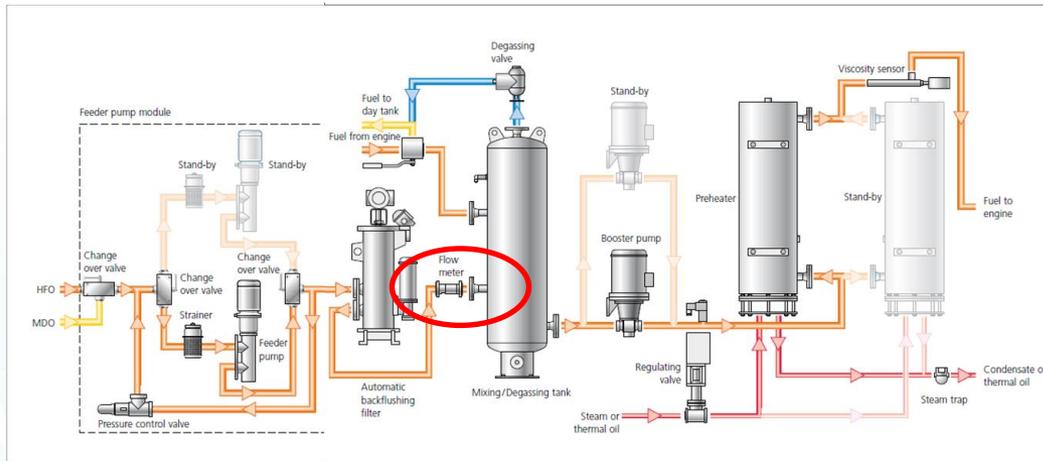
**EMERSON**  
Process Management



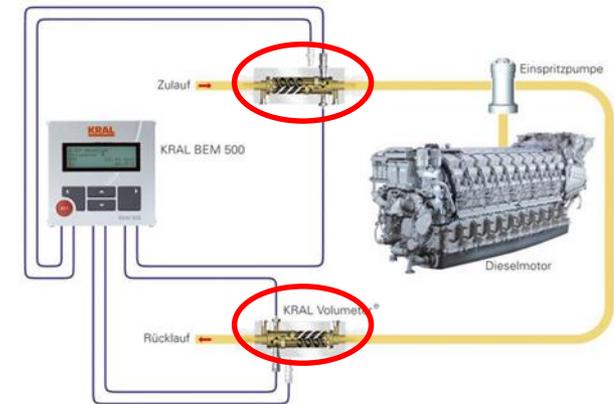
**aqua metro**



# Analyse ausgeführter Lösungen



**KRAL** ■ Durchflusstechnik



Westfalia Separator®  
ViscoBoosterUnits

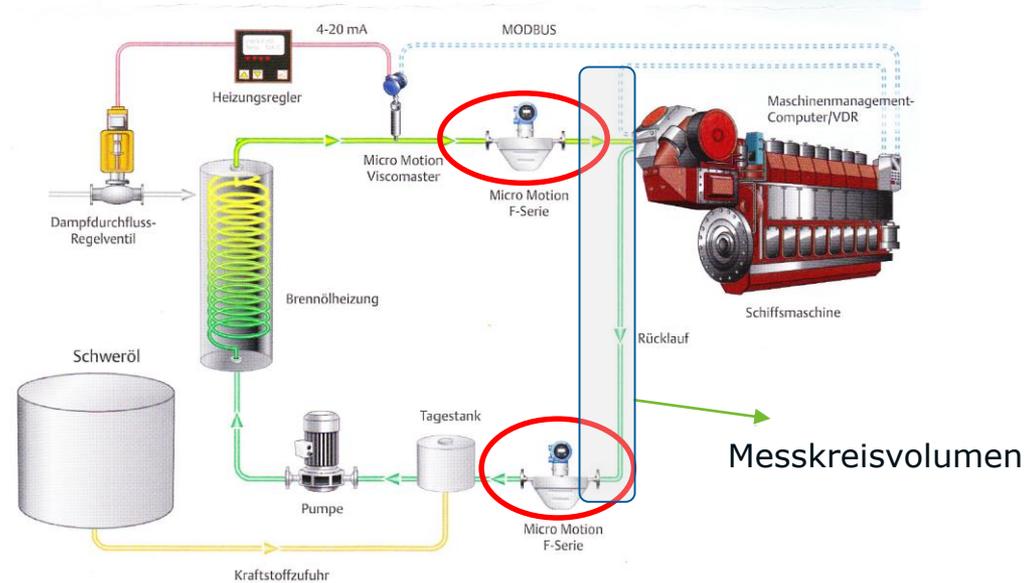
## Stand der Technik

- Installation der Durchflussmessgeräte in Markt- verfügbare Booster- Units
  - Gerade wo es räumlich passt
    - In Vorlauf & Rücklauf vom Motor
    - Nur im Vorlauf mit Rücklauf in Mischtank
- Keine definierten Kundenforderungen
  - an einzuhaltende Normen...
  - Funktionalitäten
- Keine Bewertung der Einflussgrößen zur Bestimmung von Messunsicherheiten
- Keine standardisierten Systeme
  - Je nach Messaufbau unterschiedliche Verbrauchswerte (Messunsicherheiten...)
- Damit:
  - Keine Vergleichbarkeit von Schiff zu Schiff im Flottenverbrauch
  - Anforderungen an Expertensysteme sind kaum zu gewährleisten

# Messunsicherheitsbetrachtung Vor- und Rücklaufmessung



Micro Motion Messung der Kraftstoffeffizienz



## ▪ Beispiel:

- Messbereich 0,5...3500kg/h
- Umlaufmenge 7000kg/h
- Mess-Zeit (Up-Date Zeit) 1s

