

Per Simulation durch die Nordsee

Duisburger Computermodell senkt Kraftstoffverbrauch bei RoRo-Schiffen

„An jenem Tag ließ man das Tor des Schiffes öffnen und man brachte all unsere Pferde hinein, die wir übers Meer mitnehmen sollten. Dann schloss man das Tor wieder und dichtete es gut ab, wie man ein Fass abdichtet, weil das ganze Tor unter Wasser liegt, wenn das Schiff auf See ist.“ So schilderte Jean de Joinville, Biograph des französischen Königs Louis IX. seine Beobachtung beim Transport von Kriegsgerät für den 6. Kreuzzug von 1248 bis 1254 – wahrscheinlich eine der ersten Beschreibungen eines RoRo-Schiffes in der Geschichte. Heute transportieren moderne RoRo-Schiffe statt Kriegsgerät Wirtschaftsgüter. Sie verkehren im Linienverkehr auf festen Routen; Verspätungen sind teuer. Deshalb arbeitet das Duisburger Institut für Schiffstechnik und Transportsysteme (IST) in Kooperation mit der Flensburger Schiffbau Gesellschaft (FSG) an Simulationsmodellen, die den pünktlichen und energiesparenden Betrieb von RoRo-Schiffen verbessern sollen.

Um ein wirtschaftliches und energiesparendes RoRo-Schiff (Abb. 1) zu einem konkurrenzfähigen Preis zu bauen, muss man bereits beim Entwurf die wesentlichen Umwelteinflüsse berücksichtigen, die zu Verspätungen führen können. Dazu wird der Schiffsbetrieb im Computer simuliert und statistisch ausgewertet. Die Ergebnisse ermöglichen unter anderem eine optimale Dimensionierung der Antriebsanlage. Neben den zeitlich veränderlichen Umwelteinflüssen wie Wind, Seegang und Tideströmung birgt in vielen Seegebieten besonders die Wassertiefe ein bemerkenswertes Potenzial zur Einsparung wertvollen Treibstoffes. Steigende Ölpreise und wachsendes Umweltbewusstsein dürften dieses Potenzial in naher Zukunft verstärkt in das Interesse der Reedereien rücken.

Im Rahmen ihres gemeinschaftlichen Forschungsvorhabens mit der FSG wurde von den Duisburger Wissenschaftlern mit Hilfe einer so genannten genetischen Optimierung eine an das je-

weilige Wassertiefenprofil angepasste Geschwindigkeitsverteilung ermittelt. Dieses Fahrprofil wird anschließend einer aufwändigen Computersimulation zugrunde gelegt.

300 Gigabyte Daten

Dabei wird der Schiffsbetrieb anhand von räumlich und zeitlich aufgelösten Werten für insgesamt 17 verschiedene Umweltparameter simuliert. Die Daten stammen aus Nachrechnungen von Klimaprozessen, welche in dem EU-Vorhaben HIPOCAS (Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe) unter anderem vom GKSS-Forschungszentrum (Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt mbH) in Geesthacht durchgeführt wurden. Sie liegen für das Gebiet der südlichen Nordsee vor. Bei einer räumlichen Auflösung von etwa fünf Kilometern in Breiten- und Längsrichtung sind die Daten für den Zeitraum von 1958 bis 2000 stundenweise in einer Datenbank abgelegt. Daraus ergibt sich ein Datenvolumen von mehr als 300 Gigabyte.



Abbildung 1:
Modernes RoRo-Schiff
(hier: Computermodell eines
Neubaus der Flensburger
Schiffbau Gesellschaft für die
türkische Reederei U.N.RoRo)

