Inertialkinematik in der maritimen Anwendung

Forum Maritim: Digitale Schifffahrt – Vernetzte Sensorik und Simulation

Dipl.-Ing. Sven Stuppe
Prof. Dr.-Ing. Holger Korte
Fachbereich Seefahrt und Logistik, Elsfleth
Jade2Pro Projekt: AutoMeT – Autonome und ferngesteuerte Meerestechnik

Elsfleth, 16.05.2018

MOTIVATION

- Computergestützte Simulation von Offshore-Operationen mit **Mehrkörpersystemen** im Seegang gewinnt an Bedeutung
- Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen den Einzelkörpern ist erforderlich
- Bewegungsgleichungen der Einzelkörper müssen im gleichen Referenzsystem vorliegen
- Besonderheit bei maritimen Anwendungen sind nicht zu vernachlässigende hydrodynamische Effekte – Added Masses
- Diese sind Form- und damit Bewegungsrichtungs-abhängig

$$\bar{\mathbf{m}}_b = \begin{bmatrix} m + m_{h,11} & 0 & 0 \\ 0 & m + m_{h,22} & 0 \\ 0 & 0 & m + m_{h,33} \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{J}}_b = \begin{bmatrix} J_{11} + J_{h,11} & 0 & 0 \\ 0 & J_{22} + J_{h,22} & 0 \\ 0 & 0 & J_{33} + J_{h,33} \end{bmatrix}$$

- Simulation der Körperbewegung im erdfesten Koordinatensystem erfordert die Transformation der Trägheitsmatrizen

SCHIFFSTYP

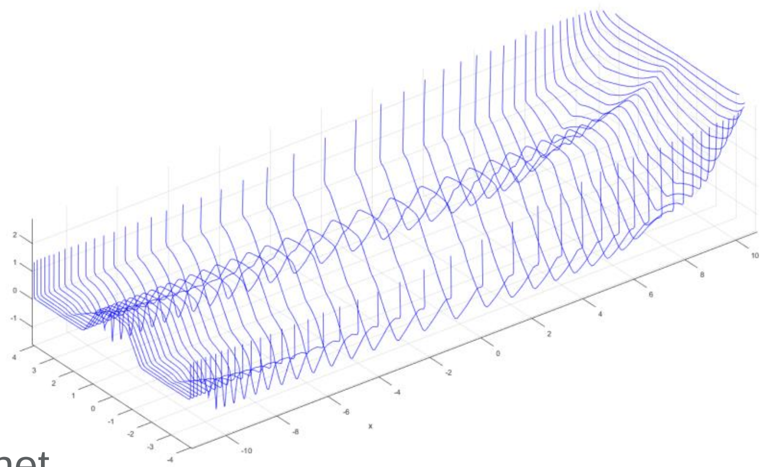
- Crew Transfer Vessel
  - Katamaran
  - L_{oa} = 22.0 m
  - B = 8.3 m
  - d = 1.70 m
  - m = 60 t
  - v_{max} = 25.0 kn
  - 25 Passagiere

- Hydrodynamische Seegangs-Koeffizienten wurden mit dem Potentialcode WAMIT berechnet
  - Hydrodynamische Massen und Trägheitsmomente
  - Dämpfungs- und Rückstellkoeffizienten
  - Erregerkräfte aus dem Seegang

- Viskose Widerstandskoeffizienten wurden im Rahmen einer Abschlussarbeit mit einem CFD-Solver ermittelt

SEEGANGSMODELL

- Windsee und zwei Dünungen können simuliert werden
- Windsee:
  - Standard JONSWAP Spektrum - Nordsee
  - Irregulärer Seegang wird als Überlagerung von harmonischen Wellen mit zufälligen Phasen verwendet
- Wind und Strömung werden vernachlässigt



- Schiff wird Spantweise diskretisiert
- Auftriebskraft wird an der aktuellen Wasserlinie berechnet
- Wellenkräfte werden aus dynamischem Druck im Seegang und Erregerkräften aus WAMIT berechnet
- Dämpfungskräfte werden mit Parametern aus WAMIT berechnet

BEWEGUNGSGLEICHUNGEN EINES FREI SCHWIMMENDEN KÖRPERS - KÖRPERFEST

- Traditionell sind die Bewegungsgleichungen im körperfesten Referenzsystem definiert
- Massenmatrix $\boldsymbol{m}_b$ und Trägheitsmomente $\mathbf{J}_b$ sind im körperfesten System konstant

