

## Abwärmenutzung bei grossen Schiffsmotoren

# Volle Kraft voraus!

Verschärfte Emissionsgrenzwerte sowie steigende Energiepreise erhöhen die Attraktivität effizienzsteigernder Massnahmen bei Schiffsanwendungen. Die Nutzung der beim Motorprozess anfallenden Abwärme spielt hier eine entscheidende Rolle. Durch Technologien wie Nutzturbine und Dampfkraftprozess kann die Abwärme in zusätzliche mechanische Leistung für den Hauptantrieb oder alternativ in elektrische Energie für das Bordnetz umgewandelt werden. Simulationsrechnungen verschiedener Schiffsdiesel-Konfigurationen zeigen, dass sich mit der konsequenten Abwärmenutzung 10–13 Prozent der installierten Motorenleistung realisieren lassen.

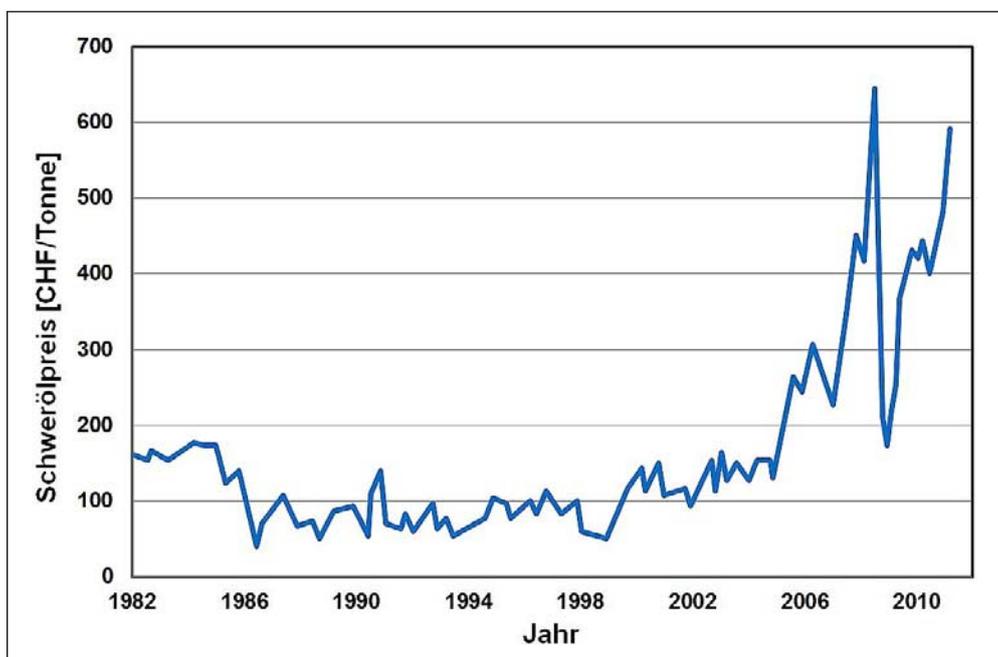


Bild 1: Über Jahrzehnte war Schweröl als Abfallprodukt aus Öltraffinerien sehr preisgünstig. In den letzten Jahren hat der Schwerölpreis stark zugenommen. [1]

**A**llein die internationalen Schifffahrtstransporte verursachen rund 3 % der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen [1]. Die Schifffahrt wird da-

her auch ihren Beitrag zur Eingrenzung der Klimaerwärmung leisten müssen. Entsprechende Technologien zur Energieeffizienzsteigerung sind verfügbar, aber heute meist noch nicht wirtschaftlich. Andererseits werden die Energiepreise künftig ansteigen. Bild 1 zeigt, dass der Schwerölpreis – ein typischer Schiffstreibstoff – den Preis vor der Wirtschaftskrise von 2008/09 fast wieder erreicht hat. Bei grossen Schiffen machen die Brennstoffkosten bereits heute zwischen 50 und 80 % der Betriebskosten aus. Daher werden die bessere energetische

Ausnutzung und damit die Abwärmenutzung in Zukunft sehr interessant.