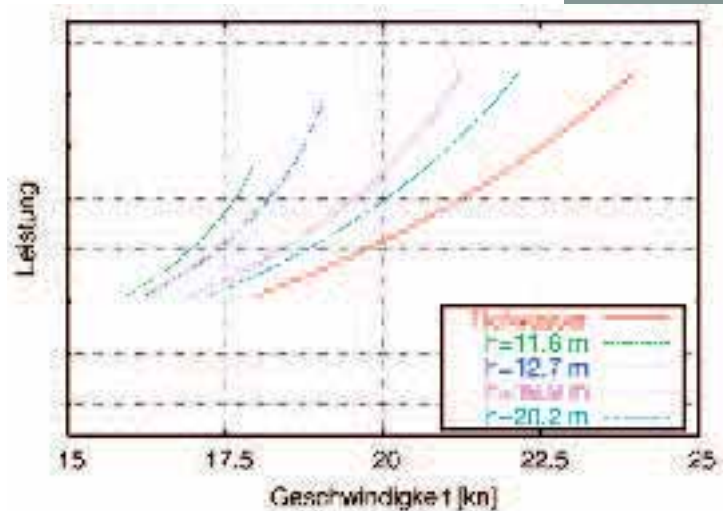


Die untersuchten Routen werden durch geographische Koordinaten von Wegpunkten beschrieben, an denen das Schiff seinen Kurs wechselt. Zwischen diesen Punkten verläuft die Route entlang von so genannten Orthodromen. Orthodrome sind Segmente von Großkreisen. Dabei versteht man unter einem Großkreis einen größtmöglichen Kreis auf einer Kugeloberfläche, dessen Mittelpunkt immer mit dem Mittelpunkt der Kugel zusammenfällt. Im geographischen Koordinatensystem der Erde sind alle Längengrade sowie der Äquator solche Großkreise. Ein Orthodrom ist die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten auf der Kugeloberfläche.

Im Laufe der Simulation werden an einer frei wählbaren Anzahl ortsfester Punkte die berücksichtigten Wetterdaten aktualisiert. Jedem dieser Punkte wird ein ihn umgebender Streckenabschnitt mit gleich bleibender Wassertiefe und konstantem Kurs zugeordnet.

Flachwassereinfluss

Eine verringerte Wassertiefe erfordert durch Beeinflussung des Wellensystems und der Schiffs-

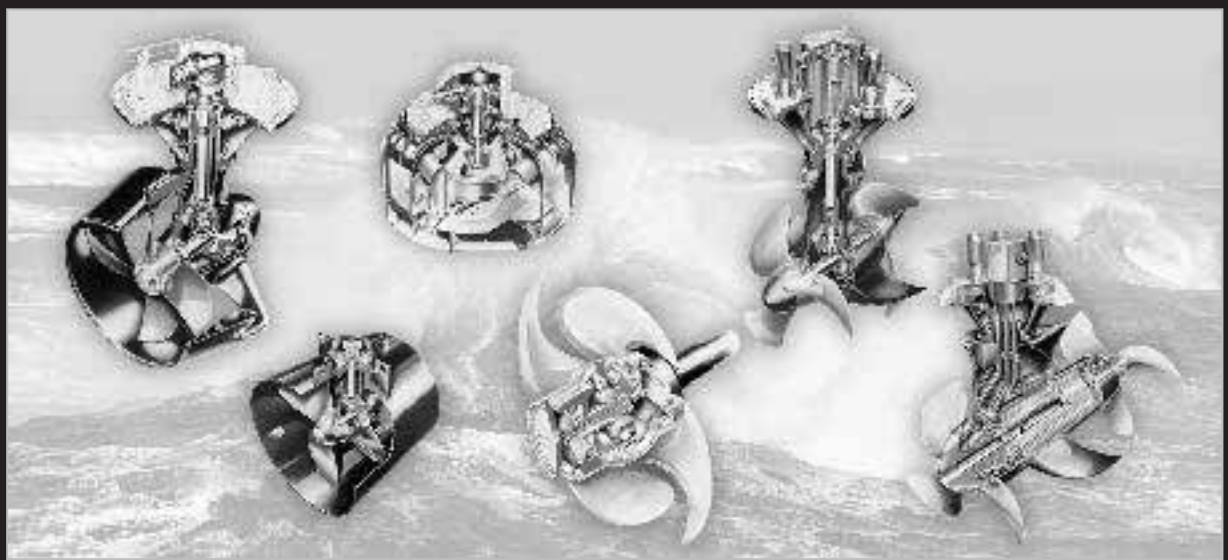


umströmung eine Steigerung der Leistung, welche zum Erreichen einer vorgegebenen Geschwindigkeit benötigt wird. Analog sinkt bei konstanter Leistung und niedriger Wassertiefe die Fahrgeschwindigkeit (Abb. 2). Je nach Schiffsgeschwindigkeit beginnt dieser Einfluss bereits bei Wassertiefen von rund 40 Metern. Somit müssen große Teile der Nordsee (Abb. 3), aber auch fast die gesamte Ostsee als Flachwasser bezeichnet werden.

