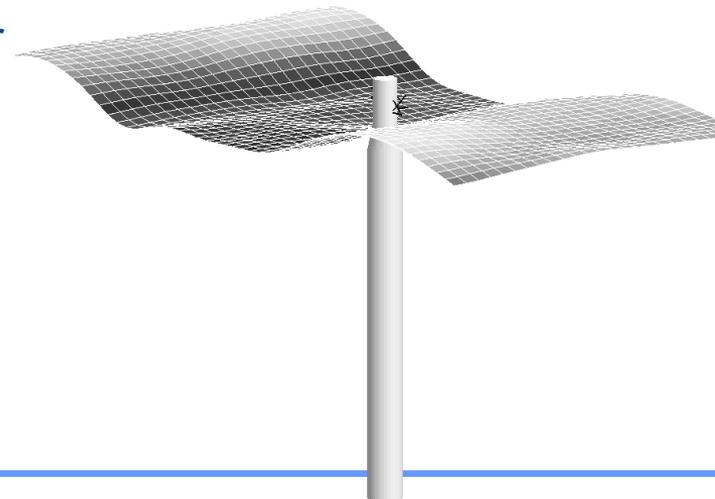
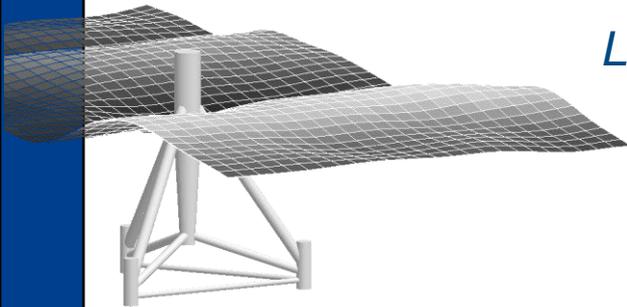


Integrale Simulationsumgebung für die dynamische Analyse verschiedener OWEA-Tragstrukturkonzepte

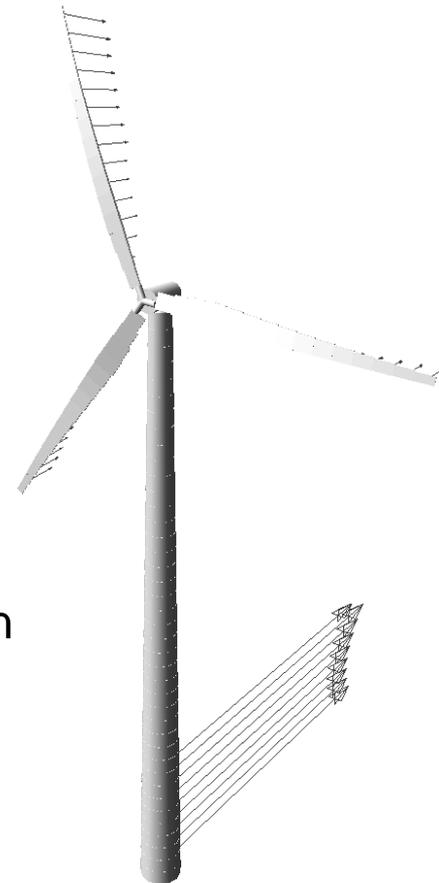
M. Kohlmeier, T. Kossel und W. Zielke

*ForWind – Zentrum für Windenergieforschung
Institut für Strömungsmechanik und Umweltphysik
Leibniz Universität Hannover*



Überblick

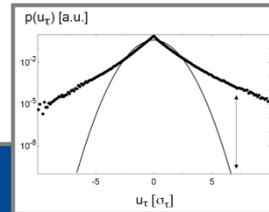
- **Motivation**
 - Forschungsziele im ForWind Teilprojekt IX
- **Wellen- und Wellenlastsimulation**
 - Lastsimulation mittels „WaveLoads“
 - Möglichkeiten der Anwendung
- **Integrierte Modellierung von OWEAs**
 - Strategie der integrierten Simulation
 - Komponenten der Simulationsumgebung
 - Simulation einer WEA auf dem OC3-Tripod unter Anwendung von Wellen- und Windlastmodellen



Motivation – Umfangreicher Simulationsbedarf

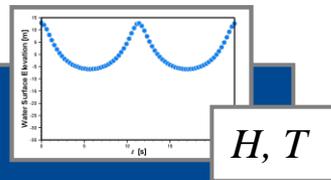
■ Wechselwirkungen

- Lasten aus turbulentem Windfeld und deren aeroelastische Wechselwirkung mit dem Rotor

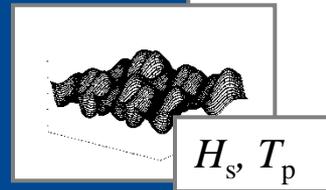


■ Einwirkungen

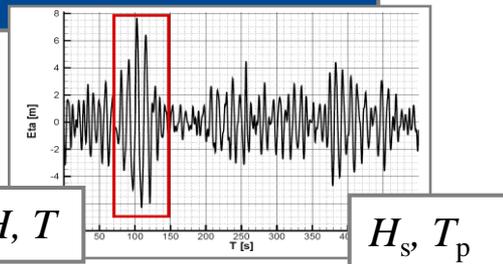
- Design Wave
- Stochastische Simulation
- Tailored Sequence



H, T



H_s, T_p



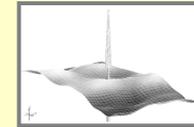
H, T

H_s, T_p

■ Gesamtsimulation

- Analyse der Tragstruktur im Zeitbereich

- Schnelle und verlässliche Methoden
 - Vereinfachte Simulationsansätze
 - Hocho aufgelöste Strukturdynamik
 - Optimierung



- Flexibilität bezüglich der Tragstruktur



- Kommerzielle und eigene Software
 - ANSYS, MD Adams, MD Nastran etc.
 - FAST/AeroDyn, WaveLoads
 - Poseidon/FLEX5, aeroFLEX etc.