### Zwei-Takt-Schiffsdiesel und seine Abwärmequellen

Um die Abwärmethematik auf Schiffen besser zu verstehen, wird das vereinfachte System eines Zwei-Takt-Motors kurz vorgestellt. Das Gesamtsystem besteht hauptsächlich aus dem Motor mit der Antriebswelle inklusive dem Propeller und dem Turboladersystem bestehend aus Turboladerverdichter und -turbine sowie dem Ladeluftkühler, (Bild 2). Der Motor wird über den Turboladerverdichter mit Frischluft versorgt. Dazu komprimiert der Verdichter die angesaugte Luft auf einen Druck im Bereich von 3 bis 4 bar. Durch die Verdichtung erwärmt sich die Luft auf Temperaturen um die 160 bis 200 °C. Durch die Abkühlung der Luft im Ladeluftkühler werden u. a. der Wirkungsgrad, die Motorleistung und die Emissionen sowie die Bauteilkühlung des Motors verbessert. In den Motorzylindern wird der Treibstoff unter hohem Druck und hoher Temperatur verbrannt und die thermische Energie in Antriebsenergie umgewandelt. Nach dem Arbeitstakt wird das noch ca. 400 bis 470 °C heisse, unter Druck stehende Abgas aus dem Motorzylinder gespült und der Turboladerturbine zugeführt. Diese entspannt das Abgas auf Umgebungsdruck und treibt gleichzeitig den

#### Autoren/Infos

Adrian Rettig, Dipl. Masch.-Ing. ETH, und Tobias Keller, BSc in Maschinentechnik ZFH, arbeiten am Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering der ZHAW und beschäftigen sich intensiv mit der ORC-Technologie aus der Überzeugung, dadurch die Energieeffizienz von thermischen Prozessen signifikant verbessern zu können.  
[www.ife.zhaw.ch/orc](http://www.ife.zhaw.ch/orc)  
[www.engineering.zhaw.ch](http://www.engineering.zhaw.ch)

# Robust und kompakt: der Embedded-PC mit Intel® Atom™.

Die CX5000-Serie von Beckhoff.



Turboladerverdichter an. Bei der Entspannung kühlt sich das Abgas auf etwa 300 °C ab.

Aufgrund der sehr hohen Temperaturen während der Verbrennung müssen wichtige Bauteile ausreichend gekühlt werden. Dazu wird beispielsweise die Zylinderwand von kühlem Wasser umströmt, welches sich dabei aufheizt. Auch zirkulierendes Schmieröl wird zur Kühlung eingesetzt und erwärmt sich. Die im heißen Wasser und dem Schmieröl enthaltene Abwärme wird durch externe Kühlung abgeführt. Heisse Bauteile geben zudem Abwärme über Wärmestrahlung an die Umgebung ab.

## Energieaufteilung und Potenziale der Abwärmeströme

Grosse Zwei-Takt-Schiffsdieselmotoren zeichnen sich durch hohe Wirkungsgrade aus. Fast die Hälfte der freigesetzten thermischen Leistung lässt sich in Antriebsleistung umwandeln (Bild 3). Ein Teil der restlichen Energie wird für Heizzwecke und Frischwasserbereitung verwendet. Der grösste Teil geht jedoch ungenutzt als Abwärme in Form von Abgas und durch die Ladeluft-, Motor- und Schmierölkühlung sowie durch Strahlung an die Umgebung verloren. Das muss nicht sein. Aufgrund der verhältnismässig hohen Temperaturen eignen sich das Abgas nach der Turboladerturbine und die heisse Luft vor der Ladeluftkühlung (nach dem Turboladerverdichter) für die Abwärmenutzung. Die Motor- und Schmierölkühlung kann allenfalls für Vorwärmprozesse genutzt werden. Die Wärmestrahlung ist jedoch unbrauchbar.

