

Beschreibung der Interaktionen maschinen- und schiffbaulicher Komponenten in allen für Ausrichtrechnungen relevanten Bau- und Betriebszuständen

Description of Interactions between Mechanical Engineering and Ship Building components in all for Alignment Calculations relevant Building States and Service Conditions

Prof. Dr.-Ing. Jan H. Weyhardt

Fachhochschule Kiel (ehem. Flensburger Schiffbaugesellschaft mbH)

Katja Christiansen, Michael Thiemke

Flensburger Schiffbaugesellschaft mbH

In der Fachwelt wird regelmäßig über Schäden an hydrodynamischen Gleitlagern in Propulsionssträngen berichtet, obwohl diese aufgrund ihrer progressiven Steifigkeit Fluchtungsfehler in einem gewissen Maße verzeihen. Das Verlagerungsverhalten der Welle ist so komplex, dass heute übliche Modelle zu Ausrichtrechnungen dieses nicht abbilden. Im Rahmen des BMBF-Verbundvorhabens MaPos wurde an der FSG ein Berechnungstool entwickelt, welches in Variantenrechnungen über alle für die Ausrichtung relevanten Betriebs- und Bauzustände die Positionen einer Welle in ihren hydrodynamischen Gleitlagern bestimmt. Herzstück ist ein Iterationsalgorithmus, der die hochgradig nicht linearen Schmierfilmsteifigkeiten und sowohl Nachgiebigkeiten als auch Verformungen von Welle und Schiff berücksichtigt. Die entsprechenden FE Modelle wurden messtechnisch validiert. Liefert ein eingegabener Satz Ausrichtwerte für alle relevanten Betriebszustände zulässige Schmierzustände in allen Lagern, ist eine geeignete Ausrichtung gefunden. Die Ergebnisse werden u.A. zur Berechnung von Jack-up-Kräften und Eigenfrequenzen weiter verwendet.

Among experts is frequently reported about damages on hydrodynamic bearings in power trains even though they often get over misalignments because of their progressive stiffness. The shifting behaviour of the shaft is as complex that today's models of alignment calculations do not represent it.

During the BMBF joint research project MaPos, FSG developed a calculation tool which determines

the positions of a shaft in its hydrodynamical bearings by variant calculations. All relevant building and service states for alignment are considered. The main component is an iteration algorithm that considers the highly nonlinear stiffnesses of lubrication films as well as the stiffnesses of mechanical and shipbuilding components with its deformations caused by different building states and service conditions. The corresponding FE-models were validated by measurements. If a set of alignment values gives acceptable lubrication states in all bearings for all relevant service conditions, a suitable alignment is found. The results are further used among other things for calculations of jack up forces and natural frequencies.

1 Einleitung

Schiffbau und Schifffahrt sind Voraussetzung für eine funktionierende Weltwirtschaft [1]. Die rasante Entwicklung des Seehandels stellt dabei immer höhere Anforderungen an die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Schiffe.

Ein häufiges Problem ist der Ausfall des/eines Antriebsstranges aufgrund von Lagerschäden, die auf Fehlansichtungen zurückzuführen sind, welche eventuell nur in bestimmten Betriebszuständen maßgeblich werden.

Die häufig im Schiffbau verwendeten hydrodynamischen Gleitlager haben aufgrund ihrer stark progressiven Schmierfilmsteifigkeit die Eigenschaft, sich auch bei gewissen Verkippungen vor Kantenläufem und somit Schäden selbst zu schützen. Ein genaueres

Wissen über das Systemverhalten wird mehrere Potenziale ggf. gleichzeitig erschließen: Größere Ausrichttoleranzen, höhere Zuverlässigkeit, schnelleres und zuverlässigeres Reagieren auf Schäden z.B. nach Grundberührung. Gleichzeitig kann durch Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen beim Bau die Ausrichtung des Propulsionsstranges auf den Bauplatz vorgezogen werden, wodurch der betriebliche Ablauf straffer organisiert werden kann.

Die folgenden Ausführungen beschreiben die Ergebnisse, welche bei der FSG im Rahmen des BMBF-Verbundvorhabens MaPos (Partner: AKER, Uni Rostock, IMAWIS) erarbeitet wurden.

2 Messung von stapellaufbedingten Deformationen am Bauplatz

2.1 Einführung

Motivation für dieses Arbeitspaket war, dass bei der FSG sehr weit gehende Ausrichtarbeiten bis hin zum Vorausrüsten von Hinterschiffsmodulen mit Propellerwelle bereits auf dem Helgen durchgeführt werden [2].

Schon bei gewöhnlichen Ausrichtarbeiten wurden Störungen durch Wasserstandsschwankungen, bewegte Lasten usw. beobachtet, die hier durch geeignete Messverfahren quantifiziert wurden.

Frühere Verformungsmessungen mit Laserverfahren erwiesen sich als zu ungenau und konnten auch nicht direkt am Ort des Geschehens – unter Seewasser – eingesetzt werden.

2.2 Anforderungen an das neue Messprinzip

- Messen der vertikalen Biegelinie am Ablaufbalken im ca. 60m langen Bereich unter dem Propulsionsstrang des darauf liegenden Schiffes
- Messungen bei den Laständerungen mit/ohne Wasser/Schiff
- Abstand Messpunkte ca. 5m
- Messbereich ca. 5mm
- Genauigkeit von 1mm/100m global und 1/10mm lokal.
- Vertikaler Einbauraum am Ablaufbalken ca. 0,8m
- Messen unter Seewasser
- Einfaches Verfahren: Messen einer Biegelinie durch einen Mann innerhalb weniger Minuten. Auch, um Messzyklen zu ermögli-

chen, die früher beobachtete dynamische Effekte beschreibbar machen

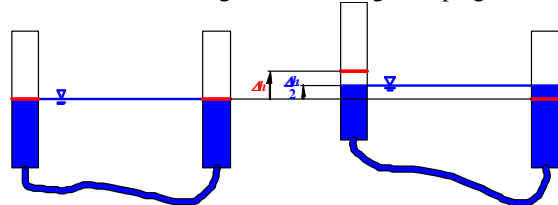
- Keine gegenseitigen Beeinträchtigungen mit dem Werftbetrieb
- Realisierung mit werfteigenen Mitteln

Es wurde das Schlauchwaagenprinzip gewählt. Dieses schwerkraftbasierte Verfahren ist uneingeschränkt geeignet, da ausschließlich schwerkraftbedingte Verformungen gemessen werden sollen.

2.3 Das Schlauchwaagenprinzip

Schon die Ägypter verwendeten wassergefüllte Gräben zur Nivellierung der Bauplätze ihrer Pyramiden. Heutzutage werden Schlauchwaagensysteme mit Messgenauigkeiten von 1/100mm-Bereich im Tunnelbau eingesetzt. Letztere erfüllen aber nicht die Anforderungen.

