



Was ist eigentlich... Mehrkörpersimulation

Lehrstuhl Maschinenelemente, Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, Fakultät Maschinenwesen, Technischen Universität Dresden
 Prof. Dr.-Ing. Berthold Schlecht, Dr.-Ing. Thomas Rosenlöcher

In gekürzter Version erschienen im SCHOTTEL Report Nr. 14

Zusammenfassung

Die Auslegung und Dimensionierung von Ruderpropellerantrieben ist aufgrund der vielfältigen Antriebsstrang- und Schiffskonzepte, die unter sehr verschiedenen Betriebsbedingungen operieren müssen und gleichzeitig mit hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit zu konstruieren sind, ein sehr komplexes Aufgabengebiet. Unabhängig vom Einsatzgebiet der Antriebe (Abbildung 1, Abbildung 2) ergeben sich aufgrund der kombinierten Funktion aus Antreiben und Manövrieren (Abbildung 3) sowie der zumeist paarweisen, außermittigen Anordnung gegenüber den klassischen Antriebskonzepten veränderte Auslegungslasten. Neben den auftretenden Torsionsmomenten sind die aus den Ruderbewegungen und den Anströmungsverhältnissen resultierenden Biegemomente um die vertikale Achse für die verschiedenen Betriebsbedingungen zu berücksichtigen, die sich aus den vielfältigen Kombinationen der Lasten für den Propeller und die Gondel ergeben.

Eine Ermittlung der im Betrieb auftretenden Belastungen für die Antriebsstrangkomponenten und die Untersuchung der dynamischen Eigenschaften kann durch den aufwendigen Einsatz umfangreicher Messtechnik in dem Ruderpropellerantrieb oder mit Hilfe detaillierter Simulationsmodelle erfolgen. Bei der messtechnischen Erfassung der Betriebszustände stellen vor allem die schwierigen Umgebungsbedingungen und die fehlende Zugänglichkeit nach der Installation eine große Herausforderung dar, wodurch derartige Messungen nur in Ausnahmefällen zur Bereitstellung der erforderlichen Daten herangezogen werden können. Der Aufbau eines Simulationsmodells für den Antriebsstrang eines



Abbildung 1: Schlepper [Schottel]



Abbildung 2: Offshore supply vessel [Schottel]



Abbildung 3: SRP Ruderpropeller [Schottel]



Ruderpropellerantriebs ist jedoch bereits im Produktentwicklungsprozess möglich.

Aufbau der Mehrkörpersystem(MKS)-Modelle

Der Einsatz der Methode der Mehrkörpersysteme (MKS) erfordert eine Diskretisierung der realen Struktur in einzelne starre Körper unter Vorgabe der Freiheitsgrade sowie der koppelnden, masselosen Feder-Dämpfer-Elemente. Mit Hilfe von Simulationsprogrammen werden die Bewegungsdifferentialgleichungen des schwingungsfähigen Systems durch Einsatz numerischer Algorithmen gelöst und die Eigenfrequenzen, Eigenschwingformen sowie die Zustandsgrößen an den definierten Masse- und Feder-Dämpfer-Elementen bereitgestellt.

Den Ausgangspunkt der Modellerstellung bildet die Ermittlung der Parameter zur Beschreibung starrer Körper in Form der Position, der Masse, der Massenträgheitsmomente und des Schwerpunktes auf Grundlage von CAD-Modellen. Durch die verbindenden Wellen wird die Torsionssteifigkeit des Antriebsstranges hauptsächlich beeinflusst, wobei vor allem schlanke Wellen mit ihren elastischen Eigenschaften zu berücksichtigen sind (Abbildung 4, Abbildung 5). Zusätzlich ergeben sich aus den Biegesteifigkeiten solcher Wellen nicht vernachlässigbare Einflüsse auf das dynamische Verhalten und die zu erwartenden Verlagerungen.

Aufbauend auf einfachen Torsionsschwingermodellen sind in weiteren Modellierungsschritten die Modelle um die axialen und radialen Freiheitsgrade zu erweitern und dabei zusätzlich die Eigenschaften der Lager abzubilden. Grundsätzlich wird die Charakteristik beliebiger Lager mit Hilfe von Krafterelementen modelliert, in denen die Reaktionskräfte in axialer und radialer Richtung sowie gegebenenfalls die Reaktionsmomente auf Grundlage der Verlagerungen und Verkippungen ermittelt und eingeleitet werden. Der Zusammenhang zwischen den Zustandsgrößen und den Kräften bzw. Momenten wird über die Lagersteifigkeiten hergestellt, die in Form eines mittleren Wertes, als Kennlinie oder komplexes Kennfeld eingebunden werden können.