## Technologien zur Abwärmenutzung bei grossen Schiffen

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen der direkten Nutzung der heissen Abgase und nachgeschalteten Prozessen. Bei der direkten Nutzung wird ein Teil des Abgases vor der Turboladerturbine abgezweigt und einer Nutzturbine zugeführt. Die Nutzturbine treibt zur Stromerzeugung einen Generator an. Der so gewonnene Strom kann für das Bordnetz oder zur Unterstützung des Antriebs via Wellenmotor verwendet werden (Bild 4). Der

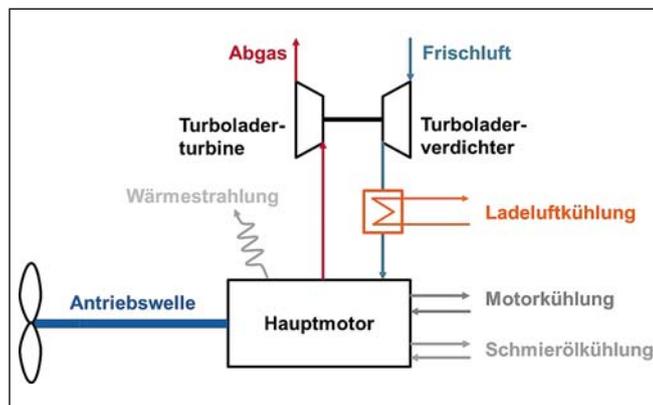


Bild 2: Zwei-Takt-Motor mit Turbolader und den Abwärmequellen Abgas, Ladeluft-, Motor-, Schmierölkühlung und Wärmestrahlung.

## www.beckhoff.ch/CX5000

Die Embedded-PC-Serie CX5000 für die Hutschienenmontage: Geeignet zum flexiblen Einsatz als kompakter Industrie-PC oder als PC-basierte Steuerung für SPS, Motion Control und Visualisierung:

- Intel®-Atom™-Z530-CPU 1,1 GHz (CX5010) oder 1,6 GHz (CX5020)
- Robustes und kompaktes Magnesiumgehäuse
- Erweiterter Betriebstemperaturbereich von -25...60 °C
- Lüfterlos, ohne rotierende Bauteile (Compact-Flash als Speichermedium)
- I/O-Interface für EtherCAT-Klemmen und Busklemmen
- Optionsplatz für serielle oder Feldbus-Schnittstellen
- Integrierte 1-Sekunden-USV

	CX1020/CX1030	CX1010	CX9000/CX9010	CX8000
IPC	Embedded-PC mit Intel®-Pentium®-M-CPU, 1,8 GHz oder Intel®-Celeron®-M-ULV-CPU, 1 GHz	Embedded-PC mit Pentium®-MMX-kompatibler CPU, 500 MHz	Ethernet-Controller mit Intel®-IXP420-XScale®-Technologie, 266 MHz oder 533 MHz	Feldbus Controller mit ARM9-CPU, 400 MHz z.B. für PROFIBUS, PROFINET, EtherCAT und Ethernet
I/O				
Motion				
Automation				

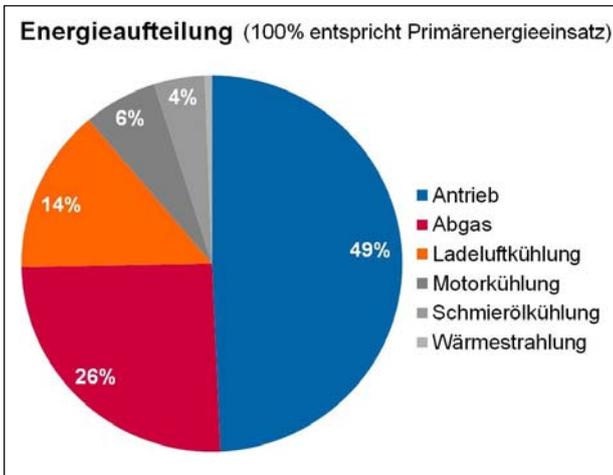


Bild 3: Rund die Hälfte des Primärenergieeinsatzes kann vom Motor in nutzbare Arbeit umgewandelt werden [2].