Das Prinzip ist einfach: Ein gebogener Schlauch bildet bei Befüllung zwei Flüssigkeitsspiegel aus.



Wird ein Ende angehoben, verteilt sich die entsprechende Flüssigkeitssäule je zur Hälfte auf beide Enden. Die abgelesene Differenz ist also der halbe Messwert, siehe Abbildung 2.1.

Abbildung 2.1: Auslenkung einer einfachen Schlauchwaage

Die Ablesegenauigkeit beträgt aufgrund der Oberflächenspannung nur ca. 0,5mm, ist aber leicht steigerbar und im Gegensatz zu optischen Verfahren unabhängig von der Messdistanz.

Das Prinzip funktioniert mit beliebig vielen Messgläsern in einem System, so dass auch horizontale Ebenen zeitgleich gemessen werden können.

Bei dem Helgengefälle von 5% ist die Reihenschaltung mehrerer Systeme mit entsprechender Addition der Messgenauigkeiten erforderlich. Die Ablesestellen müssen auch oben durch gasgefüllte kommunizierende Röhren gekoppelt sein, damit das System auch unter Wasser funktioniert.

2.3.1 Möglichkeiten zur Messverstärkung

2.3.1.1 Unterschiedliche Querschnitte

Ist der Flüssigkeitsspiegel an der Messstelle erheblich größer als an der Ablesestelle, kann dort (annähernd) der ganze Messwert abgelesen werden, siehe Abbildung 2.2.

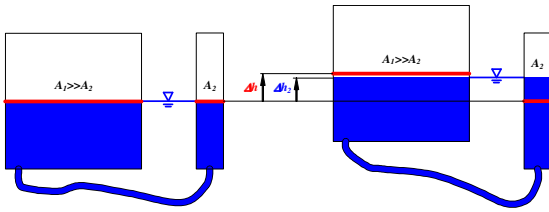


Abbildung 2.2: Schlauchwaage mit zweifacher Messverstärkung

2.3.1.2 Schräg angeordnete Messgläser

Abbildung 2.3 zeigt die später verwendete schräge Anordnung eines Messglases, wo der Flüssigkeitsspiegel an der Skala eine Strecke entsprechend der 10fachen Höhenänderung durchläuft. Die Ablesegenauigkeit von 0,5mm entspricht also einer Änderung des Flüssigkeitsspiegels von 0,05mm. Im System von zwei korrespondierenden Messgläsern ergibt sich also eine Messgenauigkeit von 0,1mm.

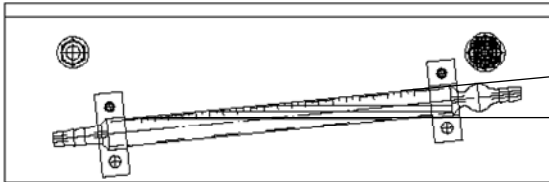


Abbildung 2.3: Ablesestation mit zehnfacher Messverstärkung

2.3.2 Fehlerquellen, Bewertung und Abhilfe [3]

2.3.2.1 Schwingungen

Schlauchwaagen sind – je nach Anzahl der Ablesestellen – Schwinger mit vielen Freiheitsgraden und Eigenformen. Ungewollte dynamische Effekte sind durch Wahl der Viskosität und Vorsehen von Drosselstellen eliminierbar.

2.3.2.2 Oberflächenspannung

Das Wölben des Flüssigkeitsspiegels an den Kanten erschwert das Ablesen an senkrechten Messgläsern. An geneigten Gläsern, siehe Abbildung 2.3, wird das Ablesen eher begünstigt.

Das Anhaften der Flüssigkeit an der Wand kann durch kleine Erschütterungen kurz vor dem Ablesen gelöst werden.

2.3.2.3 Kapillarwirkung

Tritt bei hinreichen großen Querschnitten nicht auf.

2.3.2.4 Dichteunterschiede

Es bilden sich unterschiedliche Flüssigkeitsspiegel aus, sobald im Fluid Dichteunterschiede vorliegen.

Diese können durch Verunreinigungen, Entlösungen, Ausgasungen, Gasblasen, Flüssigkeitssäcke (im oberen Gassystem), Entmischungen und Temperaturdifferenzen hervorgerufen werden.

Durch die blasenfreie Befüllung des geschlossenen Systems mit einem farbigen (nicht gefärbten) Öl können diese Probleme ausgeschlossen werden. Nennwerte Temperaturdifferenzen sind nicht zu erwarten.

2.3.2.5 Flüssigkeitsverlust

Ein Flüssigkeitsverlust ist bei Relativmessungen zwischen mehreren Ablesestellen eines Systems so lange zu verschmerzen, wie die Skalen nicht unterschritten werden. Dieses ist bei sachgemäßer Installation kein Problem.

2.3.2.6 Boyle-Mariotte-Effekt

Werden die mit Flüssigkeit gefüllten Rohre bzw. Schläuche von außen mit Druck beaufschlagt, wird deren Querschnitt verringert und der Flüssigkeitsspiegel im System steigt. Die Auswirkungen bei äußerem Druckabfall sind ähnlich wie bei Flüssigkeitsverlust (s.o.), bei Druckaufbringung entsprechend umgekehrt. Bei Relativmessungen zwischen den Gläsern ist dieser Effekt ohne Belang.

2.3.2.7 Querschnittsveränderungen an Messgläsern

Im oberen Bereich würde der Flüssigkeitsspiegel durch den Stutzen der Messgläser beschnitten und somit die Verstärkung verändert. Daher wird nur der untere Skalenbereich verwendet, wodurch mit 10mm Messbereich mehr als gefordert übrig bleiben.

2.4 Realisiertes System am Ablaufbalken

Abbildung 2.4 zeigt den in den Helgengrund laufenden Ablaufbalken. Links ist eine Ablesestation zu sehen. Die weißen Linien deuten an, wie die (insgesamt sieben) Systeme mit je drei (ggf. zwei) Gläsern in Stufen geschaltet sind: Am Übergang zweier Systeme liegen immer zwei Ablesestationen übereinander. So können die Teil-Biegelinien zu einer großen zusammengesetzt werden. Die geschützte Anordnung seitliche am Ablaufbalken gewährleistet keine gegenseitigen Beeinträchtigungen mit dem Werftbetrieb.



Abbildung 2.4: Messsystem am Ablaufbalken
Die Qualität der Ablesung unter Seewasser zeigt
Abbildung 2.5: Die Teilung beträgt 5mm, entsprechend 0,5mm Hub. Der Ablesewert von 2,80 muss mit denen der anderen Gläser zu einer Biegelinie weiterverarbeitet werden.