ForWind – Integrierte Modellierung

Maritimes Windfeld

- TP I: Turbulenzmodellierung: Modellierung der kleinskaligen atmosphärischen Turbulenz
- TP II: Offshore-Windenergie: Charakterisierung der maritimen atmosphärischen Grenzschicht

Wellenlasten

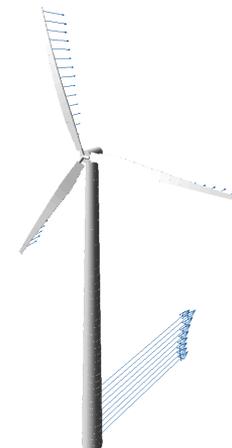
- TP IV: Belastungsansätze von Offshore-Windkraftanlagen

Gründung

- TP VII: Modellierung der Bauwerk-Boden-Interaktion für Offshore-Windenergieanlagen

TP IX: Integrierte Modellierung von Offshore-Windenergieanlagen

- Modellierung dynamischer Lasten auf Windenergieanlagen
- Numerische Berechnung dynamischer Lasten im turbulenten Windfeld
- Integrale Modellierung der Tragstrukturdynamik von Offshore-WEA



Wellenlastermittlung an hydrodynamisch schlanken Strukturen

Morison-Gleichung:

$$dF_N = \left[\underbrace{c_m \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u_N}{\partial t}}_{\text{Trägheitskraft}} + \underbrace{c_D \frac{\rho}{2} D u_N |u_N|}_{\text{Widerstandskraft}} \right] ds$$

Trägheitskraft Widerstandskraft

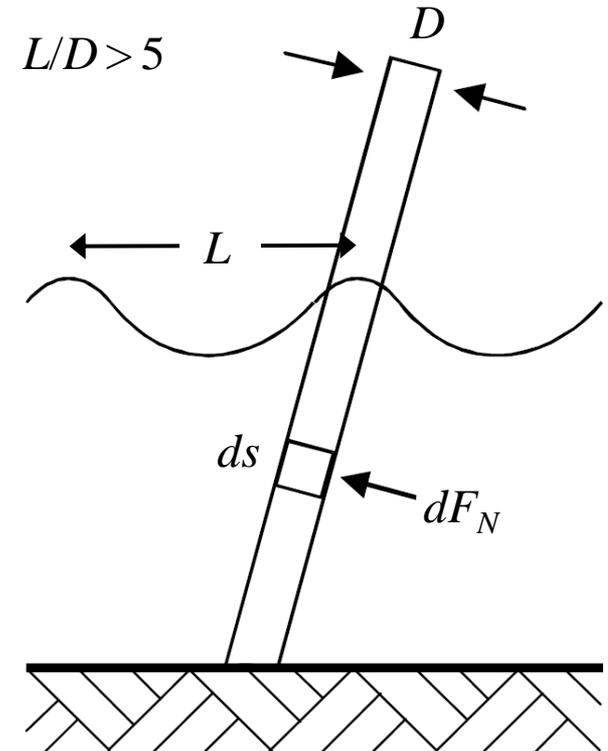
$$c_m \rho A \frac{\partial u_N}{\partial t} = \underbrace{c_a \rho A \frac{\partial u_N}{\partial t}}_{\text{Beschleunigungswiderstand}} + \underbrace{\rho A \frac{\partial u_N}{\partial t}}_{\text{Froude-Kryloff-Kraft}}$$

Beschleunigungswiderstand
~ hydrodynamische Wassermasse

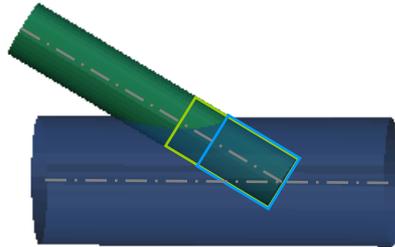
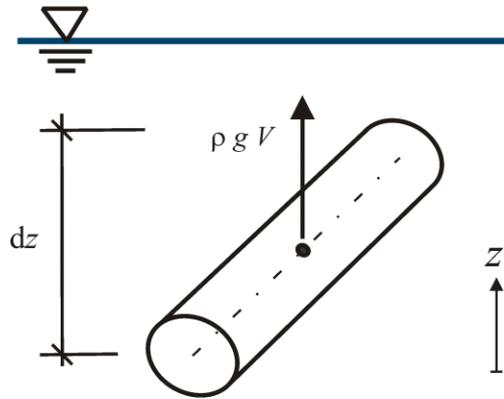
Froude-Kryloff-Kraft
~ verdrängte Wassermasse

c_D Widerstandsbeiwert
 $c_m = 1 + c_a$ Trägheitsbeiwert

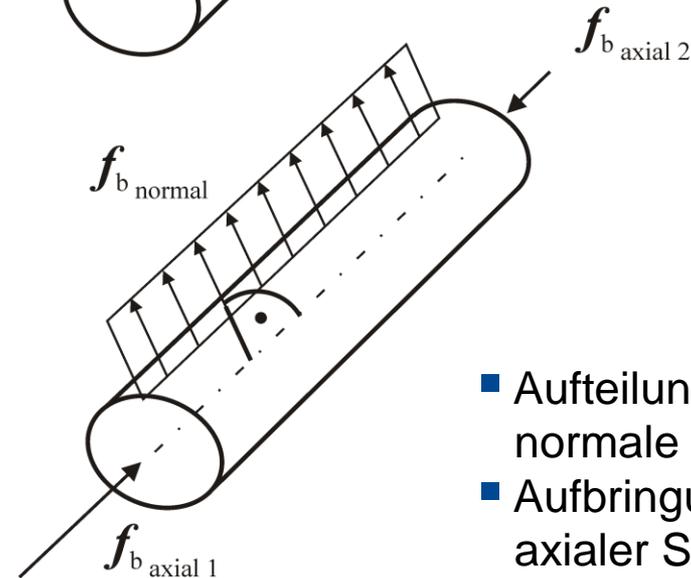
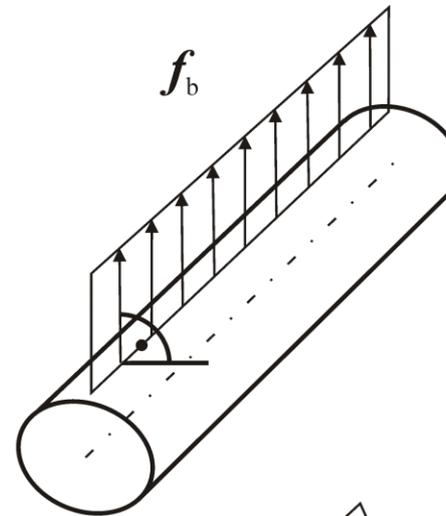
} abhängig von Struktur und
Strömungsverhältnissen