Wellenmotor kann auch als Generator eingesetzt werden. Dabei wird ein Teil der Antriebsleistung des Hauptmotors zur Stromerzeugung für das Bordnetz genutzt. Grosse Schiffe verfügen zudem über mehrere Hilfsmotoren, die bei Bedarf ebenfalls das Bordnetz mit Elektrizität versorgen.

Das Abzweigen der Abgase beeinflusst das Turbolader- und Motorverhalten. Die gegenseitigen Abhängigkeiten sind komplex und werden hier nicht behandelt. Wichtig ist, dass durch diesen Eingriff die Abgastemperatur vor und nach dem Turbolader angehoben wird. Dies wirkt sich negativ auf den Motorwirkungsgrad aus. Andererseits wird diese Einbusse durch die zusätzliche Nutzturbinenarbeit überkompensiert. Ausserdem profitieren die nachgeschalteten Prozesse von den erhöhten Temperaturen.

Als nachgeschalteter Prozess kommt der herkömmliche Dampfkraftprozess infrage. In einem geschlossenen Kreislauf durchläuft Wasser eine Reihe von Zustandsänderungen. Um diese zu realisieren, braucht es die Komponenten Speisepumpe, Abhitzekeessel, Turbine mit Generator und Kondensator (Bild 5). Mit der Speisepumpe wird kaltes Wasser auf einen hohen Druck gebracht. Im Abhitzekeessel wird das Wasser vorgewärmt, verdampft und überhitzt. Der Abhitzekeessel nutzt die Restwärme im Abgas hinter dem Turbolader. Die Leis-

tung kann erhöht werden, wenn die Abwärme aus der Ladeluft- und Motorkühlung für die Vorwärmung verwendet wird. Der überhitzte Dampf entspannt anschliessend in der Dampfturbine unter Abgabe von mechanischer Arbeit. Die Dampfturbine treibt für die Stromerzeugung einen Generator an. Der kalte Niederdruckdampf am Turbinenaustritt wird im Kondensator vollständig verflüssigt und wieder der Speisepumpe zugeführt.

Heutige Abwärmenutzungssysteme auf Schiffen kombinieren die Nutzturbine und den Dampfkraftprozess, indem sie einen gemeinsamen Generator verwenden. Dabei werden die Wellen der Nutzturbi-

ne, der Dampfturbine und des Generators über Getriebe gekoppelt (Bild 5).

Zwar ist die Kombination dieser Technologien seit Jahren Stand der Technik, wird bis jetzt aber nur einzeln eingesetzt. Mögliche Gründe sind die langen Amortisationszeiten, der stetig verbesserte Motorwirkungsgrad mit tieferen Abgastemperaturen sowie schlechte Teillastwirkungsgrade, welche den sinnvollen Betrieb nur im oberen Motorlastbereich zulassen.

### Organic Rankine Cycle als alternativer Dampfkraftprozess

Weitere Effizienzsteigerungen am Motor werden die Abgastempera-

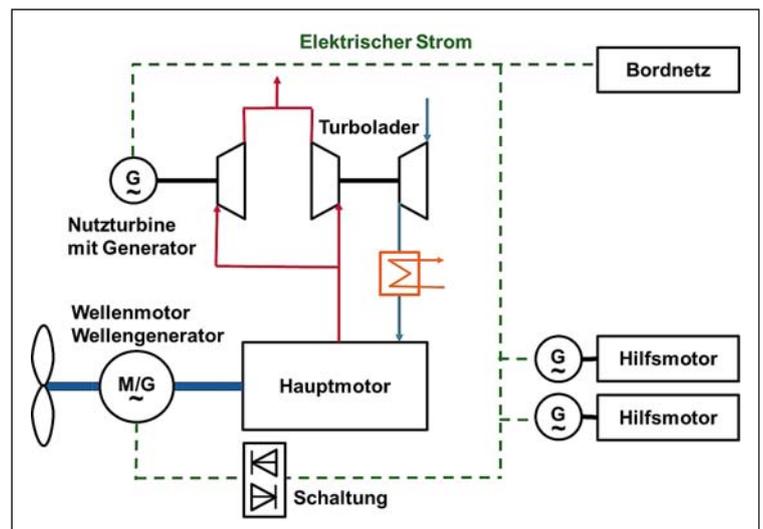


Bild 4: Anwendung einer Nutzturbine zur Stromerzeugung.