Abbildung 2: Abhängigkeit der erforderlichen Antriebsleistung von der Wassertiefe

ANZEIGE

SCHOTTEL for the Shipping World



Unser Produktprogramm umfasst rundum steuerbare Antriebs- und Manövriersysteme sowie komplette konventionelle Antriebsanlagen bis 30 MW Leistung. Über unser weltweites Vertriebs- und Servicenetz bieten wir wirtschaftliche und zuverlässige Lösungen für Schiffe aller Art und Größe.

Innovators in propulsion technology



SCHOTTEL GmbH & Co. KG · Mainzer Str. 99 · D-56322 Spay/Rhein
Tel.: + 49 (0) 26 28 / 6 10 · Fax: + 49 (0) 26 28 / 6 13 00 · eMail: info@schottel.de · www.schottel.de

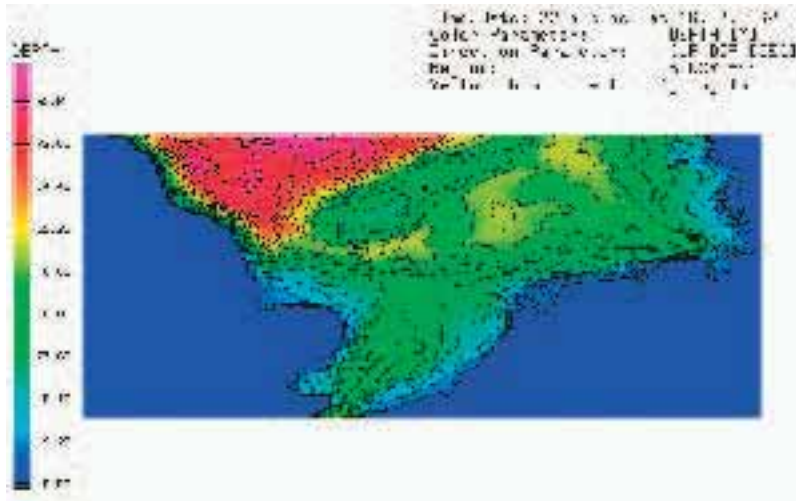


Abbildung 3: Visualisierung der Wassertiefen im Bereich der südlichen Nordsee (HIPOCAS-Daten für die Simulation des Fahrbetriebs in der südlichen Nordsee zwischen 1958 und 2000).

Die Leistungskurven bei verschiedenen Wassertiefen werden mit der Methode der Effektivgeschwindigkeit berechnet. Dieses Verfahren wurde am Duisburger Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme (DST), einem An-Institut der Universität Duisburg-Essen, von Tao Jiang entwickelt. Da eine Berücksichtigung aller in der Datenbank entlang einer Route vorkommenden Wassertiefen zu aufwändig wäre, arbeitet das Programm mit einer anwendergestützten Diskretisierung der Wassertiefen, d.h. der Anwender gibt vor, in welchen Bereichen die Wassertiefe als konstant angenommen werden soll. Dadurch kann bei geringem Genauigkeitsverlust eine abschnittsweise konstante Wassertiefe unterstellt werden. Auf Streckenabschnitten mit geringer Tiefenänderung oder mit geringem Einfluss durch eine relativ große Wassertiefe genügt eine grobe Einteilung. Dies verringert zum einen den Speicher- und Rechenaufwand der Simulation erheblich. Zum anderen ermöglicht es die nachstehend beschriebene Optimierung des Geschwindigkeitsprofils durch eine reduzierte Anzahl der Freiheitsgrade.

Fahrprofile

Im Laufe der Simulation müssen bei verschiedenen Wassertiefen möglichst realistische Fahrtzustände berücksichtigt werden. Hierzu wurden verschiedene so genannte Fahrprofile implementiert und untersucht.