Auftriebslasten



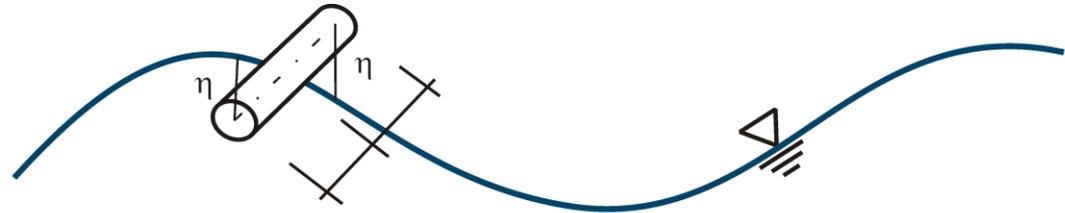
- Korrekte Berücksichtigung des Volumens überlappender Elemente am Knoten



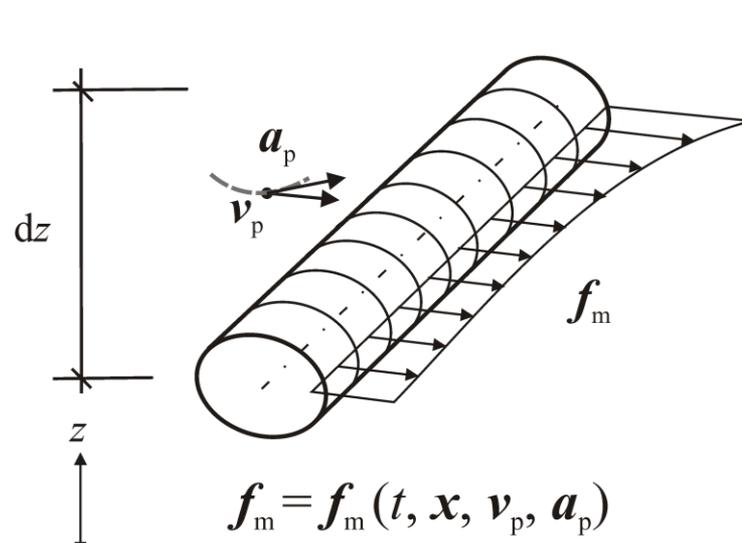
- Aufteilung in axiale und normale Lastanteile
- Aufbringung lokaler axialer Spannungen in der Struktur

Hydrodynamische Lasten an zylindrischen Strukturen

- Berücksichtigung der Eintauchtiefe und Interpolation der Lasten

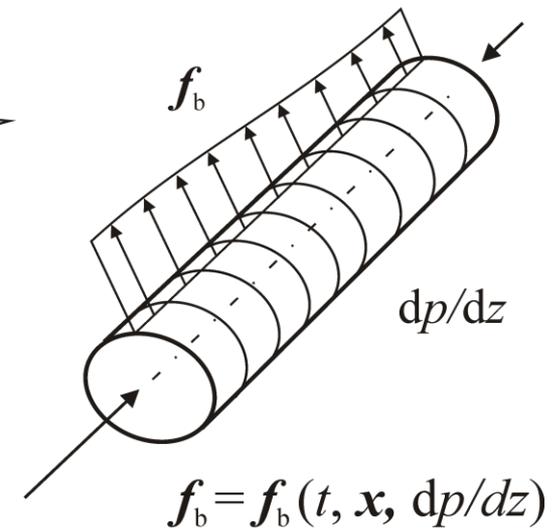


- Beliebige Diskretisierung und Integration der Lasten



$$f_m = f_m(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}_p, \mathbf{a}_p)$$

Wellenlasten



$$f_b = f_b(t, \mathbf{x}, dp/dz)$$

Auftriebslasten

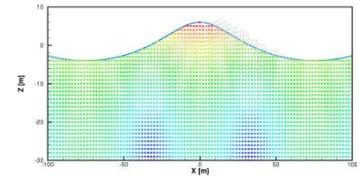
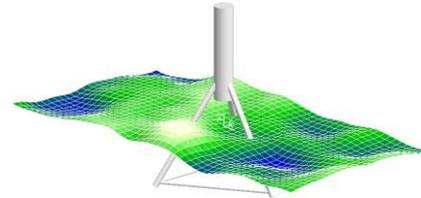
- Berücksichtigung der aktuellen Lage der Struktur

- Lasten aus Struktur-
bewegungen sind noch
unberücksichtigt

Anwendungsbereiche des Programms „WaveLoads“

Seegangsbeschreibung

- lineare und nichtlineare Wellentheorien
- unregelmäßiger Seegang (1D/2D)
- Auswertung der Wellenkinematik an beliebigen Punkten