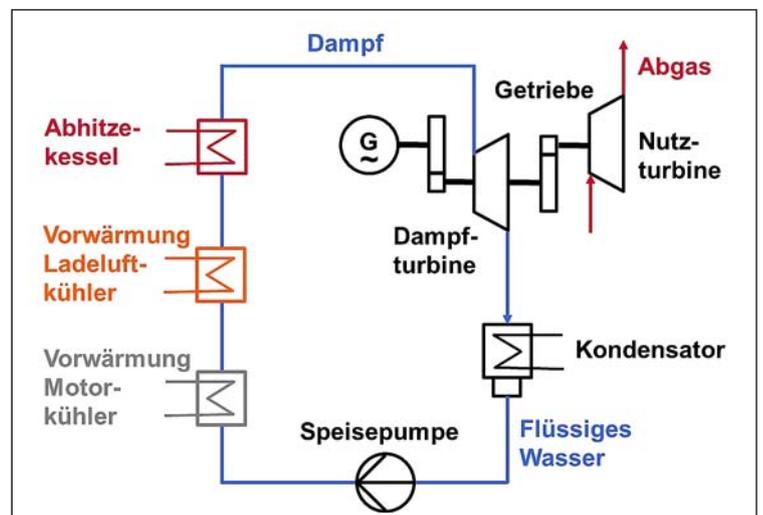


Bild 5: Nutzturbine kombiniert mit dem Dampfkraftprozess, der durch die Abwärme des Abgases sowie des Ladeluft- und Motorkühlers angetrieben wird.

turen weiter sinken lassen. Dadurch wird die Realisierung des herkömmlichen Dampfkraftprozesses schwieriger und aufwendiger. Hier bietet sich der Übergang zum sogenannten Organic Rankine Cycle (ORC) an. ORC ist ebenfalls ein Dampfkraftprozess, der jedoch anstelle von Wasser einen organischen Stoff als Arbeitsmedium verwendet, wie z.B. das Kältemittel R245fa. Organische Arbeitsmedien besitzen tiefere Siedetemperaturen, was die Stromproduktion aus Abwärme ab Temperaturen von 100 °C ermöglicht. Insgesamt zeichnet sich die ORC-Technik aus durch ihre Robustheit, die kompakte Bauweise, die hohe Automatisierbarkeit und die vergleichsweise hohen Wirkungsgrade, insbesondere auch im Teillastbereich.

ORC-Prozesse werden seit längerem erfolgreich in der Geothermie und bei Biomasseanwendungen als Wärme-Kraft-Kopplungsprozess (WKK) eingesetzt (Bild 6). Gefördert durch attraktive Strom-einspeisevergütungen wurde in Deutschland, Österreich und Italien ein regelrechter Boom für Biomasseanwendungen ausgelöst. Von dieser Förderung profitieren auch die meisten Abwärmenutzungsprojekte, welche die Restwärme von Biogasmotoren mittels ORC verwenden. Die Nutzung industrieller Ab-

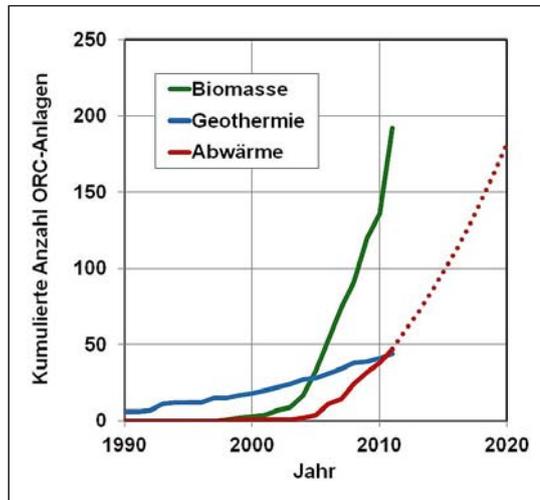


Bild 6: Weltweit installierte ORC-Anlagen aufgeteilt auf verschiedene Anwendungsgebiete.