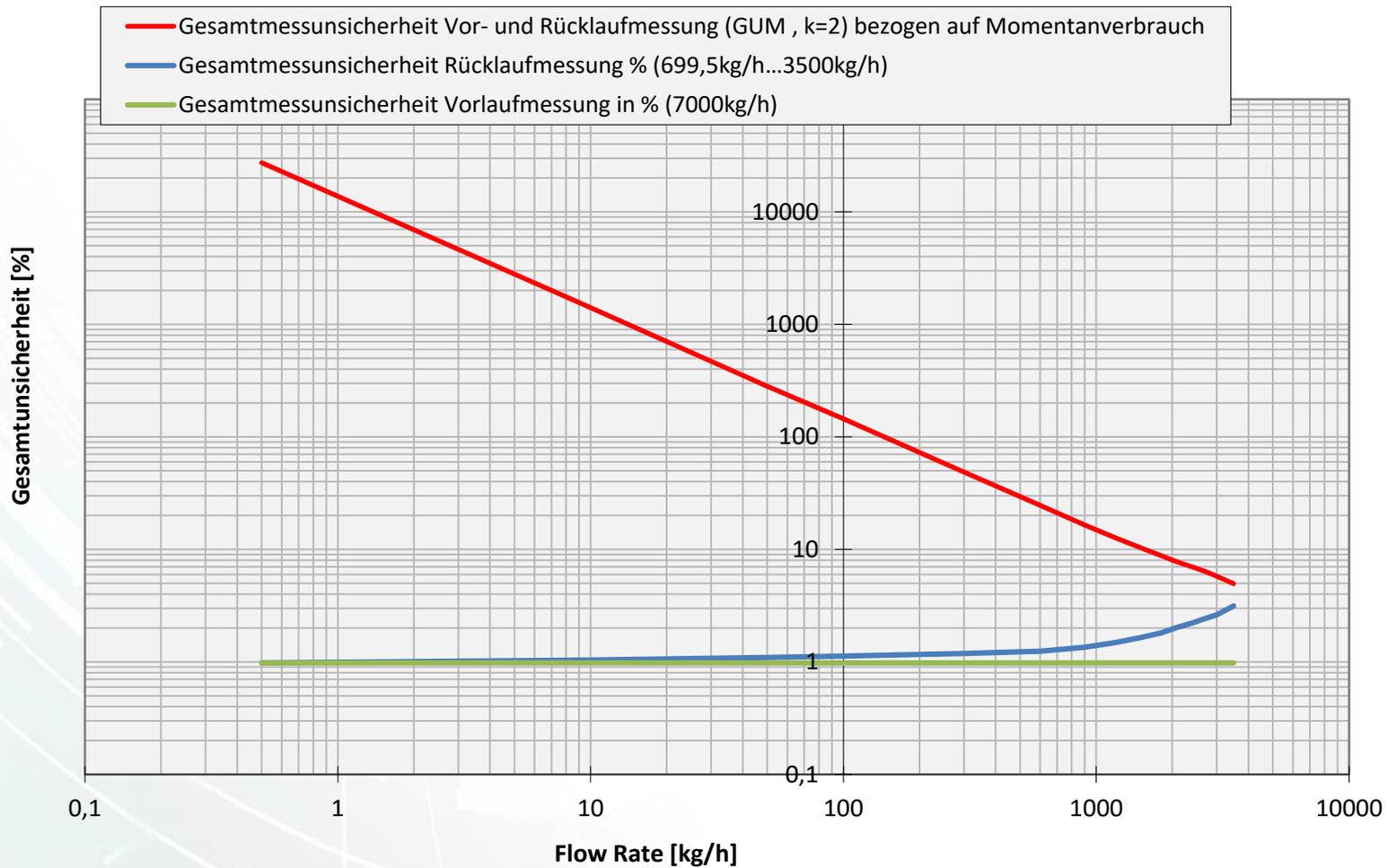
## ▪ Einflussgrößen:

- Gesamtmessunsicherheiten der Kalibrierung der Messgeräte (z.B. Coriolis): 0,2% v.M.
- Langzeitstabilitäten: 0,3% v.M.
- Messkreisvolumen pro Strang: 25dm<sup>3</sup>
- Temperatur- Regelgüte in jedem Strang : 2°C
- Streuungen (Standardabweichungen)
  - Vorlauf : 0,9% (bei 7000dm<sup>3</sup>) , 1s Messzeit mit gleitender Mittelwertbildung
  - Rücklauf 0,9% bis 3,1% , 1s Messzeit mit gleitender Mittelwertbildung