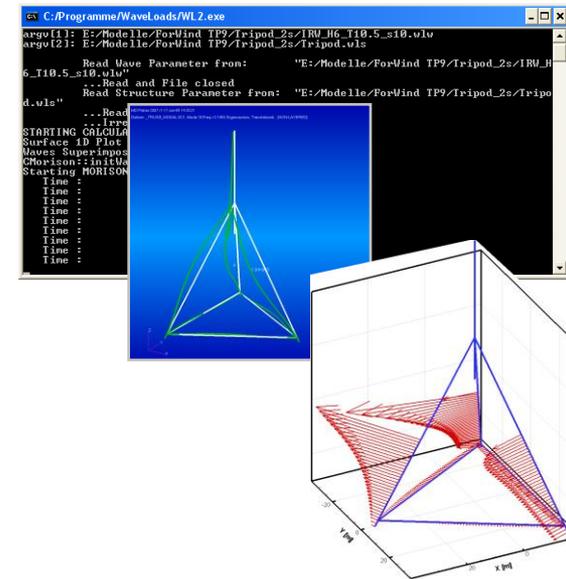


Lastermittlung

- Lastberechnung für beliebig zusammengesetzte zylindrische Strukturen
- Lastintegration für Strukturgruppen

Softwareintegration

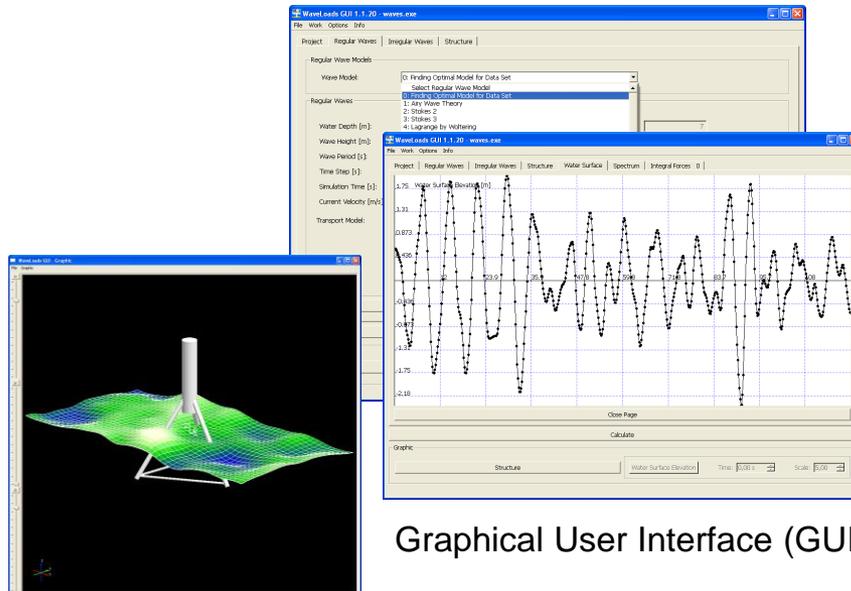
- Erzeugen von Eingabedateien für automatisierte FE-Berechnung inkl. Post-Processing
- Bereitstellen von Schnittstellen zum dynamischen Einbinden in Simulationsumgebungen



Vorteile der Modularität

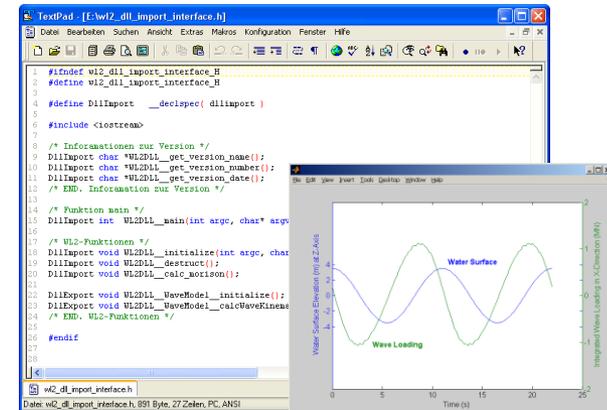
- Eigenständige Entwicklung der Module (C/C++, Fortran, MATLAB)
- Einfache Verifikation des Teilmoduls und Validierung im Gesamtmodell
- Weitergabe an Dritte als Teilmodul inkl. Schnittstellenmodul

WaveLoads als dynamisch eingebundene Bibliothek (DLL)



Graphical User Interface (GUI)

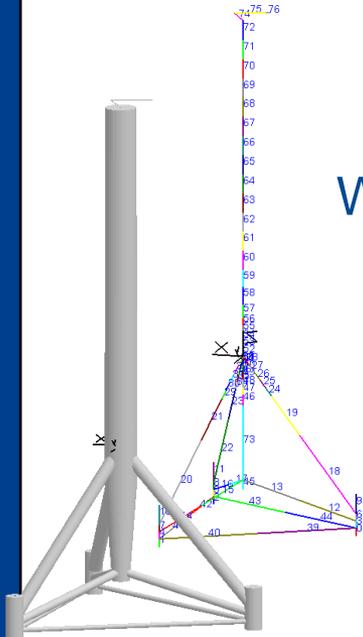
WaveLoads (DLL) in graphischer Oberfläche



WaveLoads (DLL) in Matlab® 7.1

Modellaufbau für Offshore-Tripod-Benchmark

Im Rahmen der “Offshore Code Comparison Collaboration (OC3)“
koordiniert vom “National Renewable Energy Laboratory (NREL)”