wärme zur Stromproduktion wird noch kaum angewendet. Der Ersteinsatz von ORC auf Schiffen ist noch ausstehend, ist aber bereits geplant [3].

### Potenzialstudie

Durch thermodynamische Simulationen verschiedener Konfigurationen eines typischen Zwei-Takt-Motors wurde das Potenzial der Abwärmenutzung evaluiert. Die wichtigsten Ergebnisse für die Kombination Nutzturbine mit ORC-Prozess sind im Bild 7 dargestellt. Die Konfiguration V1 besitzt ein Motorsystem mit herkömmlicher Turboaufladung. Neue, inno-

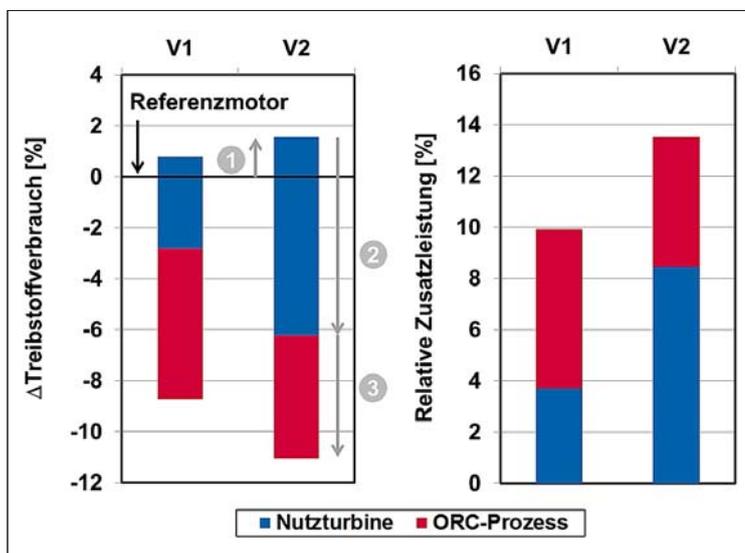


Bild 7: Potenzielle Verbrauchseinsparung durch Abwärmenutzung bezogen auf Referenzmotor ohne Abwärmenutzung; rechts: zusätzliche Leistung bezogen auf Motorleistung mithilfe von Nutzturbine und ORC.

# Administration? KEINE SACHE.



## BRANCHENLÖSUNG FÜR SANITÄR / HEIZUNG / LÜFTUNG.

Unsere Software unterstützt Sie bei der Verwaltung und Steuerung Ihres Unternehmens.

Ob mit ALBAU-Flex, der flexiblen, kostengünstigen Branchensoftware oder mit ALBAU-Plus, der integrierten, flexiblen Lösung mit SIA-451 Schnittstelle. Mit ALBAU ist Administration keine Sache!

Mehr Infos auf [www.alsoft.ch](http://www.alsoft.ch).  
Testen Sie uns!

Herstellung und Vertrieb:



info@alsoft.ch | 081 650 10 10 | 7417 Paspels

Vertriebspartner:

ORBIT Informatik AG  
8832 Wollerau  
043 888 29 88  
info@orbitag.ch  
www.orbitag.ch

Milesi Mario SA  
6982 Agno  
091 605 35 12  
milesisa@sunrise.ch

Ing. Impiantistica  
TKM sagt  
6596 Gordola  
091 745 30 11  
tkstag@bluewin.ch



## Energieeffizienz beginnt im Raum

**PentaControl AG realisiert, vom Konzept über Ausführung und Inbetriebsetzung bis zur Wartung, integrale Raum- und Gebäudesteuerungen, und das schon seit Jahrzehnten.**

Die integrierten Lösungen verknüpfen Funktionen wie Beleuchtung, Beschattung, Klimatisierung, Überwachung und Energieoptimierung logisch miteinander. Durch den Einsatz modernster Technologie wird der Komfort für Benutzer und Betreiber erhöht, die Umwelt geschont und zudem eine Reduktion der Betriebs- und Unterhaltskosten erreicht.

