

Use of Composite Materials for Large Engines Fueled by Heavy Oil in Marine Engineering

The economy in the maritime sector represents one of the most important foundations for the competitiveness of Germany as a technology, production and logistics location. As a high-technology industry with around 400,000 employees and an annual sales volume of more than 54 billion euros, marine engineering is among the most important and most advanced economic sectors in Germany. Around 60 percent of German exports are transported by sea.

Einsatz von Werkstoffverbunden für schwerölbetriebene Großmotoren in der Schiffstechnik

Dipl.-Ing. André Wagner,
Dipl.-Ing. Tim Lehnert und
Prof. Dr.-Ing. Dirk Landgrebe, Chemnitz

Die Wirtschaft im maritimen Sektor stellt eine der wichtigsten Grundlagen für die

Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands als Technologie-, Produktions- und Logistikstandort dar. Als Hochtechnologiebranche mit etwa 400.000 Beschäftigten und einem Jahresumsatzvolumen von mehr als 54 Milliarden Euro gehört diese Sparte zu den wichtigsten und fortschrittlichsten Wirtschaftszweigen des Landes. Rund 60 Prozent der deutschen Exporte finden über den Seeweg statt.

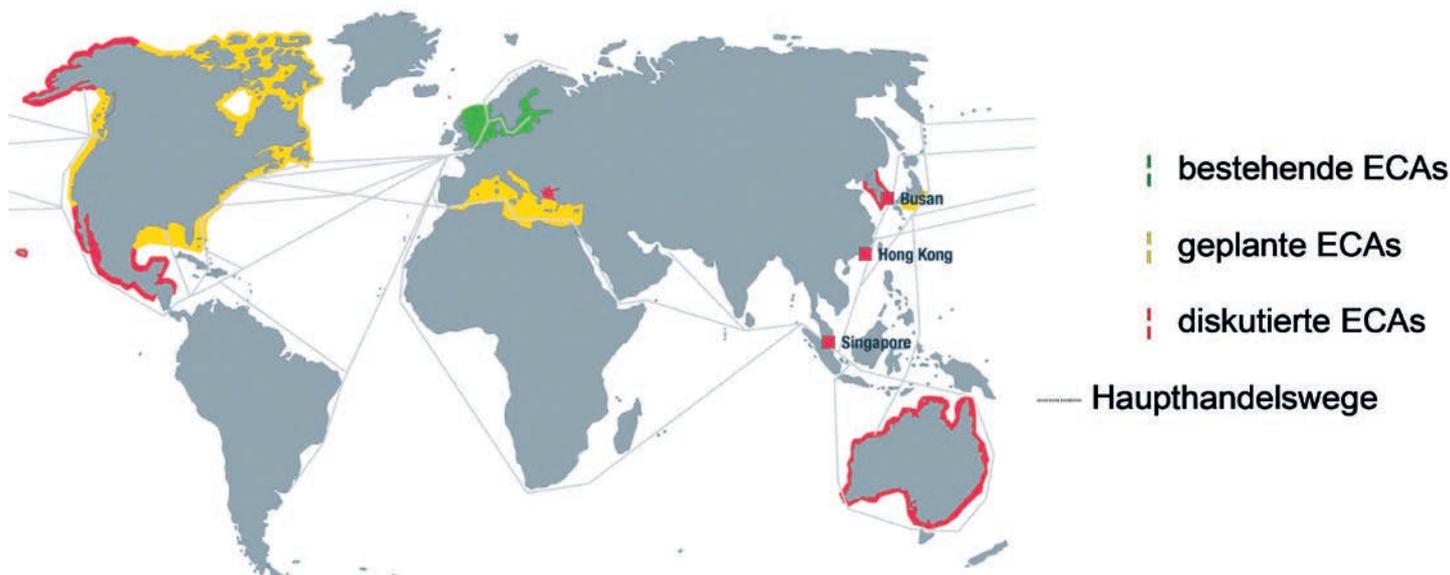


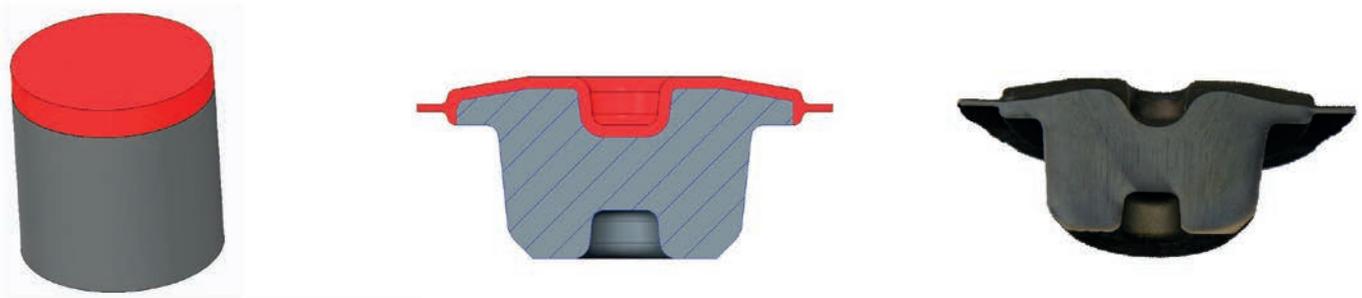
Bild 1: ECAs weltweit [1].

NO_x-Reduktion ist gefordert

Die Internationale Maritime Organisation „IMO“, eine Organisation der UN, wurde zum Schutz der Meere mit der Umsetzung klima-

politischer Vorgaben betraut und erarbeitet daraufhin verschiedene Emissionsvorschriften für Hochseeschiffe. In ihrer letzten „Ausbaustufe“ der IMO-Tier III wird eine Senkung

der NO_x-Emissionen in sogenannte Emission Controlled Areas (ECAs) auf das Niveau von 80 Prozent unter „Tier I“ bis zum Jahre 2016 vorgesehen (Bild 1).