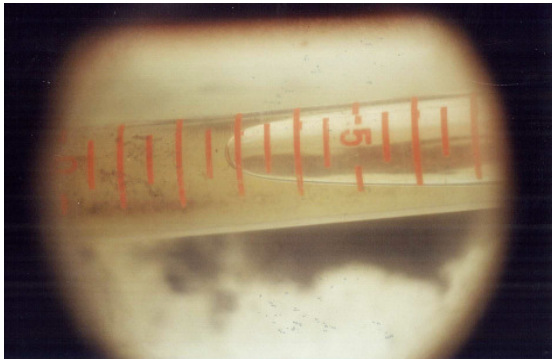


Abbildung 2.5: Ablesen unter Wasser
Die Werte wurden teilweise von einem Taucher aufgenommen, der am Stapellauftag zugegen war.

Abbildung 2.6 zeigt das Verhalten der Biegelinie des Ablaufbalkens während der drei großen Laständerungen „Halle fluten“, „Stapellauf“ und „Halle leer pumpen“. Auf der Abzisse ist der Abstand vom Docktor (rechts) in m aufgetragen, auf der Ordinate die vertikale Verformung in mm. Die Pfeile zeigen den zeitlichen Verlauf. In allen drei Fällen folgt die Biegelinie der Be- bzw. Entlastung und in allen drei Fällen gibt es gegenläufige Tendenzen in Phasen ohne Laständerung.

Eine Kalibriermessung sollte nicht vorgenommen werden, da kein hinreichend genaueres, unter diesen Bedingungen funktionierendes System bekannt war. Der Verlauf der Werte zeigt aber, dass diese sich stetig verändern und keine Streueffekte sichtbar sind. Die Größenordnungen der Verformungen sind wertvoll für Abschätzungen von sich einstellenden Zuständen nach betrieblich bedingten Laständerungen und waren Grundlage für ein FEM-Modell, welches diese beschreibt.

2.5 Ausblick

Die Beschreibung und Modellierung des transienten Verhaltens bedarf eines erheblich höheren Messaufwandes, wobei der Kosten-Nutzen-Effekt abzuschätzen ist. Das in Abbildung 2.6 im Bereich von „System 3“ zu sehende sprunghafte Verhalten ist dabei zuerst zu klären.

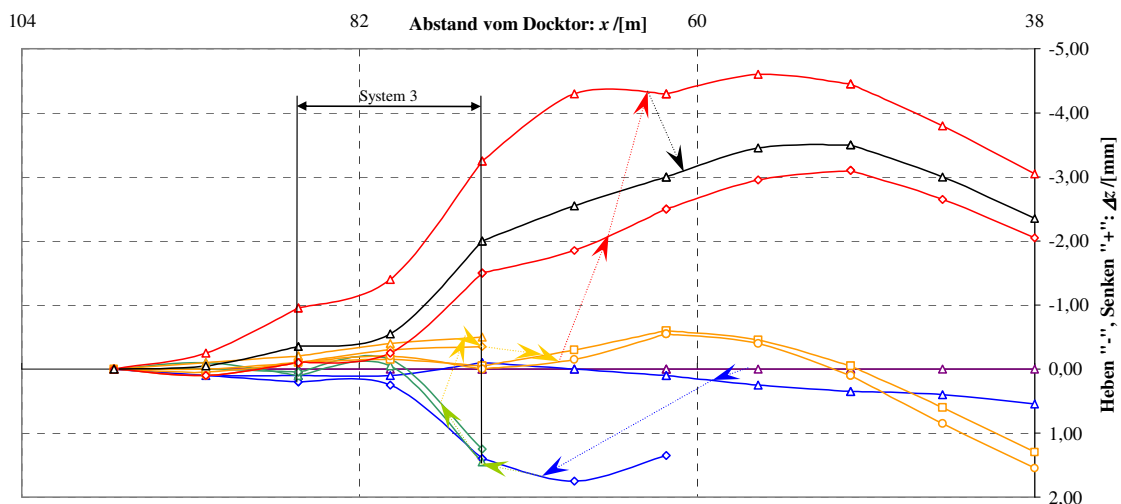


Abbildung 2.6: Biegelinien des Ablaufbalkens an einem Stapellaufwochenende. Blau: Fluten, grün: anschließende Erholung, gelb: Stapellauf mit anschließender Erholung, rot Halle leer pumpen, schwarz: anschließende Erholung.

3 Messung von stapellaufbedingten Deformationen am Hinterschiff

3.1 Einführung

Auch bei diesem Arbeitspaket war die Motivation, Verformungen abschätz- und ggf. modellierbar zu machen, die auf vor Stapellauf (teil)ausgerichtete Propulsionsstränge wirken.

3.2 Anforderungen an die Messungen

- Flächiges Messen insbesondere der vertikalen Verformungen möglichst nahe am Propulsionsstrang des Schiffes
- Messungen bei Hallenflutung, Beruhigungsphase und nach Stapellauf
- Abstand Messpunkte ca. 5m
- Messbereich ca. 5mm
- Genauigkeit von 5mm/100m global und 1/10mm lokal.

3.3 Messung an einem Zweischrauber

In nächster Nähe zu den Propulsionssträngen liegt das Hauptdeck, welches keine optischen Barrieren aufweist und somit auch für Messungen mit einem Leica-Gerät geeignet ist. Abbildung 3.1 zeigt das Raster von Messpunkten.

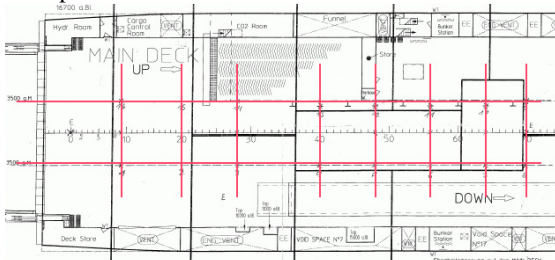


Abbildung 3.1: Messpunkte auf dem Hauptdeck eines Zweischraubers oberhalb der Propulsionsstränge

Abbildung 3.2 zeigt die Ergebnisse für die drei gemessenen Veränderungen. Auf den Abszissen ist die Längskoordinate des Schiffes in m aufgetragen, auf den Ordinaten die vertikale Verformung. Der blaue Graph stellt die jeweils gemittelte Biegelinie dar, die grünen und roten (Sb und Bb) geben Auskunft über die Verkipfung.

Abbildung 3.2 oben: Beim Hallenfluten ergibt sich erwartungsgemäß ein Hogging. Bemerkenswert ist der ca. 0,6mm starke Knick an den linken Messpunkten oberhalb der Struts zum hinteren Stevenrohrlager. Dieser ist durch frei werdende Schweißeigenspannungen erklärbar.

