



Vier Caterpillar MaK Dual Fuel-Motoren der Baureihe M46 DF sind auf der „AIDAnova“, dem ersten Kreuzfahrtschiff mit einem reinen LNG-Antrieb, installiert
Foto: Felix Gaensicke/AIDA Cruises

Gasmotoren für die Schifffahrt

ÜBERBLICK Eine Vielzahl an innovativen Dual Fuel- bzw. reinen Gasmotoren stehen der Schiffbauindustrie heute zur Verfügung. Sie unterscheiden sich insbesondere in der Bauform sowie den Leistungs- und Drehzahlbereichen. Der folgende Beitrag skizziert die wesentlichen Merkmale der verfügbaren Motoren.

Prof. Dipl.-Ing. Freerk Meyer

Im Dezember 2018 ist mit der „AIDAnova“ der Rostocker Reederei AIDA Cruises das erste deutsche Kreuzfahrtschiff, das komplett auf LNG als Kraftstoff setzt, der Öffentlichkeit vorgestellt worden. Diverse andere mit LNG angetriebene Schiffe für den Binnen- und Seeverkehr sind außerdem bereits im Einsatz und eine Reihe weiterer LNG-Projekte befinden sich in der Umsetzungsphase. Dies gilt sowohl für den nationalen als auch für

den internationalen Markt. Antriebssysteme mit LNG als Kraftstoff findet man inzwischen in unterschiedlichen Schiffstypen (Fähren, Passagierschiffe, Arbeitsschiffe, Handelsschiffe usw.) und Größen. Neben LNG (Liquefied Natural Gas) stehen ebenfalls LPG (Liquefied Petrol Gas) und andere technische Gase (z.B. Ethylen) als Kraftstoffe für Schiffsantriebe zur Verfügung. Da sich die tech-



www.galigrup.com

Gali Deutschland GmbH
Am Ockerheimer Graben, 32
55411 Bingerbrunn
T: +49 8721 10025
info@gali.de

Components for Diesel & Gas Engines

Air Starters
Powerful Starters to start engines up to 7000KW and more.

Shut off valves
Immediate emergency stop of the engine in case of safety reason.

Turning Mechanism (Barring motors)
For engine build up and service work.

Hydraulic Starters
For special application and emergency sets.






nischen Lösungen zur Verwendung dieser Gase nur wenig unterscheiden, liegt der Fokus im Folgenden auf derzeit verfügbare Gasmotoren für LNG-Schiffsantriebe.

Die Motoren sind nur eine Komponente des Gesamtsystems „Antriebsanlage“. Sie müssen entsprechend der Rahmenbedingungen des Schiffsprojektes mit den anderen Anlagenteilen (Tank, Gasaufbereitung, Energiewandler, Propulsionsanlage etc.) harmonisieren.

Heutige Gasmotoren unterscheiden sich im Hinblick auf die Funktionsweise, das Leistungsvermögen, die Motordrehzahl, den Wirkungsgrad und die Abgasemissionen. Es stehen Motoren für den reinen Gasbetrieb und sogenannte Dual Fuel-Motoren für die wahlweise Verwendung von Gas oder flüssigen Kraftstoffen zur Verfügung.

Erdgas als Kraftstoff für Schiffe

Das flüssig gelagerte, tiefkalte Erdgas wird vor seiner Verwendung erwärmt und gelangt gasförmig mit geringem Überdruck zur Motorenanlage. Es besteht zu über 90 Prozent aus Methan (CH_4). Die Voraussetzungen für die Verbrennung von Methan sowie der Ablauf der Verbrennung (Reaktionsgeschwindigkeit, Temperaturen und Druckverläufe) unterscheiden sich gegenüber herkömmlichen Dieselmotoren. So muss sich der Erdgasanteil im Luft-/Gasgemisch zwischen vier und 17 Prozent bewegen und die Verbrennung durch eine Fremdzündung gestartet werden.