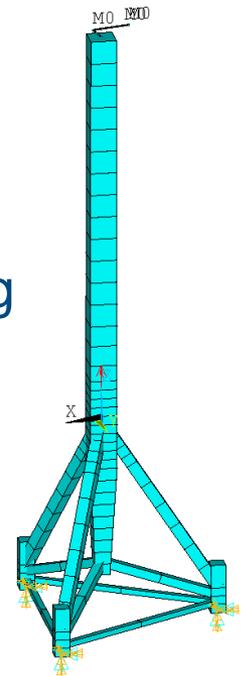


WaveLoads
Präprozessor

- Struktur + Lastzeitreihen
- Struktur + DLL

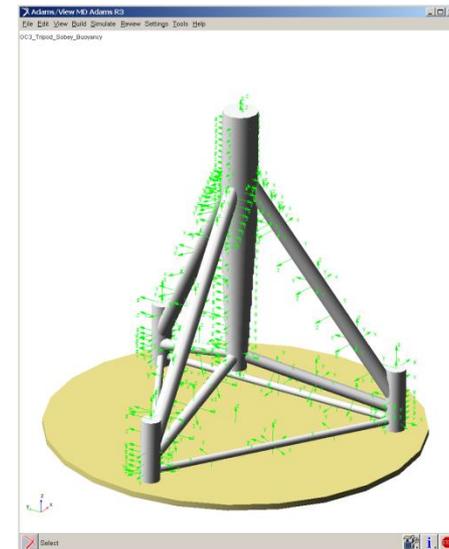
Finite-Element-Modellierung

- ANSYS
- MD Nastran
- Abaqus



Mehrkörperdynamik

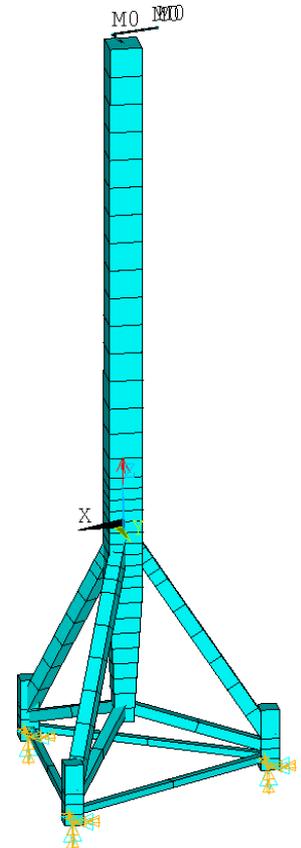
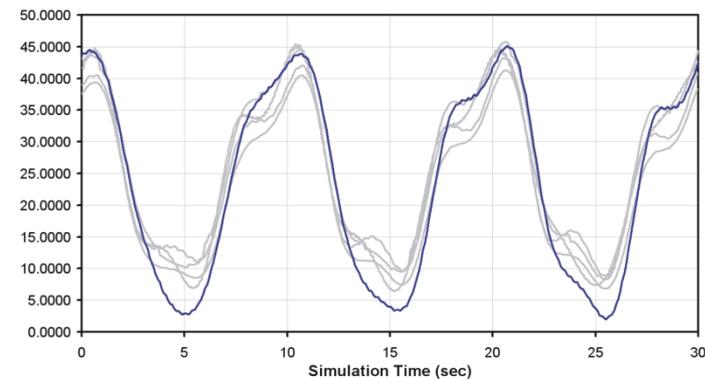
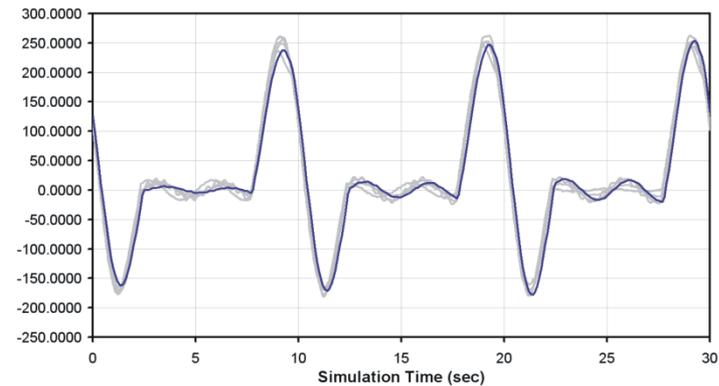
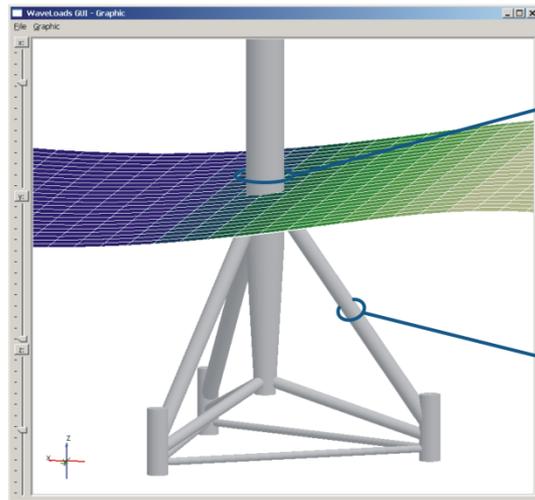
- MD Adams