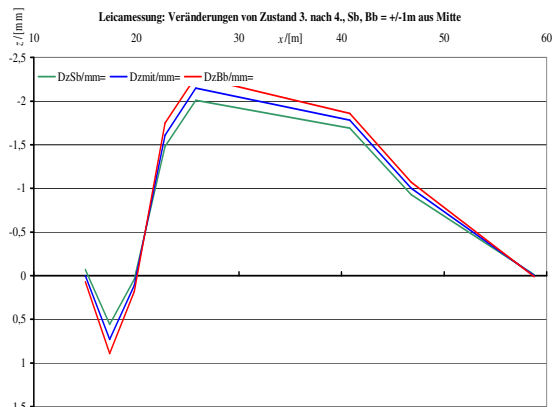
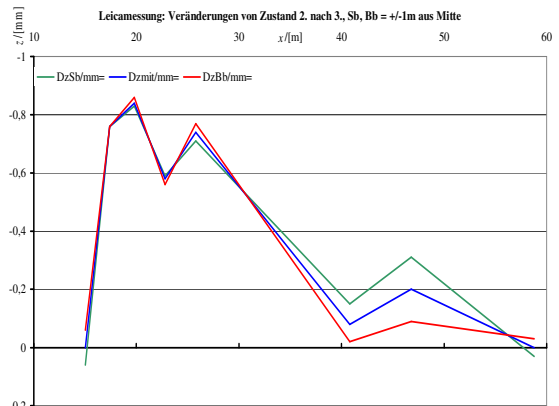
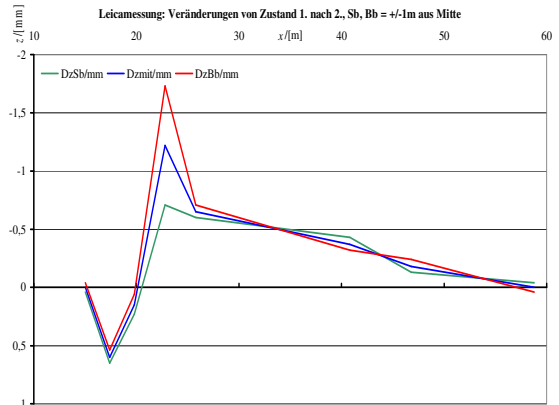


Abbildung 3.2: Messergebnisse, Veränderungen durch/bei... - oben: Flutung der Halle – mitte: Beruhigungsphase - unten: Stapellauf

Abbildung 3.2 mitte: In diesem Zeitraum treten äußerlich lediglich Veränderungen durch minimale Kriechbewegungen des Helgens auf. Abgesehen von dem starken Abfall am linken Ende ergibt sich ein konstanter Verlauf, unterbrochen durch Schwankungen in der Größenordnung der Messgenauigkeit. Der steile Abfall ist das inverse Ereignis zu dem im darüberliegenden Verlauf auftretenden Knick.

Abbildung 3.2 unten: Beim Stapellauf ergibt sich wiederum erwartungsgemäß ein Hogging. Auch hier

tritt an derselben Stelle ein ca. 0,6mm starker Knick auf.

Wechselnde Verknickungen im Hinterschiffsbereich wurden auch durch eine Schlauchwaagenmessung im Wellentunnel/Maschinenraum eines Einschraubers festgestellt.

Diese Messungen geben Auskunft über die Größenordnung frei werdender Schweißspannungen in einem für die Ausrichtung sehr sensiblen Bereich.

3.4 Ausblick

Die Modellierung bzw. Voraussage der genannten Verformungen ist noch nicht Stand der Technik und ist besonders bei Zweischaubern mit ihrer offenen Struktur aus Struts und Wellenhose schwierig. Bis dahin sind die Größenordnungen der Verformungen zu berücksichtigen.

4 Modellierung des Gesamtsystems und Entwicklung von Berechnungstools

4.1 Einführung

Dieser Abschnitt behandelt ein zentrales Ergebnis des Forschungsvorhabens: die mathematische Beschreibung der Interaktionen zwischen den Teilsystemen Welle und Schiff, die in den Lagern durch hydrodynamische Schmierfilme gekoppelt sind. Zu dieser Thematik gibt es diverse Veröffentlichungen [4]. Ziel ist es, in einem beliebigen Bauzustand in einer Art und Weise auszurichten, dass alle Lager in jeglichen Betriebszuständen ein zufriedenstellendes Tragverhalten aufweisen. Das Verfahren kann durch Genetic Algorithms zum Auffinden geeigneter Ausrichtwerte ergänzt werden [5].

Für die FE-Modellierung der Teilsysteme Schiffskörperstruktur, Maschine (Getriebe) und Wellenleitung haben sich bewährte Modellierungsvorschriften wie lokale Verfeinerungen als geeignet erwiesen, wie auch Validierungsmessungen zeigten [6], siehe Abbildung 4.1.

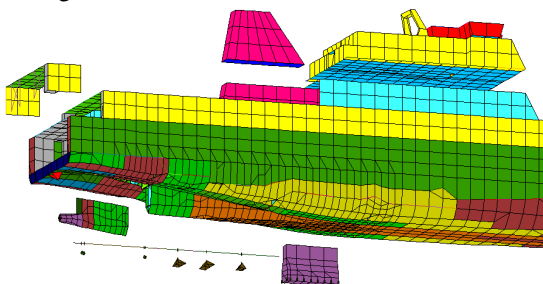


Abbildung 4.1: Modular aufgebautes FEM-Modell für Variantenrechnungen mit lokalen Verfeinerungen.

Als größtes Problem, welches im Rahmen von MaPos zu lösen war, erwies sich die Kopplung schiff- und maschinenbaulicher Komponenten. Dabei wurde deutlich, dass eine Unterteilung in „drehende und stehende“ Teile zielführend ist.

Sowohl drehende Komponenten (im Folgenden „Welle“ genannt) als auch stehende („Schiff“) weisen bereits im Ruhezustand maßgebliche Verformungen aufgrund von z.B. Eigengewicht und Schwimmzustand auf.

Die zur Kopplung von Welle und Schiff zu modellierenden hydrodynamischen Schmierfilme weisen zwei wichtige Besonderheiten auf [7]:

- Die Schmierfilmsteifigkeit in Belastungsrichtung ist so stark progressiv. Die Beschreibung dieser Hauptsteifigkeit ist für rein radiale Verlagerungen Stand der Technik. Durch dieses Verhalten widersetzt sich ein Lager aber auch Verkippen, deren Berechnung maßgeblich für eine Ausrichtrechnung und somit ein wesentliches Ziel für dieses Vorhaben ist.
- Der Schmierfilm weist eine ausgeprägte nichtlineare Nebensteifigkeit auf, die bewirkt, dass eine Welle quer zur Krafrichtung ausweicht. Die Modellierung dieses Verhaltens ist von großer Bedeutung um sicherzustellen, dass eine Welle nicht in eine Schmiernut läuft. Das Verhalten ist nicht 2D-beschreibbar, da z.B. bei reiner Gewichtsbelastung eine horizontale Verlagerung in der Welle unmittelbar Querkraftkomponenten induziert, die wiederum in den Lagern abgestützt werden müssen.