Die prinzipiellen Vorteile von (Erd-)Gasmotoren gegenüber herkömmlichen Dieselmotoren ergeben sich aus der chemischen Zusammensetzung des Erdgases und seiner Verbrennung:

Zur Erzeugung von mechanischer Energie werden im Gasbetrieb deutlich weniger Schadstoffe wie Ruß, Feinstaub, Kohlenmonoxid, Schwefeloxide sowie Stickoxide freigesetzt als mit herkömmlichen Dieselmotoren. Die ebenfalls erreichte Einsparung von bis zu 25 Prozent Kohlendioxid während des Verbrennungsprozesses eröffnet dem Gasbetrieb ebenfalls einen Vorteil in Bezug auf die Klimafreundlichkeit, muss jedoch ins Verhältnis zum Anteil von unverbranntem Methan im Abgas (der sogenannten Methan-Schlupf) gesetzt werden.

Messungen bei verschiedenen Motorherstellern haben ergeben, dass der Anteil von Methan im Abgas heute deutlich unter dem kritischen Wert von etwa einem Prozent liegt, sodass ein positiver Effekt im Hinblick auf die Klimabelastung durch die Verwendung von Erdgasantrieben erhalten bleibt.



Der MTU 16 Zylinder-Gasmotor ist in einem Leistungsbereich von ca. 1500 bis 2000 kW verfügbar. Die 8 Zylinder-Version deckt einen Leistungsbereich von ca. 750 bis 1000 kW ab.

Ein Nachteil der Nutzung von Erdgas gegenüber herkömmlichen Dieselmotoren ist der höhere technische Aufwand, der bei den Motorenanlagen notwendig ist. Zur Vermeidung von Gasleckagen und damit einer ungewollten Entstehung von explosionsfähigem Luft-/Gasgemischen im und am Motor müssen Präventivmaßnahmen (z.B. Verwendung von doppelwandigen Rohrsystemen) getroffen werden. Mögliche Kostenkompensationen ergeben sich durch niedrigere Betriebskosten (z.B. Kraftstoffpreise und niedrigere Wartungskosten). Heute gibt es folgende Bauformen und Leistungsbereiche:

- › Viertakt-Motoren (Otto-Prinzip) als reine Gasmotoren mit einer Leistung von 150 kW bis ca. 10 000 kW,
 - › Viertakt-Motoren (Otto/Diesel-Prinzip) als Dual Fuel-Motoren mit einer Leistung von 250 kW bis ca. 16 000 kW,
 - › Zwei-Takt Kreuzkopf-Motoren (Diesel-Prinzip) als Dual Fuel-Motoren mit einer Leistung von 4500 kW bis 80 000 kW.
- Im Hinblick auf die Betriebsdrehzahlen sind Langsamläufer (Zweitakt-Motoren), Mittel- oder Schnellläufer (Viertakt-Motoren) verfügbar. Viele Motoren sind für den Generatorbetrieb mit konstanter Drehzahl ausgelegt. Motoren für den Be- ›

IHR PARTNER FÜR MARINEANWENDUNGEN MIT WELTWEITEM SERVICE.



Sprechen Sie uns an: Telefon +49 40 853 151 0
zps.hamburg@zeppelin.com
www.zeppelin-powersystems.com

