

**GL ShipLoad für  
Festigkeitsanalysen von  
Containerschiffen**

von Dr. Jörg Rörup, Dr. Thomas E. Schellin und Helge Rathje (Germanischer Lloyd, Hamburg)

## Einführung

Seit einigen Jahren stützt sich die Dimensionierung von komplexen Schiffsstrukturen auf Finite-Elemente (FE)-Analysen des gesamten Schiffes [1–3]. Im Gegensatz zu dem traditionellen, auf Regeln und Formeln basierenden Entwurf besteht hier die Möglichkeit, direkt berechnete Lasten zu verwenden.

Die benutzerfreundliche Software GL ShipLoad wurde entwickelt, um realistische Lasten für eine globale FE-Analyse von Containerschiffen effizient zu erzeugen [4, 5]. Basierend auf dem Entwurfswellen-Konzept findet diese Software die für die Bemessung der Schiffsstrukturen relevantesten Lastkombinationen. Hydrodynamische Berechnungen für reguläre Wellen führen zu welleninduzierten Drücken und Schiffsbeschleunigungen.

Die strukturellen Beanspruchungen resultieren aus der Massenbeschleunigung (Trägheitslasten) und aus externen welleninduzierten Drücken. GL ShipLoad bietet Hilfe bei der Modellierung der Massenverteilung von Leerschiffsgewicht und Ladung, bei der Berechnung der hydrostatischen und hydrodynamischen Drücke sowie bei der Erzeugung ausgeglichener, quasi statischer Lastfälle.

Über benutzerdefinierte Auswahlkriterien wie z.B. das vertikale Biegemoment oder das Torsionsmoment werden die kritischen Wellensituationen für die globale Festigkeitsanalyse ausgewählt. Anhand der Entwurfslastfälle, die in den „Guidelines for Strength Analysis for Ship Structures with the Finite Element Method“ [2] beschrieben sind, werden die Hüllkurven für Biege- und Torsionsmomente nach Bauvorschrift angenähert.

Um die Entwurfslastfälle zu finden, wird eine große Anzahl von Wellensituationen analysiert. Die Rollbewegung trägt maßgeblich zum dynamischen Torsionsmoment, insbesondere im Bereich der vorderen Laderäume [6], bei und muss daher hinsichtlich der Verschiebung der Lukendeckel und der Beanspruchung der Lukenecken berücksichtigt werden.

Die Erstellung einer strukturellen Festigkeitsanalyse auf dieser Grundlage umfasst folgende Arbeitsschritte [5]:

1. Generierung eines FE-Modells, das die globalen strukturellen Eigenschaften des ganzen Schiffes erfasst
2. Auswahl von zwei kritischen Ladefällen, in der Regel sind es das maximale und das minimale Hogging-Glattwassermoment
3. Verteilung von Massen auf das FE-Modell, um Ladung und Verbrauchsgüter zu einem Ladefall zusammenzustellen

## Überblick



Photo: Fotolia

4. Erzeugung des hydrostatischen Gleichgewichts für diesen Ladefall
5. Lineare Berechnung der Schiffsbewegungen und -beschleunigungen
6. Berechnung von welleninduzierten Drücken unter Berücksichtigung nicht linearer Korrekturen
7. Erzeugung des dynamischen Gleichgewichts für das FE-Modell
8. Systematische Analyse verschiedenster Wellensituationen
9. Auswahl der kritischen Entwurfslastfälle
10. Durchführung der strukturellen Festigkeitsanalyse mit diesen Entwurfslastfällen

## Überblick

Das anwenderfreundliche Tool GL ShipLoad ermöglicht es, auch ohne detaillierte hydrodynamische Fachkenntnisse alle notwendigen Schritte zur Lastfallgenerierung durchzuführen.