# Gesamtmessunsicherheit Vor- und Rücklaufmessung

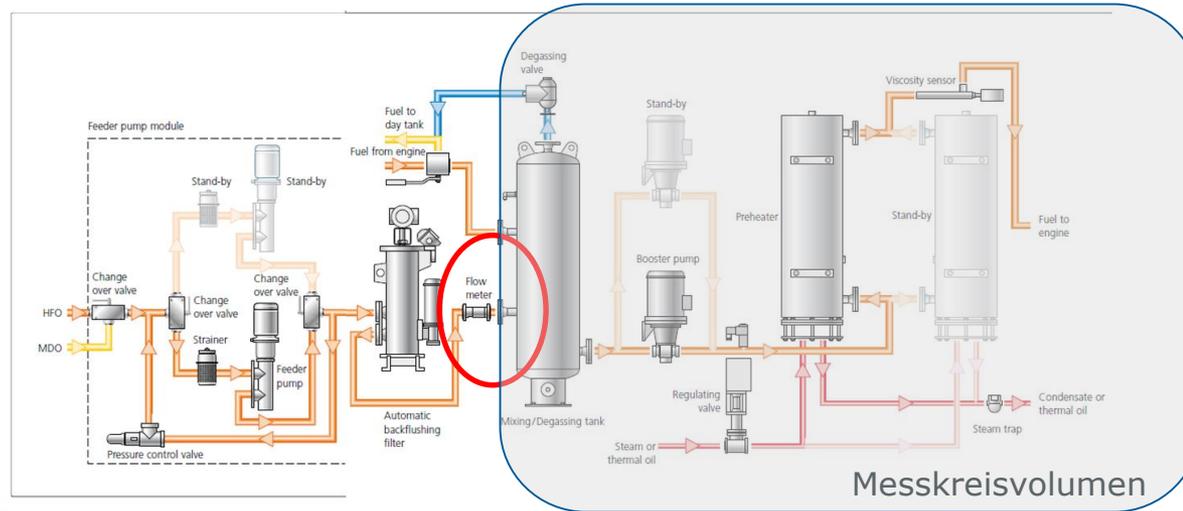


## Gesamtmessunsicherheit Vor- und Rücklaufmessung



# Messunsicherheitsbetrachtung Vorlaufmessung

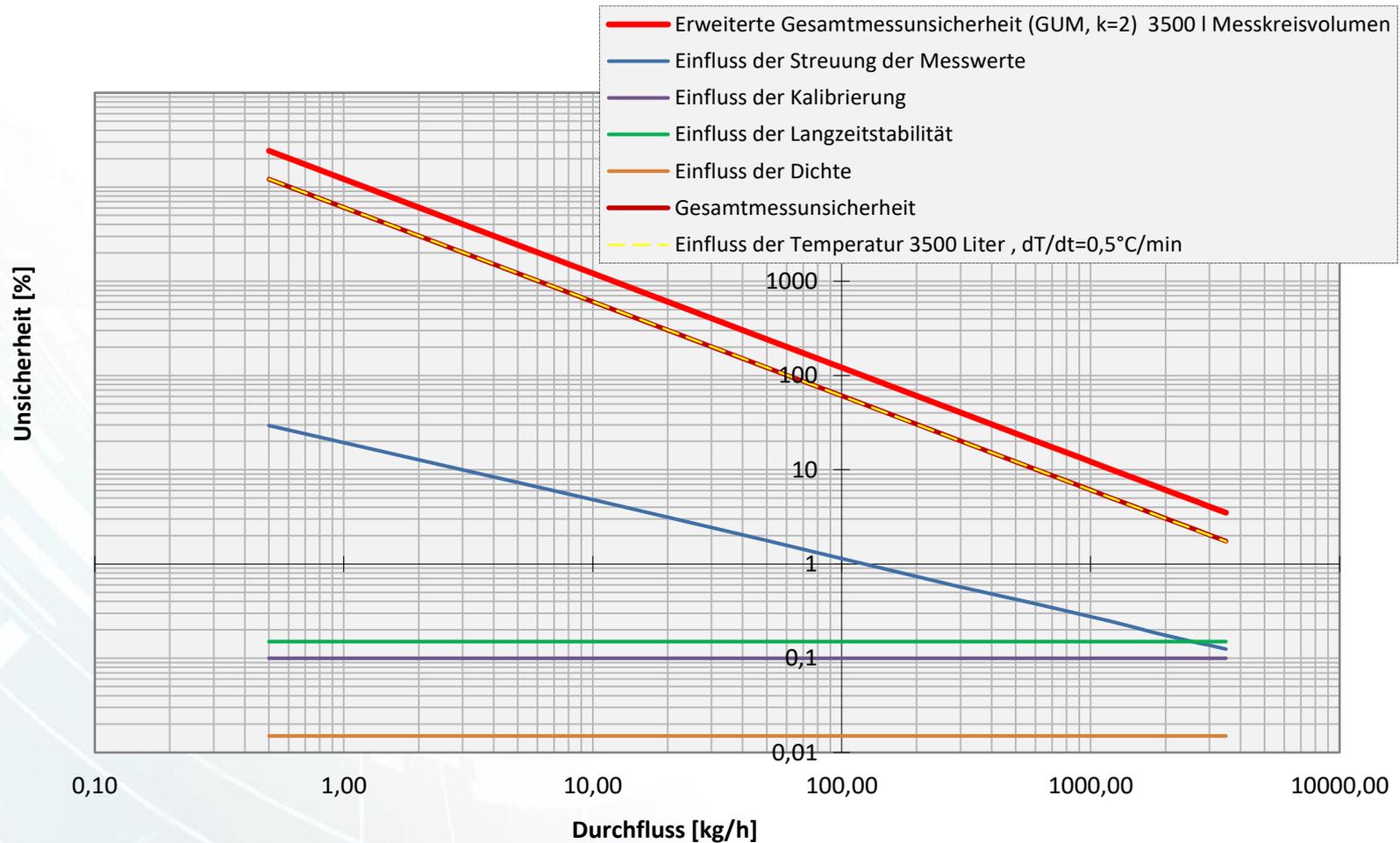
AVL



Westfalia Separator®  
ViscoBoosterUnits

- **Beispiel:**
  - Messbereich 0,5...3500kg/h
  - Umlaufmenge 7000kg/h
  - Mess-Zeit (Up-Date Zeit) 1s
- **Einflussgrößen:**
  - Gesamtmessunsicherheit der Kalibrierung des Messgerätes (z.B. Coriolis): 0,2% v.M.
  - Langzeitstabilität der Kalibrierung: 0,3% v.M.
  - Messkreisvolumen im Messkreis hinter dem Messgerät: ca. 3500dm<sup>3</sup>
  - Temperatur- Regelgüte: 0,5°C
  - Streuungen (Standardabweichungen): 0,1%...30% (Messbereich 0,5...3500kg/h)

## Messunsicherheiten mit 3500l Messkreisvolumen





## Kraftstoffverbrauchsmessung im Automobilbereich

- Kundenforderungen für eine effiziente Versuchsplanung:
- AVL- FuelExact :Standard- Messsystem für den Kraftstoffverbrauch
- Einflussgrößen auf die Verbrauchsmessung
  - Begriffe zur Messunsicherheit
  - Messunsicherheitsbetrachtungen

## Kraftstoffverbrauchsmessung im Marinebereich

- Analyse derzeit ausgeführter Systemlösungen
  - Ausführungsvarianten
  - Messunsicherheitsbetrachtungen

## AVL Fuel System Marine (FSM)

- Systemkonzept
- Konstruktiver Aufbau
- Messunsicherheitsbetrachtungen
- Systemarchitekturen / Systemvariationen