LET'S DO THE WORK.™

ZEPPELIN
Power Systems **CAT**

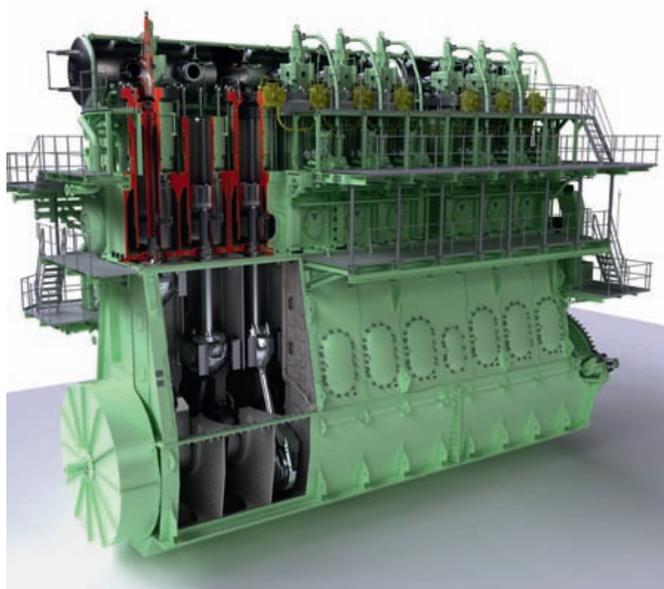


WinGD bietet Zweitakt-DF-Motoren nach dem Niederdruckverfahren an Foto: WinGD

trieb entlang der Propellerkurve (variable Drehzahl) sind ebenfalls im Portfolio diverser Hersteller. Gasturbinenanlagen mit Gasantrieb spielen heute keine nennenswerte Rolle.

Arbeitsweisen/funktionelle Merkmale der Gasmotoren

Heutige Gasmotoren für die Schifffahrt basieren in der Regel auf vorhandene Motorbaureihen der Motorhersteller mit ähnlichen Wirkungsgraden. Während der Motorblock, der



S90 ME-GI Dual Fuel mit Blick ins Motorinnere: Der ME-GI ist laut MAN Energy Solutions der einzige Gasmotor weltweit, bei dem kein Methanschluß auftritt Foto: MAN Energy Solutions

Kurbeltrieb und die Brennräume weitgehend von den Basismotoren übernommen werden, muss der Verbrennungsluftbereich, die Kraftstoffzuführung und gegebenenfalls die Ventilsteuerung der Motoren modifiziert werden. Darüber hinaus ist entweder eine elektrische Zündanlage oder die Zündung durch Dieselkraftstoff (Pilot Fuel) vorzusehen. Dazu kommen Anpassungen der Motorsteuerung inklusive der notwendigen Mess- und Regelungstechnik (z.B. Klopfsondrik, Gasmengezufuhr usw.).

Viertakt-Dual Fuel (DF)-Motoren

DF-Motoren können sowohl Dieselöl als auch Erdgas als Kraftstoff verwenden. Die Motoren arbeiten mit dem für Dieselmotoren typischen Luftüberschuss im Brennraum ($\lambda > 2$) sowie einer Ventilüberschneidung (gleichzeitige Öffnung der Einlass- und Auslassventile zwischen dem vierten und erstem Takt). Die Gemischbildung (Gas/Luft) vor dem Brennraum sowie die Fremdzündung im Gasbetrieb entspricht dem Otto Prinzip.

