

# Emissionsstrategien für Großmotoren in der Schifffahrt

## *Herausforderungen und Lösungsansätze*

Vortrag STGF  
Flensburg, 17.10.2017

**Prof. Dr.-Ing. Horst Harndorf**

Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren  
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik  
Universität Rostock

Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren, Universität Rostock

## Inhalt

### Gliederung

#### 1. Status

- Großdieselmotor
  - Emissionen
  - Brennstoffe

#### 2. Lösungsansätze zur NO<sub>x</sub>-/Partikelminimierung

- Innermotorische Strategien
  - AGR mit CR-Höchstdruckeinspritzung
  - LNG mit Zündstrahlverfahren
- Nachmotorische Strategien
  - Selektive katalytische NO<sub>x</sub>-Reduktion (SCR)
  - Partikelfilter (DPF)

#### 3. Zusammenfassung und Ausblick

## Gliederung

### 1. Status

- Großdieselmotor
  - Emissionen
  - Brennstoffe

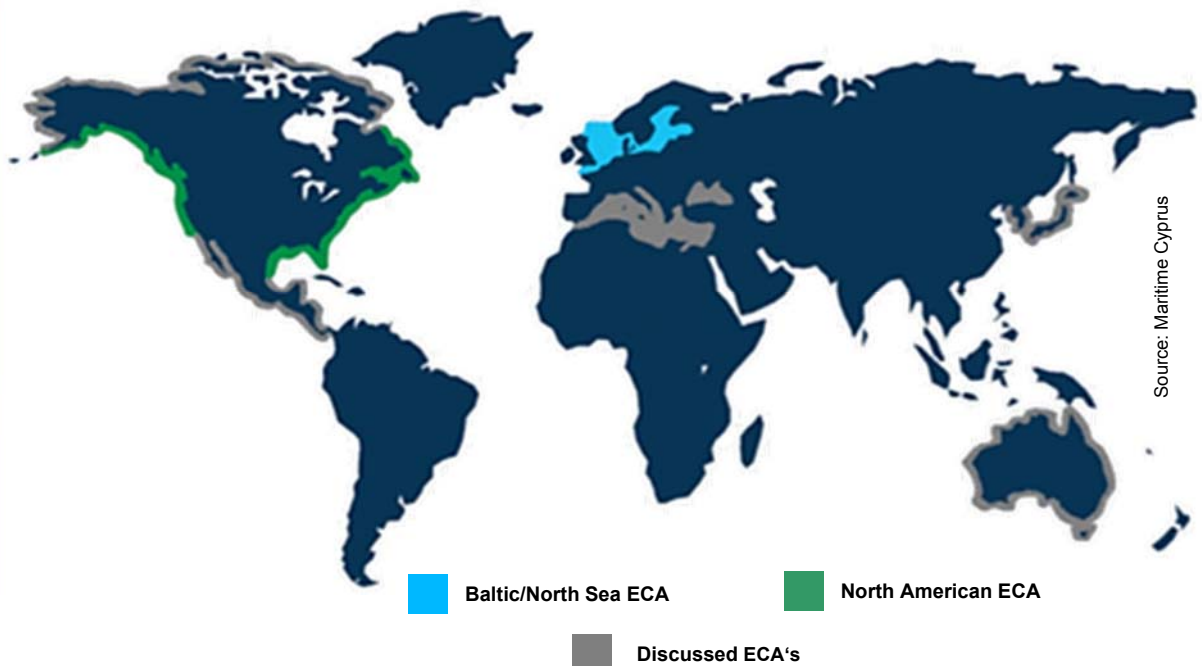


## Emission Control Areas (ECA) NOx/SOx Kontrollgebiete

### 1. Status

- Dieselmotor
- Emissionen
- Brennstoffe

### NOx/SOx ECA's für Schiffsdieselmotoren

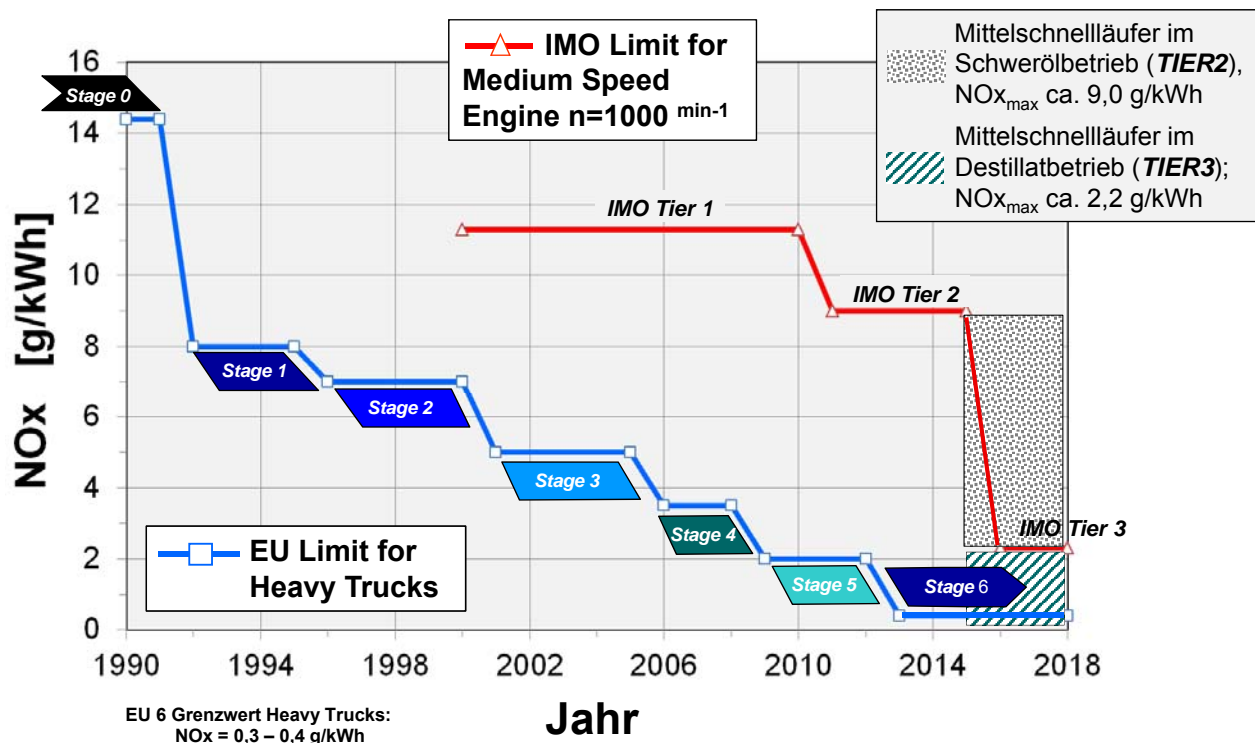


**ECA:** Emission Control Areas  
**NECA:** NOx Emission Control Areas  
**SECA:** SOx Emission Control Areas



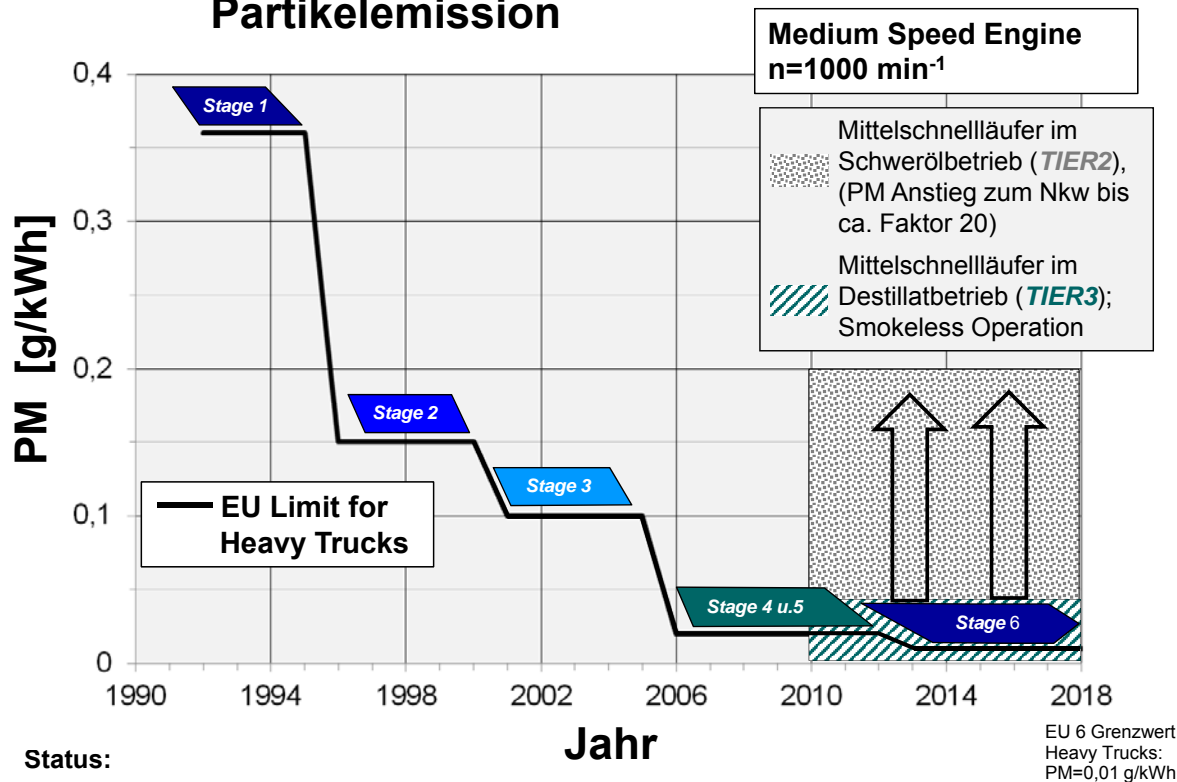
1. Status
- Dieselmotor
  - Emissionen
  - Brennstoffe

## NOx-Emission



1. Status
- Dieselmotor
  - Emissionen
  - Brennstoffe

## Partikelemission






Status:

- EU 6 Partikel-Grenzwert Heavy Trucks: **0,01 g/kWh**
- Schiffsmotor: **kein PM Grenzwert**; nur sichtbarer Rauch „limitiert“