## Zusammenfassung

# AVL Fuel System Marine (FSM) Systemkonzept



Vent



**Systemkonzept auf Basis FuelExact  
Nach Marine - Anforderungen**

Kühlmedium  
←  
←  
Heizmedium

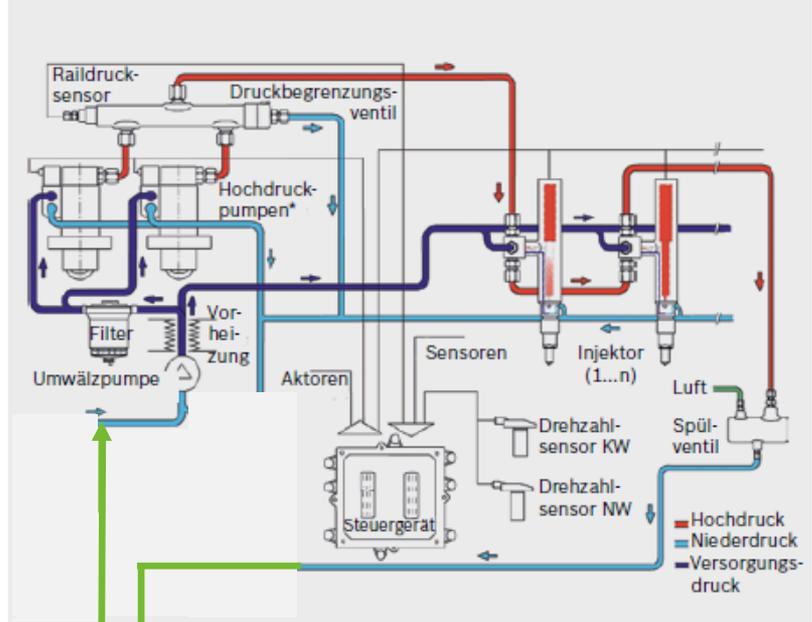
Kraftstoff Zulauf

Kraftstoff in Spül-Tank

Kraftstoffzulauf zum Motor

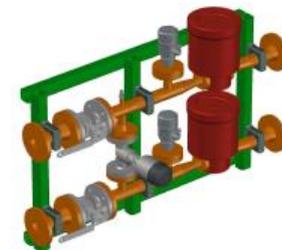
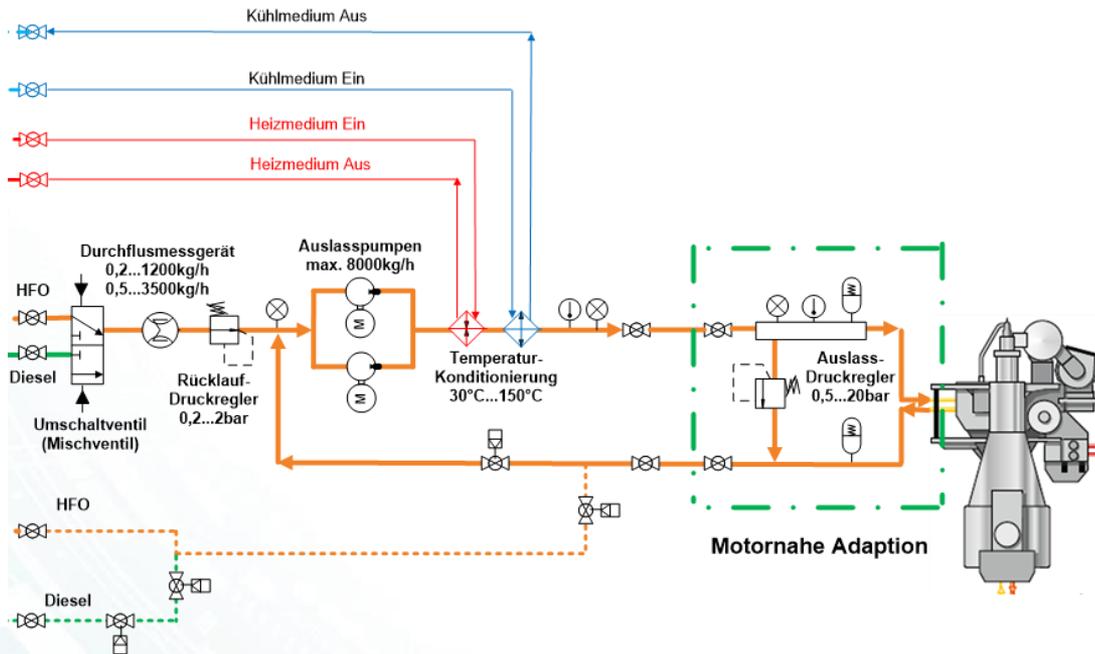
Kraftstoffrücklauf vom Motor

## Schweröl Common Rail System mit 2200 bar



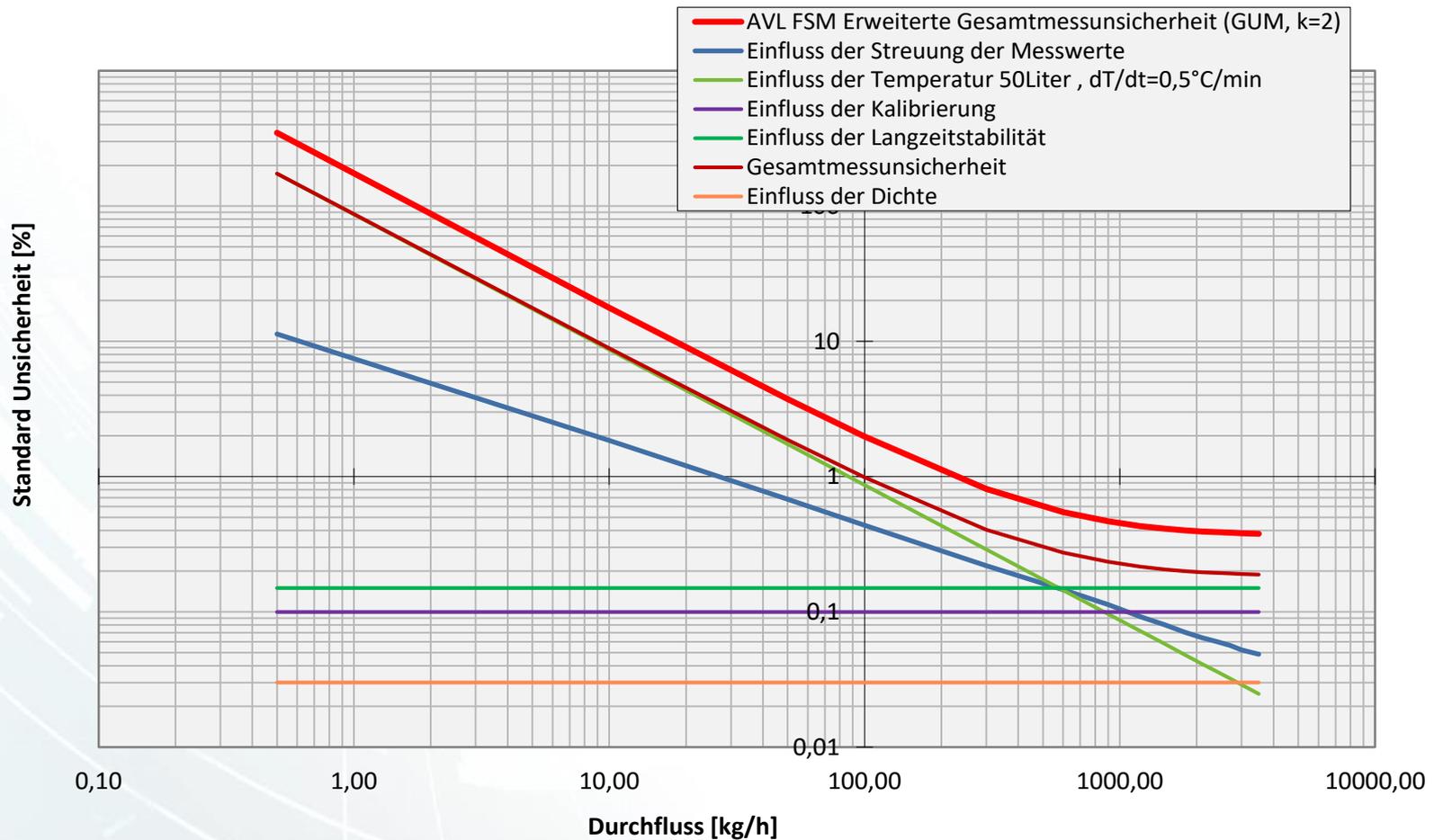
- Schnittstellen-Parameter für Kraftstoff-Vorlauf & Rücklauf nach Kundenanforderung:
  - Temperaturen
  - Drücke
  - Umlaufmengen
- Spülen & Entlüften in Spül-Tank
- Kraftstoff- Wechsel in Spül- Tank