Kirchhoff-Gleichungen:

$$\frac{d\vec{\mathbf{P}}}{dt} + \vec{\boldsymbol{\omega}} \times \vec{\mathbf{P}} = (X, Y, Z)^T \qquad \text{(Kraftgleichungen)}$$

$$\underbrace{\frac{d\vec{\mathbf{L}}}{dt} + \vec{\boldsymbol{\omega}} \times \vec{\mathbf{L}}}_{\text{Euler-Kreiselgleichung}} + \underbrace{\vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{P}}}_{\text{Destabilisierendes Moment}} = (K, M, N)^T \qquad \text{(Momentengleichungen)}$$

- Bewegungsgleichungen für 6 Freiheitsgrade
- Kirchhoff-Gleichungen beschreiben das Bewegungsverhalten eines schwimmenden Körpers unter Einbeziehung der hydrodynamischen Trägheitseffekte im körperfesten Koordinatensysten

- **Im Hinblick auf Mehrkörpersysteme:** Kann man die Bewegungsgleichungen in einem erdfesten Koordinatensystem definieren?

JADE HOCHSCHULE
Wilhelmshaven Oldenburg Elsfleth

Definition der Bewegungsgleichungen im inertialen System

Translation

Impuls: $\vec{\mathbf{P}}_e = \bar{\mathbf{m}}_e \vec{\mathbf{v}}_e$

Rotation

Drehimpuls: $\vec{\mathbf{L}}_e = \bar{\mathbf{J}}_e \vec{\boldsymbol{\omega}}_e$

Mit der Euler-Transformationsmatrix $\bar{\mathbf{C}}_{be}$

$$\bar{\mathbf{C}}_{be} = \begin{bmatrix} c\Theta c\Psi & s\Phi s\Theta c\Psi - c\Phi s\Psi & c\Phi s\Theta c\Psi + s\Phi s\Psi \\ c\Theta s\Psi & s\Phi s\Theta s\Psi + c\Phi c\Psi & c\Phi s\Theta s\Psi - s\Phi c\Psi \\ -s\Theta & s\Phi c\Theta & c\Phi c\Theta \end{bmatrix}$$

können die Matrizen $\boldsymbol{m}_b$ und $\mathbf{J}_b$ ins Inertialsystem transformiert werden

$$\bar{\mathbf{m}}_e = \bar{\mathbf{C}}_{be} \bar{\mathbf{m}}_b \bar{\mathbf{C}}_{be}^{\top}$$

$$\bar{\mathbf{J}}_e = \bar{\mathbf{C}}_{be} \bar{\mathbf{J}}_b \bar{\mathbf{C}}_{be}^{\top}$$

Die zeitliche Ableitung ergibt

$$\frac{d\vec{\mathbf{P}}_e}{dt} = \vec{\mathbf{F}}_e = \bar{\mathbf{m}}_e \dot{\vec{\mathbf{v}}}_e + \dot{\bar{\mathbf{m}}}_e \vec{\mathbf{v}}_e$$

$$\frac{d\vec{\mathbf{L}}_e}{dt} = \vec{\mathbf{M}}_e = \bar{\mathbf{J}}_e \dot{\vec{\boldsymbol{\omega}}}_e + \dot{\bar{\mathbf{J}}}_e \vec{\boldsymbol{\omega}}_e$$

s = Sinus, c = Kosinus, b = körperfest, e = erdfest

JADE HOCHSCHULE
Wilhelmshaven Oldenburg Elsfleth

Definition der Bewegungsgleichungen im inertialen System

Translation

$$\frac{d\vec{\mathbf{P}}_e}{dt} = \vec{\mathbf{F}}_e = \bar{\mathbf{m}}_e \dot{\vec{\mathbf{v}}}_e + \dot{\bar{\mathbf{m}}}_e \vec{\mathbf{v}}_e$$

Rotation

$$\frac{d\vec{\mathbf{L}}_e}{dt} = \overrightarrow{\mathbf{M}}_e = \bar{\mathbf{J}}_e \dot{\vec{\boldsymbol{\omega}}}_e + \dot{\bar{\mathbf{J}}}_e \vec{\boldsymbol{\omega}}_e$$