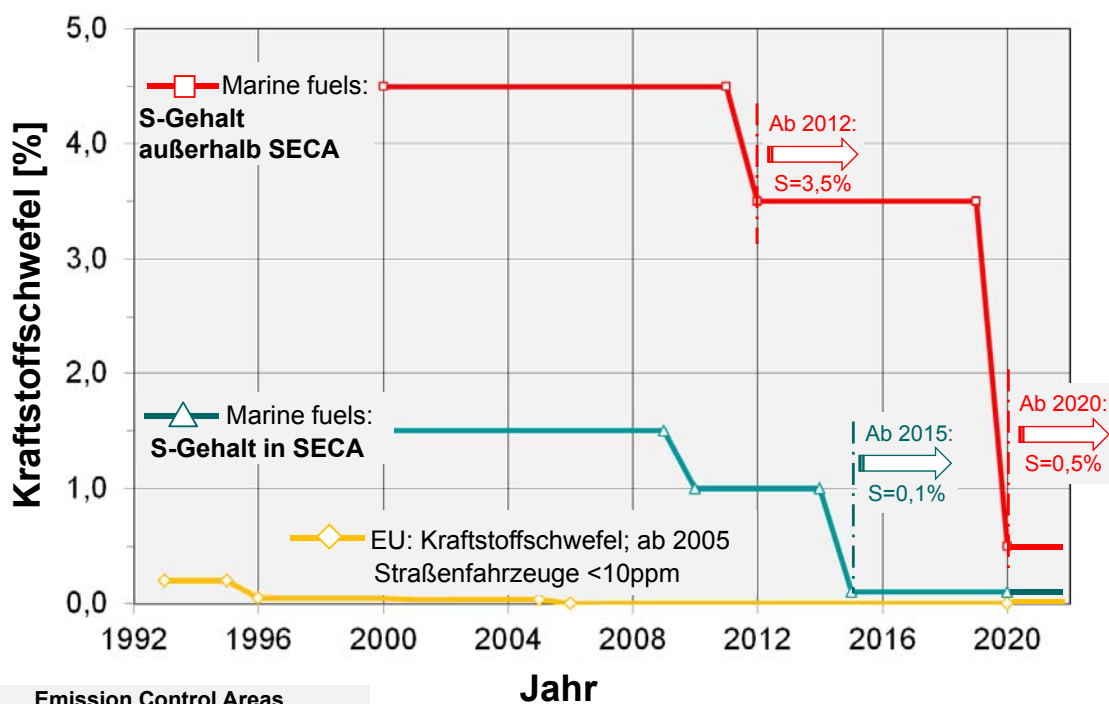
- 1. Status**
- Dieselmotor
  - Emissionen
  - Brennstoffe

Eigenschaften		Dieselkraftstoffe		
		EN 590 Diesel (EU on-road)	Marine Destillate DMB (ISO 8217)	Marine HFO RGM 380 (ISO 8217)
Dichte	kg/m <sup>3</sup>	833	900	991
Kin. Viskosität	mm <sup>2</sup> /s	4,5@40°C	11@40°C	380@50°C
Stockpunkt	°C	-10	0	30
Koksrückstand	% <sub>m/m</sub>	0,30	0,30	18
Aschegehalt	% <sub>m/m</sub>	0,01	0,01	0,15
Schwefel	% <sub>m/m</sub>	0,001	0,1 in SECA	3,5
Vanadium	mg/kg	< 0,1	< 0,1	300
Gesamtverschmutzung	% <sub>m/m</sub>	0,0024	0,1	0,1
				



- 1. Status**
- Dieselmotor
  - Emissionen
  - Brennstoffe

### Gesetzgebung Kraftstoffschwefel



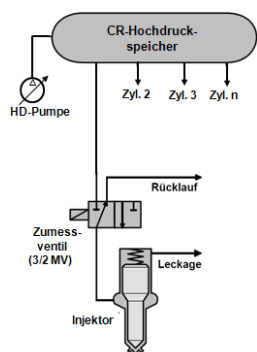
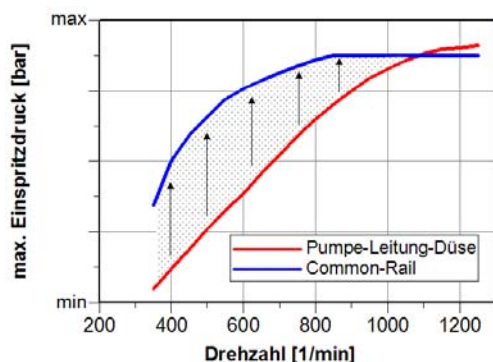
ECA: Emission Control Areas  
 NECA: NOx Emission Control Areas  
 SECA: SOx Emission Control Areas



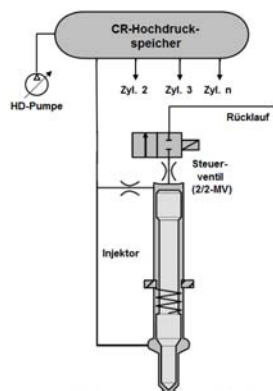
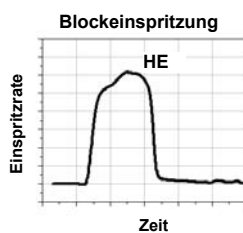
## 1. Status

- Dieselmotor
- Emissionen
- Brennstoffe

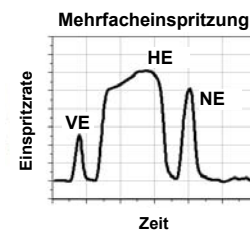
## Druckgesteuertes- vs. Zeit-Hub gesteuertes CR-Einspritzsystem



A: Druckgesteuertes CR-System (druckgesteuerte Düse)



B: Zeit-Hub gesteuertes CR-System (hubgesteuerte Düse)



### Schritt A:

- Freie Druckmodulation mit CR-Einspritzsystem
- Druckgesteuerte Einspritzdüse
- nur Blockeinspritzung möglich

### Schritt B:

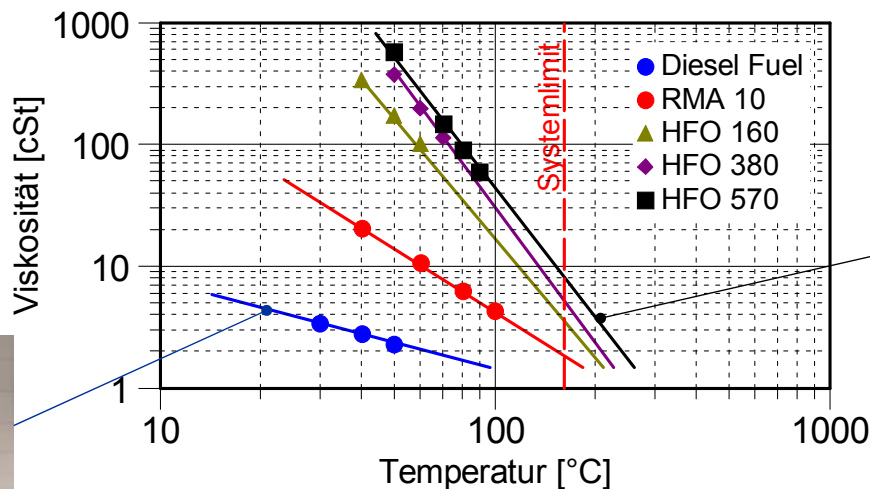
- Freie Druckmodulation mit CR-Einspritzsystem
- Zeit-Hub gesteuertes Injektor
- Mehrfacheinspritzung möglich

# Kraftstoffe Schiffsdieselmotor vs. Nkw

## 1. Status

- Dieselmotor
- Emissionen
- Brennstoffe

## Vergleich Kraftstoffviskosität



EN 590 Diesel (EU on-road)



Marine HFO RGM 380 (ISO 8217)

### 1. Status

- Dieselmotor
- Emissionen
- Brennstoffe

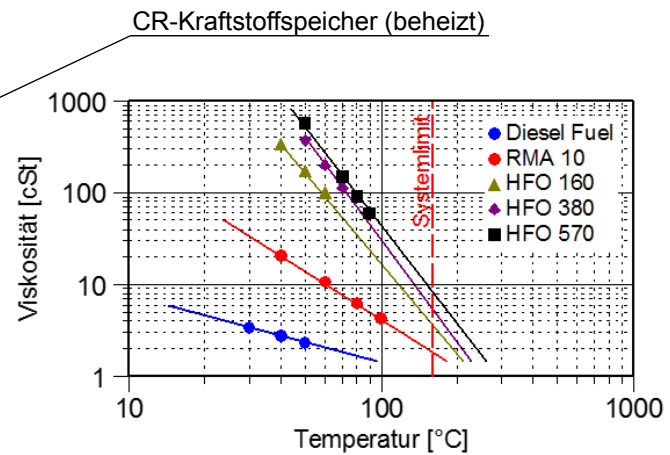
### Einfluss Kraftstoffviskosität



Schiffsdieselmotor CAT 6M20 mit CR



Schiffsdieselmotor CAT 6M20 mit AGR



- Kraftstoff Großmotor ist keine konstante Applikationsgröße
- Eingeregelter Schwerölviskosität typischerweise 10 -17 cSt
- Konditionierung der Schweröltemperaturen teilweise bis zu 180°C erforderlich (Grenzbelastung Magnetventil (DMV))

## Inhalt

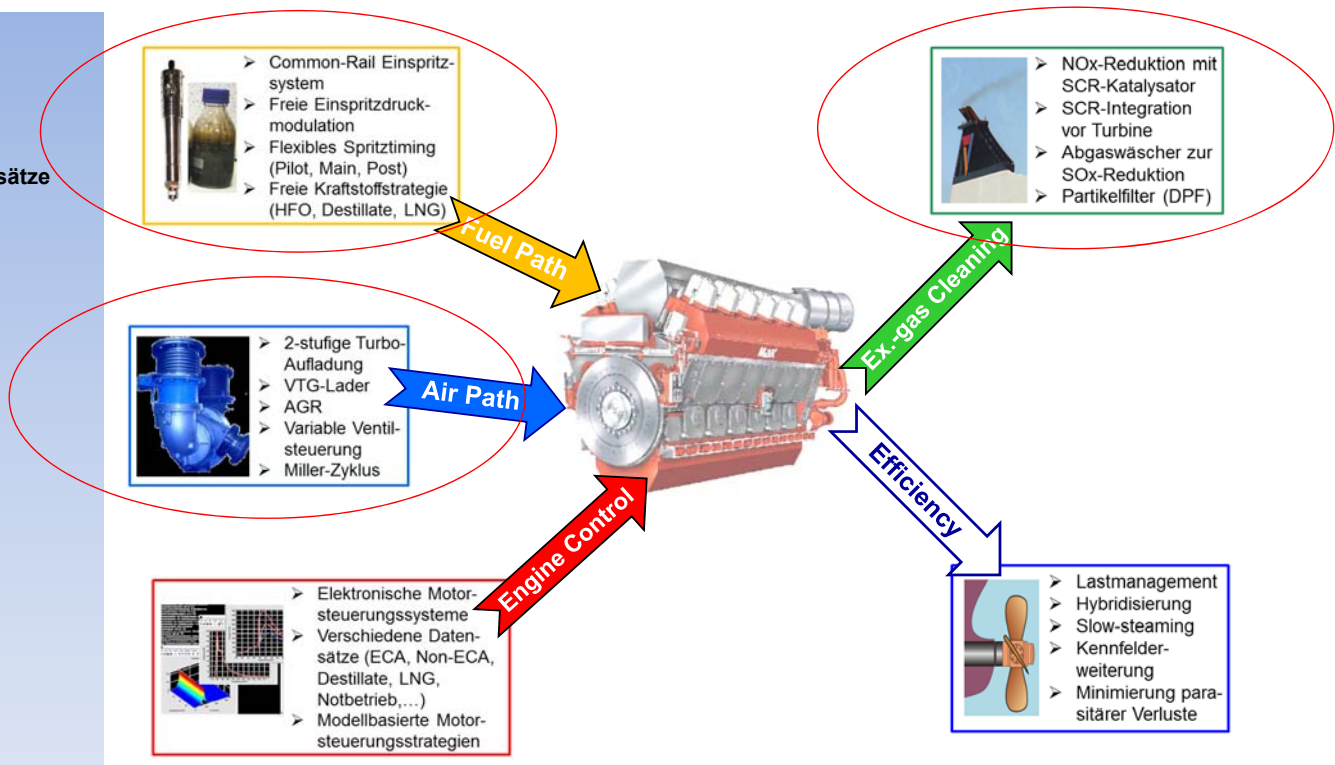
### Gliederung

#### 1. Status

- Großdieselmotor
  - Emissionen
  - Brennstoffe

#### 2. Lösungsansätze zur NOx-/Partikelminimierung

- 1. Status
  - Motor
  - Emissionen
  - Brennstoffe
- 2. Lösungsansätze /Strategien