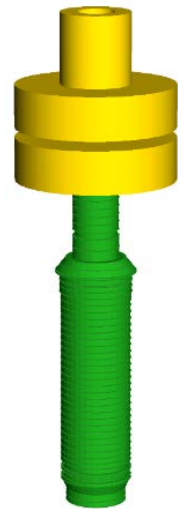


Abbildung 4:
MKS-Modell Welle Kupplung

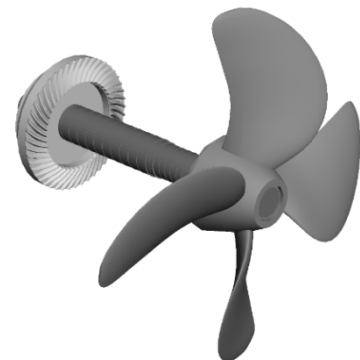


Abbildung 5:
MKS-Modell Propellerwelle



Zur Übersetzung der Drehzahl des schnellaufenden Motors auf die Propellerdrehzahl und gleichzeitiger Weiterleitung der Drehmomente zwischen vertikalem und horizontalem Wellenstrang werden Kegelradstufen eingesetzt (Abbildung 6), die aufgrund der komplexen Kraftverhältnisse und veränderlichen Steifigkeiten im Zahneingriff das dynamische Verhalten des gesamten Antriebsstranges beeinflussen. Eine detaillierte Modellierung des Getriebes mit allen relevanten Komponenten und Freiheitsgraden ist daher von großer Bedeutung.

Durch eine detaillierte Abbildung des Antriebes, der Kupplungen, Wellen und Verzahnungen wird die Beschreibung der dynamischen Wechselwirkungen zwischen den Komponenten möglich. Auch wenn dabei bereits durch Freischaltung der rotatorischen und translatorischen Freiheitsgrade die Bauteile gegenüber dem starren Referenzsystem mit Feder-Dämpfer-Elementen gelagert sind, bleiben die Nachgiebigkeit der umgebenden Struktur (Gondelgehäuse, Abbildung 7) unberücksichtigt. Zur Abbildung dieser Elastizitäten kann das steife Mehrkörpersystem-Simulationsmodell mit Hilfe von modal reduzierten Finite-Elemente-Modellen erweitert werden.

Propellerseitige Lasten

Neben den Variationen der Lasten im Normalbetrieb, sollen die Simulationsmodelle auch zur Bewertung und zur Ermittlung der auftretenden Komponentenlasten beim Eintreten von Sonderlastfällen eingesetzt werden. Eine theoretische Beschreibung möglicher Überlastszenarien ist auf Grundlage der Betriebserfahrungen von Betreibern und Herstellern möglich. Daraus resultiert eine erste grundlegende Analyse möglicher Sonderlastfälle mit der Zielstellung durch Variation der Parameter die schädigenden Mechanismen einzugrenzen und mit detaillierteren Angaben zu den Lastfällen bzw. Messungen die Erkenntnisse zu validieren.

Ein Sonderlastfall kann bei hohem Wellengang durch das Krängen des Schiffes und die Verringerung des Abstandes



Abbildung 7: Elastisches Gehäusemodell

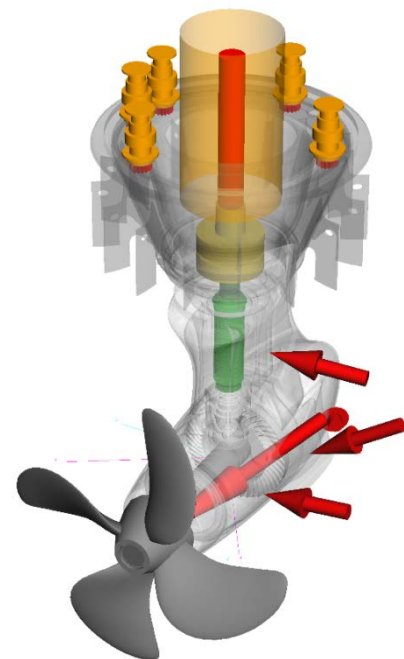


Abbildung 8: Gehäuselasten

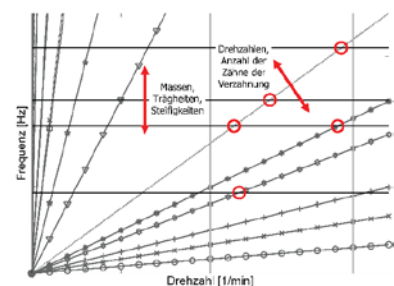


Abbildung 9: Campbell-Diagramm

Abbildung 6: MKS-Modell Kegelradstufe



zwischen Propeller und Wasseroberfläche auftreten. Durch das Ansaugen von Luft kommt es zur Schubreduktion und bei weiterer Annäherung an die Oberfläche zum Austausch der Blätter. Der Wiedereintritt in das Wasser verursacht einen schlagartigen Anstieg der Propellerblattlast, der über die Propellerwelle auch in den Antriebsstrang weitergeleitet wird. Weitere kritische Betriebszustände ergeben sich beim Kontakt der Propellerblätter mit Fremdkörpern im Wasser, zu denen beim Einsatz der Antriebe unter entsprechenden Bedingungen Eisschollen und schwimmende Gegenstände zu zählen sind.