# AVL Fuel System Marine (FSM) Konstruktiver Aufbau

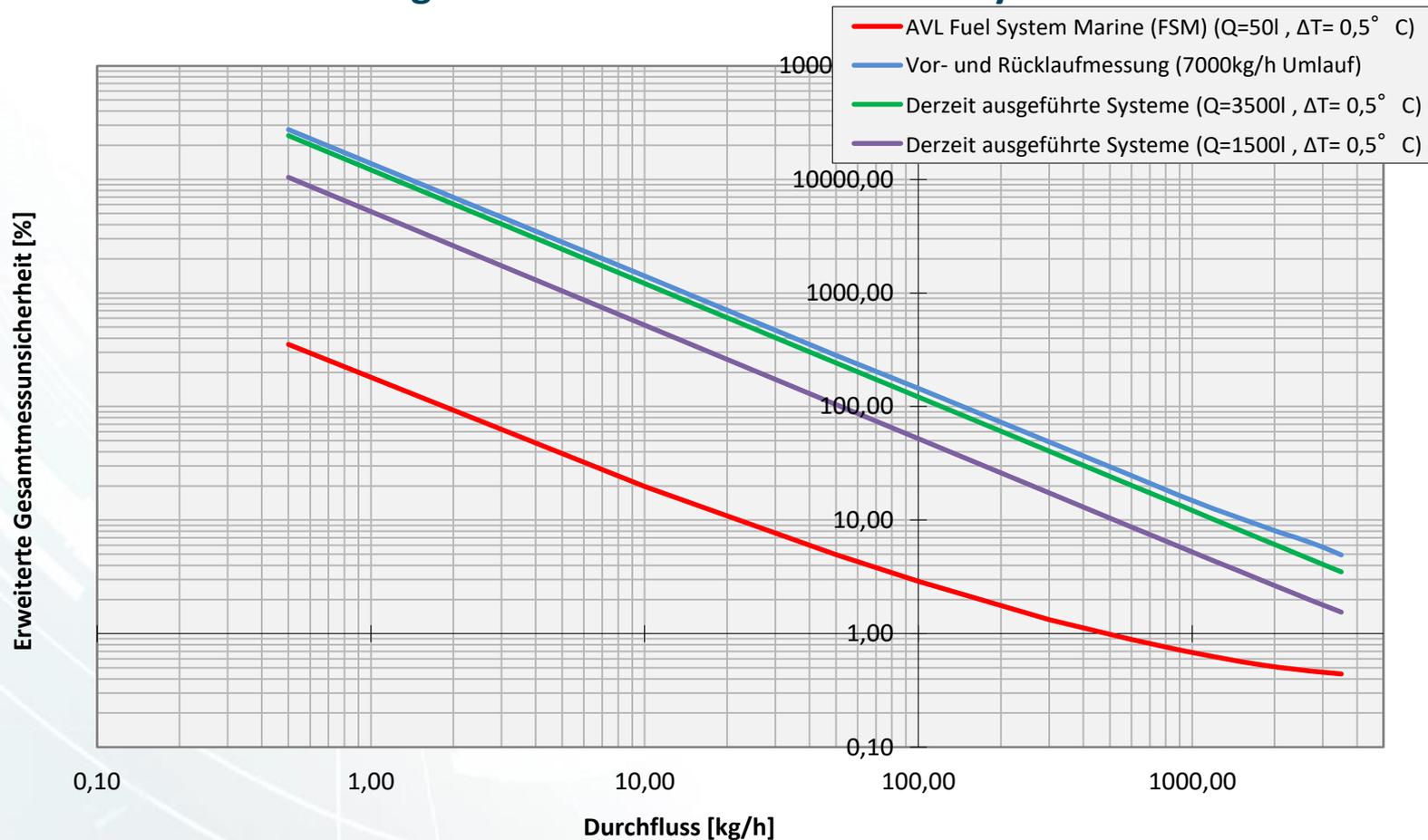


- **Beispiel:**
  - Messbereich 0,5...3500kg/h
  - Umlaufmenge 7000kg/h
  - Mess-Zeit (Up-Date Zeit) 1s
- **Einflussgrößen:**
  - Gesamtmessunsicherheit der Kalibrierung des Messgerätes (z.B.Coriolis): 0,2% v.M.
  - Langzeitstabilität der Kalibrierung: 0,3% v.M.
  - Messkreisvolumen im Messkreis hinter dem Messgerät: ca.50dm<sup>3</sup>
  - Temperatur- Regelgüte: 0,5°C
  - Streuungen (Standardabweichungen): 0,1% ...30% (Messbereich 0,5...3500kg/h)

## Gesamtmessunsicherheiten AVL Fuel System Marine



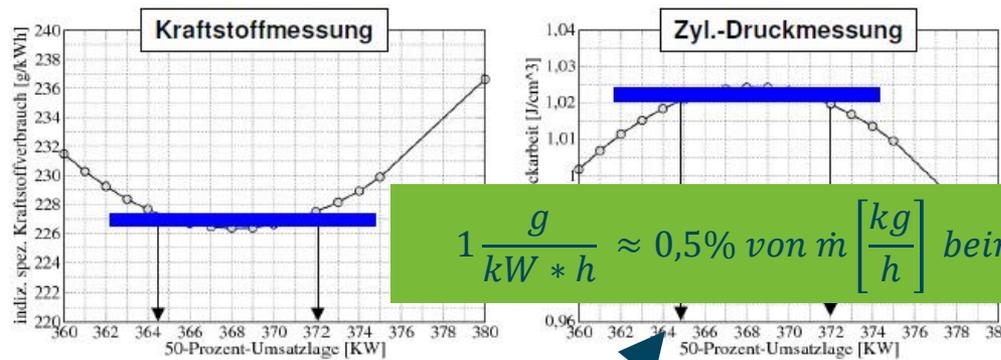
## Erweiterte Gesamtmessunsicherheiten im Vergleich (GUM , k=2) Vergleich unterschiedlicher Mess- Systeme



# Bedeutung der Gesamtmessunsicherheit für Einsparpotentiale



## Einfluss von Messfehlern bei der Beurteilung der optimalen 50%-Umsatzlage



Bestwert bei 368 kW

Die Annahme eines minimalen Messfehlers von 1g / kWh führt schon zu einer Ergebnis-Streubreite von ca. 7°KW

Ein minimaler Messfehler von 0,5% der indizierten Arbeit führt zu einer Ergebnis-Streubreite von ca. 7,5°KW