## Inhalt

### Gliederung

#### 1. Status

- Großdieselmotor
- Emissionen
- Brennstoffe

#### 2. Lösungsansätze zur NOx-/Partikelminimierung

- Innermotorische Strategien
  - AGR mit CR-Höchstdruckeinspritzung



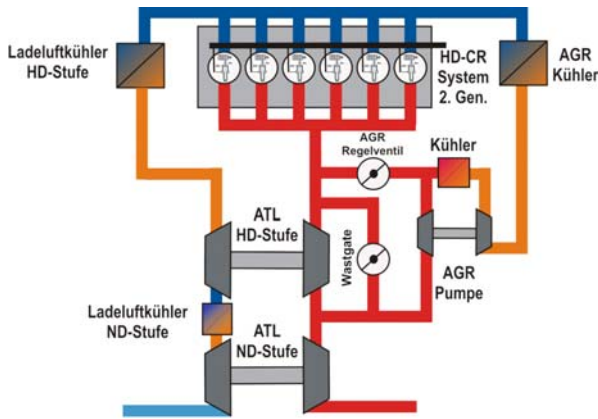
### 1. Status

- Motor
- Emissionen
- Brennstoffe

### 2. Lösungsansätze /Strategien

- Innermotorisch mit AGR

## Abgasrückführung (AGR) + angelagerte Nacheinspritzung (NE)



<b>AGR-basiertes Konzept</b>	<b>Innerhalb ECA</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kraftstoff: Destillat, schwefelarm</li> <li>• Einspritzsystem: Common-Rail mit Nacheinspritzung</li> <li>• Ladeluftsystem: 2-stufig</li> <li>• NO<sub>x</sub>-Reduzierung: IMO III durch AGR</li> <li>• SO<sub>x</sub>-Reduktion: über Kraftstoff</li> </ul>
<b>Motorintern, ohne Abgasnachbehandlung</b>	

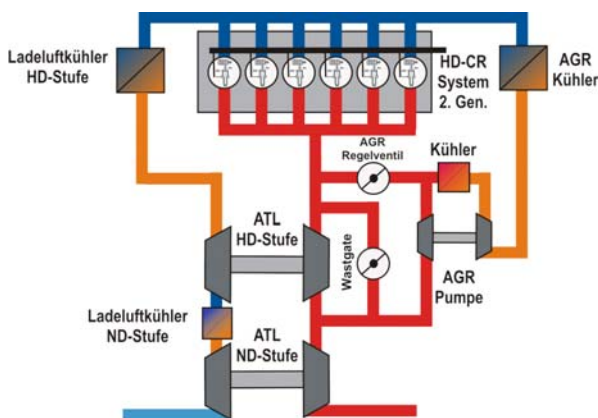
### 1. Status

- Motor
- Emissionen
- Brennstoffe

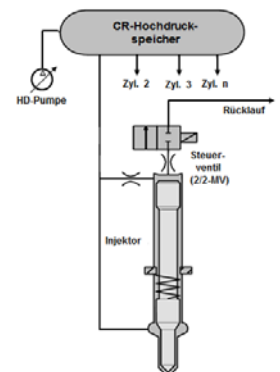
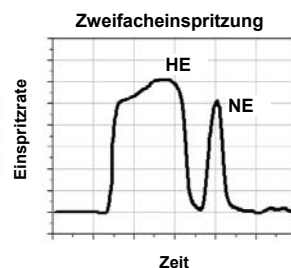
### 2. Lösungsansätze /Strategien

- Innermotorisch mit AGR

## Abgasrückführung (AGR) + angelagerte Nacheinspritzung (NE)



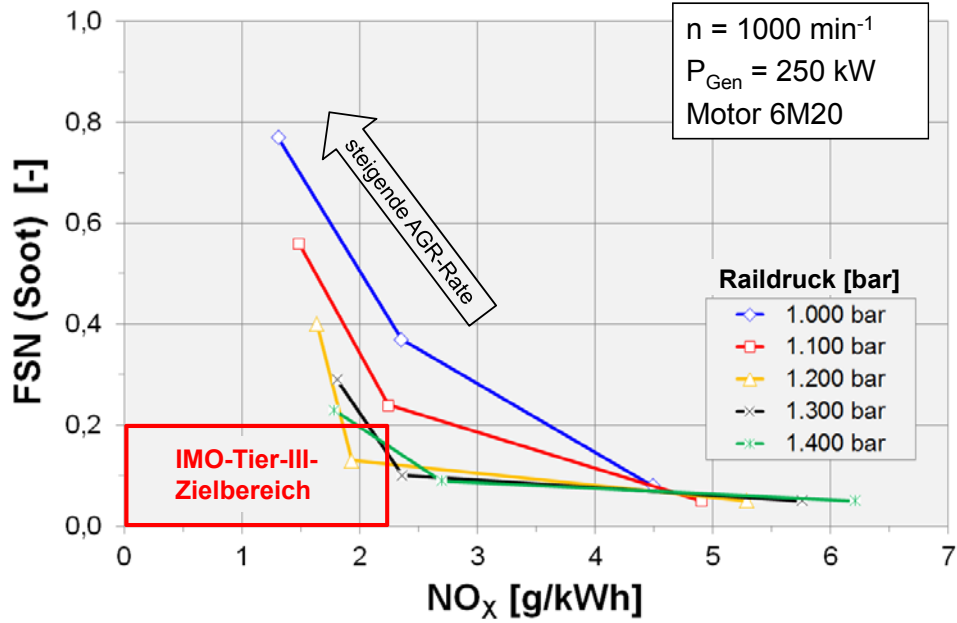
<b>AGR-basiertes Konzept</b>	<b>Innerhalb ECA</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kraftstoff: Destillat, schwefelarm</li> <li>• Einspritzsystem: Common-Rail mit Nacheinspritzung</li> <li>• Ladeluftsystem: 2-stufig</li> <li>• NO<sub>x</sub>-Reduzierung: IMO III durch AGR</li> <li>• SO<sub>x</sub>-Reduktion: über Kraftstoff</li> </ul>
<b>Motorintern, ohne Abgasnachbehandlung</b>	





1. Status
  - Motor
  - Emissionen
  - Brennstoffe
2. Lösungsansätze /Strategien
  - Innermotorisch mit AGR

### AGR im Teillastbetrieb / Raildruckvariation



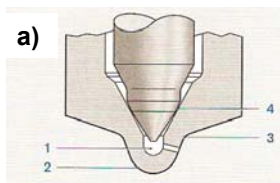
#### Ergebnis:

- Durch Kombination von AGR mit CR-Höchstdruckeinspritzung können im Teillastgebiet unter Einsatz von Destillatkraftstoff  $\text{NO}_x$ -Grenzwerte von ca.  $2,0 \text{ g/kWh}$  dargestellt werden.
- **Nachteil:** Partikelhöhung durch AGR kritisch!