- Das einfachste Fahrprofil ist die Vorgabe einer konstanten Geschwindigkeit, sofern diese mit der installierten Antriebsleistung bei gegebener Wassertiefe zu erreichen ist. Dieses Profil berücksichtigt den vorgegebenen Fahrplan durch eine gleich bleibende Reisedauer, solange die Wetterbedingungen nicht zu einer unvermeidbaren Geschwindigkeitsreduktion

führen. Allerdings führt die wassertiefenunabhängige Geschwindigkeitsvorgabe in flachen Routenabschnitten zu sehr hohen Anforderungen an die Antriebsanlage. Für die zusätzliche Berücksichtigung der Einflüsse von Wind und Seegang bleiben dann nur noch geringe Reserven. Zudem steigt bei hohen Geschwindigkeiten im Flachwasser der Treibstoffverbrauch erheblich.

- Als zweites Fahrprofil wurde eine konstante Leistung vorgegeben. Dieses Profil führt zwar zu einer plausiblen Geschwindigkeitsreduktion in flachem Wasser, jedoch auch zu einer sehr starken Streuung der Reisedauer. Minimale Einflüsse durch Wind und Seegang bewirken so bereits eine unakzeptable Verschiebung der Ankunftszeit.

Die Vorteile der beiden beschriebenen Profile können jedoch durch die Vorgabe abschnittsweise konstanter und wassertiefenabhängiger Geschwindigkeiten verbunden werden. Genauere Untersuchungen ergaben, dass das Geschwindigkeitsprofil, welches sich bei konstanter Leistung einstellt, noch nicht das Optimum darstellt. Eine zusätzliche Fahrtreduktion bei geringen Wassertiefen, welche in tieferem Wasser durch entsprechend größere Geschwindigkeiten ausgeglichen wird, führt zu weiteren Einsparungen im Kraftstoffverbrauch.

Zur Ermittlung der Geschwindigkeitsverteilung entlang der Route mit dem geringsten Treibstoffbedarf wird zur Vorbereitung der eigentlichen Simulation eine Optimierung durchgeführt. Das Ergebnis steht anschließend als drittes Fahrprofil für die Simulation zur Verfügung (Abb. 4 auf Seite 16).

Optimierung

Zur Optimierung des Geschwindigkeitsprofils wird die oben beschriebene Diskretisierung der Route anhand der Wassertiefe verwendet. Die zeitabhängigen Parameter wie Wind, Seegang und Strömung bleiben unberücksichtigt. Als Stellgrößen dienen die abschnittsweise für jede diskretisierte Wassertiefe konstanten Geschwindigkeiten. Die zu minimierende Zielfunktion ist der Gesamtreibstoffbedarf der Reise. Als Randbedingung muss eine vorgegebene Reisedauer eingehalten werden. Zusätzlich darf in keinem Routenabschnitt die Geschwindigkeit bzw. der damit verbundene Leistungsbedarf außerhalb der entsprechenden Grenzen des untersuchten Schiffes liegen.

Die Optimierung erfolgt auf der Grundlage eines so genannten genetischen Algorithmus. Dabei

Funktionsweise der Optimierung



Die Optimierung erfolgt in Anlehnung an die Evolution nach einem so genannten genetischen Algorithmus. Zunächst wird eine beliebige Einzellösung, welche alle Randbedingungen erfüllt, ermittelt. Daraus generiert das Programm durch wahllose Variation der einzelnen Parameter, jedoch unter Einhaltung der Randbedingungen eine zufällig gewählte Population von beispielsweise vierzig plausiblen Einzellösungen. Auf dieser Population basierend wird in jedem Schleifendurchlauf, sozusagen für jede Generation, durch zwei verschiedene Mutationsmechanismen eine dreimal so große Zwischenpopulation generiert.

Beide Mutationen halten grundsätzlich die vorgegebene Reisedauer ein. So wird eine reduzierte Geschwindigkeit auf einem Routenabschnitt durch eine Geschwindigkeitssteigerung in einem anderen Abschnitt kompensiert. Der erste Mechanismus verändert die Gene (Geschwindigkeiten) der vorherigen Population nach dem Glättungsprinzip. So werden Elemente mit extremen Geschwindigkeiten auf einzelnen Abschnitten zügig zu plausiblen Lösungen weiterentwickelt. Der zweite Mechanismus mutiert zufallsbasiert, aber nutzt das Prinzip einer anderen Optimierungsmethodik. Mit fortschreitender Verbesserung der Lösungen wird die maximale Sprungweite der zur Mutation vorgenommenen Geschwindigkeitsänderungen herabgesetzt.