Einzelzylinderhubraum = 0,5l Verdichtungsverh. = 10,0



Prof. Dr.-Ing. P.-W. Manz

# Bedeutung der Gesamtmessunsicherheit für Einsparpotentiale



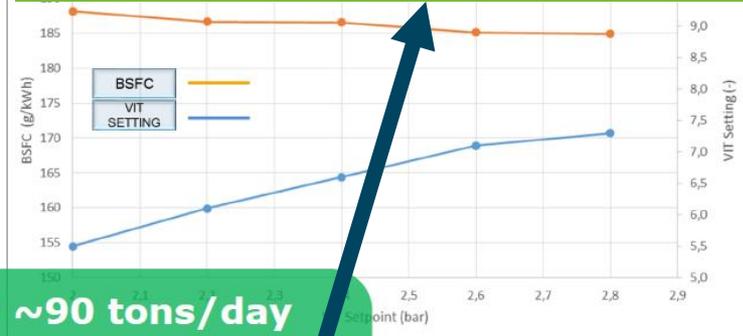
## Field Experience 2-Stroke Engine

### Engine Performance Optimization – BSFC Improvement

$p_{max}$ -Variation vs. VIT

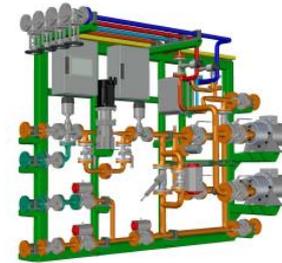
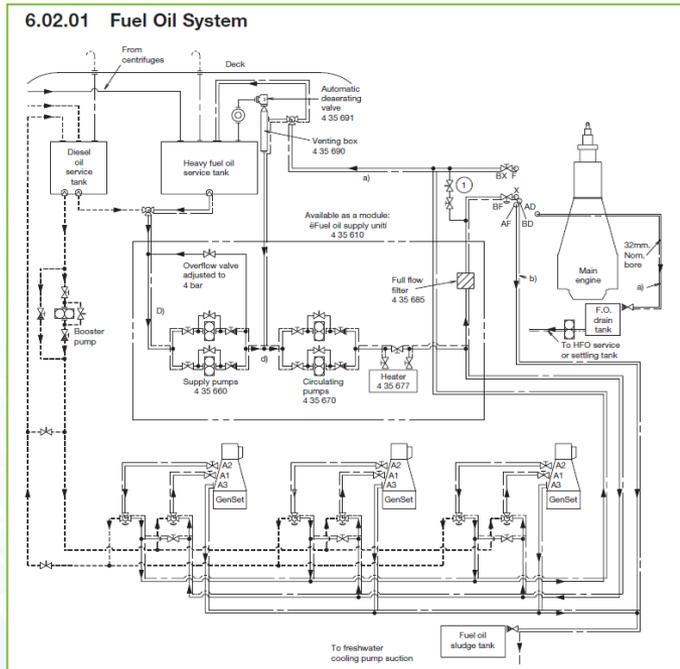


$$1 \frac{g}{kW * h} \approx 0,5\% \text{ von } \dot{m} \left[ \frac{kg}{h} \right]$$

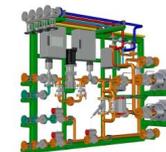
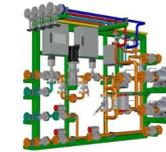
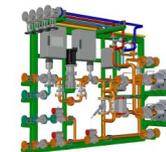


- ✓ HFO Consumption: ~90 tons/day
- ✓ BSFC improvement → ~2-3 g/kWh
- ✓ Fuel Savings → ~60 tons/month !!!

# AVL Fuel System Marine (FSM): Systemarchitekturen



**Systemkonzept für:  
1 Hauptmaschine  
3 Nebenaggregate**

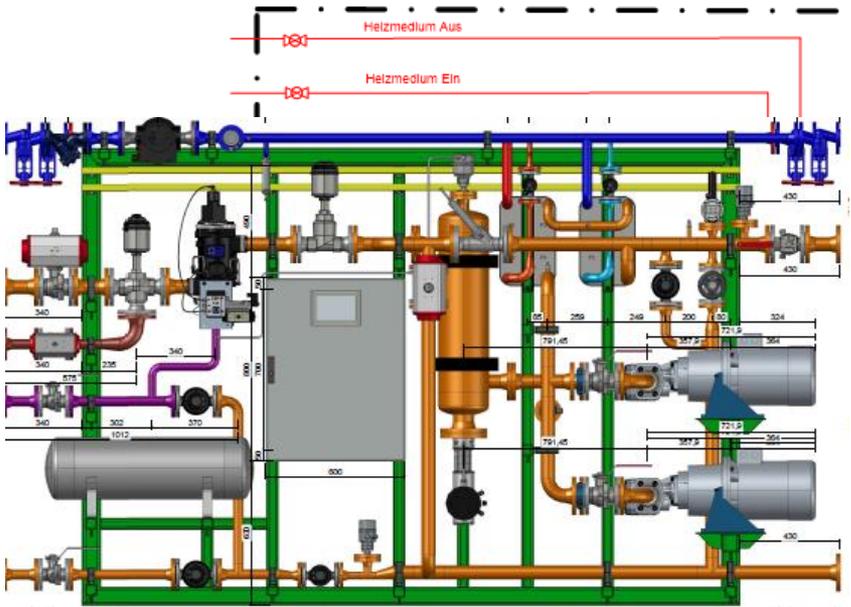


- Übernahme aller Funktionen von „Booster Units“
- Präzise Vorgabe / Konditionierung aller Kraftstoffe nach Angaben der Motorenhersteller auf Motor- spezifische Parameter (Druck , Temperatur , Dichte , Viskosität , Umlaufmengen ...)
- Kraftstoffwechsel- Funktionen (MDO auf HFO und umgekehrt...)
- Entlüften und Spülen vorhandener Kraftstoff- Pfade

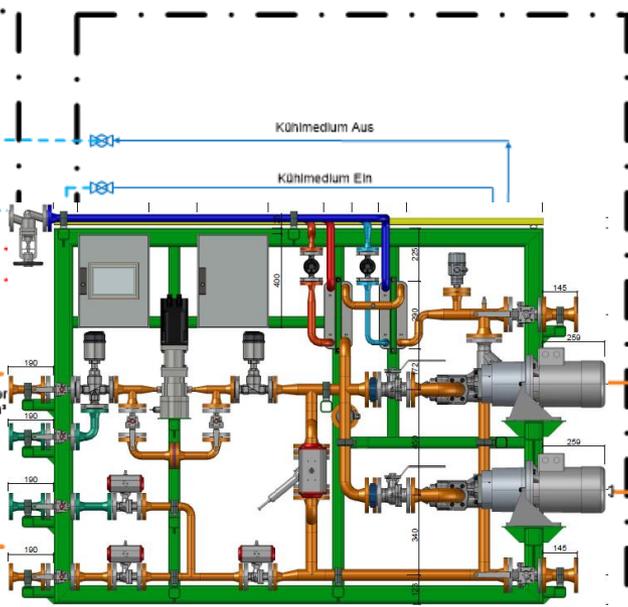
# AVL Fuel System Marine (FSM): Systemarchitekturen