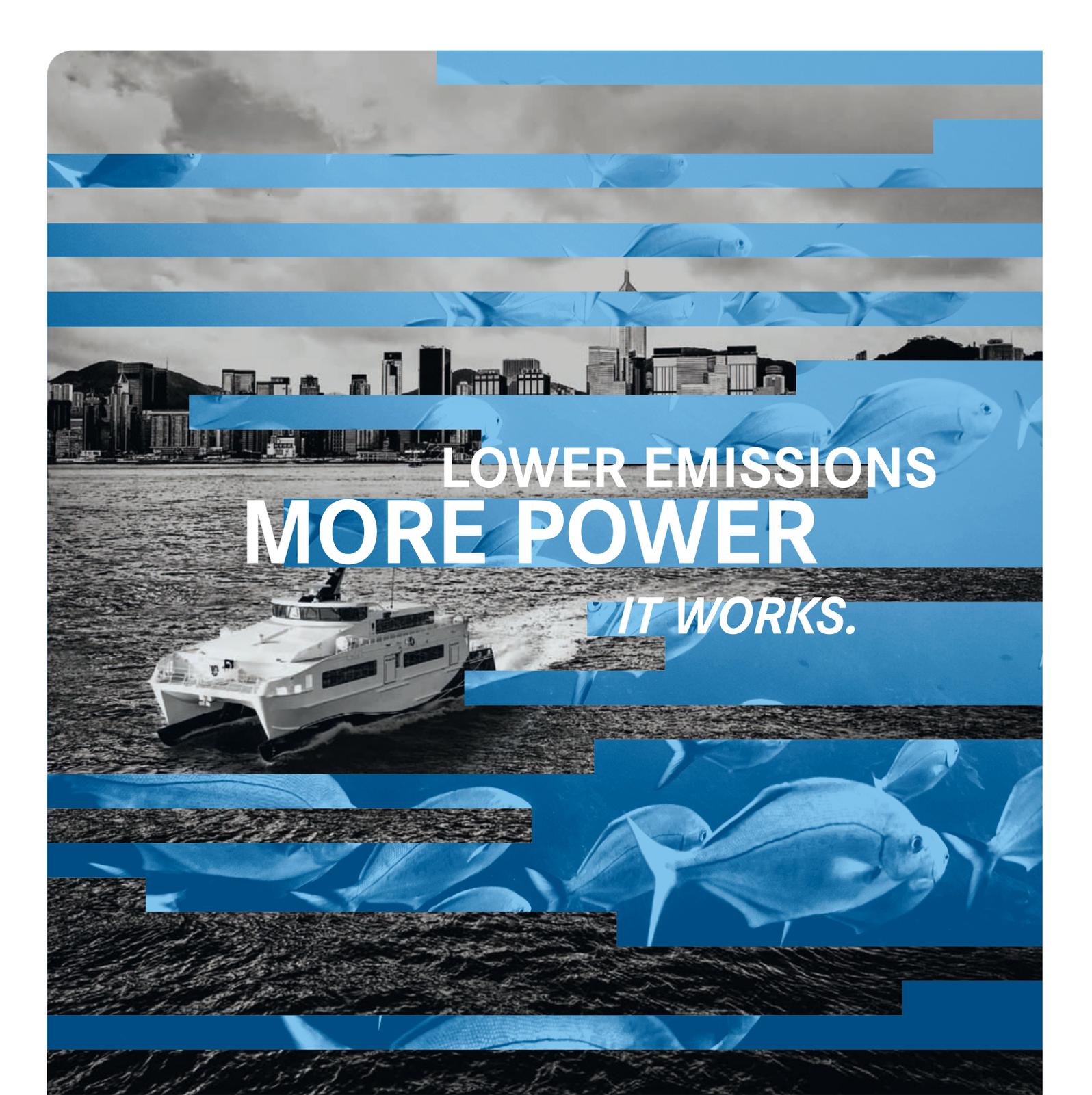
Bei modernen DF-Motoren wird das Erdgas für jeden Zylinder separat in den Einlassluftkanal eingebracht und vermischt sich direkt vor den Einlassventilen mit der Verbrennungsluft. Das Gas-Luftgemisch wird im Motor verdichtet und mit einer geringen Menge Dieselkraftstoff, die in den heißen Brennraum gespritzt wird, gezündet. Dazu ist eine Pilot Fuel-Einspritzanlage in den Zylinderkopf integriert. Zusätzlich ist eine Standardeinspritzanlage für den reinen Dieseltreibstoff vorhanden. Der Umschaltprozess vom Dieseltreibstoff zum Gasbetrieb und umgekehrt ist ohne Lastunterbrechung möglich. Daraus ergibt sich eine hohe Flexibilität im Schiffsbetrieb.

Prinzipieller Nachteil dieser Motorentechnologie ist, dass die Erfordernisse des Dieseltreibstoffes und des Gasbetriebes in Teilbereichen gegenläufig sind. Daraus resultiert, dass Kompromisse in der Motorperformance (im Vergleich zu reinen Dieseltreibstoff- oder Gasmotoren) eingegangen werden müssen. Mithilfe konstruktiver Maßnahmen an den Motoren und mit moderner Steuerungssoftware konnten die Betriebsparameter Effizienz und Abgasemissionen bei den aktuellen DF-Motoren deutlich verbessert werden.

