Leichtbau als Baustein zur Effizienzsteigerung

BALTEC OFFSHORE Die Schlüsseleigenschaften bei Schiffen sind heute Kosteneffizienz, Umweltfreundlichkeit und Sicherheit [2]. Die Schiffbauindustrie muss der Umweltfreundlichkeit zunehmend einen wichtigen Platz einräumen. Daher dürfte auch hier der Leichtbau in Zukunft wichtiger werden, denn annähernd linear mit der Gewichtsersparnis reduziert sich bei gleicher Länge und Geschwindigkeit auch der Brennstoffverbrauch von Schiffen. Dieser Beitrag soll zunächst einige Anregungen zum Bau von leichten, umweltfreundlichen und kostengünstigen Schiffen geben.

Dr. Odo Hütter, Stefan Schulz

Generell geht es bei Green Ships um die allgemeinere Forderung nach besserer Ressourceneffizienz [1]. Das schließt einen nachhaltigen Umgang mit den begrenzten natürlichen Ressourcen (Schiffbaumaterial, Brennstoff, Atmosphäre) ein.

Wenn heute aber über Green Ships gesprochen wird, geht es zunächst um den Umwelt- und Klimaschutz. Vor allem ist hier die Reduktion der NOx und CO_2-Emissionen im Fokus der Diskussion und der international verbindlichen vorgeschriebenen Grenzwerte. Von den Motorenherstellern wurden und werden entsprechend große Anstrengungen unternommen, um die NOx- und CO_2-Emissionen zu reduzieren. Die Verbrennung von LNG ist dabei aber auch nur ein Zwischenschritt zu einer saubereren Verbrennung, bei der aber weiterhin große Mengen Kohlenstoff zu CO_2 verbrannt werden. Langfristig sollten wir daher zu neuen, kohlenstofffreien Lösungen kommen.

Potentiale

Ein Weg, der Klima- und Umweltschutz und Ressourceneffizienz miteinander verbindet, wird momentan noch wenig diskutiert: Die Verringerung des Schiffswiderstands durch Gewichtsreduktion. Bei ähnlichen Schiffen und gleichbleibender Wasserlinienlänge kann zunächst vereinfachend davon ausgegangen werden, dass der Widerstand annähernd linear mit der Verdrängung reduziert werden kann.

Bei sehr großen Containerschiffen dürfte das größte Potential zur Verdrängungsreduktion nicht beim Schiffskörper liegen, sondern allenfalls bei den Aufbauten. Ein wesentlicher Punkt bei diesen Schiffen liegt aber auch beim Gewicht der leeren Container. Das Ladungsgewicht besteht hier zu zwei Drittel aus dem Gewicht der Container selbst und nur zu einem Drittel aus deren Inhalt. Hier sind möglicherweise noch neue Ideen für Leichtbaucontainer gefragt.

Abb. 1: A200 20 x 7 m Katamaran, 20 t Verdrängung, 28 kn mit nur 2 x 300 kW

Bei großen Passagierschiffen mit verhältnismäßig geringem Ladungsgewicht dürfte die Verringerung des Gewichtes der meist sehr großen Aufbauten ein hohes Potential besitzen. Vor allem die neuen Composite-Werkstoffe ermöglichen erhebliche Gewichtseinsparungen gegenüber den gängigen Stahl- oder Aluminiumwerkstoffen. Bei Kreuzfahrtschiffen sind heute bereits Kunststoff-Aufbauten mit erheblich geringeren Gewichten denkbar, wodurch sich das Gewicht und damit auch der Brennstoffverbrauch um etwa 20-25 Prozent reduzieren und auch die Stabilität der Schiffe verbessert wird.

Bei kleineren Passagierschiffen bis zu etwa 50 m Länge besitzen heute Kunststoff-Sandwichlösungen das größte Potential zur Gewichtsreduzierung, weil hier auch der gesamte Schiffskörper aus Kunststoff-Sandwichmaterial gebaut werden kann. Die Baltec Offshore GmbH hat hier bereits vor zehn Jahren mit dem A200 gezeigt, dass bis zu 50 Prozent Gewichtsreduzierung gegenüber Aluminiumschiffen möglich ist.