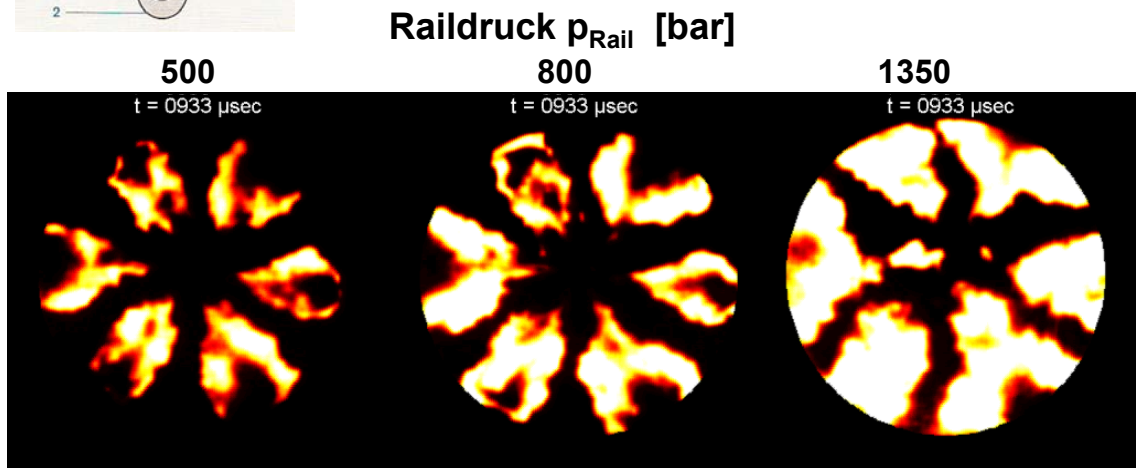


1. Status
  - Motor
  - Emissionen
  - Brennstoffe
2. Lösungsansätze /Strategien
  - Innermotorisch mit AGR

### Abgasrückführung / Einfluss Raildruckvariation



$m_E = \text{konst.}$   
 $p_{\text{Rail}} - \text{Variation}$

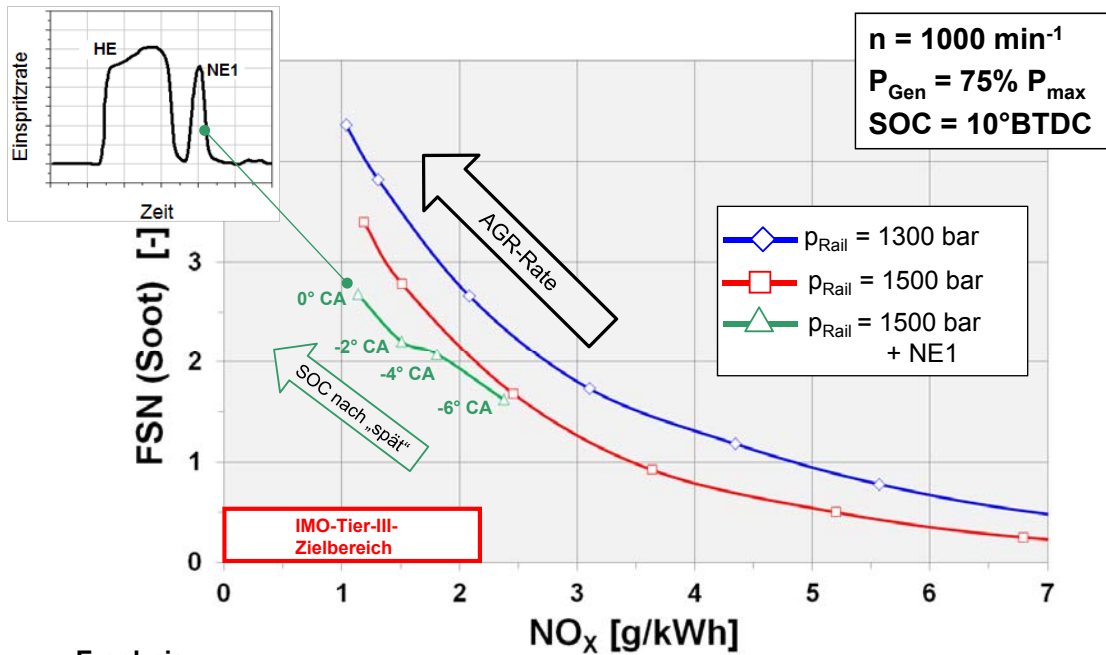


- a) 1 Zylindrisches Sackloch; 2 konische Kuppe; 3 Kehlradius; 4 Düsenkörpersitz



1. Status
  - Motor
  - Emissionen
  - Brennstoffe
2. Lösungsansätze /Strategien
  - Innermotorisch mit AGR

### AGR: Raildruckvariation + Nacheinspritzung (NE)



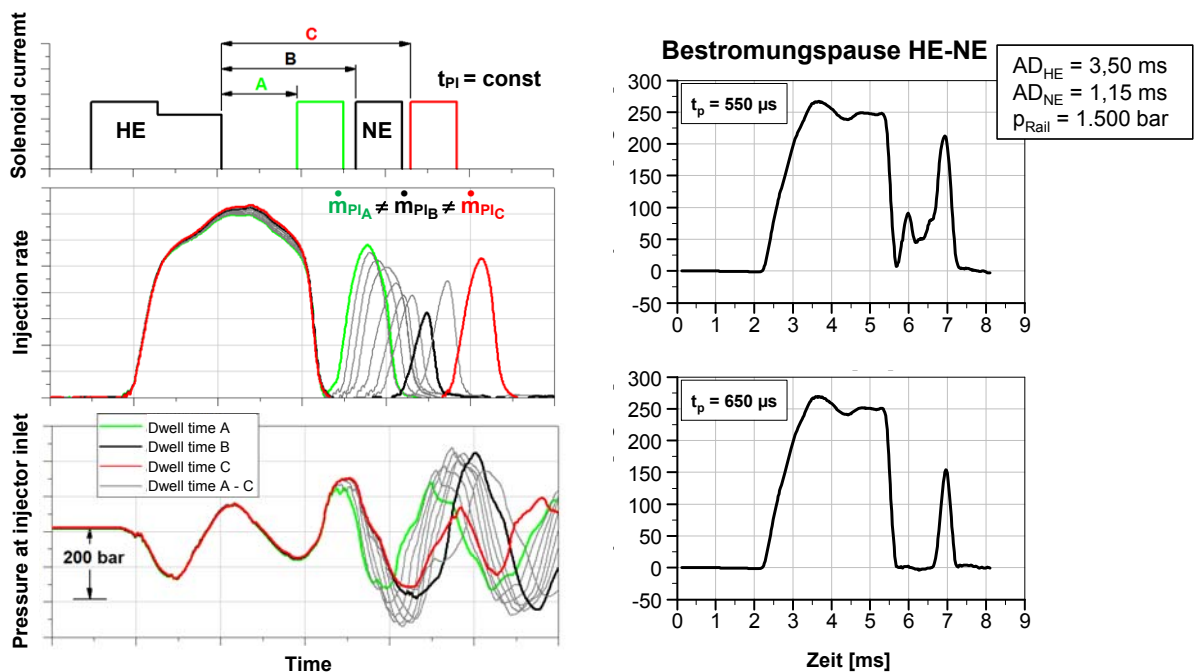
#### Ergebnis:

- Auch bei Kombination von Abgasrückführung und Mehrfacheinspritzung (NE) sowie dem Einsatz von Destillatkraftstoff kann der  $\text{NO}_x$ -Grenzwerte von ca.  $2,0 \text{ g/kWh}$  z.Z. nur im Teillastgebiet dargestellt werden
- **Konsequenz:** Einsatz druckgesteigertes CR-Einspritzsystem + Düsenoptimierung.



1. Status
  - Motor
  - Emissionen
  - Brennstoffe
2. Lösungsansätze /Strategien
  - Innermotorisch mit AGR

### Optimierung Spitztiming Nacheinspritzung (NE)



- Druckwellenkompensation bei zentraler CR-Speicherleiste zwingend
- Weiterer Lösungsansatz: Speichereinjektoren (Einzelspeicher)



1. Status
- Motor
  - Emissionen
  - Brennstoffe

2. Lösungsansätze /Strategien

- Innermotorisch mit AGR

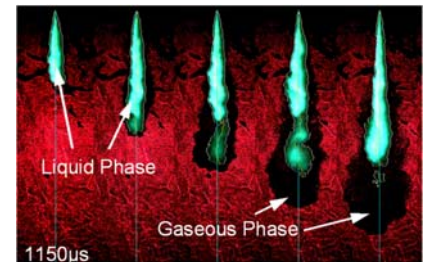
### Neue Hochdruck-/Hochtemperatur-Einspritzkammer

- Eine der aktuell größten Einspritzkammern
- Speziell ausgelegt für Großmotor-Injektoren



#### Technische Daten

Max. Gasdruck	250 bar
Max. Gastemperatur	900 K
Beobachtbare Strahllänge	150 mm (zentrale Düseneinbaulage)
Optische Zugänglichkeit	1 x 300 mm frontal 4 x 80 mm radial
Gasatmosphäre	Luft / N <sub>2</sub>

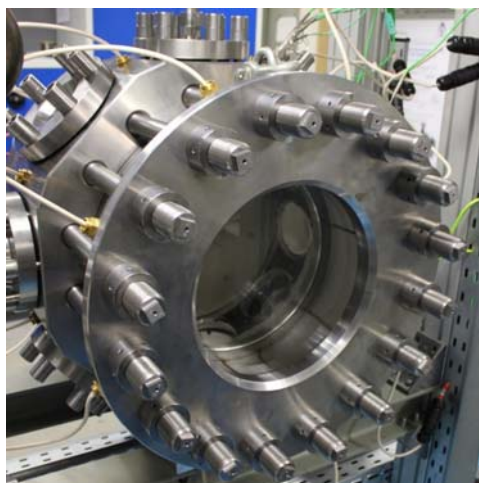


1. Status
- Motor
  - Emissionen
  - Brennstoffe

2. Lösungsansätze /Strategien

- Innermotorisch mit AGR

### Hochdruck- / Hochtemperatur Brennkammer

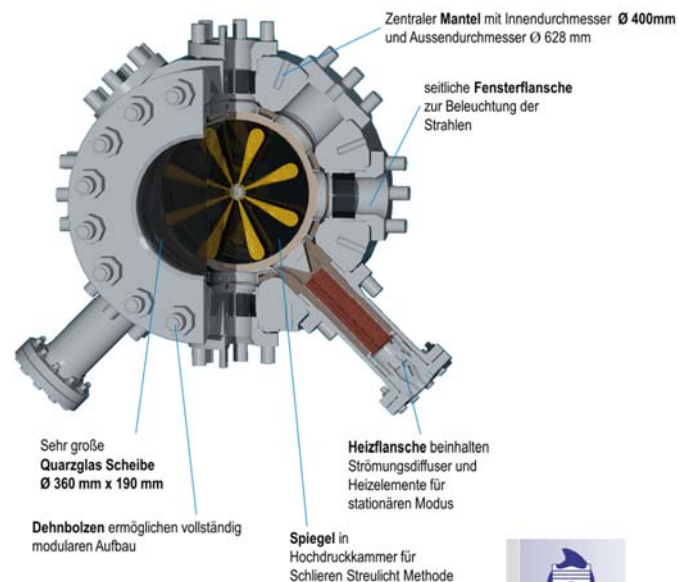


#### Zielsetzung:

- Sichtbarmachung Flüssig-/Dampfphase
- Bestimmung erster Zündorte und ZV
- Untersuchung der Spray/Wand-Interaktion
- Düsen-/Einspritzsystemvergleiche
- Entwicklung/Erprobung neuer Messtechniken

#### Technische Daten:

- Dieseltypischer Drücke und Temperaturen
- $p_{max} = 250\text{bar}$ ;  $T_{max} = 900\text{K}$
- Gasversorgung für N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, ...
- Variable Gaskonzentration (z.B. AGR-Betrieb)



### 1. Status

- Motor
- Emissionen
- Brennstoffe

### 2. Lösungsansätze /Strategien

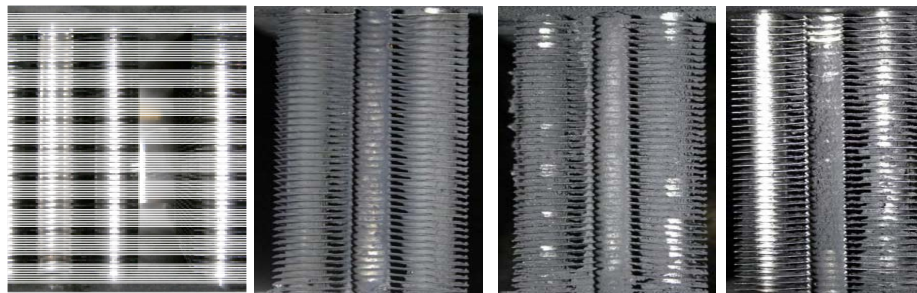
- Innermotorisch mit AGR

#### Abgasrückführung (AGR):

→ **Problemstellung Kraftstoffschwefel:**

- Bildung von  $\text{H}_2\text{SO}_3$  und  $\text{H}_2\text{SO}_4$  in AGR-Kühler und Ladeluftpfad
- Wärmetauscherleistung des AGR-Kühlers wird durch kritische Ablagerungen beeinträchtigt
- nur schwefelfreie Kraftstoffqualitäten erlauben einen zielführenden AGR-Betrieb zur NO<sub>x</sub>-Senkung

#### Bildung von Ablagerungen (fouling) am AGR-Kühler durch Schwefelreaktionsprodukte



## Inhalt

### Gliederung

#### 1. Status

- Großdieselmotor
- Emissionen
- Brennstoffe

#### 2. Lösungsansätze zur NO<sub>x</sub>-/Partikelminimierung

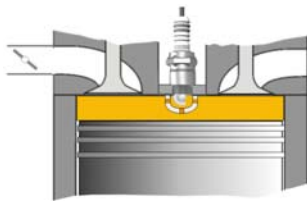
- Innermotorische Strategien
  - AGR mit CR-Höchstdruckeinspritzung
  - LNG mit Zündstrahlverfahren

- 1. Status**
- Motor
  - Emissionen
  - Brennstoffe

**2. Lösungsansätze /Strategien**

- Inermotorisch mit AGR
- Inermotorisch mit LNG

**Otto - Gasverfahren**

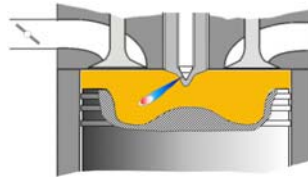


- Quantitätsregelung
- äußere Gemischbildung
- Bevorzugt CNG (LNG)
- Homogenes Gemisch mit  $\lambda > 1$
- Vorkammer mit  $\lambda \leq 1$
- Fremdzündung (ZK)
- Brennverfahren in monovalenter Ausführung (nur Gas)

**Anwendungsfelder**

- Stationärmotoren (4-Takt)