Die zeitliche Ableitung der Trägheitsmatrizen ist

$$\dot{\bar{\mathbf{m}}}_e = \dot{\bar{\mathbf{C}}}_{be} \bar{\mathbf{m}}_b \bar{\mathbf{C}}_{be}^{\top} + \bar{\mathbf{C}}_{be} \bar{\mathbf{m}}_b \dot{\bar{\mathbf{C}}}_{be}^{\top}$$

$$\dot{\bar{\mathbf{J}}}_e = \dot{\bar{\mathbf{C}}}_{be} \bar{\mathbf{J}}_b \bar{\mathbf{C}}_{be}^{\top} + \bar{\mathbf{C}}_{be} \bar{\mathbf{J}}_b \dot{\bar{\mathbf{C}}}_{be}^{\top}$$

Durch einführen der Einheitsmatrix

$$\mathbf{C}_{be} \mathbf{C}_{be}^{\top} = \mathbf{C}_{be}^{\top} \mathbf{C}_{be} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

sowie der Verwendung des Kreuzproduktoperators

$$\dot{\bar{\mathbf{C}}}_{be} \cdot \bar{\mathbf{C}}_{be}^{\top} = \widetilde{\boldsymbol{\omega}}_e = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{ze} & \omega_{ye} \\ \omega_{ze} & 0 & -\omega_{xe} \\ -\omega_{ye} & \omega_{xe} & 0 \end{bmatrix} = (\vec{\boldsymbol{\omega}}_e \times)$$

b = körperfest, e = erdfest

BEWEGUNGSGLEICHUNGEN EINES FREI SCHWIMMENDEN KÖRPERS - ERDFEST

Definition der Bewegungsgleichungen im inertialen System

folgen die Bewegungsgleichungen im erdfesten Koordinatensystem

Translation: $$\vec{\mathbf{F}}_e = \bar{\mathbf{m}}_e \, \dot{\vec{\mathbf{v}}}_e + \vec{\boldsymbol{\omega}}_e \times (\bar{\mathbf{m}}_e \vec{\mathbf{v}}_e) - \bar{\mathbf{m}}_e (\vec{\boldsymbol{\omega}}_e \times \vec{\mathbf{v}}_e)$$

Rotation: $$\vec{\mathbf{M}}_e = \bar{\mathbf{J}}_e \dot{\vec{\boldsymbol{\omega}}}_e + \vec{\boldsymbol{\omega}}_e \times (\bar{\mathbf{J}}_e \vec{\boldsymbol{\omega}}_e)$$

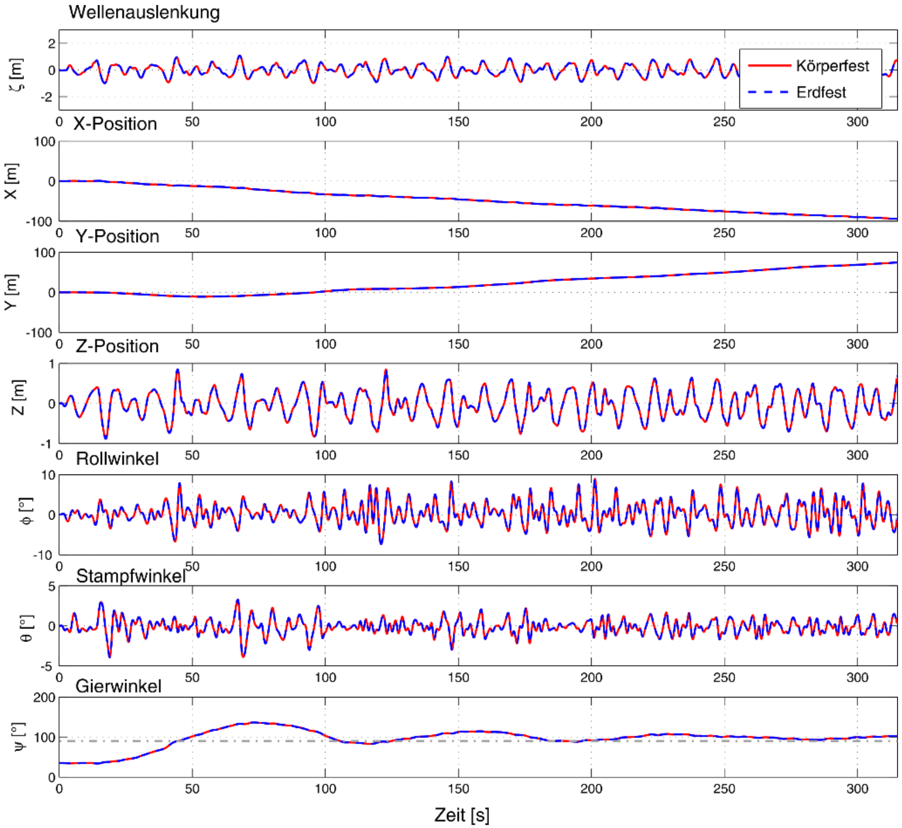
- Die Rotationsgleichung hat die Gleiche Struktur wie im körperfesten Koordinatensystem
- Die Translationsgleichung beinhaltet zwei unerwartete Terme, die nur aufgrund der Matrixstruktur der Masse sowie der Überlagerung aus Translation und Rotation existieren
- Die Terme heben sich nicht gegeneinander auf
- Im Fall einer skalaren Masse (trockene Mechanik bzw. Kugel) oder reiner Translation verschwinden die Terme und die Translationsgleichung ist identisch dem 2. Newtonschen Axiom
- Die Transformation in das körperfeste Koordinatensystem führt wieder auf die Kirchhoff-Bewegungsgleichungen