Wie in Abbbildung 2 gezeigt, kann dann auch die erforderliche Maschinenleistung und der Brennstoffverbrauch um den gleichen Prozentsatz gesenkt werden. In unserem Beispiel oben beträgt die Differenz bei einer Schiffsgeschwindigkeit von 20 kn etwa 140 kg/h. Bei 2000 Betriebsstunden ergeben sich 280 t/Jahr. Während der 20-jährigen technischen Lebensdauer eines 24 m-CTV's können hierdurch für jede Tonne eingespartes Schiffsgewicht ca. 140 t Dieseltreibstoff eingespart werden. Das dürfte nicht nur klimarelevant, sondern auch wirtschaftlich interessant sein.

Schnelle Schiffe oberhalb der Froudezahl 0,4 (Abb. 1 oberhalb von 12 kn) könnten wegen der hohen Energiedichte und der dafür ansonsten benötigten Batteriegrößen vorzugsweise als Hybridschiffe realisiert werden. Auf kurzen Strecken kann damit elektrisch und auf längeren Strecken mit Dieselmotoren (möglicherweise auch mit Brennstoffzellen) gefahren werden. Langsame Passagierschiffe unterhalb einer Froudezahl von ca. 0,4 benötigten nur geringe Antriebsleistung bezogen auf die Verdrängung. Durch Leichtbau können bei diesen Schif-

fen wegen deren geringer Energiedichte zwar keine großen absoluten Einsparungen an Antriebsleistung erreicht werden, aber es bieten sich durch leichtere Kaskos gute Lösungen für kostengünstige Passagierfähren mit emissionsfreiem Elektroantrieb und Batterien als Energiespeicher an. Grundsätzlich kann hier gelten: Für die Reduktion beim Kaskogewicht kann Brennstoff gespart werden oder auch bei gleichbleibedem Gesamtgewicht Batterien eingebaut werden. Hiermit sind dann selbst mit kostengünstigen Bleibatterien (Staplerbatterien) bis 18 Stunden Betrieb ohne Nachladen realistisch.

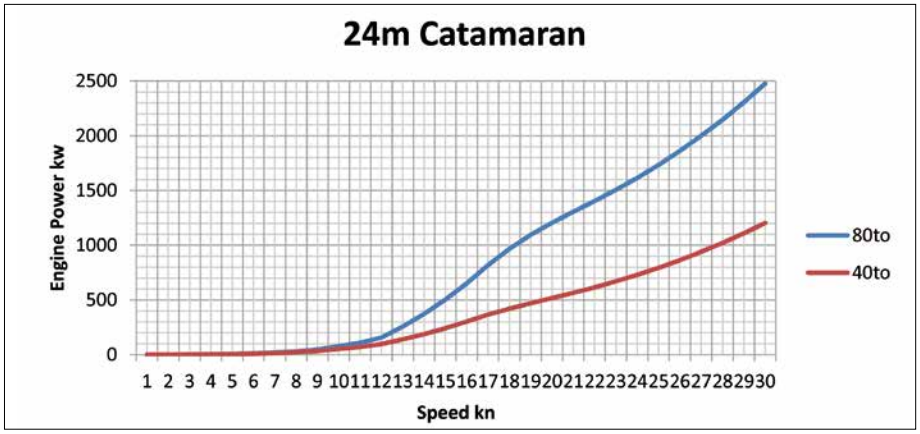


Abb. 2: Erforderliche Maschinenleistungen für ein fiktives 24 m Standard-CTV als Aluminium-Schweißkonstruktion (80 t) und als Epoxyd-Sandwich-Leichtbau (40 t) (Widerstände nach Holtrop [3] und Leistungen mit 68 Prozent Wirkungsgrad berechnet)

Technische Lösungen

Um eine Leichtbauweise zu realisieren, kommen unterschiedliche Materialien und Technologien in Frage, die in Bezug auf ihre Eignung unterschiedlich bewertet werden müssen.