**Diesel-Gas - Verfahren**

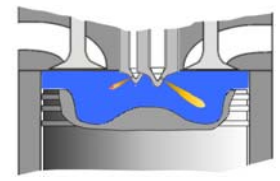


- Quantitätsregelung
- äußere Gemischbildung
- Bevorzugt LNG
- Homogenes Gemisch mit  $\lambda \geq 1$
- Diesel-Zündstrahl
- Brennverfahren in Dual Fuel Ausführung (Diesel- oder Gasbetrieb)

**Anwendungsfelder**

- Schiffsmotoren (4-Takt)
- Stationärmotoren

**Gas-Diesel - Verfahren**



- Qualitätsregelung
- Innere Gemischbildung (Gaseinblasung)
- Bevorzugt LNG
- Heterogenes Gemisch ( $\lambda > 1$ )
- Selbstzündung (Diesel-Zündstrahl für Kaltstart und Teillast)
- BV in Dual Fuel Ausführung (Gas- oder Dieselbetrieb)

**Anwendungsfelder**

- Schiffsmotoren (2-/4-Takt)
- Stationärmotoren

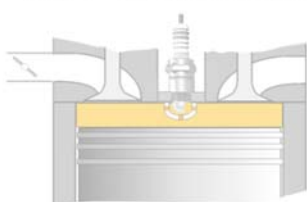


- 1. Status**
- Motor
  - Emissionen
  - Brennstoffe

**2. Lösungsansätze /Strategien**

- Inermotorisch mit AGR
- Inermotorisch mit LNG

**Otto - Gasverfahren**

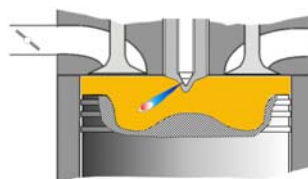


- Quantitätsregelung
- äußere Gemischbildung
- Bevorzugt CNG (LNG)
- Homogenes Gemisch mit  $\lambda > 1$
- Vorkammer mit  $\lambda \leq 1$
- Fremdzündung (ZK)
- Brennverfahren in monovalenter Ausführung (nur Gas)

**Anwendungsfelder**

- Stationärmotoren (4-Takt)

**Diesel-Gas - Verfahren**

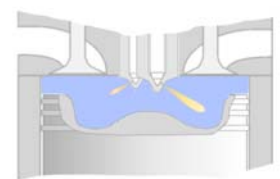


- Quantitätsregelung
- äußere Gemischbildung
- Bevorzugt LNG
- Homogenes Gemisch mit  $\lambda \geq 1$
- Diesel-Zündstrahl
- Brennverfahren in Dual Fuel Ausführung (Diesel- oder Gasbetrieb)

**Anwendungsfelder**

- Schiffsmotoren (4-Takt)
- Stationärmotoren

**Gas-Diesel - Verfahren**



- Qualitätsregelung
- Innere Gemischbildung (Gaseinblasung)
- Bevorzugt LNG
- Heterogenes Gemisch ( $\lambda > 1$ )
- Selbstzündung (Diesel-Zündstrahl für Kaltstart und Teillast)
- BV in Dual Fuel Ausführung (Gas- oder Dieselbetrieb)

**Anwendungsfelder**

- Schiffsmotoren (2-/4-Takt)
- Stationärmotoren



1. Status

- Motor
- Emissionen
- Brennstoffe

2. Lösungsansätze /Strategien

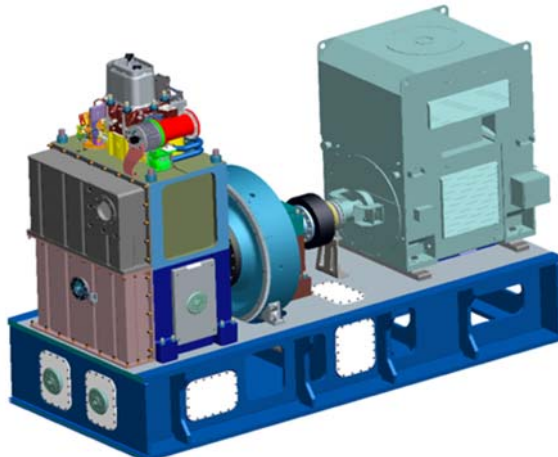
- Inermotorisch mit AGR
- Inermotorisch mit LNG

1-Zylinder Dual Fuel (DF) Forschungsgrößmotor

Kraftstoffe:

- Erdgas/LNG, EN590 Diesel,
- Marine Destillate, Schweröl

Bohrung	250-350 mm
Hub	350-500 mm
Leistung	850 kW
Gewicht	43 t



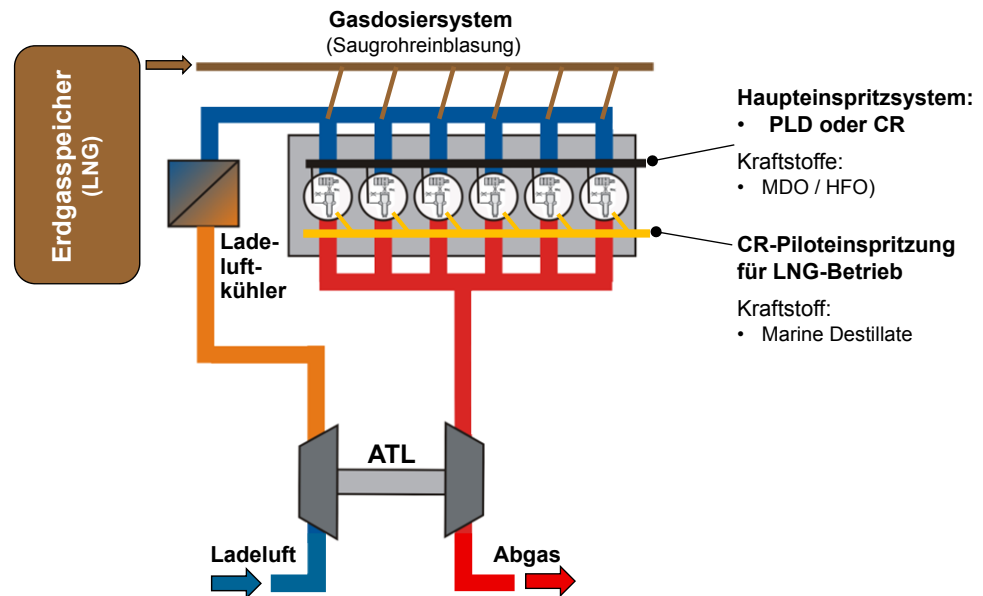
Dual Fuel (DF) Schiffsdieselmotor  
LNG-basiertes IMO Tier 3 Konzept

1. Status

- Motor
- Emissionen
- Brennstoffe

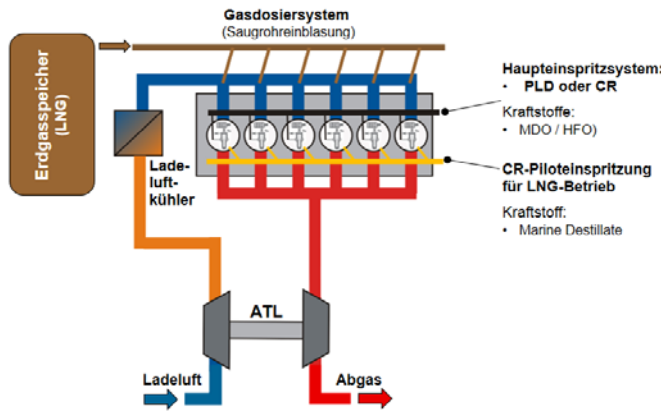
2. Lösungsansätze /Strategien

- Inermotorisch mit AGR
- Inermotorisch mit LNG
- Nachmotorisch mit SCR



# Dual Fuel (DF) Schiffsdieselmotor LNG-basiertes IMO Tier 3 Konzept

- 1. Status**
- Motor
  - Emissionen
  - Brennstoffe
- 2. Lösungsansätze /Strategien**
- Inermotorisch mit AGR
  - Inermotorisch mit LNG

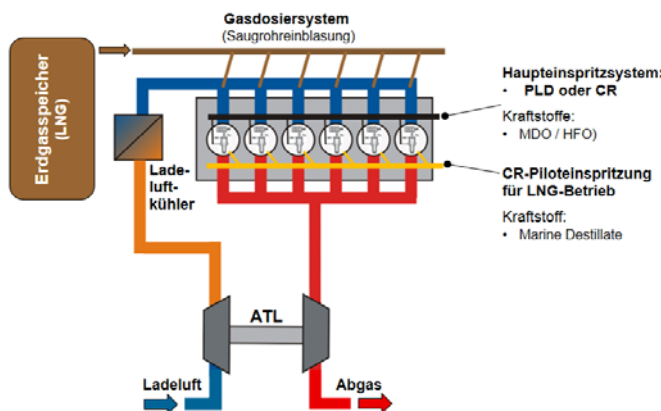


<b>LNG-basiertes Konzept</b>  <b>Motorintern, ohne Abgasnachbehandlung</b>	<b>Innerhalb ECA</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kraftstoff: Erdgas + Destillat</li> <li>• Einspritzsystem: PLD (CR) + Gas-Dosiersystem + CR-System für Piloteinspritzung (Zündstrahl)</li> <li>• Ladeluftsystem: 1-stufig</li> <li>• NOx-Reduzierung: IMO III über Gas-Mager-Betrieb</li> <li>• SOx-Reduktion: über Kraftstoff</li> </ul>
--	---



# Dual Fuel (DF) Schiffsdieselmotor LNG-basiertes IMO Tier 3 Konzept

- 1. Status**
- Motor
  - Emissionen
  - Brennstoffe
- 2. Lösungsansätze /Strategien**
- Inermotorisch mit AGR
  - Inermotorisch mit LNG



<b>LNG-basiertes Konzept</b>  <b>Motorintern, ohne Abgasnachbehandlung</b>	<b>Innerhalb ECA</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kraftstoff: Erdgas + Destillat</li> <li>• Einspritzsystem: PLD (CR) + Gas-Dosiersystem + CR-System für Piloteinspritzung (Zündstrahl)</li> <li>• Ladeluftsystem: 1-stufig</li> <li>• NOx-Reduzierung: IMO III über Gas-Mager-Betrieb</li> <li>• SOx-Reduktion: über Kraftstoff</li> </ul>	<b>Außerhalb ECA</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kraftstoff: Schweröl</li> <li>• Einspritzsystem: PLD (Common-Rail); nur Haupteinspritzung</li> <li>• Ladeluftsystem: 1-stufig</li> <li>• NOx-Reduzierung: IMO II-Betrieb</li> <li>• SOx-Reduzierung: keine wegen HFO</li> </ul>	<b>Vor- und Nachteile</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>+ Sehr geringe Emissionen</li> <li>+ Keine Abgasnachbehandlung</li> <li>+ CO<sub>2</sub>-Vorteil ggü. Diesel</li> <li>- Komplexe Funktionalitäten</li> <li>- Zusätzliches Piloteinspritzsystem + Gasdosiersystem</li> <li>- Geringere Leistungsdichte</li> <li>- Platzbedarf für LNG-Speicher</li> <li>- Sicherheit und Versorgungsstruktur</li> </ul>
--	---	---	---