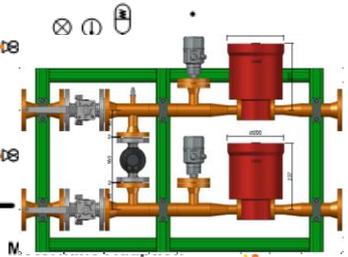
3600mmx2050mmx933mm



2500mmx1640mmx655mm

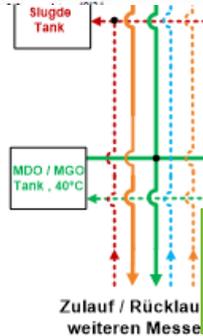


1130x742x394



Messeinheit für Motorleistungen von 4MW...20MW  
 Messbereich I: 0,2...1200kg/h  
 Messbereich II: 0,5...3800kg/h

Konditioniereinheit HFO/MGO/Diesel bis 38MW  
 Motorleistungen kombinierbar  
 z.B. 1x20MW , 3x 6MW



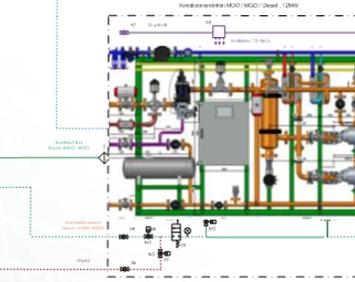
# AVL Fuel System Marine (FSM): Systemvariationen



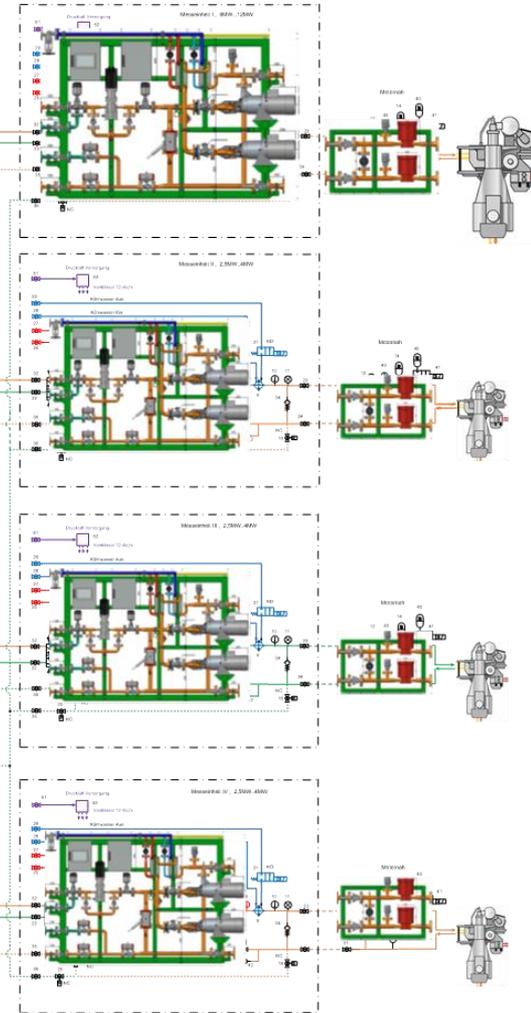
## Maximal- Ausführung für dualen Betrieb mit HFO & Diesel



**Booster Einheit I**  
HFO / MGO / Diesel  
Für bis zu 38MW  
Motorleistung



**Booster Einheit II**  
MGO / Diesel  
Für bis zu 18MW  
Motorleistung



**Messeinheit I**  
HFO / MGO / Diesel  
8MW...20MW  
Motorleistung

**Messeinheit II**  
HFO / MGO / Diesel  
2,5MW...6MW  
Motorleistung

**Messeinheit III**  
HFO / MGO / Diesel  
2,5MW...6MW  
Motorleistung

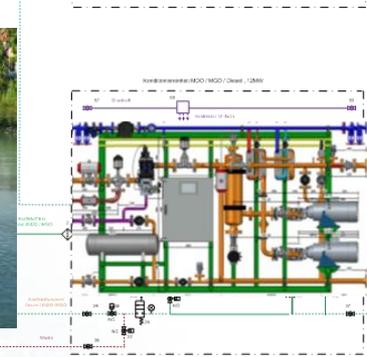
**Messeinheit IV**  
HFO / MGO / Diesel  
2,5MW...6MW  
Motorleistung



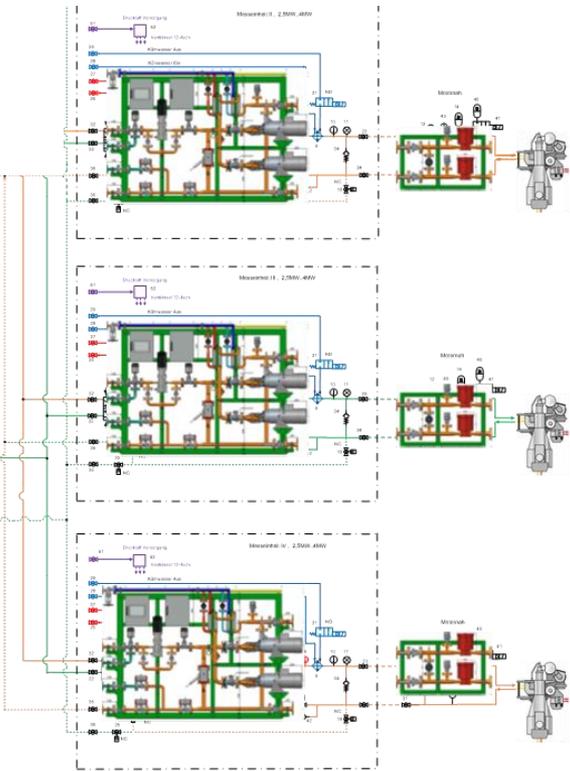
# AVL Fuel System Marine (FSM): Systemvariationen