Leichtbau aus Aluminium

Wegen der Korrosion und Schweißbarkeit kann die Außenhaut von Aluminiumschiffen vor allem bei kleineren Einheiten nicht ausreichend dünn ausgeführt werden. Darüber hinaus sind hierbei die Schweißspannungen sehr groß und elastische Verformungen im Verbund mit der Versprödung des Aluminiums im Dauerbetrieb können leicht zu Spannungsrissen vor allem im Bereich der Schweißnähte führen. Um die elastischen Verformungen zu reduzieren, muss wegen der Dauerfestigkeit gegen Rissbildung das Material also stark überdimensioniert werden. Daher ist weitgehender Leichtbau zumindest bei Schweißkonstruktionen kaum möglich. Hinzu kommt hier noch viel Gewicht an Isolierung und Innenverkleidung.

Leichtbau aus Kunststoffen

Für echten Leichtbau von Schiffen kommen vorzugsweise zwei Hauptmaterialien in Frage:

› Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) mit hoher Festigkeit, hoher Bruchdehnung und damit hoher Bruch-Schlagarbeit. Schiffe aus GFK sind daher zunächst schwerer und weicher, aber auch robuster gegen Kollision als CFK Schiffe.

› CarbonfaserverstärkterKunststoff(CFK) mit etwas höherer Festigkeit, geringerem Gewicht, geringerer Bruchdehnung und damit auch geringerer Bruch-Schlagarbeit. Schiffe aus CFK sind daher zunächst steifer und leichter, aber auch empfindlicher gegen Kollision als GFK Schiffe.

Um eine gute Langzeitfestigkeit von Kunststoff-Leichtbauteilen zu erreichen, ist Epoxydharz wegen seiner guten Haftung an der Faser und seiner Dauerelastizität die beste Wahl. Laminate mit Vinylesterharz erreichen nicht ganz die Dauerfestigkeit von Epoxydharz-Laminaten, sind jedoch für Leichtbauten noch akzeptabel. Polyesterharze sind wegen der Versprödung des Harzes und der schlechten Haftung an der Faser für kommerzielle Leichtbauschiffe ungeeignet.

Sandwichbauweise

Hierbei werden zwei hochfeste Deckschichten mit einem leichten Kernwerkstoff (Hartschaum, Waben o.Ä.) kombiniert. Hierdurch können sehr steife, hochfeste Teile mit sehr geringem Flächengewicht entstehen. Diese Teile sind die Basis von echten Leichtbauten!

Die Berechnung von Sandwichstrukturen ist wegen der komplizierteren Mechanik erheblich aufwändiger als bei den herkömmlichen massiven Materialien. Für die Festigkeitsauslegung gegen Biegung ist die Zug- und Druckfestigkeit der Decklagen, deren Knickverhalten auf der Druckseite, die Schlankheit des Trägers und die Schubfestigkeit des Sandwichkerns maßgeblich.

Baltec hat bereits vor zehn Jahren systematische Festigkeitsversuche an Plattenfeldern aus GfK-Sandwich ›

Abb. 3: Rahmen für Drucktests: Sandwich aus 25 mm PVC-Schaumkern mit 80 kg/m³ und beidseitigem 1,2 mm dicken GfK Laminat. Auf ein allseitig eingespanntes Plattenfeld in Originalgröße wurde von der Rückseite Wasserdruck aufgebaut und verschiedene Messungen durchgeführt.

durchgeführt und mit den Ergebnissen der sehr vereinfachten Berechnungen der Klassen verglichen. Im Ergebnis konnten bei den Versuchen über doppelt so hohe Festigkeiten als bei den Berechnungen der Klasse und damit doppelte Festigkeitsreserven festgestellt werden. Auch bei Versuchen bezüglich der Dauerfestigkeit wurden nach 12 Millionen Lastwechseln nur 15 Prozent Festigkeitsverlust festgestellt. Daher dürften solche Sandwichschiffe erheblich langlebiger als Aluminiumschiffe sein (Versprödung bei vielen Lastwechseln s.O.).