Der hydrodynamische Teil von GL ShipLoad (schematisch in Abb. 1 dargestellt) beginnt mit der Anwendung einer linearen Streifenmethode, um Schiffsbeschleunigungen und welleninduzierte Drücke für das Schiff bei konstanter Vor-

# Lastgruppen

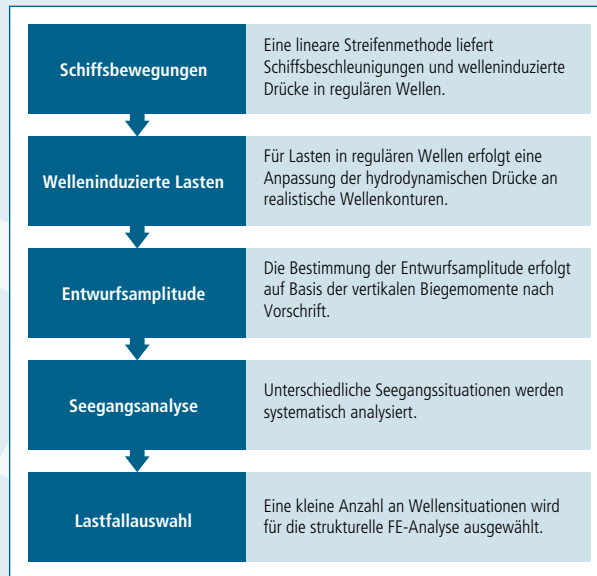


ABBILDUNG 1. Hydrodynamische Arbeitsschritte in GL ShipLoad.

**SPANTAUSFALL.**  
Typische Ausprägung im Vor- und Hinterschiff.

wärtsgeschwindigkeit in regulären Wellen von unterschiedlicher Länge und Richtung zu erhalten.

Hydrodynamische Drücke werden dann an die Wellenkontur mit realistischen Amplituden angepasst, um u. a. die Auswirkungen von großem Spantausfall im Vor- und Hinterschiffsbereich zu berücksichtigen. Das führt zu nicht linear korrigierten Pseudoübertragungsfunktionen der hydrodynamischen Drücke in verschiedenen Wellenhöhen. Als Nächstes werden diese Drücke integriert. Zusammen mit den Trägheitskräften ergibt sich die gesamte globale Belastung der Schiffsstruktur.

Entwurfswellenamplituden werden ermittelt, um eine Übereinstimmung mit den Biegemomenten nach Vorschrift zu erhalten. Aus einer großen Anzahl von Wellensituationen, charakterisiert durch eine systematische Variation der Wellenrichtung, -länge und -phase, wird eine kleinere Anzahl von regulären Entwurfswellen ausgewählt, die die Schiffsstruktur den maximalen Belastungen aussetzt.

Die aus den nicht linearen Korrekturen resultierenden Ungleichgewichte zwischen Druck- und Trägheitskräften erfordern eine Anpassung der Beschleunigung. Damit ist eine

ausgeglichene Gesamtbelastung des FE-Modells sichergestellt.

## Lastgruppen

Jeder Lastfall, der für das FE-Modell aufbereitet wird, ist eine Kombination von Lastgruppen, um eine effiziente Speicherung zu ermöglichen. Alle Lasten werden in die folgenden Gruppen aufgeteilt:

1. Hydrostatische Auftriebslasten
2. Statische Gewichtslasten
3. Statische Tanklasten
4. Sechs trägheitsbedingte Lastgruppen in den drei translatorischen und den drei rotatorischen Richtungen für alle Massen mit Ausnahme der Tanks
5. Sechs trägheitsbedingte Lastgruppen in den drei translatorischen und den drei rotatorischen Richtungen für alle Tankmassen
6. Eine hydrodynamische Lastgruppe für jede Druckverteilung auf der Außenhaut des Schiffs

Die Kombination der ersten drei Lastgruppen führt zu ausgeglichenen statischen Lasten. →

## Massenverteilung

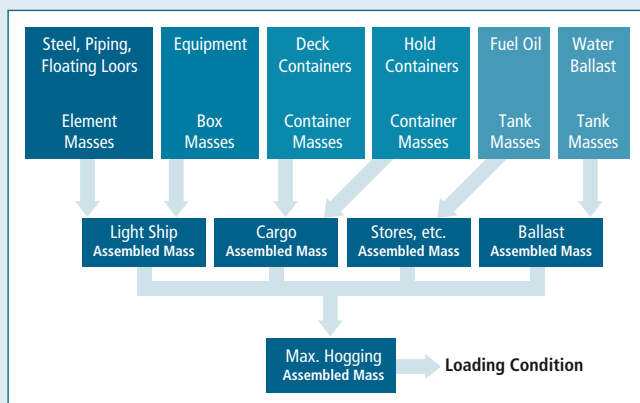


ABBILDUNG 2. Zusammenstellung eines typischen Ladefalls.