Dies entspricht der fiktiven Temperatur der so genannten Simulated Annealing-Algorithmen, welche sich an dem Modellbild des Erstarrungsprozesses eines Kristalls, bei dem sich ein optimaler Energiezustand einstellt, orientieren.

Für jede der enthaltenen Einzellösungen wird die Zielfunktion ausgewertet und das Drittel mit den günstigsten Treibstoffverbräuchen für die folgende Generation verwendet. Verbessert sich der

geringste Verbrauch über eine einstellbare Anzahl von Durchläufen nicht weiter, so wird der Vorgang beendet und das günstigste Ergebnis ausgegeben. Zur Anpassung der Optimierung an die Anzahl der Freiheitsgrade oder die Randbedingungen der Hardware sind die Populati-

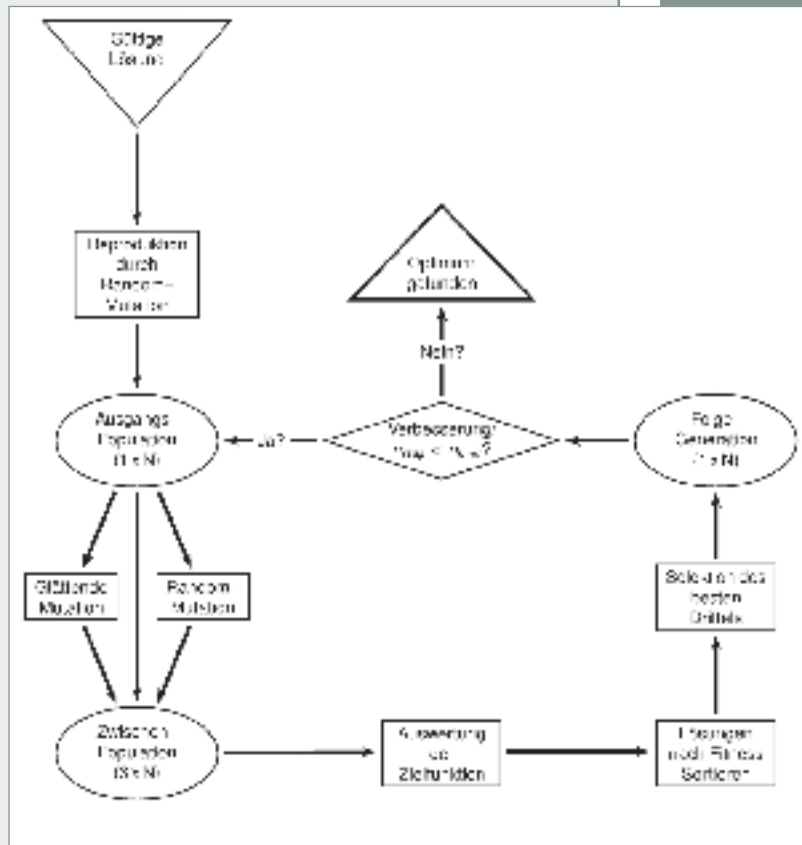


Abbildung A: Schematisches Modell des eingesetzten genetischen Algorithmus.

onsgröße, der Temperaturgradient sowie die maximale Anzahl von Iterationen ohne weitere Verbesserung frei einstellbar.

Mit den so gewonnenen optimalen Geschwindigkeiten wird anschließend der Schiffsbetrieb unter realistischen Bedingungen untersucht. In einer Computersimulation fährt das Schiff immer wieder durch das Nordseewetter des vergangenen halben Jahrhunderts.

erzeugt man – ähnlich wie bei der biologischen Evolution – eine Anzahl von Individuen und wählt diejenigen aus, die einem bestimmten Gütekriterium am besten entsprechen. Deren Eigenschaften werden dann leicht verändert und miteinander kombiniert, um eine neue Generation von Individuen zu erzeugen (vgl. Kasten Expertenwissen und Abb. A).