Viertakt-Gas (Otto)-Motoren

Reine Erdgasmotoren arbeiten nach dem klassischen Ottoprinzip, jedoch mit einer höheren Verdichtung als vergleichbare Benzinmotoren. Das heißt, die Motoren arbeiten mit einer Luftmengenregulierung (Drosselklappe), ohne Luftüberschuss ($\lambda = 1$) und ohne Ventilüberschneidung. Die Zündung erfolgt mit Zündkerzen oder mit einer geringen Menge Zündöl.

Die effizientesten Gasmotoren arbeiten nach dem Lean Burn-/Magermix-Verfahren. Das Erdgas wird vor dem Lufteinlass des Motors in einer niedrigen Konzentration in die Verbrennungsluft eingebracht (Magermix). Dieses Luft-/Gasgemisch wird im Brennraum verdichtet. Parallel wird Erdgas in einer höheren Konzentration in eine sogenannte Vorkammer im Zylinderkopf geblasen. Es entsteht eine Luft-/Gaskonzentration mit hohem Gasanteil. Diese wird am Ende der Verdichtung von einer klassischen Zündkerze gezündet. Das brennende Gas strömt in den Brennraum und entzündet das restliche Luft-Gasgemisch. >



LOWER EMISSIONS MORE POWER

IT WORKS.

We develop new LNG propulsion systems that make your vessels cleaner and stronger at the same time. So you can transport more passengers on the world's most regulated waters. **Whatever your needs, we provide solutions that work.**

www.mtu-online.com/marine



Diese Motoren wurden für den reinen Gasbetrieb entwickelt und sind deshalb im Hinblick auf die Abgasemissionen und Effizienz den DF-Motoren überlegen. Der zusätzliche Freiheitsgrad der Nutzung von herkömmlichen Kraftstoffen entfällt.

Zweitakt-Dual Fuel-Kreuzkopf-Motoren

Zweitakt DF-Kreuzkopfmotoren sind modifizierte Standardmotoren und arbeiten weitgehend nach dem Dieserverfahren. Da die

HERSTELLER	MOTORTYP/LEISTUNG
Anglo Belgian Corporation nv, (Belgien)	Mittelschnelllaufende Dual Fuel-Motoren/ 680 – 3170 kW (720 – 1000 1/min)
Caterpillar Corporation (USA) mit MWM und MAK (Deutschland)	Schnelllaufende Gas-Ottomotoren (MWM)/ 400 – 4500 kW (1500 – 1800 1/min) Schnelllaufende Gas-Ottomotoren (Caterpillar)/ 140 – 4500 kW (1500 – 1800 1/min) Mittelschnelllaufende Dual Fuel-Viertakt-Motoren (MAK)/ 3000 kW – 14 400 kW (514 1/min bzw. 720 1/min)
Daihatsu Diesel Mfg. Co. (Japan)	Mittelschnelllaufende DF-Motoren/ 890 – 5620 kW (720 – 900 1/min)
Hyundai Heavy Industries (Südkorea)	Mittelschnelllaufende DF-Motoren/ 2880 – 9600 kW (720 – 750 1/min)
Kawasaki Heavy Industries (Japan)	Mittelschnelllaufende Viertakt-Otto-Motoren/ 2300 – 7800 kW (720 – 750 1/min)
MAN Energy Solutions (Deutschland)	Mittelschnelllaufende Dual Fuel-Viertakt-Motoren/ 590 – 19 000 kW (bei 500 1/min – 900 1/min je nach Motortyp) Langsamlaufende Zweitakt-Kreuzkopfmotoren mit Hochdruckeingasung/ 2650 – 82 440 kW
Mitsubishi Heavy Industries (Japan)	Schnelllaufende Gas-Ottomotoren/ 368 – 1563 kW (1200 – 1500 1/min)
Niigata Power Systems, (Japan)	Mittelschnelllaufende Dual Fuel-Viertakt-Motoren/ 1920 kW – 2880 kW (bei 800 1/min)
Rolls-Royce (GB) mit MTU (Deutschland)	MTU: Schnelllaufende Gas-Ottomotoren/ 746 – 2000 kW (1200 – 1500 1/min) RR Bergen: Schnelllaufende Gas-Ottomotoren/ 1460 – 2430 kW (900 – 1000 1/min) RR Bergen: Mittelschnelllaufende Gas-Ottomotoren/ 3500 – 7700 kW (720 – 750 1/min)
Wärtsilä (Finnland)	Schnelllaufende Dual Fuel-Viertakt-Motoren/ 1100 – 1650 kW (1200 1/min) Mittelschnelllaufende Dual Fuel-Viertakt-Motoren/ 3000 – 17 750 kW (bei 514 1/min – 750 1/min je nach Motortyp)
Winterthur Gas & Diesel (Win GD) (Schweiz)	Langsamlaufende Zweitakt-Kreuzkopfmotoren mit Niederdruckeingasung/ 4600 – 63 800 kW