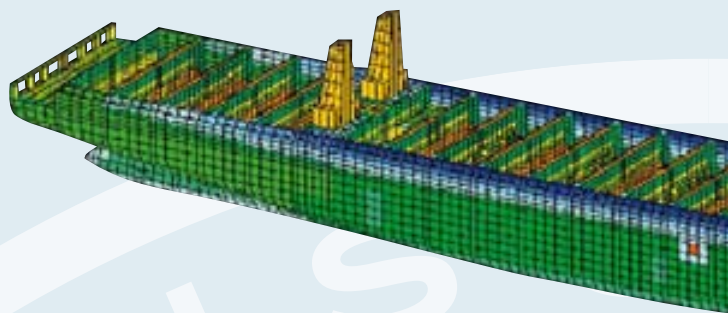


ABBILDUNG 3. Globales FE-Modell.

→ Die trägheitsbedingten Lastgruppen sind mit den für den betrachteten Lastfall gültigen Beschleunigungen zu multiplizieren. Zusammen mit der hydrodynamischen Druckverteilung ergeben sich dann ausgeglichene dynamische Lastfälle.

## Massenverteilung

Die Einzelmassen eines Schiffs werden zusammengefasst, um weiterverwendbare Massengruppen zu erhalten. Damit wird die Zusammenstellung von typischen Ladefällen erleichtert. Diese Massengruppen umfassen z.B. das Stahlgewicht der Schiffsstruktur und weitere Bestandteile des Leerschiffsgewichts, Treibstoff, Frischwasser und andere Verbrauchsgüter (Bunker), Wasserballast sowie die Ladung. Während manche Massengruppen sich für jeden Ladefall unterschiedlich zusammensetzen, wie z.B. der Wasserballast, bleiben andere Massengruppen für jeden Ladefall unverändert, wie z.B. das Leerschiffsgewicht. Abb. 2 zeigt schematisch die Zusammenstellung eines typischen Ladefalls unter Verwendung der Massengruppen.

Sogenannte Massenmatrizes geben sowohl einzelne als auch zusammengesetzte Massen wieder. Eine Massenmatrix ordnet die Knotenmassen den Beschleunigungen zu, die aus den berechneten Festkörperbeschleunigungen abgeleitet werden. Translatorische Beschleunigungen werden unmittelbar verarbeitet; Rotationsbeschleunigungen werden in translatorische Beschleunigungen transformiert.

Mit der Verwendung einer Materialdichte ergibt sich aus den Elementen des FE-Modells

das Stahlgewicht der Struktur. Es ist allgemeine Praxis, die Materialdichte anzupassen, um lokale strukturelle Komponenten zu berücksichtigen, die nicht im Modell enthalten sind. Um einen im Stabilitätsbuch definierten Massenschwerpunkt für das Stahlgewicht zu erfüllen, passt GL ShipLoad auch die Materialdichte der einzelnen Elementgruppen individuell an.

Der Rest des Leerschiffsgewichts (Maschinen, Lukendeckel, Ausrüstung u.a.) wird durch eine Verteilung von Knotenmassen in den entsprechenden Bereichen über sogenannte Massenboxen erreicht. Diese verteilen eine vorgegebene Gesamtmasse innerhalb eines räumlich definierten Bereichs, der durch eine rechteckige Box oder durch eine Kombination aus mehreren rechteckigen Boxen beschrieben wird. Die Masse innerhalb einer Box wird so homogen wie möglich verteilt. Auch hier können vordefinierte Massenschwerpunkte eingehalten werden.

Tankgeometrien werden auch über vom Benutzer definierte Boxen erfasst. Topologisch abgeschlossene Regionen in dem FE-Modell – sogenannte geschlossene Zellen – werden vom Programm ausschließlich dafür verwendet, um Tanks zu lokalisieren. Die Tankmassen werden entsprechend einer hydrostatischen Druckverteilung unter Berücksichtigung des Füllstandes und der Flüssigkeitsdichte auf die relevanten Knoten des Tanks verteilt.