Bauweisen für Kunststoff-Leichtbauschiffe

In Bezug auf die Bauweise ist zwischen der formbasierten und der plattenbasierten Bauweise zu unterscheiden.

Formbasierte Bauweise

Im konventionellen Kunststoff-Boots- und -Schiffbau wird flüssiges Harz mit Fasern in mehreren Lagen in einer Form laminiert und danach dieses Laminat bei Raumtemperatur ausgehärtet. Bei der modernen Vakuum-Infusionsmethode werden die Fasern (und ggf. auch die Sandwichkerne) trocken in die Form gelegt und dann das ganze Packet mit einer Folie überzogen und unter Vakuum gesetzt. Dann wird das sehr dünnflüssige Infusionsharz in die Fasern eingesaugt. Dies ist eine hocheffiziente Baumethode vor allem zum Bau von großen Yachten, die bisher auch bei kommerziellen Kunststoffschiffen eingesetzt wird. Die damit entstehenden Laminate sind jedoch normal brennbar und müssen bei kommerziellen Schiffen zumindest von innen aufwändig isoliert und verkleidet werden. Hierdurch geht ein Teil des Gewichtsvorteils wieder verloren.

Besser eignet sich daher der Einsatz von feuerhemmendem Harz. Wegen der sehr hohen Viskosität von feuerhemmenden Epoxydharzen kann die Vakuum-Infusionsmethode nicht angewandt und auch kaum von Hand laminiert werden. Daher kommen für feuergeschützte Laminate nur Prepregs (Vorimprägnierte Fasern) mit Heißhärtung der Harze in Frage. Dies bedingt jedoch vakuumdichte und hitzebeständige Formen mit erheblichen Kosten.

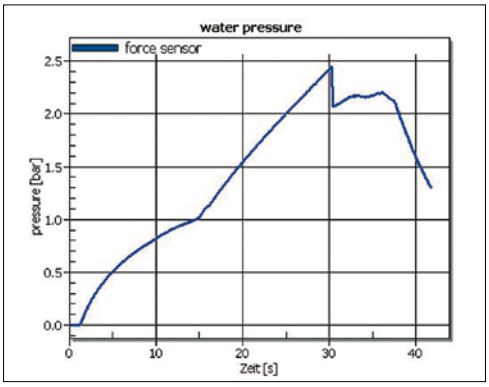
Plattenbasierte Bauweise

Zur Realisierung von großen Einzelbauten ohne den kostenaufwändigen Bau von Formen hat Baltec eine effiziente Bauweise auf Basis von ebenen Sandwichplatten entwickelt und in seinen Grundlagen bereits 2008 in der Zeitschrift „lightweightdesign“ [4] und 2009 in den VDI Nachrichten [5] veröffentlicht.

Hierzu werden zunächst in einer Heißpresse große standardisierte Sandwichplatten (ca.12 x 2,4 m) gefertigt. Aus diesen Platten wird dann ein Teilesatz ähnlich dem Metallschiffbau geschnitten. Diese Teile können für alle abwickelbaren Flächen verwendet werden. Strecken und Stauchen des Materials ist bei solchen Composite-Platten nur im elastischen Bereich möglich. Biegungen in einer Richtung können durch Modifizierung der Kernhöhen erleichtert werden. Schiffsteile mit sphärischen Wölbungen müssen aber in gesonderten Formen hergestellt und dann in die Schiffsform integriert werden.

Zum Zusammenbau wurde eine neuartige zeitsparende kombinierte Misch- und Applikationsmaschine entwickelt. Ein weiterer Vorteil solcher Sandwichteile liegt darin, dass sie bereits isoliert und beidseitig glatt und lackierfähig sind. Eine Isolierung oder Innenverkleidung ist nur noch an wenigen Stellen des Schiffes (Maschinenraum) erforderlich, wodurch nochmals erheblich Kosten und Gewicht eingespart werden. Die höheren Materialpreise für feuergeschützte Kunststoff-Sandwichplatten werden hierdurch weitgehend ausgeglichen.