Grundwerkstoff ■ (z.B. 1.7225 / 42CrMo4)
Sonderwerkstoff ■ (z.B. Nimonic 80 A, Inconel 718 und René 41)

Bild 2: CAD-Modell (links) – Ventildfederteller Anfangsform Schmiederohteil (Mitte) – Testmuster geschmiedet (rechts).



Bild 3: CAD-Modell: Werkstoffverbund-Anfangsform (links), Schmiederohteil (Mitte), Fertigteil - mechanisch bearbeitet (rechts).

Um diese Ziele zu erreichen, sind innermotorische Maßnahmen notwendig, um durch höhere Brennraumtemperaturen eine sauberere Verbrennung zu erreichen und folglich auch die Abgastemperaturen anzuheben. Ein nachfolgender Katalyseprozess kann somit bezüglich der NO_x-Reduktion wirksamer arbeiten. Die aktuell verwendeten Werkstoffe unterliegen bei Temperaturen von über 500 °C einem starken Verschleiß durch Heißgaskorrosion und ihre Warmfestigkeit sinkt bei längerer Betriebsdauer stark ab.

Nickelbasislegierungen wurden speziell für Hochtemperaturanwendungen, wie zum Beispiel im Turbinen- und Triebwerksbau, entwickelt. Diesbezüglich ist davon auszugehen, dass sie für die Anwendungen in schwerölbetriebenen Großmotoren geeignet sind.

Bei bisherigen Ansätzen für Kraftfahrzeugmotoren wurden Kolben und Ventile mit dünnen Zusatzschichten (im µm-Bereich mit PVD-Verfahren) aus oben genannten Werkstoffen versehen. Bei dem angestrebten Lösungsansatz wird die Anfangsform zum Gesenkschmieden mit einem Sonderwerkstoff thermisch gefügt und zu einem endkonturnahen Bauteil umgeformt.

Höchste thermische Belastbarkeit

Das Projekt „INKOV“ wurde ins Leben gerufen, um mechanisch und thermisch hoch belastbare Motorkomponenten für maritime Großmotoren, wie zum Beispiel Kolben und

Ventile zu entwickeln. Diese sollen aus hybriden Werkstoffverbunden umformtechnisch möglichst endkonturnah hergestellt werden.