Die Container werden vom Benutzer stapelweise in den einzelnen Bays gestaut. Eine interaktive grafische Darstellung des entsprechenden Schiffsquerschnittes und der zu stauenden Containern ermöglicht dabei eine kontinuierliche visuelle Kontrolle. Auch wenn die

# Hydrostatik, Hydrodynamik

## Hydrostatik

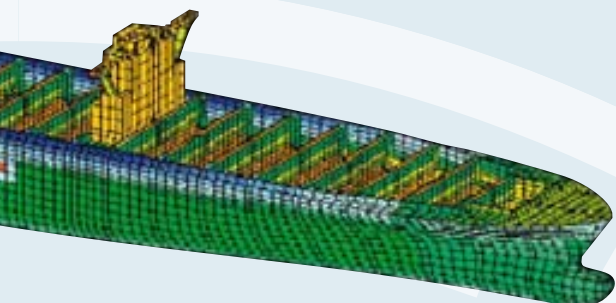
Über das hydrostatische Gleichgewicht sind Tiefgang, Trimm- und Krängungswinkel eines Schiffes im Glattwasser zu bestimmen. Um das hydrostatische Gleichgewicht herzustellen, stützt sich GL ShipLoad auf eine Newton'sche Iteration der Gleichgewichtslage, bis die Auftriebskräfte und -momente im Gleichgewicht mit der Massenverteilung sind.

## Hydrodynamik

Ausgeprägter Spantausfall im Vor- und Hinterschiff ist eine typische Eigenschaft moderner Containerschiffsformen. Insbesondere bei großen Schiffsbewegungen kommt es dadurch zu nicht linearen Schiffsreaktionen. Die Berücksichtigung dieser nicht linearen Effekte kann zu signifikanten Unterschieden im Vergleich zu linearen welleninduzierten Lasten führen. Hachmann [7] hat eine effiziente Methode formuliert, die die hydrodynamischen Drücke oberhalb des Glattwasserspiegels berücksichtigt und somit nicht linear korrigierte Druckamplituden einschließlich Wellenerhebung bestimmt.

Bei der Berechnung der hydrodynamischen Drücke ist es notwendig, die Wellenhöhen und -richtungen zu beachten, die zu kritischen Belastungen der Schiffsstruktur führen. Für Containerschiffe sind normalerweise die drei folgenden globalen Schnittlasten hierfür als relevant anzusehen:

1. Vertikales Biegemoment (VBM)
2. Horizontales Biegemoment (HBM)
3. Torsionsmoment (TM)



Übertragung der Containermassen auf die Schiffsstruktur für die Laderaum- und die Deckscontainer prinzipiell gleich ist, gibt es folgende Unterschiede:

Für die Laderaumcontainer werden alle Kräfte in Längs- und Querrichtung in die angrenzenden Querschotte eingeleitet und die vertikalen Kräfte entsprechend den Containerfußpunkten (20' oder 40') in den Innenboden bzw. in ein unter dem Containerstapel angeordnetes Deck.

Für die Deckscontainer bestimmen Geometrie und Stopperpositionen der Lukendeckel, welche Knoten die Containerlasten aufnehmen. Vertikale Lasten werden entsprechend den Fußpunkten eines 40'-Containers in die Quersülle eingeleitet, Längs- und Querkkräfte entsprechend den Stopperpositionen.