## 1. Status

- Motor
- Emissionen
- Brennstoffe

## 2. Lösungsansätze /Strategien

- Innermotorisch mit AGR
- Innermotorisch mit LNG

### Kraftstoffkenndaten: Vergleich Erdgas vs. Diesel

	Dichte	Heizwert	Energiedichte	$L_{min}$	CH <sub>4</sub>	C	H	H/C	CO <sub>2</sub>
Einheit	kg / m <sup>3</sup> [15°C]	MJ / kg	MJ/dm <sup>3</sup>	kg <sub>L</sub> /kg <sub>Kr</sub>	%	%	%	-	kgCO <sub>2</sub> / kg <sub>Kr</sub>
Diesel (EN 590)	831	42,68	35,46	14,6	-	84,42	13,74	1,9	3,1
HFO RGM 380	990	40,5	40		-	89,0	11,0	1,5	3,25
CNG (200 bar)	215	43	9,0	17,2	98	74,99	25,01	3,90	2,8
LNG (- 162 °C)	450-475	43 - 49	12,6	17,2	98	74,99	25,01	3,90	2,8
Erdgas Beispiel	0,90	49	0,04	17,2	98	74,99	25,01	3,90	2,8

↳ Beispiel Erdgas für Kfz-Nutzung; mit 2% Propan

### Vergleich Erdgas vs. Diesel:

- Vorteil:
  - H/C-Verhältnis von LNG (Erdgas) höher; damit CO<sub>2</sub>-Vorteile
  - Partikelemission extrem niedrig (nur durch Diesel-Zündstrahl)
- Nachteil:
  - Reichweite von LNG geringer
  - Ggf. kritischer Methanschluß
  - Deutlich erhöhter Platzbedarf für LNG-Tanks



## LNG-basiertes IMO TIER 3 Konzept

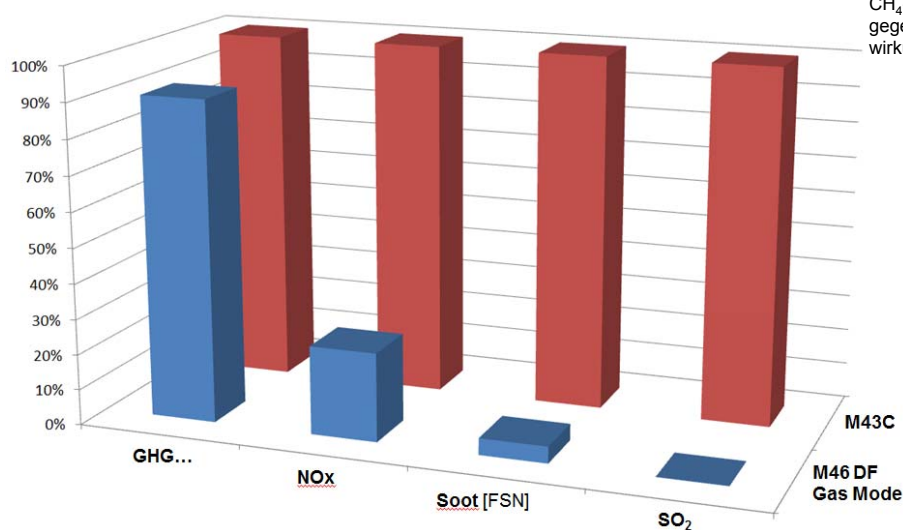
## 1. Status

- Motor
- Emissionen
- Brennstoffe

## 2. Lösungsansätze /Strategien

- Innermotorisch mit AGR
- Innermotorisch mit LNG

### Vergleich Motor M43 (Diesel-Mode) versus M46 DF (Gas-Mode)



CH<sub>4</sub>-Schlupf mit dem Faktor 23 gegenüber CO<sub>2</sub> bei der Treibhausgaswirkung (GHG) berücksichtigt.

Quelle: CAT

### Ergebnis:

- Realisierung der IMO TIER 3 Grenzwerte mit LNG ohne weitere Abgasnachbehandlung möglich





## Gliederung

### 1. Status

- Großdieselmotor
- Emissionen
- Brennstoffe

### 2. Lösungsansätze zur NOx-/Partikelminimierung

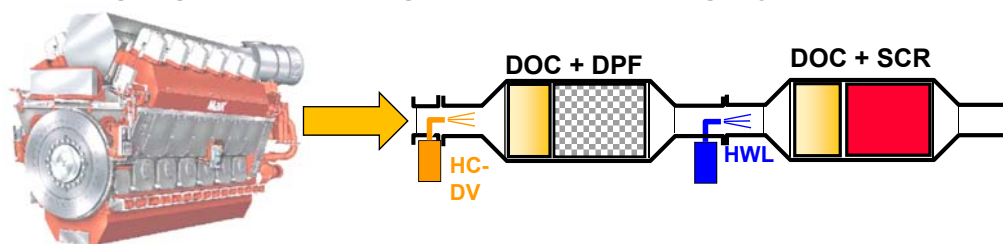
- Innermotorische Strategien
  - AGR mit CR-Höchstdruckeinspritzung
  - LNG mit Zündstrahlverfahren
- Nachmotorische Strategien (Abgasnachbehandlung)
  - Einschränkungen bei AGN

## Abgasnachbehandlung (AGN) Schiffsdieselmotor vs. Nkw

### 1. Status

- Dieselmotor
- Emissionen
- Brennstoffe

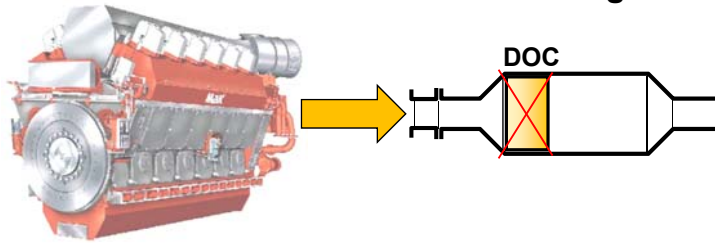
### Ausgangssituation Abgasnachbehandlungssystem Nkw (Euro VI)



## 1. Status

- Dieselmotor
- Emissionen
- Brennstoffe

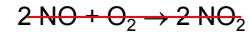
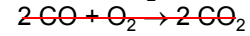
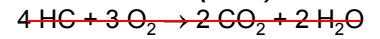
## Problemstellung Großdieselmotor



### Diesel-Oxidationskatalysator (DOC)

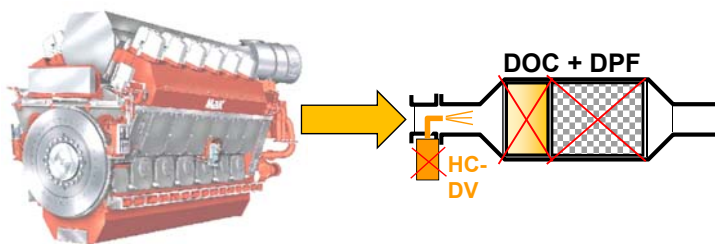
- DOC Einsatz wg. Kraftstoffschwefel nicht möglich

### Diesel Oxi-Kat (DOC)



## 1. Status

- Dieselmotor
- Emissionen
- Brennstoffe



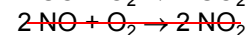
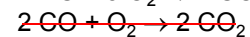
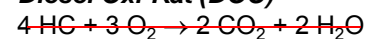
### Oxidationskatalysator (DOC)

- DOC Einsatz wg. Kraftstoffschwefel nicht möglich

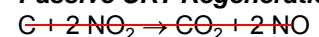
### Dieselpartikelfilter (DPF)

- wegen Kraftstoffschwefel am DOC keine NO<sub>2</sub>-getragene CRT-Regeneration
- Kein Einsatz geschlossener DPF-Systeme wegen Kraftstoffschwefel (Veraschung)
- Keine Zwangsregeneration eines DPF durch HC-Nachdosierung vor DOC

### Diesel Oxi-Kat (DOC)

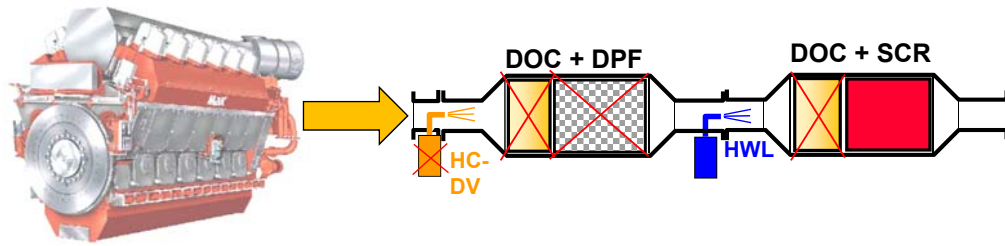


### Passive CRT-Regeneration



## 1. Status

- Dieselmotor
- Emissionen
- Brennstoffe



### Oxidationskatalysator (DOC)

- DOC Einsatz wg. Kraftstoffschwefel nicht möglich

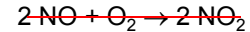
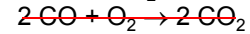
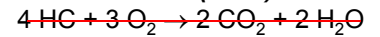
### Dieselpartikelfilter (DPF)

- wegen Kraftstoffschwefel am DOC keine NO<sub>2</sub>-getragene CRT-Regeneration
- Kein Einsatz geschlossener DPF-Systeme wegen Kraftstoffschwefel (Veraschung)
- Keine Zwangsregeneration eines DPF durch HC-Nachdosierung vor DOC

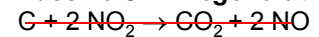
### NOx-Katalysator (SCR)

- Keine schnelle (fast) SCR-Reaktion, da kein NO<sub>2</sub>-Angebot
- NOx-Umsatz eingeschränkt (S↑, NO<sub>2</sub>↓, T<sub>Abg</sub>↓)

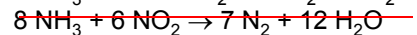
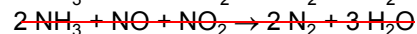
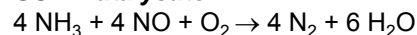
### Diesel Oxi-Kat (DOC)



### Passive CRT-Regeneration



### SCR-Katalysator



Standard SCR

Schnelle SCR (NO<sub>2</sub>)