Baltec Offshore erstellt hierfür in Zusammenarbeit mit einem Produktionspartner Bausätze für die eigenen Standardschiffe oder auch für Sonderdesigns nach Kundenspezifikation. Der Zusammenbau und die technische Ausrüstung der Schiffe erfolgen dann durch die Werft. Das zusätzliche Know-how für die neue



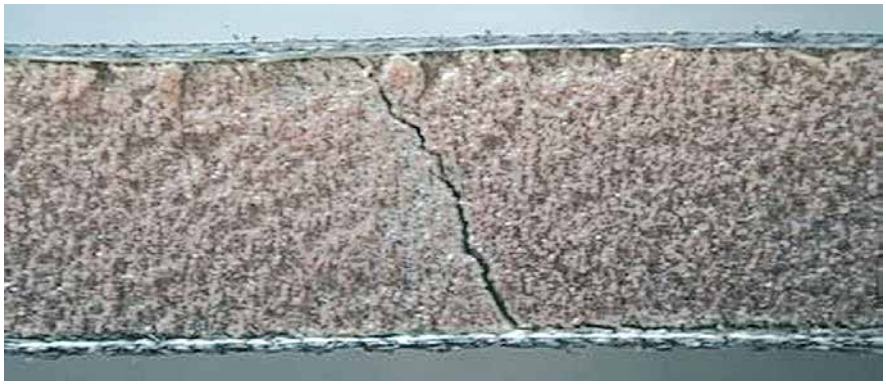


Abb. 4 + 4a: Druckverlauf im Zeitablauf des Tests: Maximale Festigkeit bei 2,5 bar und danach erfolgt der charakteristische Druckabfall beim Schubbruch im Sandwichkern. Siehe schräger Riss im Schaumkern

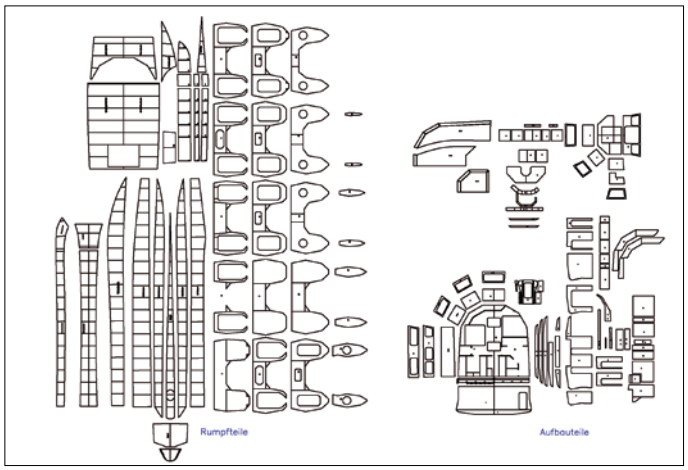


Abb. 5: Beispiel für einen Plattenplan: Teile eines 24 m-CTVs

Klebebauweise wird dann von Baltec Offshore auf die Werft übertragen.

Brandschutz im Kunststoff Leichtbau

Ein Kernproblem bei der Realisierung von Kunststoffschiffen ist der passive Brandschutz [2 + 6].

Bisher wurde davon ausgegangen, dass Brände immer vom Schiffsinneren ausgehen und daher wurden auch normal brennbare Harze für die Außenhaut akzeptiert, wenn von innen alles mit einer Feuerschutzisolierung versehen wurde. Der Brand mit anschließendem Untergang der „Umoe Ventus“ im Dezember 2015 stellt diese Praxis nun aber in Frage. Hier schlugen die Flammen aus den Luftansaugöffnungen nach außen auf die normal brennbare Außenhaut, was den Brand letztlich unkontrollierbar machte [7]. Bei Verwendung von normal brennbaren Harzen müssten Wassersprühanlagen für die Außenflächen eingesetzt werden [2].

Grundsätzlich sind die Harze für den Kunststoffschiffbau brennbar, können aber mit geeigneten Brandschutzzusätzen feuerhemmend modifiziert werden. Wichtig in diesem Zusammenhang ist die Selbstverlöschung, d.h. das Harz brennt nicht selbst weiter, sondern verlöscht bereits dicht neben der Fremdflamme. Hierdurch können Brände auf sehr engen Raum beschränkt werden. Die Autoren gehen davon aus, dass der Brand auf der „Umoe Ventus“bei Verwendung von feuerhemmenden Harzen anders verlaufen wäre.