Die anwenderfreundlichen und energieoptimierten Systeme erfüllen höchste Anforderungen bezüglich Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit.



**PENTACONTROL**

**PentaControl AG • Integrale Gebäudetechnik**

Wiesengasse 20 • CH-8222 Beringen

T +41 52 687 18 21 • F +41 52 687 18 22

info@pentacontrol.com • www.pentacontrol.com

vative Turboaufladesysteme lassen den Luftdruck vor dem Motoreintritt anheben (Konfiguration V2). Dadurch können höhere Motorleistungen realisiert werden, was bei V2 mit einer Motorleistungssteigerung von ca. 10% umgesetzt ist. Das obere Ende des blauen Balkens links in Bild 7 zeigt für alle Konfigurationen zunächst eine Treibstoffverbrauchszunahme bezogen auf einen Referenzmotor ohne Abwärmenutzung (Pfeil 1). Dies widerspiegelt den Einfluss der Nutzturbine auf das Motorverhalten bzw. den Motorwirkungsgrad. Wird die durch die Nutzturbine gewonnene Arbeit dem Wellenantrieb zugeführt, ergibt sich jedoch eine Verbrauchsreduktion (Pfeil 2), welche durch den ORC-Prozess noch verbessert werden kann (Pfeil 3). Die finale Treibstoffeinsparung entspricht dem Wert am unteren, roten Balkenende. Durch die Anwendung zukünftiger Aufladesysteme kann die Nutzturbine ihre Leistung weiter erhöhen und zusammen mit ORC den Gesamttreibstoffverbrauch im besten Fall um 11% senken. Auf der rechten Seite des Bildes 7 sind die Leistungen der einzelnen Prozesse bezogen auf die Referenzmotorleistung wiedergegeben. Mit dem kombinierten Prozess lassen sich bis zu 13% der Motorleistung durch Abwärmenutzung umsetzen.

### Fazit und Ausblick

Aufgrund teurerer Treibstoffe und grösserem Druck zur Begrenzung der Klimaerwärmung werden auch in der Schifffahrt Massnahmen zur Energieeffizienzsteigerung immer wichtiger. Entsprechende Technologien wie die Nutzturbine und der Wasserdampfprozess stehen für Marineanwendungen bereits heute zur Verfügung und sollten konsequent genutzt werden. Durch weitere Effizienzsteigerungen am Motor und der Anwendung neuer Turboaufladekonzepte wird der Einsatz des Wasserdampfprozesses immer problematischer. Als interessante Alternative bietet sich mittelfristig der ORC-Prozess an, der dem Wasserdampfprozess bei tiefen Temperaturen überlegen ist und seit Jahren erfolgreich bei der Geothermie und bei Holzheizkraftwerken eingesetzt wird. Bis der ORC-Prozess auch bei Schiffen eine marktreife Technologie ist, braucht es jedoch noch einiges an Abklärungen und Entwicklungen. ■

[1] International Energy Agency, Energy Prices and Taxes – 3rd Quarterly Statistics 2011. Annahmen für die Umrechnung: 1 Barrel Schweröl entspricht 6,6 Tonnen, 1 USD = 0,939 CHF (3.1.2012)

[2] H. Schmid: Präsentation «Engine Technologies for Reduced Emissions and Waste Heat Recovery», [www.ssmm.bzi.pl](http://www.ssmm.bzi.pl)

[3] Pressemitteilung von MAN Diesel & Turbo, [mandieselturbo.com](http://mandieselturbo.com)