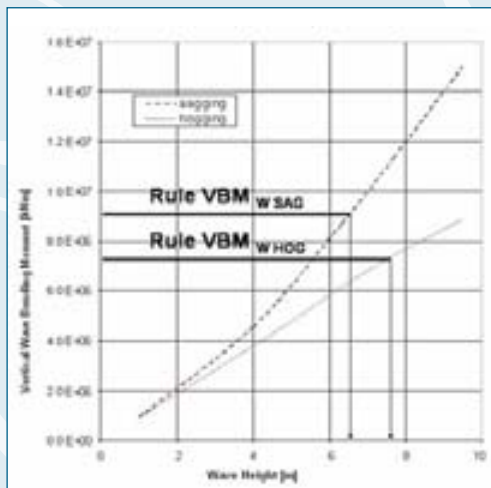
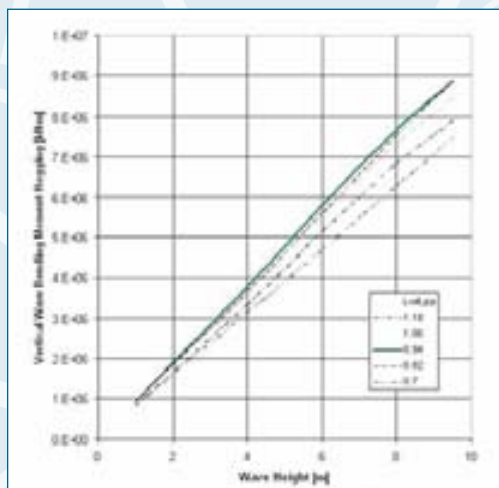


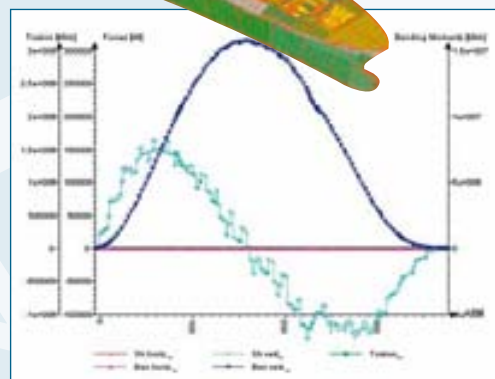
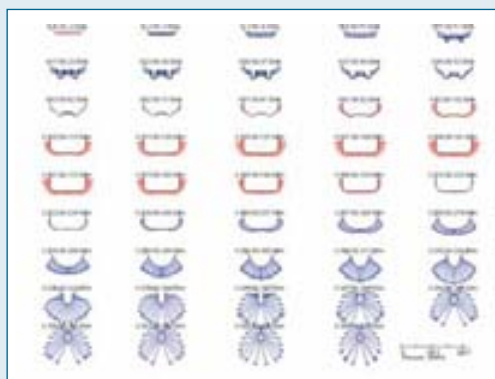
ABBILDUNG 4.  
Auswahl der kritischen Wellenlänge (Lw = Wellenlänge, Lpp = Schiffslänge).

ABBILDUNG 5.  
Auswahl der Entwurfswellenhöhe.

## Äquivalentes Entwurfswellen-Konzept

## Exemplarische Analyse eines Containerschiffes

ABBILDUNG 6. Hydrodynamische Drücke, Schnittlasten und Verformungen bei maximalem vertikalen Biegemoment.



→ Zusätzliche Lastparameter können verwendet werden. Falls beispielsweise Slamminglasten für den Entwurf maßgebend sind, müssen die vertikalen Beschleunigungen der Schiffsen den auch als relevante Parameter angesehen werden.

Zahlreiche Wellensituationen werden durch systematische Variation der Wellenlänge, der Wellenbergposition (Phase) und der Wellenrichtung analysiert. Für jeden berücksichtigten Ladefall werden letztendlich etwa 20 Lastfälle für die FE-Analyse ausgewählt. Basierend auf den oben aufgeführten globalen Schnittlasten erleichtert GL ShipLoad die automatische Auswahl von Wellenparametern. Die Wellenhöhe wird hier nicht als Variable verwendet. Diese wird als sogenannte Entwurfswellenamplitude aus dem vertikalen Biegemoment nach Vorschrift ermittelt und nur noch in Abhängigkeit von Wellenlänge und Phasenwinkel angepasst.

aus einer Vielzahl harmonischer Wellen diejenigen auswählt, die den kritischen Lastenkombinationen entsprechen. Amplituden von Entwurfswellen werden so bestimmt, dass nur eine Welle die jeweilige Entwurfslast erreicht, während keine der anderen Wellen höhere Lasten verursachen.