Im Fokus stehen stoffschlüssige Verbunde aus verschleißfesten Hochtemperaturlegierungen und klassischen gut umformbaren Kolben- beziehungsweise Ventil-Stahlwerkstoffen als Trägermaterialien. Beide Metalle werden durch eine thermische Fügeoperation miteinander verbunden. Aufgrund ihrer ausgezeichneten Warmfestigkeit sowie ihrer Hochtemperaturkorrosionsbeständigkeit sind diese Werkstoffverbunde für Einsatztemperaturbereiche von über 500 °C bis zirka 650 °C einsatzfähig.

In Vorbereitung des Projekts zur Umformung von Werkstoffverbunden wurde das Umformverhalten verschiedener Verbunde untersucht und beurteilt. Als Testbauteil wurde ein Ventildfederteller im Maßstab 2:1 verwendet. Die ausgewählte Testgeometrie eines Ventildfedertellers besitzt typische Geometrielemente, die in Werkzeugen der Warmmassivumformung sehr häufig vorkommen. Als Beispiel seien Dorne und Bereiche genannt, in denen das umzuförmende Material pilzförmig gebreitet wird. Im Bild 2 sind die Querschnitte der Anfangsform und das Schmiederohteil als Werkstoffverbund dargestellt. Die Schichtdicke des Sonderwerkstoffs beträgt zirka 5 mm.

Die Umformversuche wurden auf einer Spindelpresse vom Typ SPKA 2000 durchgeführt. Dabei wurde ermittelt, ob durch die

unterschiedlichen Materialkennwerte (speziell dem Fließverhalten bei Umformtemperatur) die gefügten Werkstoffverbunde fließen und ob diese nach der Umformung eine ausreichende Haftfestigkeit besitzen und wie sich die Gravurfüllung, einschließlich der Gratbildung, zeigt. Die Umformtemperaturen waren mit zirka 1.100 °C jeweils an den Sonderwerkstoff angepasst.

Hybride Werkstoffverbunde in der Massivumformung

In einer Potenzialstudie zum Hybridschmieden aus dem Jahr 2013 wurde untersucht, ob und für welche Bauteilklassen ein „Hybrid-/Verbundschmieden“ von gleichen und ungleichen Werkstoffen technologisch relevant ist [2].

Für Fahrwerksteile und Antriebselemente als typische Bauteilklassen aus dem Kfz-Bereich konnte nur ein geringes technologisches Potenzial für Verbundkombinationen „Stahl-Leichtbauwerkstoffe“ ermittelt werden.

Die Masse ausgewählter Fahrwerksbauteile könnte durch die Kombination artfremder Werkstoffe wie zum Beispiel Stahl-Aluminium erheblich reduziert werden. Aus wirtschaftlicher Sicht, bedingt durch den erhöhten produktionstechnischen Aufwand, erscheint das „Hybridschmieden“ für eine Stahl/Stahl- oder Stahl/Leichtbauwerkstoff-Kombination nur für eine sehr begrenzte Anzahl von Bauteilklassen relevant.

Thesen	Ziele
gemeinsame Umformung von Grund- und Zusatzwerkstoff	bessere Schichthaftung
homogenere Verteilung der chemischen Elemente im Schweißwerkstoff	bessere mechanische Eigenschaften der neu gebildeten Schicht
Umformgefüge besitzt bessere mechanische Eigenschaften als Gussgefüge	verbesserte mechanische Eigenschaften
Einsparung des Lösungsglühens für Nickellegierungen	Zeit- und Kostenreduktion
kürzere und bei niedrigeren Temperaturen stattfindende Ausscheidungshärtung	Zeit- und Kostenreduktion, bessere mechanische Eigenschaften des Grundwerkstoffs
mehr eindimensionale Gitterfehler für Ausscheidungsbildung	langsamere Vergrößerung, höhere Härte, besseres Hochtemperaturlangzeitverhalten

Tabelle 1: Vorteile der gemeinsamen Umformung eines Schichtverbunds.