OC3 Phase III – Offshore-Tripod unter hydrodynamischer Last

Finite-Elemente-Simulation in ANSYS

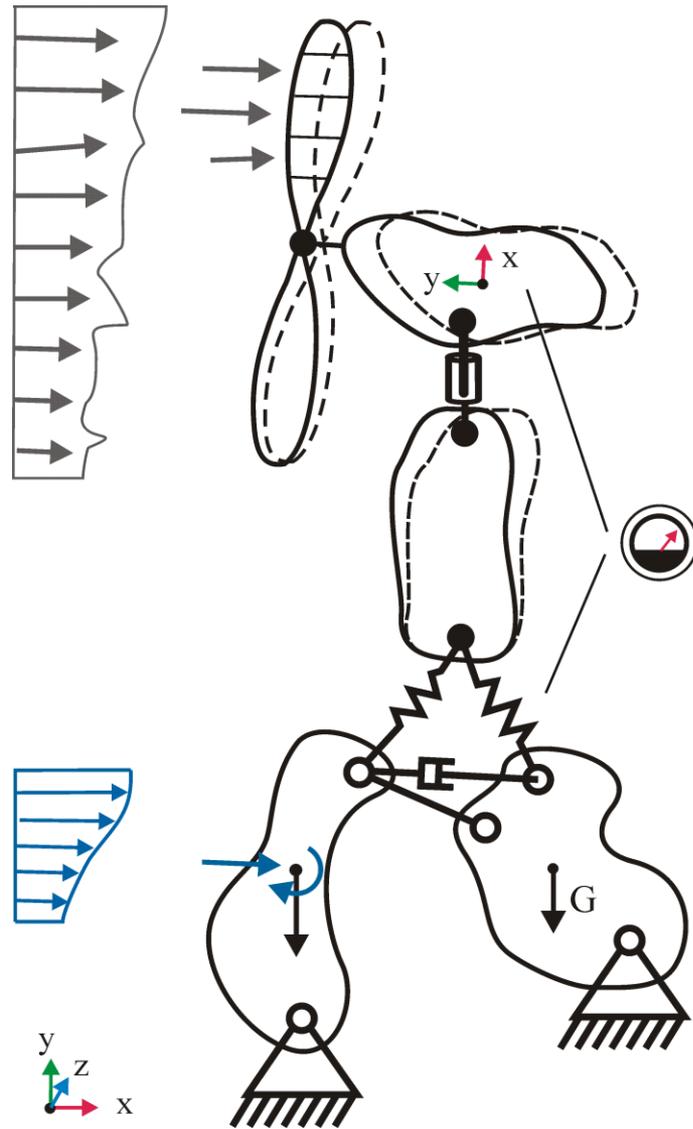
- OC3-Tripod-Tragstruktur
 - Wellenlasten
 - Auftriebskräfte



Beispielhafter Ergebnisvergleich

Mehrkörpersimulation

- Aerodynamik / Aeroelastik
Teilmodul: AeroDyn (NREL)
- Hydrodynamik / Lastermittlung
Teilmodul: WaveLoads
- Lösung der Bewegungsgleichungen des Gesamtsystems ist mit Hilfe weniger Freiheitsgrade möglich.



Exemplarische Struktur eines Mehrkörpermodells

Module für die Mehrköpersimulation

Modellaufbau

- FAST – Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence
Aeroelastisches Bemessungsprogramm für Horizontalachsen-
Windturbinen (NREL, Jason Jonkman) Fortran 90, DLL
- Controller für Drehmoment und Blattverstellung Fortran 90, DLL

Interaktion mit dem Windfeld

- AeroDyn – Aerodynamische Programmbibliothek
(NREL, David J. Laino) Fortran 90, DLL
- TurbSim – A stochastic, full-field, turbulent-wind simulator for
use with the AeroDyn-based design codes
(YawDyn, FAST, and MSC Adams®)
(NREL, Neil Kelley and Bonnie Jonkman) Fortran 90

(NREL - National Renewable Energy Laboratory)

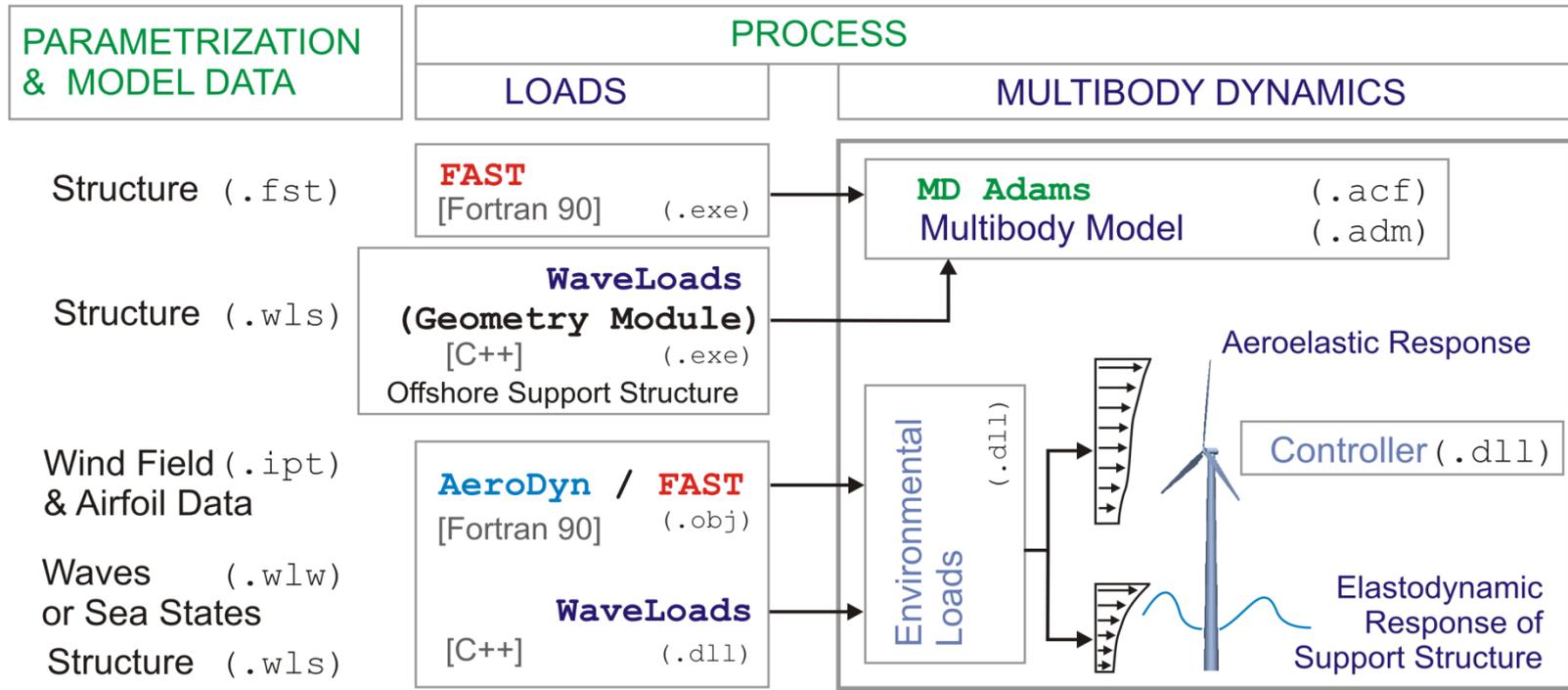
Einwirkung des Wellenfelds

- WaveLoads – Aus Seegang resultierende Belastungen auf
hydrodynamisch transparente Strukturen
(ISU, Kim Mittendorf, Nguyen Ba, Martin Kohlmeier) C++, DLL