Im Allgemeinen sind diese Berechnungen umfangreich. Um sie zu beschleunigen, können daher von der Klassifikationsgesellschaft ein oder mehrere sogenannte DLPs (Dominant Load Parameters) festgelegt werden. Solche Lastfälle basieren auf Erfahrungen mit ähnlichen Schiffen und geben kritische Wellenlastbedingungen wieder.

## Äquivalentes Entwurfswellen-Konzept

Das äquivalente Entwurfswellen-Konzept ist ein Kompromiss aus einem vorschriftenbasierten Lastenkonzept und physikalisch direkt berechneten Lasten. Die zugrunde liegende Annahme: Wenn die Schiffsstruktur den angenommenen Lasten standhält, die von ausgewählten Entwurfswellen verursacht werden, ist sie ausreichend dimensioniert. GL ShipLoad implementiert diesen Ansatz dadurch, dass es

## Exemplarische Analyse eines Containerschiffes

Nachfolgend wurde die globale FE-Analyse für ein 13 000-TEU-Containerschiff exemplarisch durchgeführt. Abb. 3 zeigt das FE-Modell und Tab. 1 dessen Hauptdaten.

Die Massen für das FE-Modell wurden in geeignete Gruppen unterteilt, wie z.B. Ballast- und Treibstofftanks oder auch Laderaum- und Deckscontainer, und entsprechend dem zu berücksichtigenden Ladefall auf die Knoten des FE-Modells verteilt. Die Bewegungen des Schiffes wurden für den Bemessungstiefgang und für zwei Drittel der Dienstgeschwindigkeit analysiert. Eine Streifenmethode löste das lineare Bewegungsverhalten des Schiffes. Nach

Länge zwischen den Loten	366,0 m
Breite auf Spanten	54,2 m
Seitenhöhe	27,7 m
Tiefgang	15,0 m
Dienstgeschwindigkeit	26,0 kn

TABELLE 1. Hauptdaten des Schiffs.



ABBILDUNG 7. Typischer Risschaden an einer Lukenecke.

Blume [8] wurde die viskose Rolldämpfung berücksichtigt, und nach Hachmann [7] wurde die nicht linear korrigierte hydrodynamische Druckverteilung in Wellen endlicher Amplitude ermittelt.

Zur Bestimmung der Entwurfswellenamplitude wurde im ersten Schritt die kritische Wellenlänge ermittelt. D.h., es galt die Wellenlänge zu finden, bei der für eine gegebene Amplitude das höchste vertikale Biegemoment erreicht wird. Dieser sogenannte Dominant Load Parameter (DLP) wurde durch einen Vergleich der Ergebnisse ermittelt (Abb. 4). Für das hier un-

tersuchte Schiff betrug die kritische Wellenlänge 94 Prozent der Schiffslänge.

Gemäß [2] muss die kleinstmögliche Wellenhöhe, die das maximal erforderliche Wellenbiegemoment nach Vorschrift (VBMWH) hervorruft, als Entwurfswellenhöhe verwendet werden. Für dieses Schiff waren die VBMWH-Werte  $7,38 \times 10^6$  kNm in der Hogging-Welle und  $8,93 \times 10^6$  kNm in der Sagging-Welle. Die dazu ermittelten Wellenhöhen beliefen sich auf 7,82 m im Hogging und 6,34 m im Sagging (vgl. Abb. 5).

Für die systematische Analyse der globalen Belastung im Seegang wurden Wellenlängen von 0,35 bis 1,2 der Schiffslänge untersucht. Die Wellenrichtung variierte zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  in  $30^\circ$ -Intervallen. Für jede Kombination aus Wellenlänge und -richtung wurden 50 verschiedene Wellenbergpositionen in äquidistanten Schritten über die Länge des Schiffes berücksichtigt. Aus insgesamt 9500 möglichen Szenarien des Schiffs in regulären Wellen wurden 20 Entwurfslastfälle für jeden Ladefall ausgewählt. Die Auswahl erfolgte durch Vergleich der Schnittmomente für vertikale und horizontale Biegung und Torsion, um die von der Klassifikationsgesellschaft vorgegebenen Hüllkurven dieser Momente anzunähern [9].