Alphabetische Auflistung von Gasmotoren-Herstellern. Die Leistungsangaben wurden den aktuellen Webseiten der Unternehmen entnommen. Auf Unternehmen, die Motoren anderer Hersteller für den Gasbetrieb modifizieren, wird nicht gesondert eingegangen.

heutigen Zweitakt-Motoren die sogenannte Gleichstromspülung für den Austausch des Abgases und zur Neubefüllung des Brennraumes mit Verbrennungsluft nutzen, muss das Erdgas direkt in den Brennraum eingebracht werden.

Die Unternehmen MAN Energy Solutions und WinGD sind die Anbieter von Zweitakt-DF-Schiffsmotoren. Sie nutzen zwei unterschiedliche Verfahren zur Gemischbildung im Brennraum. So setzt die Firma WinGD auf das Niederdruckverfahren. Dabei wird das Erdgas direkt nach dem Schließen der Spülluftschlitze durch separate Gasdüsen (etwa auf halber Hubhöhe) in den Brennraum geleitet. Dazu ist ein Gasdruck von > 16 bar notwendig (Niederdruckverfahren). Während des Verdichtungshubes vermischt sich das Erdgas mit der Verbrennungsluft, das Gemisch wird verdichtet und anschließend mit Pilot fuel gezündet.

Das Unternehmen MAN Energy Solutions verwendet hingegen das Hochdruckverfahren. Dazu wird das Erdgas vor dem Motor auf etwa 300 bar komprimiert und am Ende des Verdichtungstaktes mit Hochdruckgasdüsen in den Brennraum eingeblasen. Das Gas vermischt sich dort mit der komprimierten, heißen Luft und wird mit Pilot fuel gezündet.

Aus verbrennungstechnischer Sicht hat das Hochdruckverfahren den Vorteil, dass durch die gezielte, schnelle Einblasung des Erdgases die Gemischbildung sehr gut gesteuert werden kann und somit die Effizienz der Verbrennung steigt. Nachteil dieser Lösung ist die zusätzliche Verdichtung des Erdgases (Energiebedarf, technischer Aufwand).

Entwicklungstendenzen bei den Gasmotoren für die Schifffahrt

Seit Beginn der Verwendung von LNG als Kraftstoff für Schiffsantriebe ist die zweite Generation von Motoren am Markt. Parallel werden Gasmotoren verstärkt im Onshore-Bereich zur Stromerzeugung eingesetzt.

Dies hat zu größeren Stückzahlen von Gasmotoren und damit zu einer höheren Innovationsrate bei den eingesetzten Technologien geführt. Wichtigste Innovationstreiber in dem Marktsegment der Gasmotoren für Schiffsantrieb sind der hohe Kostendruck in der Branche, die verschärften Abgasvorschriften, insbesondere in Bezug auf SOx und NOx, aber auch die zunehmend hohen Erwartungen der Öffentlichkeit, im Hinblick auf emissionsarme, „grüne“ Schiffsantriebe.