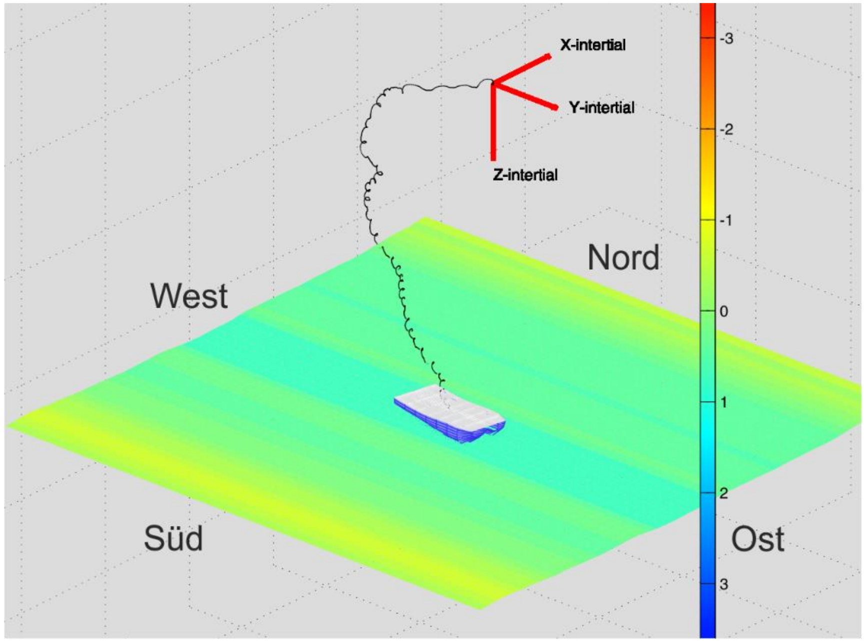
b = körperfest, e = erdfest

SIMULATIONSERGEBNISSE

- Forderung: Wenn die Gleichungen zwischen beiden Koordinatensystemen transformierbar sind, müssen Simulationen auch zu identischen Bewegungen führen!