Es sind also für jeden relevanten Betriebszustand bei gegebener Ausrichtung die Gleichgewichtslagen der Welle im Schiff zu ermitteln, die dazu gehörenden Verhältnisse in den jeweiligen hydrodynamischen Schmierfilmen, und es ist zu überprüfen, ob die durch die Physik vorgegebenen Grenzen eingehalten werden. Ist dieses nicht der Fall, müssen iterativ Ausrichtwerte modifiziert werden, bis jederzeit überall zulässige Betriebszustände vorliegen. Somit sollen auch Ausrichttoleranzen ermittelt werden.

Auf eine direkte Modellierung der Lagergeometrie mit allen Details und Berechnung mit CFD-Methoden wurde zunächst verzichtet und eine punktweise Diskretisierung vorgezogen, die jeden Lagerpunkt als schmales, nicht verkipptes Lager betrachtet. Dazu wurden die bekannten Kennfelder mathematisch beschrieben. Vorteil ist die große Rechengeschwindigkeit bei einer ausreichenden Genauigkeit. Das Gesamtkonzept sieht aber die spätere Implementierung genauerer Lagermodelle vor.

Ein weiterer wichtiger Punkt für die Konzeption des Gesamtmodells ist die Variantentauglichkeit.

4.2 Verlagerungen von Wellen in hydrodynamischen Gleitlagern

Über den Forschungsverbund von MaPos hinaus gab es einen fruchtbaren Austausch mit der TUHH, wobei Ergebnisse gegenseitig validiert wurden [8].

Die zur Beschreibung interessanter Größen Kraft F , Drehzahl n , Exzentrizität e (relative Exzentrizität ε) und Verlagerungswinkel β sind neben diversen anderen Kenngrößen Abbildung 4.2 zu entnehmen.

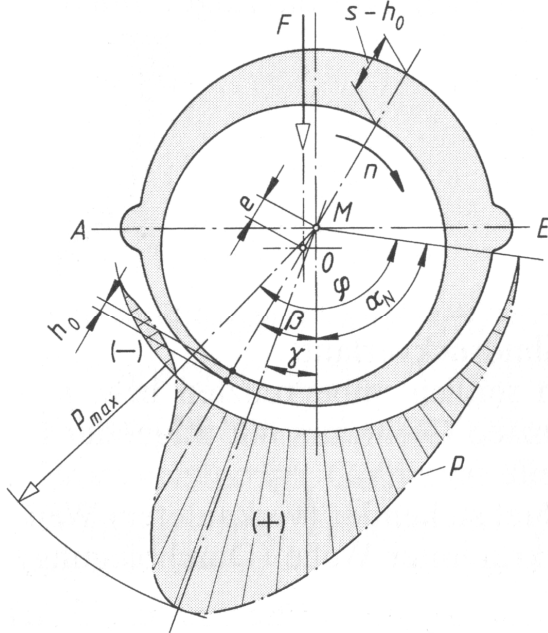


Abbildung 4.2: Kenngrößen am hydrodynamischen Schmierpalt [9]

Zu erkennen ist, dass im stationären Zustand bei vertikaler Kraftwirkung eine vertikale Verlagerungskomponente (Hauptsteifigkeit) und eine horizontale (Nebensteifigkeit) resultieren.

In diesem Abschnitt geht es um die reine radiale Verlagerung einer Welle in einem Lager. Bei der Anwendung des hier erstellten Rechenmodells auf ganze Systeme werden längere Lager in diskreten Einzellagern modelliert, deren separate Verschiebungen eine Verkipfung darstellen. In der Literatur gibt es nur wenige Stellen, die sich der Problematik der Modellierung verkippter hydrodynamischer Gleitlager annehmen [10][11].

4.2.1 Verlagerungen in Kraftwirkrichtung (Hauptsteifigkeit)

Die Verlagerung e in Richtung der Kraft F in Abhängigkeit von dieser wird in der Literatur [9] allgemein durch den Zusammenhang der dimensionslosen Größen relative Exzentrizität $\varepsilon \sim e$ und Sommerfeldzahl $So \sim F$ beschrieben, Abbildung 4.3. Anstelle der dort üblichen logarithmischen Skalierung für So wurde für

die Kennfeldbestimmung eine lineare gewählt, da der Bereich niedriger Lasten, welche für die Rechnung unproblematisch sind, überbewertet wäre.

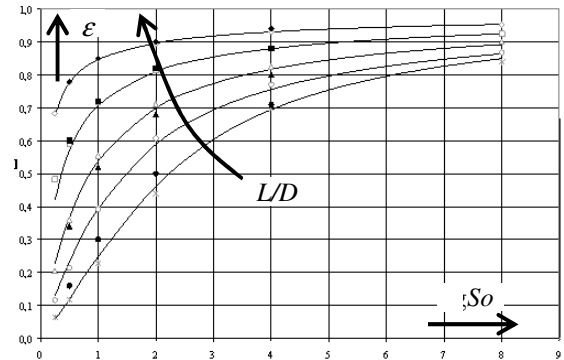


Abbildung 4.3: Auftragung der relativen Exzentrizität ε über der Sommerfeldzahl So , Scharparameter ist das Längen-Durchmesserverhältnis L/D , Approximation von Mess- und Rechenwerten durch ein Kennfeld.

4.2.2 Verlagerungen quer zur Kraftwirkrichtung (Nebensteifigkeit)

Der Verlagerungswinkel β quer zur Richtung der Kraft F in Abhängigkeit von der relativen Exzentrizität ε wird in der Literatur [9] durch den Gümbelschen Kreis beschrieben, Abbildung 4.4.

Dabei entsprechen Lagen des Zapfens nahe der Lagermitte hohen Drehzahlen n und niedrigen Kräften F und im Lagerboden umgekehrt. Je nach Veränderung dieser Parameter wandert der Betriebspunkt auf seiner Kennlinie.

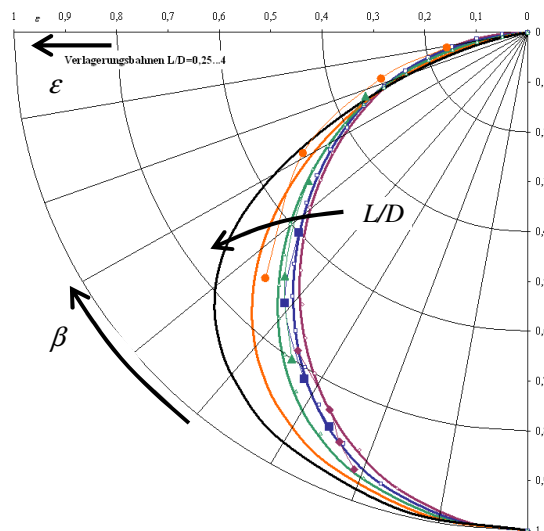


Abbildung 4.4: Auftragung des Verlagerungswinkels β über der relativen Exzentrizität ε , Scharparameter ist das Längen-Durchmesserverhältnis L/D , Approximation von Mess- und Rechenwerten durch ein Kennfeld.