Das Hauptaugenmerk von INKOV liegt auf der Kombination eines Stahlwerkstoffs mit einem hochwarmfesten Material, beispielsweise einer Nickelbasislegierung. Unter anwendungsrelevanten Bedingungen werden verschiedene Werkstoffverbunde entwickelt und bauteilspezifisch getestet. Erste Erprobungen wurden mit skalierten Demonstratoren, die in allen Konstruktionselementen dem Originalbauteil „Kolbenboden“ entsprechen, durchgeführt (Bild 3).

Um die Verschleißbeständigkeit des Brennraums zu verbessern und den Motor durch höhere Brennraumtemperaturen effizienter zu gestalten, sollten alle brennrauminternen Oberflächen im Sinne eines „wärmedichten Brennraums“ aus dem gleichen hochwarmfesten Material bestehen. Deshalb werden weitere Motorkomponenten, wie Ventile, Ventilsitzringe und Zylinderlaufbuchsen ebenfalls betrachtet.

Anwendbarkeit und Eigenschaften der Legierungssysteme

Jeder Werkstoff zeichnet sich durch ein individuelles Eigenschaftsprofil aus, wodurch sich spezielle Einsatzmöglichkeiten definieren lassen.

Für die Zusatzwerkstoffe wurde ein entsprechendes Anforderungsprofil erstellt:

- gute Schweißbeignung,
- gute Umformbarkeit,
- hohe Kriech- und Ermüdungsfestigkeit,
- beständig in schwefelhaltiger Atmosphäre,
- hohe Widerstandsfähigkeit gegen Heißkorrosion,
- chemische Zusammensetzung
 - Cr ► Oxidationsschutz, Karbidbildung

- Mo, Co ► Mischkristallverfestigung
- Al, Ti ► Ausscheidungsverfestigung (γ')
- Cr, Co, Si ► Schwefelbeständigkeit
- B ► Kriechfestigkeit
- Ni ► Umformbarkeit
- Fe ► verschlechtert Schweißbeignung
- S ► Bildung von Warmrissen

Nachfolgend sind für die zu untersuchenden Motorenkomponenten mögliche Werkstoffkombinationen aufgezeigt:

- Kolbenbodenoberfläche und -mantelfläche/ Verschleißzone an Ventilen
 - 2.4952 – Nimonic
 - 2.4816 – Iconel
 - 2.4973 – René 41
- Grundwerkstoff für Kolbenboden
 - 1.7225 (42CrMo4)
- Schaftwerkstoff für Ventile
 - 1.4718 (X45CrSi9.3)

Fügeverfahren zur Verbundherstellung

Im Folgenden wurden verschiedene Fügeverfahren analysiert, um zu prüfen, welche Verfahren sich zur Herstellung von Werkstoffverbunden für diese spezielle Anwendung eignen. Es ist grundsätzlich davon auszugehen, dass die umzuformenden Werkstoffverbunde bereits vor dem Umformprozess hergestellt sein müssen. Beide Werkstoffkomponenten sind daher in einem separaten vorgeschalteten Arbeitsschritt zu verbinden (Tabelle 1).

Eine stoffschlüssige Verbindung beider Materialien ist sowohl aus Gründen der Wärmeleitung als auch aus konstruktiver Sicht vorteilhaft. Die Verfahren Reibschweißen,

Plattieren und das Auftragsschweißen wurde dafür näher betrachtet. Es zeigt sich, dass die entstehende Übergangszone zwischen beiden Materialien duktil genug sein muss, um bei der sich anschließenden Warmumformung defektfrei zu bleiben.

Für das definierte Auftragen von Zusatzwerkstoffen in unterschiedlichen Schichtdicken sind vor allem die automatisierten Auftragschweißverfahren besonders geeignet, denn sie zeichnen sich durch einen partiellen und definierten Werkstoffauftrag aus. Der Schweißzusatzwerkstoff wird dabei in Raupen ein- oder mehrlagig aufgebracht. Im Prozess sollte eine möglichst feinschuppige Oberfläche angestrebt werden, um Schmiedefehler auszuschließen. Diese lässt sich mit vollautomatisierten Schweißrobotern herstellen. Die Verfahren Wolfram-Inertgasschweißen, Metall-Aktivgasschweißen, das Laser- und PTA-Auftragschweißen wurden für den notwendigen Fügeprozess auf ihre praktische Anwendung ausführlich untersucht.