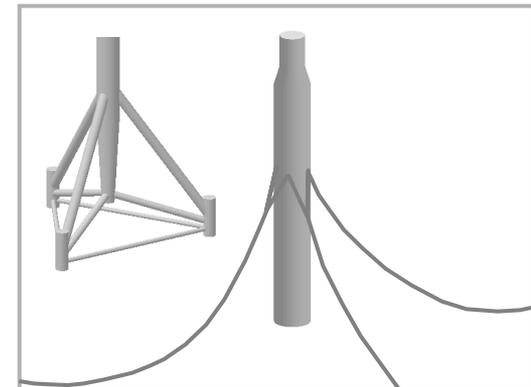
Gründungsproblematik

- Bodenmodell – Bereitstellung von Kennwerten für die lineare und
nichtlineare Beschreibung des Bodens DLL

Wind- und Wellenlastmodule in der Mehrkörpersimulation



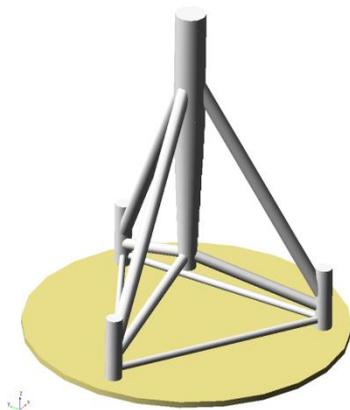
- ✓ Modularer Ansatz
- ✓ Flexible Anwendbarkeit
- ✓ Beliebige Tragstrukturkonzepte