Seegang: H_S = 2.0 m, T_P = 9 s aus N
Anfangskurs Schiff: 35° NNO

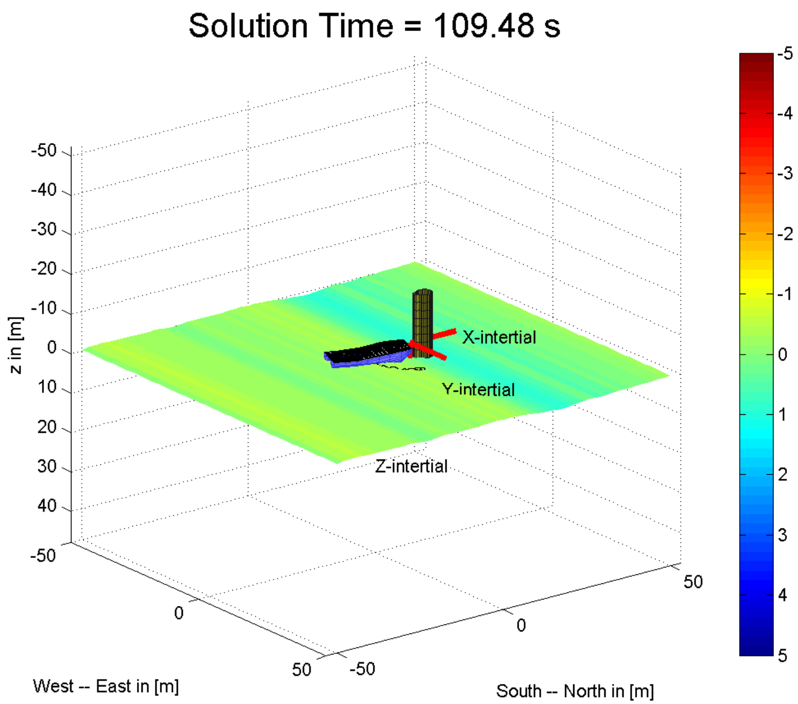


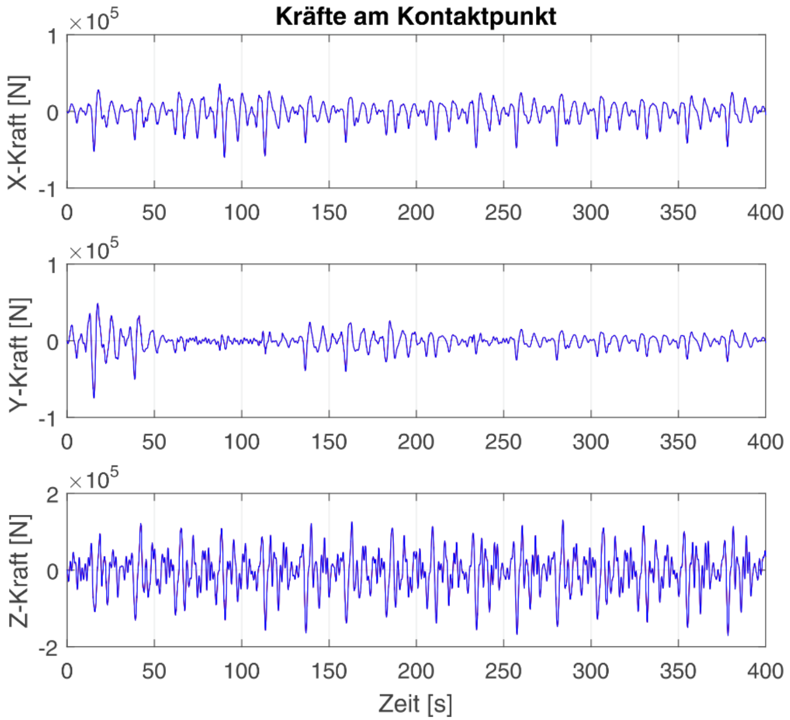


MEHRKÖRPERSYSTEM 1

- Szenario: Ein CTV liegt im Seegang mit dem Bug an einer OWEA
- Typisches Überstiegsszenario in Windparks
- Ein fixierter und ein schwimmender Körper
- Das Schiff kann sich rotatorisch um den Kontaktpunkt bewegen
- Das erdfeste Referenzsystem liegt im Kontaktpunkt C
- Zwangsbedingungen in den Bewegungsgleichungen verhindern translatorische Bewegungen
- Bewegungsgleichungen und Trägheits-matrizen werden im erdfesten System gelöst.