Mit Hilfe dieser Schweißverfahren kann die Forderung erfüllt werden, dass die Schichtdicke variabel aufgetragen werden kann. Somit kann der Forderung, die Kolbendeck- und -mantelfläche mit einer Sonderwerkstoffschicht zu versehen, ebenfalls entsprochen werden. Tendenziell wird das PTA-Auftragschweißen für großflächiges Auftragen bei einer geringen Anzahl von Schweißraupen eingesetzt.

Werkstofftechnische Untersuchungen

Für Untersuchungen wurden einfache Demonstratoren entwickelt, um Technologien für das Auftragsschweißen anforderungsspezifisch zu qualifizieren. Werkstofftechnische Untersuchungen geschmiedeter Demonstrator-

bauteile haben gezeigt, dass die technologischen Parameter des Fügeverfahrens für die Qualität der umgeformten Teile entscheidend verantwortlich sind. Die für das Schweißverfahren (Plasma-Pulver-Auftragsschweißen PTA) qualitätsbestimmende Kenngröße ist dabei die Stromstärke. Sie beeinflusst die sich während des Schweißprozesses bildende Mischzone (intermetallische Phase) in ihrer chemischen Zusammensetzung aus beiden Werkstoffen. Grundvoraussetzung für die sich anschließende Umformung ist, dass beide Werkstoffe defektfrei miteinander verbunden sind. In Auswertung der chemischen Zusammensetzung konnte festgestellt werden, dass sich durch die Diffusion der chemischen Elemente aus beiden Werkstoffen eine relativ breite Mischzone bildet. Diese sollte nach der mechanischen Bearbeitung am Fertigteil zirka 2 mm betragen.

Die sich bildende intermetallische Phase, welche sich meist wenig duktil darstellt, ließ

sich, wie in Bild 4 dargestellt ist, defektfrei im Verbund umformen.

Zusammenfassung und Ausblick

Nach Auswertung der bisherigen Untersuchungen kann die Aussage getroffen werden, dass hybride Werkstoffverbunde bei Beachtung aller technologischen Prozessparameter beim Auftragsschweißen, der induktiven Erwärmung vor der Umformung, beim Schmiedeprozess selbst und der definierten Wärmenachbehandlung, entsprechend dem zukünftigen Anforderungsprofil für Bauteile in schwerölbetriebenen Großmotoren herstellbar sind.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen werden Kolbenboden und Ventile aus hybriden Werkstoffverbunden hergestellt. Den Abschluss der Untersuchungen bilden Langzeitversuche auf verschiedenen Motorenprüfständen, um die Motorenkomponenten unter praxisrelevanten Einsatzbedingungen zu testen. ■



Bild 4: Hybrider Werkstoffverbund.

Bilder: Autoren

Förderhinweis

Im Forschungsprogramm „Maritime Technologien der nächsten Generation“ ist das Fraunhofer IWU mit der Thematik „Einsatz spezieller Werkstoffverbunde für schwerölbetriebene Großmotoren in der Schiffstechnik“ im Verbundprojekt „INKOV – Entwicklung innovativer Kolben- und Ventillösungen mit Werkstoffverbunden in Schiffsmotoren“ in Trägerschaft des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) verankert.

Literarnachweis

[1] N.N.: Emissionsgesetzgebung Schifffahrt. Abgerufen am 14.11.2012 von: <http://de.mandieselturbogreentechnology.com/0000540/UnsereMotivation/VerbindlicheVorgaben/Schifffahrt.html>

[2] Labs, Jürgen: Potentialuntersuchung zum Hybridschmieden, Stufe 1: Projektstudie Proheris im Auftrag des Industrieverbands Massivumformung e. V. (IMU 41), Abschlussbericht Juni 2013



André Wagner



Tim Lehnert



Prof. Dr. Dirk Landgrebe