Die Computersimulation des Liniendienstes von RoRo-Schiffen auf vorgegebenen Routen wird

mit einer Vielzahl von Parametern kontrolliert. So kann wahlweise innerhalb der durch die Daten abgedeckten Periode von 43 Jahren der Zeitraum zwischen einer beliebigen Start- und einer Endstunde simuliert werden, oder der Anwender wählt einen periodisch wiederkehrenden Zeitraum aus. Letzteres eignet sich beispielsweise für die Untersuchung ausgewählter Wintermonate mit besonders schwierigen Wetterbedingungen. Innerhalb des gewählten Zeitrahmens können vollständige Rundreisen oder ausschließ-

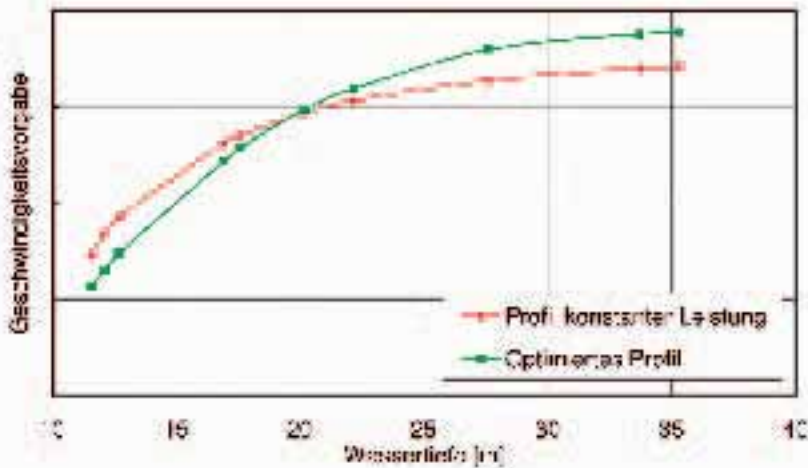


Abbildung 4:
Leistungsprofil vor und
nach der Optimierung.

lich Hin- oder Rückreisen simuliert werden. Auch die Vorgabe fester Tageszeiten für die Abreise oder betriebsbedingter Pausen für den Umschlag der Ladung ist möglich. Des Weiteren können zahlreiche Beiwerte zur Beschreibung der Antriebsanlage oder zur Auswertung der Einflüsse von Wind und Seegang an die speziellen Bedingungen des untersuchten Schiffsentwurfs angepasst werden.

Zusätzlich zu den genannten Parametern können im Vorfeld auch einige Einstellungen für die Auswertung der Simulation vorgenommen werden. So kann der Anwender aus der nachstehenden Liste die für die Analyse relevanten Größen auswählen:

- **Reisedauer:** Zur Quantifizierung der Verspätungen wird für jede simulierte Reise die benötigte Zeitdauer ausgewertet.
- **Treibstoffverbrauch:** Für eine detaillierte Prognose der zu erwartenden Betriebskosten wird der summierte Treibstoffverbrauch jeder Reise klassiert.
- **Distanz:** Während die zurückgelegte Distanz über Grund bei fest vorgegebenen Wegpunkten konstant ist, variiert die durch das Wasser zu fahrende Distanz in Folge der Oberflächenströmung.

Im Verlauf jeder Reise können, sofern gewünscht, die nachstehenden weiteren Größen klassiert und in die Ausgabedatei eingetragen werden:

- Leistungsbedarf
- Schiffsgeschwindigkeit
- Tiefen-Froudezahl (dimensionslose, wassertiefenabhängige Geschwindigkeit)
- Signifikante Wellenhöhe
- Wellenperiode
- Wellenbegegnungswinkel
- Zusatzwiderstand durch Seegang
- Windgeschwindigkeit

- Windeinfallswinkel
- Zusatzwiderstand durch Wind
- Geschwindigkeit der Oberflächenströmung
- „Einfallswinkel“ der Strömung