Bewertung der Anregbarkeit

Die erarbeiteten Simulationsmodelle der Ruderpropellerantriebe ermöglichen die Berechnung der Eigenfrequenzen und die Abbildung der charakteristischen Schwingformen, durch die das Verhalten des Gesamtsystems beschrieben ist. Inwieweit die Eigenschwingformen bei den einzelnen Eigenfrequenzen jedoch gegebenenfalls angeregt werden und Resonanzen im Betriebsdrehzahlbereich auftreten, ist mit der Ermittlung der Eigenwerte noch nicht möglich. Erst durch eine Prüfung der Anregbarkeit können detaillierte Aussagen zu kritischen Betriebsdrehzahlbereichen getroffen werden. Die Anregungsmechanismen können in freie, selbst-, fremd- und parametererregte Schwingungen unterteilt werden, wobei Unwuchten zu selbsterregten Schwingungen führen können, fremderregte Schwingungen periodischen Lastmomentschwankungen zuzuordnen sind und Parametererregungen durch Schwankungen einzelner Systemparameter, wie beispielsweise schwankende Steifigkeiten, entstehen.

Die Gegenüberstellung der ermittelten Eigenfrequenzen und Anregungen kann zur Identifikation kritischer Betriebspunkte in Campbell-Diagrammen erfolgen (Abbildung 9). Mittels horizontaler Linien werden die ermittelten Eigenfrequenzen gekennzeichnet, welche durch die drehzahlabhängigen Anregungen geschnitten werden. Jeder Schnittpunkt steht für eine potentielle Resonanzstelle deren Relevanz für das Betriebsverhalten des Antriebssystems anhand der Campbell-Diagramme aber nicht vollständig bewertet werden kann. Die

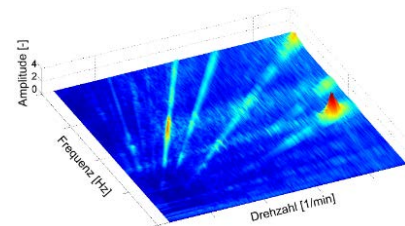


Abbildung 10: Wasserfalldiagramm

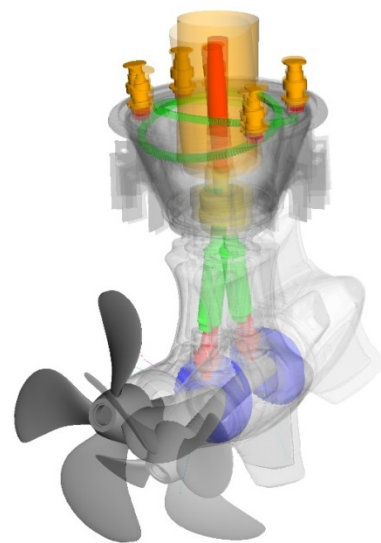


Abbildung 11: Erste Biegeeigenschwingform

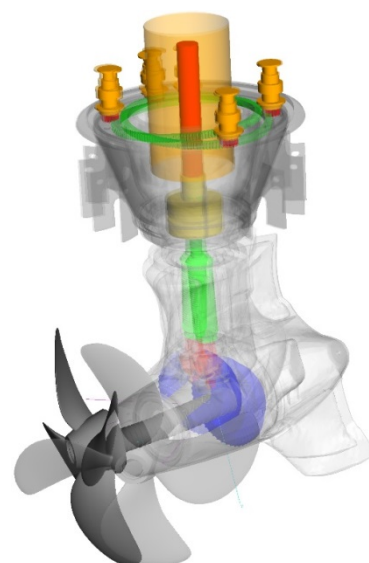


Abbildung 12: Zweite Biegeeigenschwingform



erforderlichen Untersuchungen führen zu einer Nachrechnung des Hochlaufes, der in den Campbell-Diagrammen bereits theoretisch abgebildet wird. Durch Auswertung der Simulationsergebnisse können die zu den Schnittpunkten zwischen Eigenfrequenz und Anregung gehörenden Amplituden ermittelt und bewertet werden. In Abbildung 10 sind die Frequenzspektren für die untere Kegelradstufe dargestellt.

Ergänzend zur Betrachtung der Anregung durch die Zahneingriffsfrequenzen können detaillierte Untersuchungen der propellerseitigen Anregungen erfolgen, um gegebenenfalls auftretende Anregungen von Eigenfrequenzen zu identifizieren. Die Kombination des Anregungsmechanismus, der als Vielfaches der vierfachen Propellerdrehfrequenz in tangentialer, radialer und axialer Richtung wirkt und die Propellerblattpassierfrequenz charakterisiert, kann neben Eigenschwingformen des Antriebsstranges auch Schwingformen des Ruderpropellergehäuses anregen (Abbildung 11 und Abbildung 12).