MEHRKÖRPERSYSTEM 1





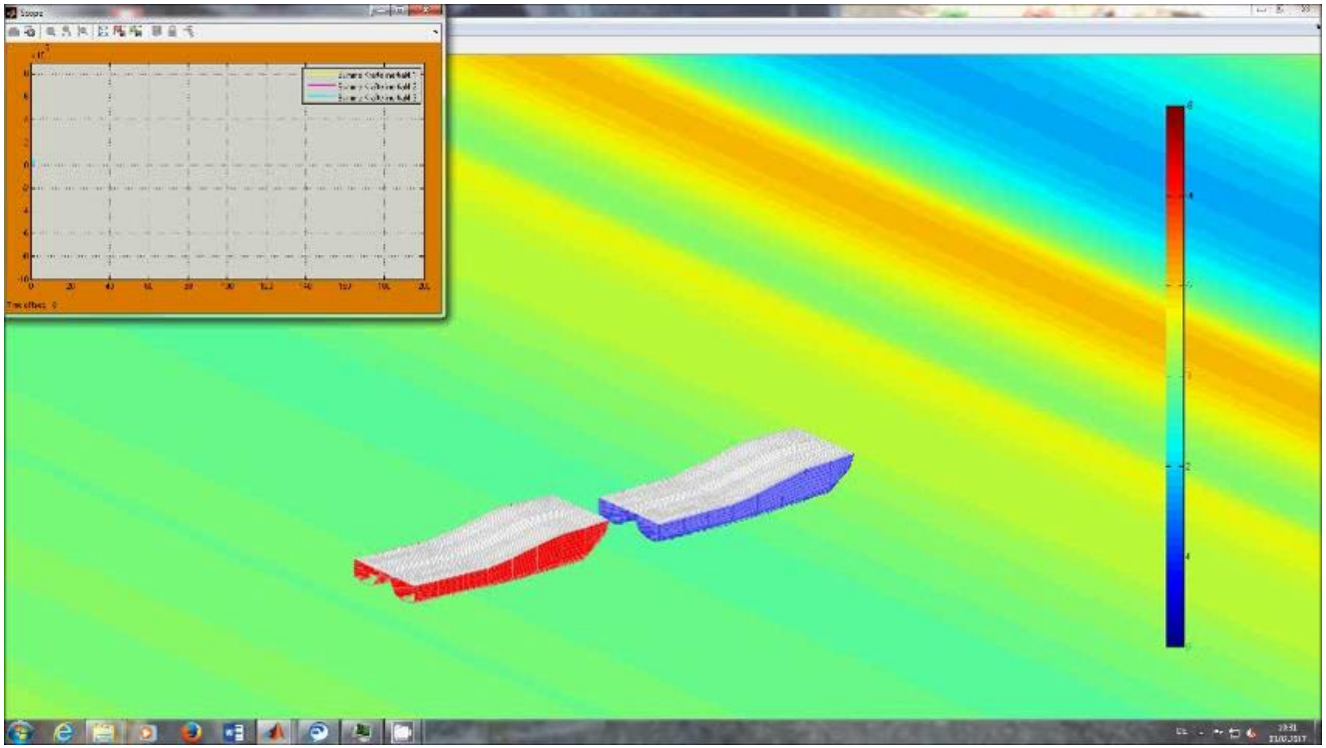
- Das Schiff zeigt ein plausibles Bewegungsverhalten und richtet sich entlang der Wellenausbreitungsrichtung aus
- Die vertikalen Zwangskräfte am Kontaktpunkt liegen in der Größenordnung des Zusatzauftriebs aus dem Seegang
- Es wird möglich, die benötigten Kontaktkräfte „Bugfender – OWEA“ unter verschiedenen äußeren Bedingungen zu ermitteln

MEHRKÖRPERSYSTEM 2

- Szenario: Zwei Schiffe in Schleppformation - Zwei schwimmende Körper
- Dem schleppenden Schiff wird eine Kraft in Schiffslängsrichtung aufgeprägt
- Verbindung der Schiffe erfolgt über gelenkig verbundene „Schleppstangen“
- Das gemeinsame Referenzsystem liegt im Kontaktpunkt der Schleppstangen
- Bewegungsgleichungen und Trägheitsmatrizen werden in das Referenzsystem transformiert

MEHRKÖRPERSYSTEM 2

- Szenario: Zwei Schiffe in Schleppformation - Zwei schwimmende Körper



….. in progress

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Zusammenfassung

- Bewegungsgleichungen von schwimmenden Strukturen können im erdfesten Koordinatensystem aufgestellt werden
- Bewegungen sind identisch zur traditionellen körperfesten Betrachtungsweise
- Mechanisch gekoppelte Mehrkörpersysteme können simuliert werden

Ausblick

- Erdfeste Bewegungsgleichungen werden in GreenMEPS Schiffssimulator implementiert
- Standardmanöver (Zick-Zack, Drehkreis) sollen gefahren und mit dem derzeit implementierten Bewegungsmodell (körperfest) verglichen werden
- Überstiegsszenario Schiff an der OWEA als gesamtes Szenario im GreenMEPS Schiffssimulator
  - Annäherung – Kontakt Bugfender zu OWEA-Turm – Ablegen vom Turm
- Weitere Mehrkörpermodelle (z.B. ROV-Simulator) können implementiert werden

VIELEN DANK FÜR DIE AUFMERKSAMKEIT!