Große Einsparpotenziale

Die Ergebnisse sind hier beispielhaft für die 332 Seemeilen lange Rundreise eines 200-m-RoRo-Schiffes zwischen Zeebrügge in Belgien und Immingham in Großbritannien dargestellt. Die Lösung der Optimierung ist ein Profil abschnittsweise konstanter, an die jeweiligen Wassertiefen angepasster Geschwindigkeiten. Abbildung 4 zeigt die optimierten Geschwindigkeiten im Vergleich zu den Werten, die sich aus einer konstanten Leistung ergeben. Setzt man für die oben genannte Rundreise eine Reisedauer von sechzehn Stunden an, so liegt der ermittelte Verbrauch bei dem optimierten Profil bei 38,6 t Schweröl je Reise. Im Vergleich dazu benötigt dasselbe Schiff bei unangepasster Geschwindigkeit über allen auftretenden Wassertiefen 41,8 t. Selbst bei konstant gehaltener Bremsleistung und somit verringerten Flachwassergeschwindigkeiten liegt der Verbrauch noch bei 40,6 t. Bei Annahme eines Schwerölpreises von etwa 160 EUR je Tonne ergibt sich ein Sparpotenzial von bis zu 200.000 EUR jährlich für ein einziges Schiff!

Die Geschwindigkeit der Optimierung liegt deutlich über den anfänglichen Erwartungen. Obwohl mehrere hunderttausend Einzellösungen untersucht werden, liegt das Ergebnis für die Beispielroute mit etwa zwanzig Abschnitten je nach Einstellung der Optimierungsparameter bereits nach ein bis zwei Minuten vor. Selbst eine Erhöhung der Freiheitsgrade auf sechzig Routenabschnitte liefert noch in weniger als einer halben Stunde Rechenzeit ein zufrieden stellendes Ergebnis. Somit eignet sich dieses Verfahren auch für den laufend aktualisierten Einsatz an Bord.

Am Ende einer Simulation werden die Ergebnisse in einer Ausgabedatei zusammengefasst. Dieser Datei lässt sich beispielsweise entnehmen, dass das untersuchte Schiff in zehn Jahren etwa 7% der Reisen verspätet beendet. Diese Verspätung beträgt jedoch nur in 0,5% der Fälle mehr als dreißig Minuten. Die ebenfalls gewonnenen statistischen Lastprofile der Antriebsanlage können von den jeweiligen Zulieferern zur Auslegung einzelner Komponenten verwendet werden. Die Daten über die verschiedenen Wind- und Seegangparameter ermöglichen darüber hinaus eine Optimierung des Schiffsentwurfs hinsichtlich der zu erwartenden Einsatzbedingungen.



Abbildung 5: Visualisierte Simulation eines Ro-Ro-Schiffes im Seegang.

Die hier vorgestellte Methodik liefert vielfältig einsetzbare Ergebnisse für den Schiffsbetrieb auf offener See. Die so genannte Revierfahrt mit ihren komplexen Einflussfaktoren, aber auch Hafenmanöver können mit heutigen Mitteln dagegen bislang nur unzureichend simuliert werden. Die Ausweitung der Methodik auf diese Bereiche ist Bestandteil zukünftiger Projekte des Instituts für Schiffstechnik und Transportsysteme, der FSG und ihrer Forschungspartner.

Der summierte Verbrauch für 3.650 Reisen eines Simulationszeitraums von zehn Jahren liegt etwa 9% über dem Verbrauch des optimierten Wertes in ideal ruhigem Wetter. Diese Differenz entspricht dem gemittelten zusätzlichen Leistungsbedarf in Folge von Wind, Seegang und Strömung.

Kontakt

Dipl.-Ing. Benjamin Friedhoff
Prof. Dr.-Ing. Moustafa Abdel-Maksoud

Schiffstechnik und
Transportsysteme

Tel.: 02 03/3 79-11 73

IST@nav.uni-duisburg.de

<http://www.uni-duisburg-essen.de/IST>



ANZEIGE

MMG-propeller - we are pushing maritime trading ahead



perfection to the last gram



MMG designs and builds fixed-pitch propellers of virtually unlimited dimensions for shipowners and shipyards on all continents - up to 140 tons and 11.3 m diameter. But what really carries weight is our maximum precision, our attention to detail and our unique know-how. With state-of-the-art technology and the world's largest furnace capacity we look forward to accepting your challenge, too.

Mecklenburger Metallguss GmbH, www.mmprop.de