Die kommerziellen Schiffe von Baltec Offshore wurden bereits vor Jahren aus feuerhemmenden Prepregs gebaut. Bisher wurde von den Sicherheitsbehörden bei kleineren Schiffen für nicht isolierte Wände und Böden ein Test für den Oberflächenbrand nach IMO FTP Teil 5 anerkannt. Auf größeren Schiffen werden aber Zertifikate nach IMO FTP Teil 10, in denen dann auch die kompletten Wände auf Feuerwiderstand getestet werden, verlangt.

Ein weiteres Problem bei den Brandeigenschaften vor allem bei Epoxydharzen ist die Bildung von aggressiven Rauchgasen. Als neueste Entwicklung gibt es nun „Fire retardant low smoke“-Epoxydharze. Zur näheren Untersuchung der Brandeigenschaften von Sandwichplatten mit Decklaminaten auf Basis dieser neuen Harze sollen auf Initiative von Baltec Offshore in der nächsten Zeit von einem internationalen Konsortium diese Platten mit verschiedenen Kernen und Oberflächen nach den IMO Vorschriften getestet werden.

Ausblick

Durch konsequenten Kunststoff-Leichtbau können heute bereits kommerzielle Schiffe mit bis zu 50 Prozent Gewichtsersparnis gegenüber herkömmlichen Aluminiumschiffen realisiert werden. Dies führt dann zu annähernd halbiertem Brennstoffverbrauch oder bei langsamen Elektroschiffen auch zu großen Batteriekapazitäten ohne Mehrgewicht.

Eine weitere Antriebsart mit sehr großen Reserven vor allem auf langen Strecken ist nach wie der Windantrieb. Denkbar wären Konzepte, die auf Windantrieb für die Langstrecke und elektrisch oder mit Wasserstoff-Brennstoffzellen im Nahbereich basieren. Mit solchen Segel-Hybridantrieben im Verbund mit sehr weitgehendem Leichtbau könnte ein wesentlicher Beitrag zum Klimaschutz geleistet werden und in der Zukunft auch Fahrleistungen bei kommerziellen Segelschiffen ermöglichen, die wir uns heute noch nicht vorstellen können.

Bis zur kompletten Dekarbonisierung ist es sicherlich noch ein weiter Weg, aber wenn wir nicht bald anfangen, verlieren wir wertvolle Zeit, denn heute gebaute Schiffe werden ja bereits für eine in 20 Jahren weitgehend klimaneutrale Welt gebaut.

Literatur

[1] Ernst Ulrich von Weizsäcker, Faktor Fünf, 2009 S. 11ff
[2] Evegren, Rahm, Herzberg, SP Report 2016:35 (BESST Project), S. 8ff
[3] Hullspeed/Holtrop, J. and G.G.J. Mennen, An approximate power prediction method, 1982
[4] Tina Kohn, Rationelle Fertigung dank standardisiertem Design, lightweightdesign 3/2008 S.54ff
[5] Tina Kohn, Geklebte Kunststofffähre, VDI Nachrichten Nr. 12 vom 20.3.2009 Technik und Gesellschaft S 3
[6] Herzberg, SP Report 2009:13 (LASS Report), S. 14ff
[7] DMA Maritime Accident Report 9.2016

Die Autoren:
Stefan Schulz und Dr. Odo Hütter, Baltec Offshore GmbH, Lübeck

Abb. 6: Beispiel für den Zusammenbau des Rumpfes für ein 24 m-CTV: Die Beplattung der Rumpfinnenseiten und des Crossdecks und des Decks ist bereits erfolgt

Abb. 7: Beispiel für den Zusammenbau des Aufbaus für ein 24 m-CTV: Im Vordergrund eine der neu entwickelten Misch- und Appliziermaschinen für Kleber und Hohlkehlen