Die vorhandenen Gasmotoren stellen bereits heute eine sehr gute Alternative zu herkömmlichen Motoren mit ihren klassischen Kraftstoffen dar. Trotzdem ist Potenzial zur weiteren Entwicklung der Motoren vorhanden. Ziele sind zum Beispiel:

- > weitere Verringerung des Methan-Anteils im Abgas,
- > Steigerung der Wirkungsgrade einzelner Komponenten und der Gesamtmotoren,
- > Verringerung der Preisdifferenz zwischen herkömmlichen Diesel- und Gasmotoren.

Dazu stehen den Motorentwicklern diverse „Stellschrauben“ zur Verfügung. Diese können in Abhängigkeit zum verwendeten Motortyp zum Einsatz kommen:

- > Verwendung von höheren Gasdrücken vor dem Motor (=> kürzere Einblaszeiten),
- > Modifizierung der Brennraumgeometrie,
- > Optimierung der Zündtechnologie,
- > Veränderung der Ventilsteuerzeiten/Verwendung von variablen Ventilsteuerungen,

- › Luftmengenvariation zwischen Teillast-/und Volllastbetrieb (aktive Steuerung der Lambdawerte),
- › Standardisierung der eingesetzten Motorkomponenten.

Neben der weiteren Verbesserung der Motorperformance setzen verschiedene Motorhersteller auf kompakte Systemangebote für den Kunden. Sie bieten Lösungen für das gesamte Antriebssystem des Schiffes an (Tanks, Gasaufbereitung, Motor, Propulsionssystem und Anlagensteuerung). Damit können die einzelnen Komponenten optimal aufeinander abgestimmt aus einer Hand angeboten werden.

Fazit

Heute sind zuverlässige, sichere, effektive Motoren als reine Gas- oder DF-Motoren der unterschiedlichen Bauformen, Leistungs- und Drehzahlbereiche von namhaften Motorherstellern für den Schiffseinsatz verfügbar.

Diese Motoren setzen im Vergleich zu Dieselmotoren im Hinblick auf die Abgasbestandteile: Ruß/Feinstäube, Schwefeloxide, Stickoxide und teilverbrannte Kohlenwasserstoffe schon heute Maßstäbe. Der Vorteil des geringeren Kohlendioxidausstoßes kann wegen des Methan-Schlupfes heute zum Teil noch nicht vollständig realisiert werden. Fortlaufende Entwicklungen auf der Motorseite aber auch im Bereich der Abgasnachbehandlung (z.B. Methan-Katalysatoren) sind auf dem Weg.

Die Wahl eines geeigneten Gasmotors für ein Schiffsprojekt ist von diversen Randbedingungen abhängig. Daher ist die Viel-



Blick in den Maschinenraum der „Viking Grace“, die von vier Wärtsilä 46 DF-Motoren angetrieben wird

Foto: Wärtsilä

falt der verfügbaren Technologien verschiedener Hersteller zu begrüßen. Intensive Bemühungen zur Senkung der Investitionskosten für die einzelnen Gasantriebskomponenten sind dringend nötig, damit LNG als Kraftstoff für Schiffe langfristig konkurrenzfähig ist.

Der Autor:

Prof. Dipl.-Ing. Freerk Meyer, Fachbereich Seefahrt und Maritime Wissenschaften, Hochschule Emden-Leer

SCHOTTEL

YOUR PROPULSION EXPERTS

WIR WISSEN, WAS SCHIFFE BEWEGT

Die „Branddirektor Westphal“ ist Europas modernstes Feuerlöschboot. Das Spezialschiff der Flotte Hamburg wird von zwei SCHOTTEL Ruderpropellern Typ SRP 190 (jeweils 500 kW) und zwei SCHOTTEL Querstrahlanlagen Typ STT 170 (jeweils 330 kW) angetrieben.

www.schottel.de

Bild: Fassmer