4.3 Umsetzung in eine Berechnungssoftware

Zur Berechnung der Deformation der Wellenleitung unter Berücksichtigung der Schiffs- und Helgenverformung wurde das Berechnungsprogramm *PropTrain* entwickelt. Hierbei handelt es sich um ein plattformunabhängiges Java-Programm, welches neben einzelnen Berechnungsmethoden sämtliche Methoden zur Vor- und Nachbehandlung von Modell- und Ergebnisdaten beinhaltet. FEM-Berechnungen der Wellenanlage werden von *PropTrain* jedoch lediglich gesteuert. Sie finden außerhalb des Programms unter Verwendung kommerzieller Software statt. Das Programm bietet neben einer Anzahl von Menüpunkten, Eingabemasken und tabellarisch dargestellten hierarchischen Datenmodellen, eine Vielzahl grafischer Darstellungen von Modell- und Ergebnisdaten.

4.3.1 Modellerstellung

Zur Modellerstellung wird zunächst eine Geometriebeschreibung der Wellenanlage mit allen rotierenden Bauteilen und Lagern sowie Werkstoffkennwerten benötigt. Hinzu kommen dann weitere Eingabedaten, die der Beschreibung von Bau- und Betriebszuständen mit allen auf die Wellenanlage wirkenden Lasten und Randbedingungen dienen. Die Erstellung der Eingabedaten erfolgt in *PropTrain* über eine grafische Benutzerschnittstelle. Das Programm kann die erstellten Daten speichern, lesen und editieren. So lassen sich aus Kopien bestehender Anlagen mit geringem Aufwand auch Modelle für ähnlich aufgebaute Propellerwellenanlagen ableiten.

In der Datenstruktur besteht ein *PropTrain*-Modell aus vielen Elementen, die sich verschiedenen Elementtypen zuordnen lassen. Jedes Element besitzt eine Reihe von Attributen, die editierbar sind. Elemente können in der Oberfläche ausgewählt werden, indem sie entweder in der Tabelle markiert oder in dem grafischen Darstellungsfenster durch Mausklick ausgewählt werden. Markierte Elemente werden in der grafischen Darstellung hervorgehoben.

Gemäß der Klassifizierung der Elementtypen ist auch die Oberfläche zur Modellerstellung und -änderung gegliedert. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Elementtypen vorgestellt:

4.3.1.1 Koordinatensysteme

PropTrain ermöglicht es, relativ zu einem globalen Koordinatensystem lokale Koordinatensysteme anzulegen. Hierdurch ermöglicht das Programm, dass die Lage der Welle sowohl mit Bezug auf ein übergeordnetes Schiffskordinatensystem als auch mit Bezug auf ein lokales, für die Eingabe gut geeignetes Be-

zugssystem z.B. mit einem Ursprung an der Mitte des Propellers, definieren lässt.

4.3.1.2 Material

Sowohl feste Werkstoffe als auch Fluide werden als Elementtyp Material für das gesamte Modell erstellt. Ein Material kann beliebig vielen Elementen zugeordnet werden. Feste Werkstoffe werden durch Dichte, Elastizitätsmodul und Schubmodul definiert. Für Flüssigkeiten genügt die Angabe ihrer Dichte. Lediglich die Viskosität eines Schmiermittels wird bislang außerhalb dieses Elementtyps als direkte Eingangsgröße für jedes Lager eingegeben.

4.3.1.3 Rotierende Komponenten der Propellerwellenanlage

Jedes Element vom Typ „Wellenabschnitt“ beschreibt ein Stück der rotierenden Propellerwellenanlage. Neben geometrischen Beschreibung der Elemente als hohle Konusabschnitte wird die dem Abschnitt ein Werkstoff, eine Lage sowie optional eine Anbindung an ein benachbartes Element zugewiesen.

4.3.1.4 Lager

Eine wichtige Komponente von *PropTrain* ist die Methode zur Berechnung von Radialgleitlagern. Sie ermöglicht als Einscheiben-Lagermethode mittels vereinfachter Berücksichtigung des nichtlinearen Schmierfilmverhaltens sowohl die Berechnung der Position der Welle in kurzen hydrodynamisch geschmierten Radialgleitlagern als auch die Berechnung anisotroper (richtungsabhängiger) Schmierfilmsteifigkeiten für solche Lager. Um auch die für die Praxis bedeutsame räumliche Verkipfung eines Wellenzapfens in einem längeren Radialgleitlager berechnen zu können, kommt neben einer Ein-Scheiben-Lagermethode für kurze Lager auch eine Zwei-Scheiben-Lagermethode zum Einsatz. In dieser Methode erfolgt die Berechnung der Wellenzapfenlagen für die Vor- und Hinterkante eines Radialgleitlagers. Benutzeroberflächen und Datenstrukturen von *PropTrain* sind so ausgelegt, dass Verformungen von Schiff und Lagergehäusen, die aus der Überlagerung unterschiedlicher Bau- Ladungs- und Seegangszuständen, thermischer Dehnung und Lagerbelastung resultieren, mit geringem Modellierungsaufwand erfasst und in der Berechnung berücksichtigt werden können. Hierfür ist es erforderlich, dass zunächst extern alle relevanten Verformungszustände von Schiff und Lagergehäusen für die Koordinaten der Lagerpunkte berechnet werden. Anschließend erfolgt eine Übergabe der Verschiebungsvektoren aller Lager je Verformungszustand an *PropTrain*. Innerhalb des

Programms können Verformungszustände ausgewählt und überlagert werden.

Um für das in der Berechnung verwendete dreidimensionale Berechnungsmodell der Wellenanlage in jeder Richtung definierte Randbedingungen zu erhalten, bietet PropTrain auch den Elementtyp eines Axiallagers an. Dieser fixiert den translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrad der Drehachse der Wellenanlage an einer wählbaren Längsposition.

4.3.1.5 Lasten

In dem Berechnungsprogramm können innere und äußere Lasten, die auf die rotierenden Komponenten der Propellerwellenanlage wirken, durch eine Anzahl unterschiedlicher Elementtypen definiert werden:

Sowohl für die Gruppe der Massen und Massenträgheiten als auch für die Gruppe der Kräfte und Momente existieren je zwei Elementtypen. Die einen Elementtypen erlauben eine punktförmige Platzierung einer Last. Die anderen ermöglichen die Verteilung konstanter oder linear veränderlicher Lasten über einen festzulegenden Längsabschnitt der Propellerwellenanlage.