Langsame SCR

## Inhalt

### Gliederung

#### 1. Status

- Großdieselmotor
- Emissionen
- Brennstoffe

#### 2. Lösungsansätze zur NOx-/Partikelminimierung

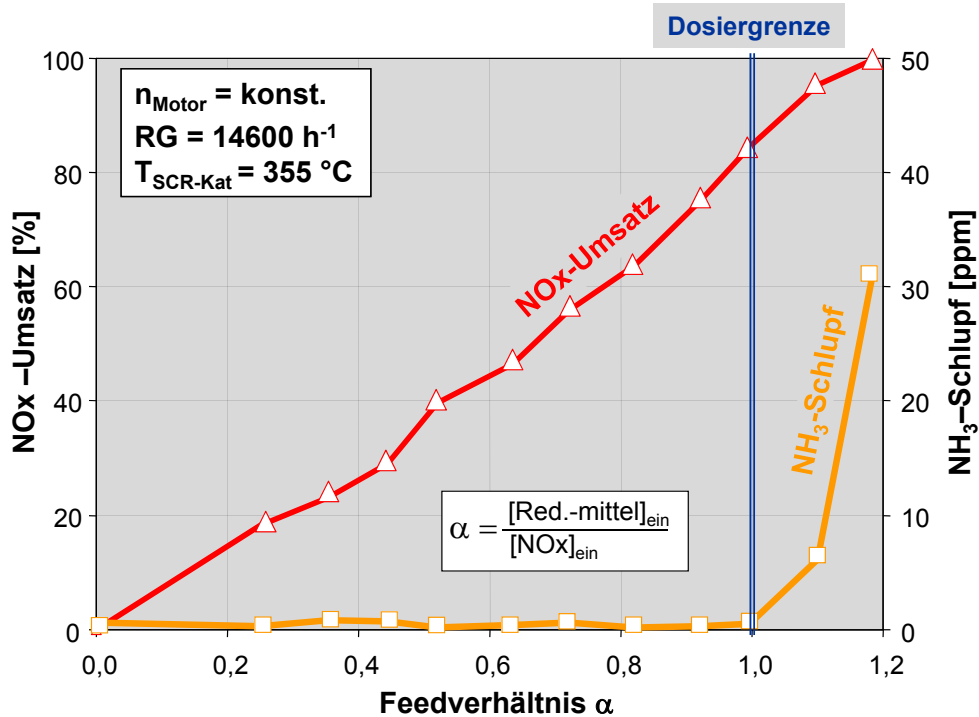
- Innermotorische Strategien
  - AGR mit CR-Höchstdruckeinspritzung
  - LNG mit Zündstrahlverfahren
- Nachmotorische Strategien (Abgasnachbehandlung)
  - Einschränkungen bei AGN
  - Selektive katalytische NOx-Reduktion (SCR)

## 1. Status

- Motor
- Emissionen
- Brennstoffe

## 2. Lösungsansätze /Strategien

- Inermotorisch mit AGR
- Inermotorisch mit LNG
- Nachmotorisch mit SCR



RG: Raumgeschwindigkeit

$$RG = \dot{V}_{Abg} / V_{Kat} [1/h]$$



## 1. Status

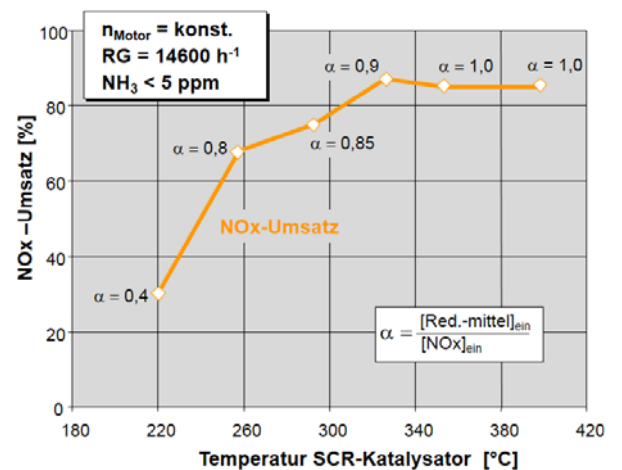
- Motor
- Emissionen
- Brennstoffe

## 2. Lösungsansätze /Strategien

- Inermotorisch mit AGR
- Inermotorisch mit LNG
- Nachmotorisch mit SCR

### Randbedingungen / Besonderheiten SCR-Einsatz bei Schiffsdieselmotoren

- Vergleichsweise extrem niedrige Abgastemperaturen
- Vorgeschaltete Abgaswäscher können die Temperaturproblematik noch verschärfen



### 1. Status

- Motor
- Emissionen
- Brennstoffe

### 2. Lösungsansätze /Strategien

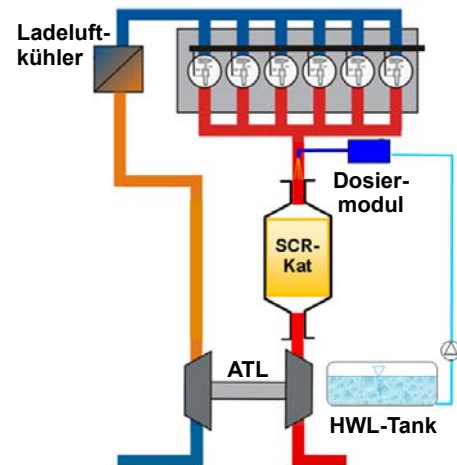
- Innermotorisch mit AGR
- Innermotorisch mit LNG
- Nachmotorisch mit SCR

### Randbedingungen / Besonderheiten SCR-Einsatz bei Schiffsdieselmotoren

- Vergleichsweise extrem niedrige Abgastemperaturen
- Vorgeschaltete Abgaswäscher können die Temperaturproblematik noch verschärfen
- Wegen höherer Schwefeltoleranz (S bis 2%) werden bevorzugter Vanadium-Wolfram-Titanoxid Katalysatoren eingesetzt.

### Lösungsansatz

- Integration SCR-Katalysators vor Turbine



### 1. Status

- Motor
- Emissionen
- Brennstoffe

### 2. Lösungsansätze /Strategien

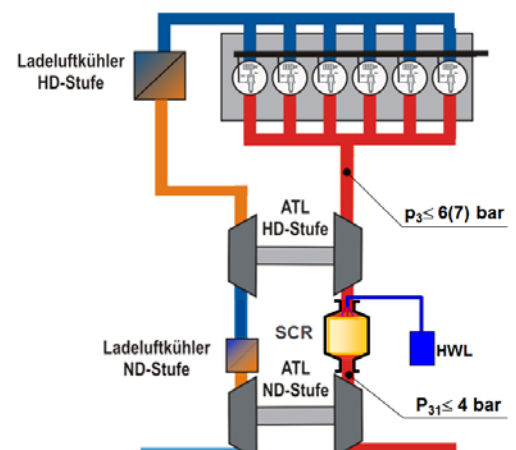
- Innermotorisch mit AGR
- Innermotorisch mit LNG
- Nachmotorisch mit SCR

### Randbedingungen / Besonderheiten SCR-Einsatz bei Schiffsdieselmotoren

- Vergleichsweise extrem niedrige Abgastemperaturen
- Vorgeschaltete Abgaswäscher können die Temperaturproblematik noch verschärfen
- Wegen höherer Schwefeltoleranz (S bis 2%) werden bevorzugter Vanadium-Wolfram-Titanoxid Katalysatoren eingesetzt.

### Lösungsansatz

- Integration SCR-Katalysators vor Turbine



1. Status
  - Motor
  - Emissionen
  - Brennstoffe
2. Lösungsansätze /Strategien
  - Innermotorisch mit AGR
  - Innermotorisch mit LNG
  - Nachmotorisch mit SCR

### Randbedingungen / Besonderheiten SCR-Einsatz bei Schiffsdieselmotoren

- Vergleichsweise extrem niedrige Abgastemperaturen
- Vorgeschaltete Abgaswäscher können die Temperaturproblematik noch verschärfen
- SCR-Katalysator: Wegen höherer Schwefeltoleranz (S bis 2%) bevorzugter Einsatz von Vanadium-Wolfram-Titanoxid Katalysatoren.

### Lösungsansatz

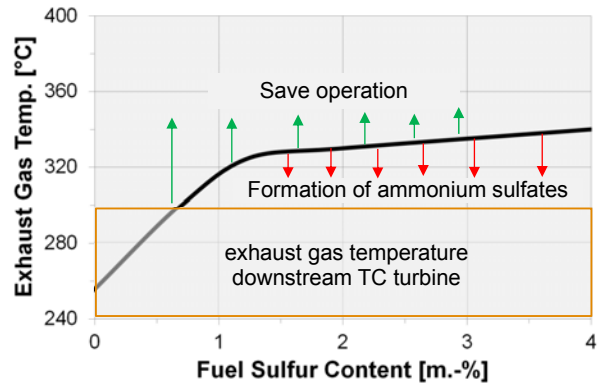
- Integration SCR-Katalysators vor Turbine

#### Vorteil

- Höhere Katalysatortemperatur
- Vermeidung von Ammonium-Sulfatbildung
- Höherer SCR-Wirkungsgrad

#### Nachteil

- Deutlich höhere Systemdrücke am SCR
- Dynamik-/Lastwechselverhalten noch ungeklärt

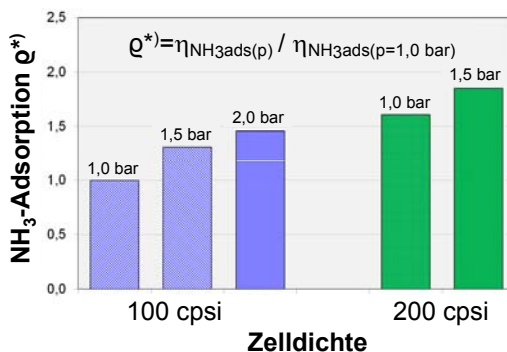


1. Status
  - Motor
  - Emissionen
  - Brennstoffe
2. Lösungsansätze /Strategien
  - Innermotorisch mit AGR
  - Innermotorisch mit LNG
  - Nachmotorisch mit SCR

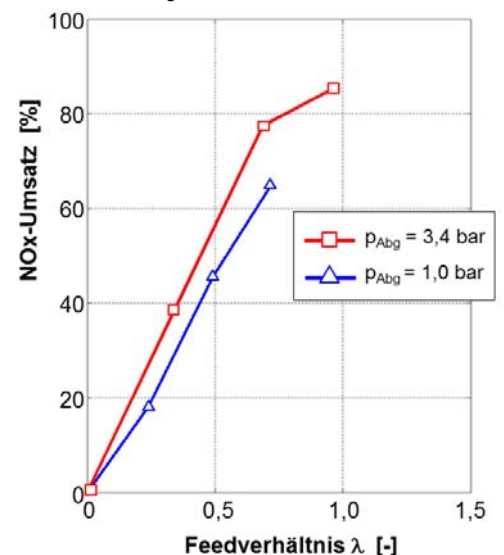
### SCR-Katalysator vor Turbine (Pre-Turbine SCR) Ergebnisse Synthesegasprüfstand

NH<sub>3</sub>-Speichervermögen in Abhängigkeit von:

- p<sub>Abg</sub> am SCR-Katalysator
- Zelldichte cpsi



NO<sub>x</sub>-Umsatz am SCR-Katalysator in Abhängigkeit vom Abgasgegen- druck (p<sub>Abg</sub>; Einbauposition):



## Gliederung

### 1. Status

- Großdieselmotor
- Emissionen
- Brennstoffe

### 2. Lösungsansätze zur NOx-/Partikelminimierung

- Innermotorische Strategien
  - AGR mit CR-Höchstdruckeinspritzung
  - LNG mit Zündstrahlverfahren
- Nachmotorische Strategien (Abgasnachbehandlung)
  - Einschränkungen bei AGN
  - Selektive katalytische NOx-Reduktion (SCR)
  - Partikelfilter (DPF)