Typische Ergebnisse für eine Seegangssituation mit maximaler vertikaler Biegung werden in Abb. 6 gezeigt. Dargestellt sind die hydrodynamischen Drücke, die auf 44 Querschnitte des Schiffes einwirken, sowie die Verteilung der Schnittlasten (Querkräfte, Biege- und Torsionsmomente), die auch die Glattwasserkräfte →

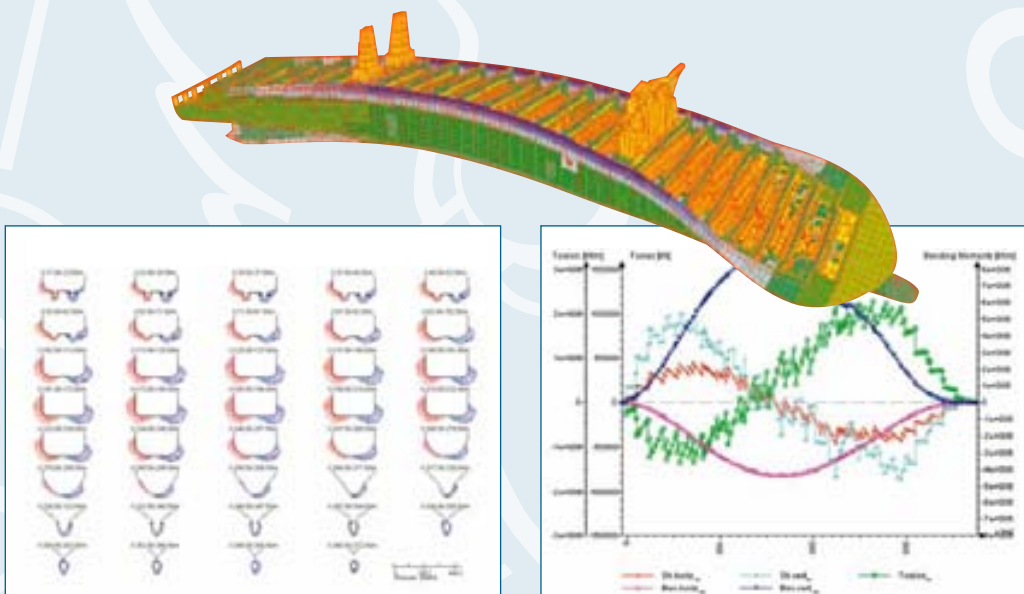


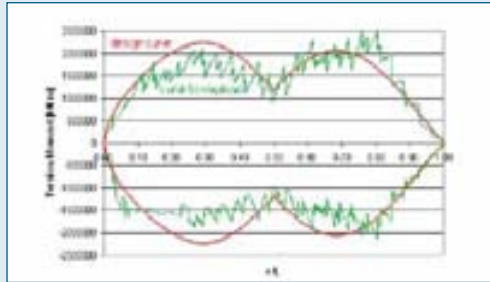
ABBILDUNG 8: Hydrodynamische Drücke, Schnittlasten und Verformungen des Schiffs für eine Rollbewegung von  $16^\circ$  nach steuerbord.



## Rollbewegungen

## Schlussfolgerung, Literatur

ABBILDUNG 9:  
Hüllkurven der  
Torsionsmomente.



→ und -momente mit einschließen. Die resultierende Verformung des FE-Modells ist überhöht dargestellt.

## Rollbewegungen

Der für moderne Containerschiffe charakteristische offene Laderaumbereich führt zu einer geringen Torsionssteifigkeit. Abb. 7 zeigt einen typischen Betriebsfestigkeitsschaden, der in einer Lukenecke eines Post-Panamax-Containerschiffes aufgetreten ist.

Hohe Torsionsmomente werden insbesondere im vorderen Laderaumbereich größtenteils durch Rollbewegungen induziert. Um diese zusätzlichen Torsionsmomente aus der Rollbewegung realistisch simulieren zu können, wird ein erzwungener Rollwinkel als zusätzlicher Eingangsparameter für die Lastenanalyse mit GL ShipLoad spezifiziert. Um die für Schiffsstrukturen relevanten Belastungsfälle zu erhalten, wird davon ausgegangen, dass extreme Rollwinkel und maximale vertikale Biegung nicht gleichzeitig auftreten. Dazu wird das Schiff zu erzwungenen Rollbewegungen nur mit reduzierten Wellenamplituden, wie von der Richtlinie für FE-Analysen [2] vorgegeben, analysiert. Die Analyse hier wurde mit Rollwinkeln von  $9,2^\circ$  und  $16,0^\circ$  nach backbord bzw. steuerbord durchgeführt. Für diese Rollwinkel wurde die Wellenamplitude auf 86 bzw. 50 Prozent der Entwurfsamplitude reduziert.