4.3.2 Modellvarianten

Um eine Anzahl unterschiedlicher Bau- und Betriebszustände für eine Propellerwellenanlage berechnen zu können, bietet PropTrain die Möglichkeit, in einem Projekt verschiedene, von denselben Grunddaten abhängende Varianten anzulegen. Eine Variante besteht aus einer Auswahl von Sets verschiedener Elementtypen, die flexibel zusammengestellt werden kann (siehe Abbildung 4.5).

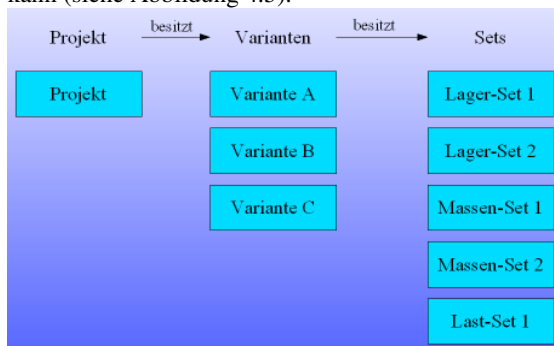


Abbildung 4.5: Ableitung unterschiedlicher Varianten aus den in Sets organisierten Grunddaten

4.3.3 Rechenlauf

Der Rechenlauf beginnt mit der automatischen Erstellung eines Finite-Elemente-Modells aus den Eingangsdaten. Jeder Wellenabschnitt wird hierbei als Balkenmodell mit kreisrundem Querschnitt modelliert. In dem Automatismus ist auch eine Routine enthalten, die bei längeren gleichförmigen Wellenabschnitten eine ausreichend feine Diskretisierung der FE-Balkenelemente sicherstellt.

Durch wechselseitige Berechnung des Schmierfilmverhaltens in den Lagern und des statischen Verhaltens der rotierenden Komponenten der Propellerwellenanlage mit Hilfe eines externen FE-Programms wird die Lage der Welle in den Lagern iterativ bestimmt (siehe Abbildung 4.6). Am Ende des Iterationsprozesses sind neben der Zapfenlage in den Lagern auch die Größen und Richtungen der Lagerreaktionen sowie die Biegelinien der Wellenanlage für den berechneten Zustand bekannt.

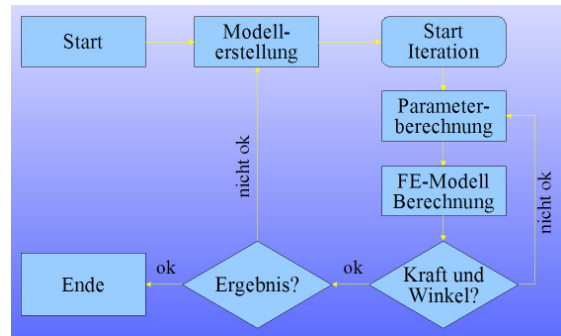


Abbildung 4.6: Einfaches Ablaufschema von PropTrain. Die Iteration endet, wenn Kraft- und Winkelfehler minimiert sind. Dies ist der Fall, wenn die aus dem FE-Modell berechneten Lagerwinkel und Reaktionskräfte und die aus dem Schmierfilm berechneten Lagerwinkel und Reaktionskräfte sich nicht mehr signifikant voneinander unterscheiden.

4.3.4 Visualisierung

PropTrain unterstützt den Anwender bei der Modell-erstellung durch umfangreiche, visuelle Darstellungen. Neben 2D-Projektionen des maßstäblich abgebildeten Modells in der vertikalen und horizontalen Ebene (Abbildung 4.7) gibt es eine drehbare 3D-Darstellung des Geometriemodells. Der Elementtyp „Material“ ermöglicht es, jedem Werkstoff und jeder Flüssigkeit eine eigene Farbe zuzuteilen, die in der Darstellung der Anlage in den Plotfenstern übernommen wird.

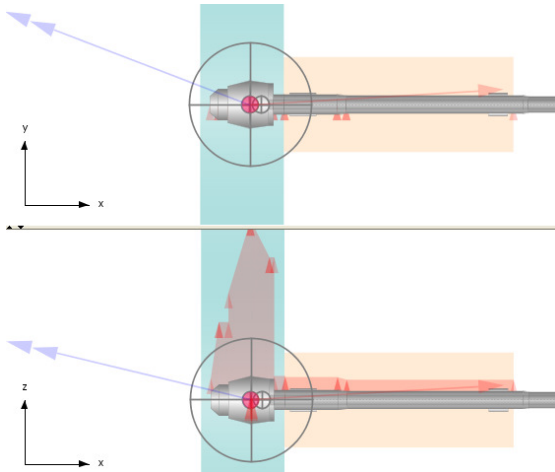


Abbildung 4.7: Darstellung der Anlagengeometrie mit den der ausgewählten Variante zugeordneten Lasten

Außer auf geometrische und farbliche Darstellungen des Anlagenmodells erstreckt sich die Visualisierung in den 2D-Projektionen auch auf die Lasten, die in einer ausgewählten Variante auf die Propellerwellenanlage aufgeschaltet sind. Dabei wird jeder Elementtyp mit leicht erkennbaren grafischen Symbolen wie z.B. Kreisfiguren und Pfeilen in unterschiedlichen Farben und mit unterschiedlichen Mustern gekennzeichnet. Die Größe der Symbole ist dabei proportional zur Größe der dargestellten Last. Auf diese Weise unterstützt die visuelle Darstellung des Gesamtmodells das Erkennen von Eingabefehlern.

Nicht nur das Berechnungsmodell sondern auch die Berechnungsergebnisse werden ergänzend zu einer tabellarischen Auflistung der wesentlichen Daten grafisch aufbereitet. So wird die für Ausrichtrechnungen übliche Biegeliniendarstellung um die horizontale Ebene sowie um eine Kennzeichnung des Lagerspaltens ergänzt (siehe Abbildung 4.8).

Die Visualisierung der Ergebnisse erleichtert und beschleunigt somit die Suche nach einem geeigneten Ausrichtzustand und trägt zu einer übersichtlichen Gestaltung der endgültigen Berechnungsergebnisse bei.

4.4 Ausblick

Im Hinblick auf die vielfältigen Teilaufgaben, die im Rahmen der Modellerstellung, der Rechnungen und der Ergebnisaufbereitung bewältigt werden müssen, erscheint eine konsequente Erweiterung des PropTrain-Programms anstrengenswert. So würden Hilfsmethoden, die den hydrostatischen Auftrieb von in Flüssigkeit getauchten Teilen oder die Getriebeverzahnungskräfte und -Momente abhängig von der Antriebsleistung und Verzahnungsgeometrie automatisch berechnen, dazu beitragen, den Bearbeitungsaufwand zu senken. Auch mit zusätzlichen Batchfunktionen

könnten über eine zunehmende Automatisierung von Programmabläufen wichtige Teilergebnisse wie Einflussmatrizen oder Auswiegelasten fast ohne nennenswerten Zusatzaufwand seitens Anwenders gewonnen werden.