## Partikelfilter (DPF) für IMO Tier 3 ff. Konzeptstudie Großmotor (LE)

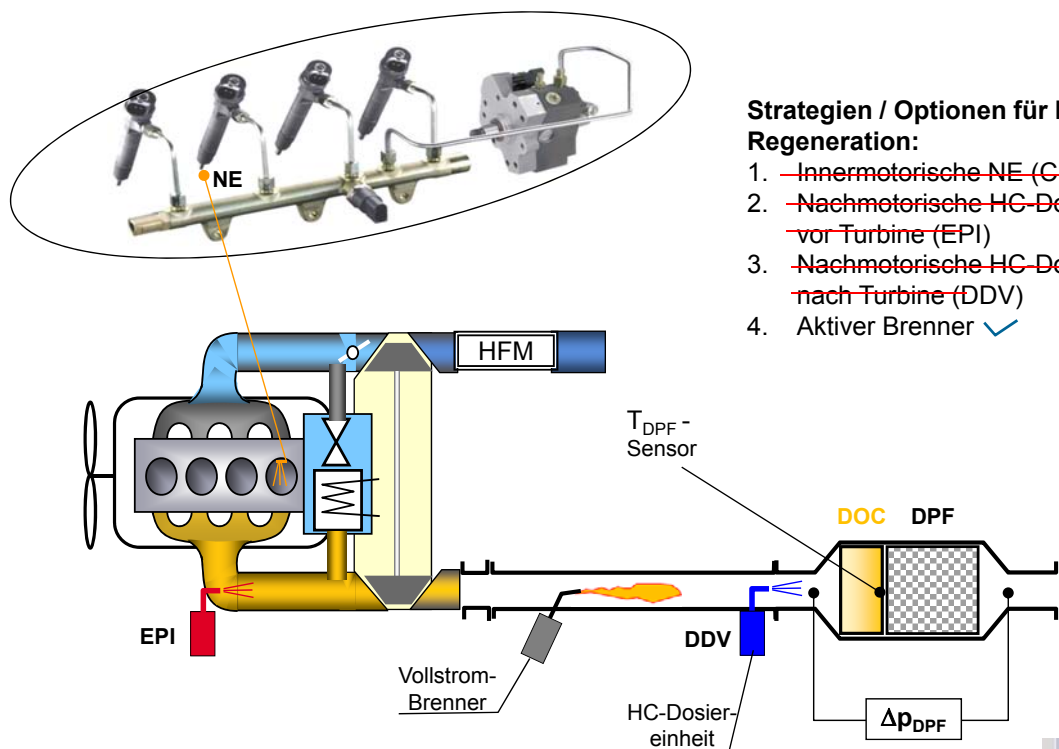
### 1. Status

- Motor
- Emissionen
- Brennstoffe

### 2. Lösungsansätze /Strategien

- Innermotorisch mit AGR
- Innermotorisch mit LNG
- Nachmotorisch mit SCR
- Nachmotorisch mit DPF

### DPF-Regenerationsstrategien Nkw versus Großmotor



#### Strategien / Optionen für DPF-Regeneration:

1. ~~Innermotorische NE (CR-System)~~
2. ~~Nachmotorische HC-Dosierung vor Turbine (EPI)~~
3. ~~Nachmotorische HC-Dosierung nach Turbine (DDV)~~
4. Aktiver Brenner ✓

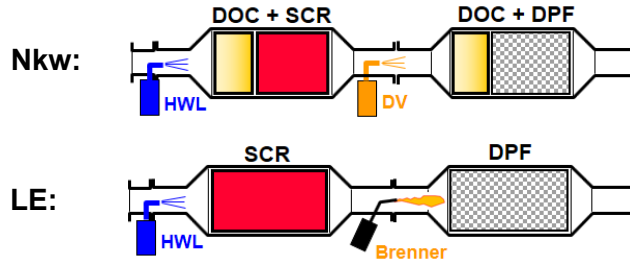
1. Status
- Motor
  - Emissionen
  - Brennstoffe

2. Lösungsansätze /Strategien

- Inermotorisch mit AGR
- Inermotorisch mit LNG
- Nachmotorisch mit SCR
- Nachmotorisch mit DPF

## Einbaustrategie Nkw vs. Großmotor (LE)

### Variante A: SCR vor DPF



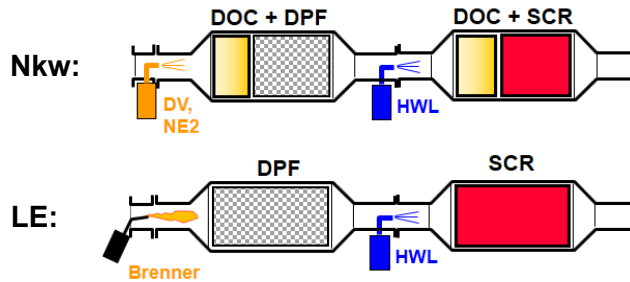
#### Vorteile SCR vor DPF:

- Guter Light-off des SCR durch motornahen Einbau
- Vorzugslösung für Großmotor
- DPF Regeneration bei LE ggf. über Brenner

#### Nachteile SCR vor DPF:

- Wärmesenke SCR vor DPF
- DOC Einsatz bei Großmotor wegen Kraftstoffschwefel nicht möglich
- HC Nassdosierung (Kraftstoff) bei Großmotor wegen kritischer Siedelage des DK nicht zielführend.

### Variante B: DPF vor SCR



## Partikelfilter für IMO Tier 3 ff. Konzeptstudie

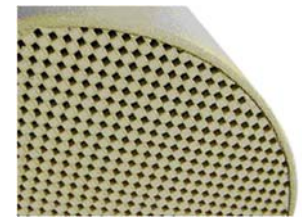
1. Status
- Motor
  - Emissionen
  - Brennstoffe

2. Lösungsansätze /Strategien

- Inermotorisch mit AGR
- Inermotorisch mit LNG
- Nachmotorisch mit SCR
- Nachmotorisch mit DPF

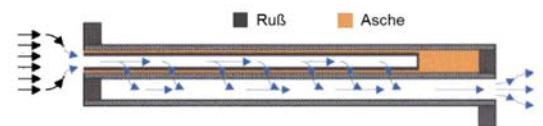
### ➤ Schlüssel zum erfolgreichen Einsatz von DPF am Schiffsdiesel

- Zuverlässige DPF-Regenerationsstrategie
- Ausreichende Aschespeicherung bei geeigneten Kraft- und Schmierstoffen



### ➤ Herausforderungen

- Geringes Abgastemperaturniveau
- Kein NO<sub>2</sub> (da kein DOC) – keine kontinuierliche Regeneration (CRT-Effekt)
- Geringe Variabilitäten im Kraftstoff- und Luftpfad zur Abgastemperaturanhebung
- Betrieb eines DPF bei Schweröleinsatz am Motor erscheint (zur Zeit) nicht möglich
- Mindestanforderungen an Kraft- und Schmierstoffen sind zu klären



### ➤ Insgesamt erheblicher Forschungsbedarf





## Gliederung

### 1. Status

- Großdieselmotor
- Emissionen
- Brennstoffe

### 2. Lösungsansätze zur NO<sub>x</sub>-/Partikelminimierung

- Innermotorische Strategien
  - AGR mit CR-Höchstdruckeinspritzung
  - LNG mit Zündstrahlverfahren
- Nachmotorische Strategien (Abgasnachbehandlung)
  - Einschränkungen bei AGN
  - Selektive katalytische NO<sub>x</sub>-Reduktion (SCR)
  - Partikelfilter (DPF)

### 3. Zusammenfassung und Ausblick



## Zusammenfassung / Ausblick

### 1. Status

- Motor
- Emissionen
- Brennstoffe

### 2. Lösungsansätze /Strategien

- Innermotorisch mit AGR
- Innermotorisch mit LNG
- Nachmotorisch mit SCR
- Nachmotorisch mit DPF

### 3. Fazit

## Zusammenfassung / Ausblick

- Gestiegene gesellschaftlichen Erwartungen an ökologische Standards werden mittelfristig auch bei Schiffsapplikationen zur einer drastischen Minderung der Schadstoffemissionen (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, PM, Feinstaub) zwingen.
- Durch den Einsatz von schwefelhaltigen Brennstoffen wird eine effektive Abgasnachbehandlung z.Z. noch erschwert (SCR) oder gar verhindert (DPF)
- Abgasrückführstrategien zur NO<sub>x</sub>-Reduktion können nur unter Verwendung schwefelfreier Kraftstoffqualitäten und höchstdruckfähigen CR-Einspritzsysteme zielführend umgesetzt werden
- Im Vergleich zu konventionellen Schiffsbrennstoffen führt der Einsatz von LNG zu einer drastischen Minderung/Vermeidung kritischer Emissionen wie NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> und Partikeln.
- Mit LNG (Erdgas) können die NO<sub>x</sub>-Grenzwerte für IMO TIER3 ohne zusätzliche Abgasnachbehandlung sicher eingehalten werden.
- Nicht verbranntes CH<sub>4</sub> (Methanschlupf) muss wegen der hohen Treibhausgasrelevanz (Faktor 23 ggü. CO<sub>2</sub>) unbedingt vermieden werden.

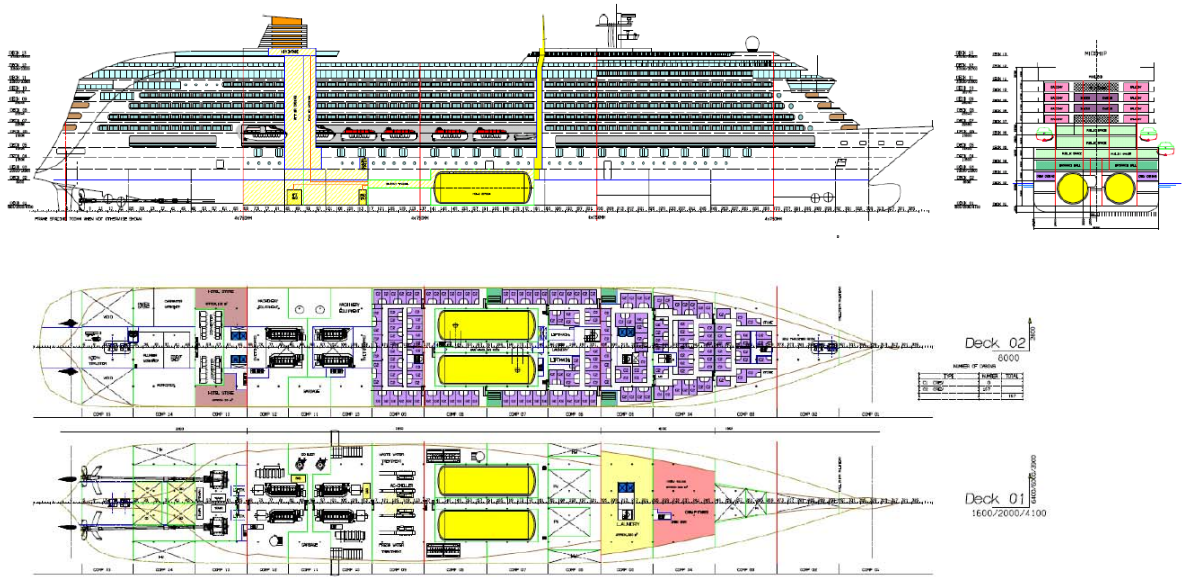


## 1. Status

- Motor
- Emissionen
- Brennstoffe

## 2. Lösungsansätze /Strategien

- Inermotorisch mit AGR
- Inermotorisch mit LNG



Quelle: Meyer Werft