Abb. 8 zeigt die Ergebnisse mit einem Rollwinkel von  $16,0^\circ$  nach steuerbord. Im Bereich der vorderen Laderäume erreichte das Torsionsmoment (grüne Kurve) seinen Maximalwert. Abb. 9 zeigt die Hüllkurve für das Torsionsmoment. Die gezackte (grüne) Kurve stellt die Ergebnisse von GL ShipLoad dar und die glatte (rote Kurve) die regelbasierten Werte. In beiden Fällen wurden vergleichbare Werte über die gesamte Schiffslänge ermittelt.

## Schlussfolgerung

Die Ermittlung von Lasten, die auf dem Prinzip der Entwurfswelle basieren, erfordert eine Auswahl von Lastkombinationen, die für die Dimensionierung der Schiffsstruktur relevant ist. GL ShipLoad wurde entwickelt, um realistische Lasten für globale strukturelle FE-Analysen von Verdrängungsschiffen zu erzeugen.

Für große Containerschiffe werden FE-Analysen standardmäßig durchgeführt, um deren Festigkeit zu überprüfen und konstruktionsbedingte Unsicherheiten zu minimieren. Um alle kritischen Lastkombinationen berücksichtigen zu können, werden die relevanten Entwurfslastfälle in der entsprechenden Richtlinie [2] vorgegeben. GL ShipLoad ermöglicht es, auch ohne detaillierte hydrodynamische Fachkenntnisse alle notwendigen Schritte zur Lastfallgenerierung durchzuführen.

## Literatur

- [1] Payer, H. G.; Fricke, W.: Rational Dimensioning and Analysis of Complex Ship Structures, SNAME Trans., Vol. 102, 1994, 395–417.
- [2] Germanischer Lloyd: Rules for Classification and Construction, V, Part 1, Chapter 1, Section 2 – Global Strength Analysis for Containership Structures, Hamburg, 2007.
- [3] Shi, B.; Liu, D.; Wiernicki, C.: Dynamic Loading Approach for Structural Evaluation of Ultra Large Container Carriers, SNAME Trans., Vol. 113, 2005, 402–417.
- [4] Cabos, C.; Eisen, H.; Krömer, M.: GL ShipLoad: An Integrated Load Generation Tool for FE Analysis, Proc. 5th Int. Conf. on Computer Application and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT), Grimmelius, H. T. (ed.), Delft University of Technology, Oegstgeest, The Netherlands, 2006, 199–210.
- [5] Eisen, H.; Cabos, C.: Efficient Generation of CFD-Based Loads for the FEM-Analysis of Ship Structures, Proc. Int. Conf. on Applications in Shipbuilding (ICCAS), Vol. II, Portsmouth, U.K., 2007, 91–98.
- [6] Ryu, H. R.; Jung, B. H.; Probst, J.-O.; Rörup, J.; Priebe, T.: Advanced Structural Analysis for 8000 TEU Class Container Carrier by Wave Load Analysis Method Combined with Roll Motion, Proc. 9th Symp. on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Lübeck, Germany, Schiffbautechnische Gesellschaft, 2004, 87–92.
- [7] Hachmann, D.: Calculation of Pressures on a Ship's Hull in Waves, J. Ship Tech. Res., Vol. 38, 1991, 11–132.
- [8] Blume, P.: Experimentally Determined Coefficients for Effective Roll Damping and Application to Estimate Extreme Roll Angles, J. Ship Tech. Res., Vol. 26, 1979, 3–23 (deutsch).
- [9] Germanischer Lloyd: Rules for Classification and Construction I, Part 1, Chapter 1 – Hull Structures, Hamburg, 2007.