Eine wesentliche Verbesserung der Berechnungsqualität wird durch die geplante Implementierung einer hydrodynamischen Gleitlager-Berechnungsmethode zu erreichen sein. Aufgrund des wesentlich höheren Rechenaufwands im Vergleich zur Scheibenlagermethode, ist jedoch absehbar, dass Rechnungen mit dieser Methode nur unter erheblichem Verlust von Rechengeschwindigkeit möglich sein werden. Aus diesem Grund wird diese Erweiterung des Programms die bestehende, etwas ungenauere Scheibenlagermethode nicht ablösen sondern ergänzen. Geplant ist, eine leichte Austauschbarkeit der Lagermethoden in bestehenden Modellen zu gewährleisten, um bedarfsorientiert die Vorteile der beiden unterschiedlichen Methoden nutzen zu können.

Schrifttum

- [1] Bundesministerium für Bildung und Forschung: Schifffahrt und Meerestechnik für das 21. Jahrhundert, Forschungsprogramm des BMBF 2000-2004
- [2] J.H. Weyhardt, T. Winterboer, H.J. Schroeder: Vorausrüstung eines Hinterschiffsmoduls mit Propellerwelle (Planerische, schiff- und maschinenbauliche, messtechnische und strukturmehchanische Aspekte), STG-Jahrbuch 2005, Springer-Verlag
- [3] Prandtl/Oswatitsch/Wieghardt: Führer durch die Strömungslehre 9. Aufl., Wien/Hamburg 1990
- [4] Sverko, D.: Design Concerns in Propulsion Shafting Alignment, ABS Technical Papers, 2003
- [5] Sverko, D.: Shaft Alignment Optimization with Genetic Algorithms, ABS Technical Papers, 2003
- [6] J.H. Weyhardt, B. Bohlmann: FEM-supported Alignment of Power Train Components, COMPIT'04, Siguenza, Spain, May 2004
- [7] Czichos, H.; Habig, K.-H.: Tribologie Handbuch, Vieweg-Verlag Braunschweig, 1992
- [8] Gurr, C.; Rulfs, H.: Einfluss instationärer Betriebszustände auf die Lagerung von Propellerwellen, Techn. Universität Hamburg-Harburg, Arbeitsbereich Wärmekraftanlagen und Schiffsmaschinen, 2006
- [9] Roloff/Matek: Maschinenelemente Lehrbuch und Tabellenbuch, Vieweg Verlag, 17. Aufl.
- [10] Hill, A.: Considerations in the Design of stern tube bearings and seals, Trans IMarE Vol. 91, Conference Paper No.4 Paper C39, 1979
- [11] Larsen, O.: Considerations on Marine Shafting Design, Trans IMarE Vol. 91, Conference Paper No.4 Paper C30, 1979

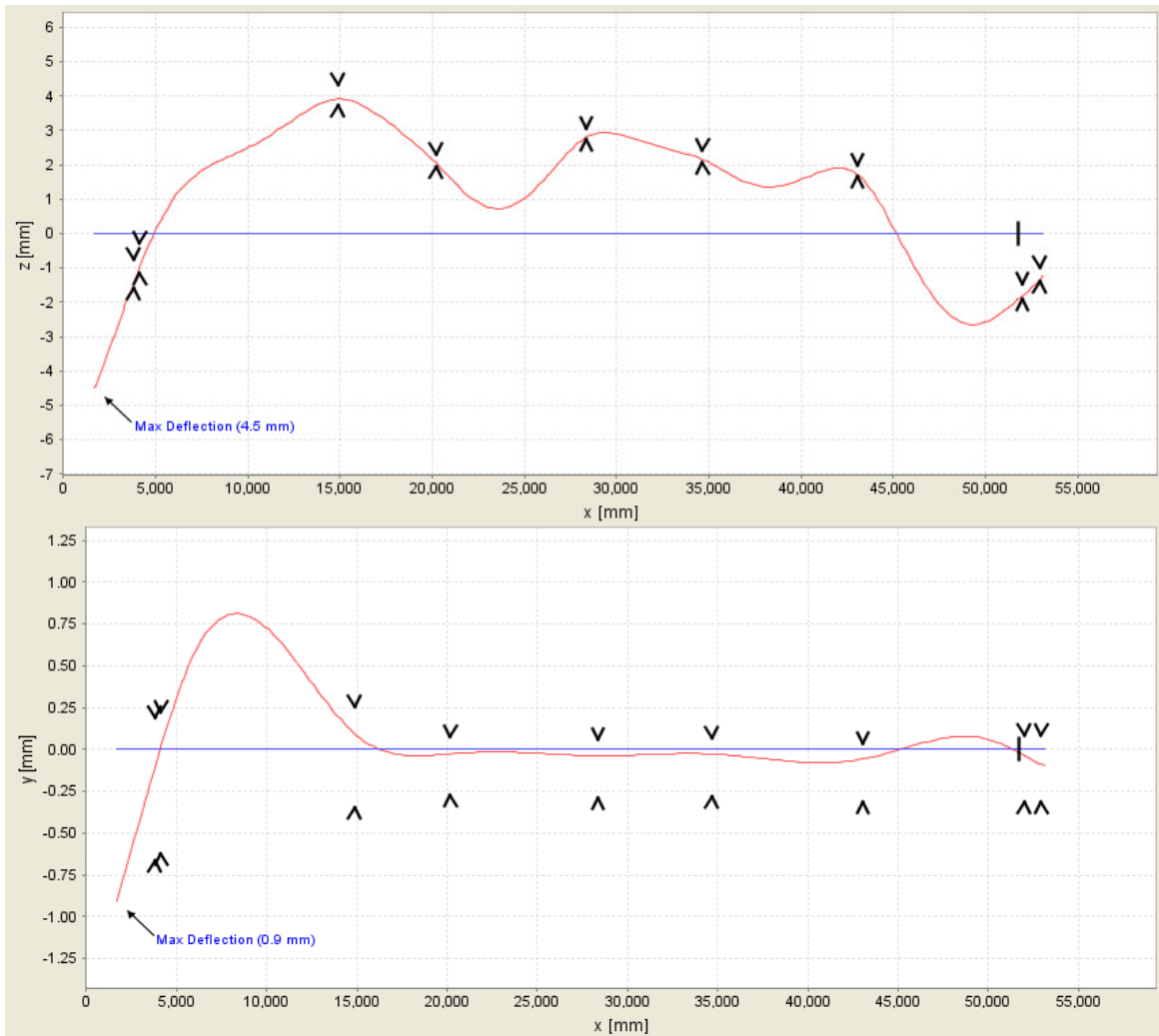


Abbildung 4.8: Darstellung eines vertikalen (oben) und horizontalen (unten) Biegelinienvverlauf mit Kennzeichnung der Lagerflächen in der Projektionsebene