## Maximal- Ausführung für Betrieb mit Diesel



**Booster Einheit II**  
MGO / Diesel  
Für bis zu 18MW  
Motorleistung

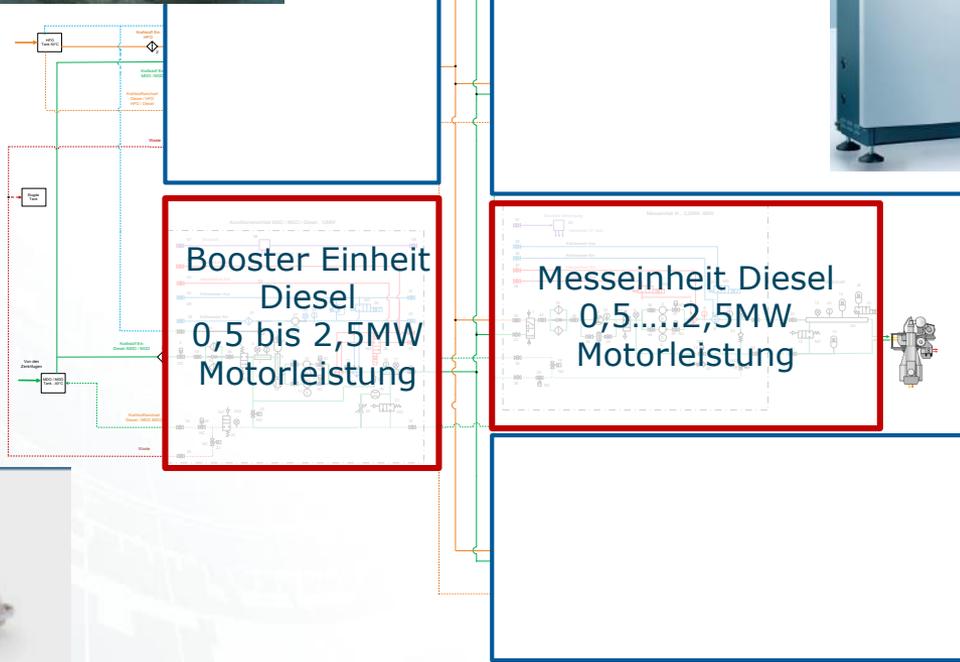


**Messeinheit II**  
HFO / MGO /  
Diesel  
2,5MW...6MW  
Motorleistung

**Messeinheit III**  
HFO / MGO /  
Diesel  
2,5MW...6MW  
Motorleistung

**Messeinheit IV**  
HFO / MGO /  
Diesel  
2,5MW...6MW  
Motorleistung

# AVL Fuel System Marine (FSM): Systemvariationen



z.B. AVL FuelExact





## Kraftstoffverbrauchsmessung im Automobilbereich

- Kundenforderungen für eine effiziente Versuchsplanung:
- AVL- FuelExact :Standard- Messsystem für den Kraftstoffverbrauch
- Einflussgrößen auf die Verbrauchsmessung
  - Begriffe zur Messunsicherheit
  - Messunsicherheitsbetrachtungen

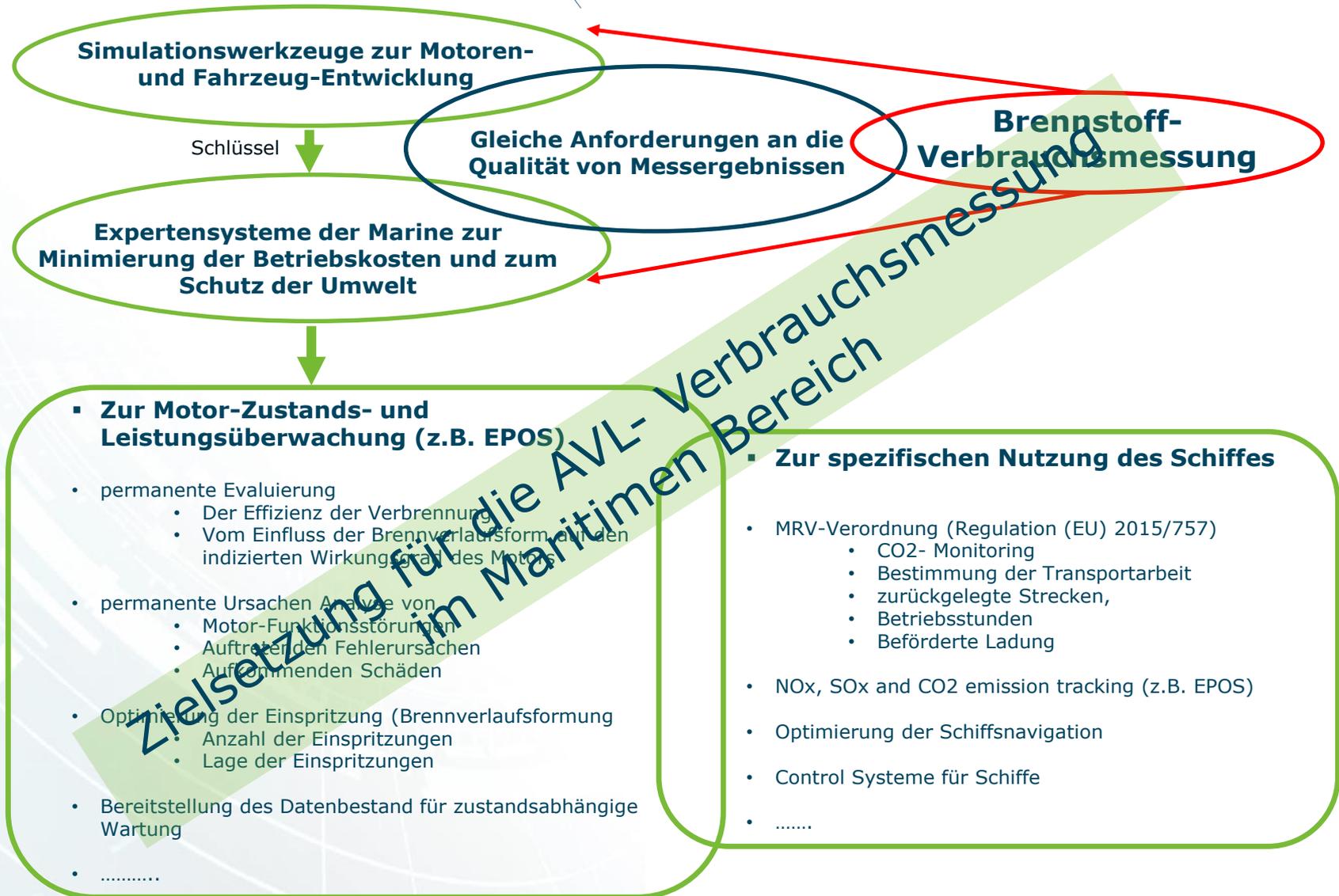
## Kraftstoffverbrauchsmessung im Marinebereich

- Analyse derzeit ausgeführter Systemlösungen
  - Ausführungsvarianten
  - Messunsicherheitsbetrachtungen

## AVL Fuel System Marine (FSM)

- Systemkonzept
- Konstruktiver Aufbau
- Messunsicherheitsbetrachtungen
- Systemarchitekturen / Systemvariationen

## Zusammenfassung



Vielen Dank



[www.avl.com](http://www.avl.com)