Mehrkörperdynamik

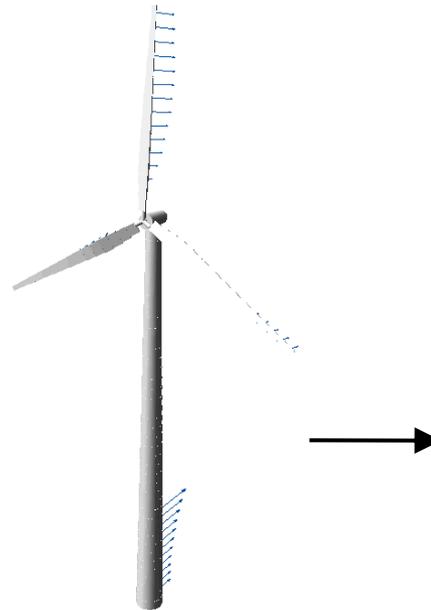
Gesamtsimulation in MD Adams

- Modellzusammenstellung
 - Windturbine
 - Tripod

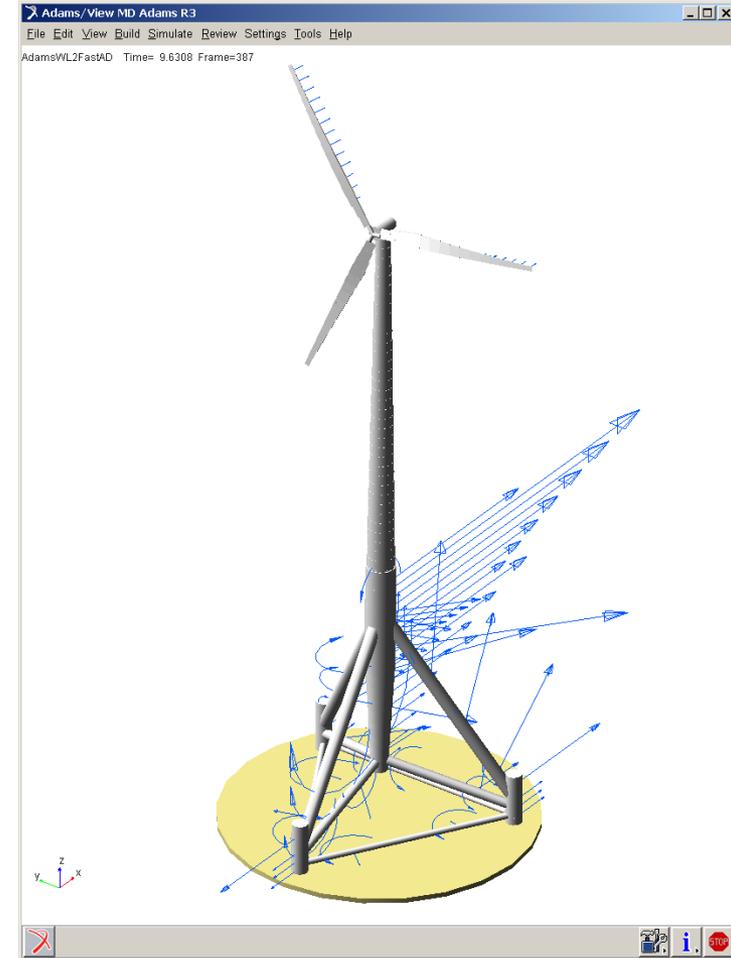


OC3-Tripod

+



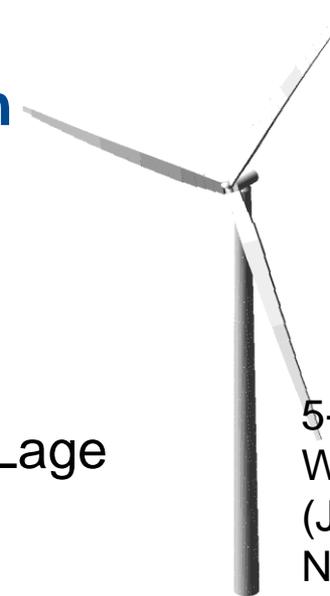
1,5 MW NREL-Turbine



Windturbine auf Offshore-Tripod

OC3-Phase IV – Schwimmende Strukturen

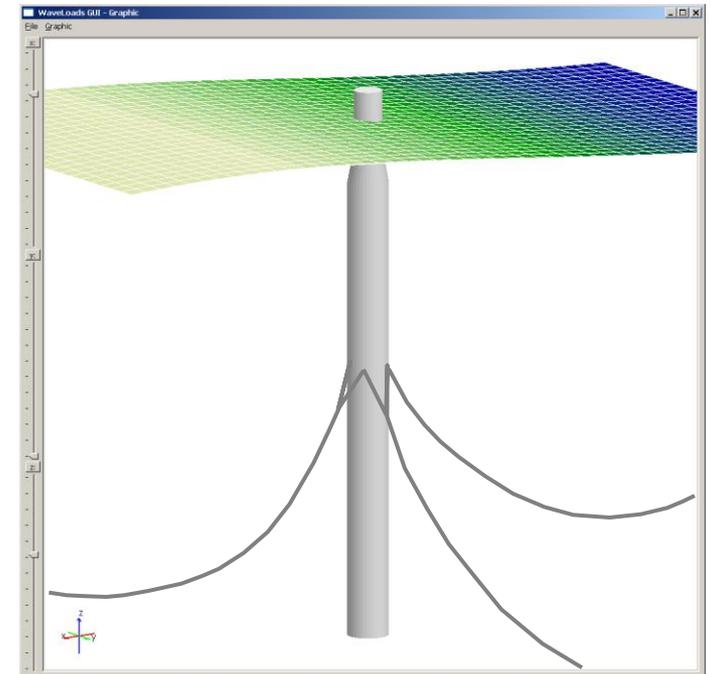
- ✓ Schwimmkörper: OC3-Hywind Spar-buoy
- ✓ Wellenlast und Auftrieb
- ✓ Berücksichtigung der aktuellen räumlichen Lage



5-MW Referenz-Windturbine
(Jonkman et al.,
NREL, 2009)

Weiterer Entwicklungsbedarf:

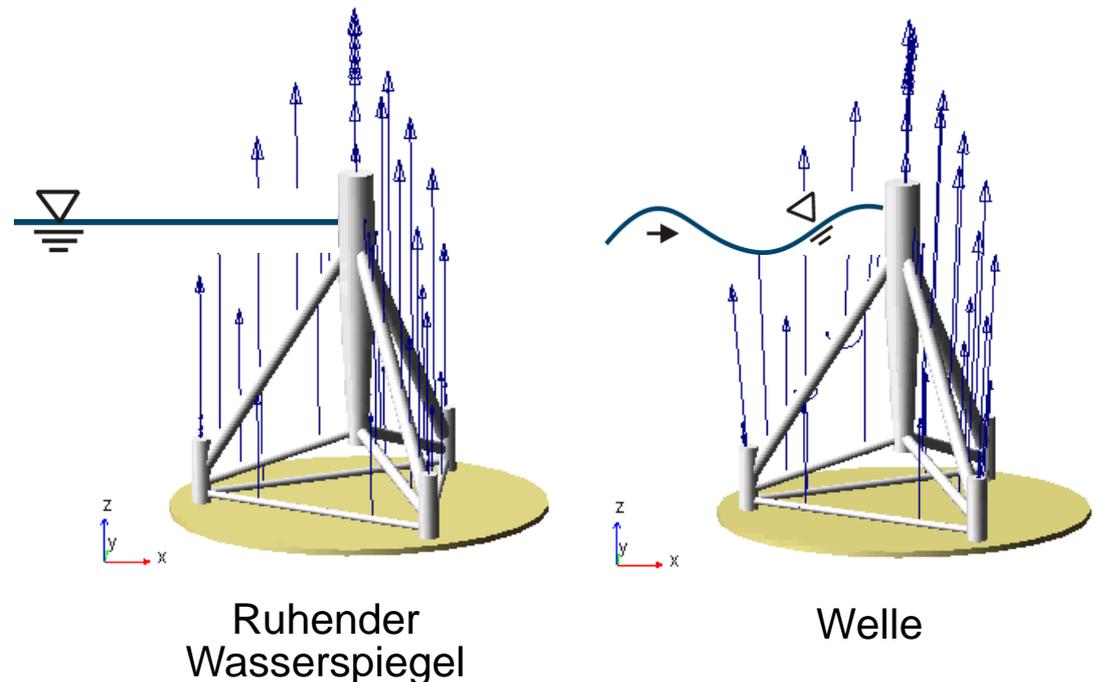
- Strömungskräfte aufgrund der Relativbewegung der Substrukturen (Geschwindigkeit, Beschleunigung)
- Axiale Strömungskräfte
- Einbeziehung der Verankerungsketten



OC3-Phase IV – Schwimmende Strukturen

Plausibilitätsbeispiel

- ✓ Wellenlast und Auftrieb auf nicht ortsfesten Strukturen
- ✓ Einbeziehung von hydrodynamischen Wechselwirkungen
- Aufsteigen des Tripods nach dem Lösen der Gründungsfixierungen
- Vernachlässigung der Reibungskräfte aus Strukturbewegungen



Zusammenfassung

Windlasten

- Blattelement-Impuls-Theorie [AeroDyn]

Turbulenzeffekte

Strukturdynamik

- Finite-Elemente-Simulation [ANSYS, MD Nastran, Abaqus]
- Mehrkörperdynamik [MD Adams]

Hydrodynamische Lasten

- Regelmäßige Wellen
- Seegang
- Auftrieb [WaveLoads]

Ausblick

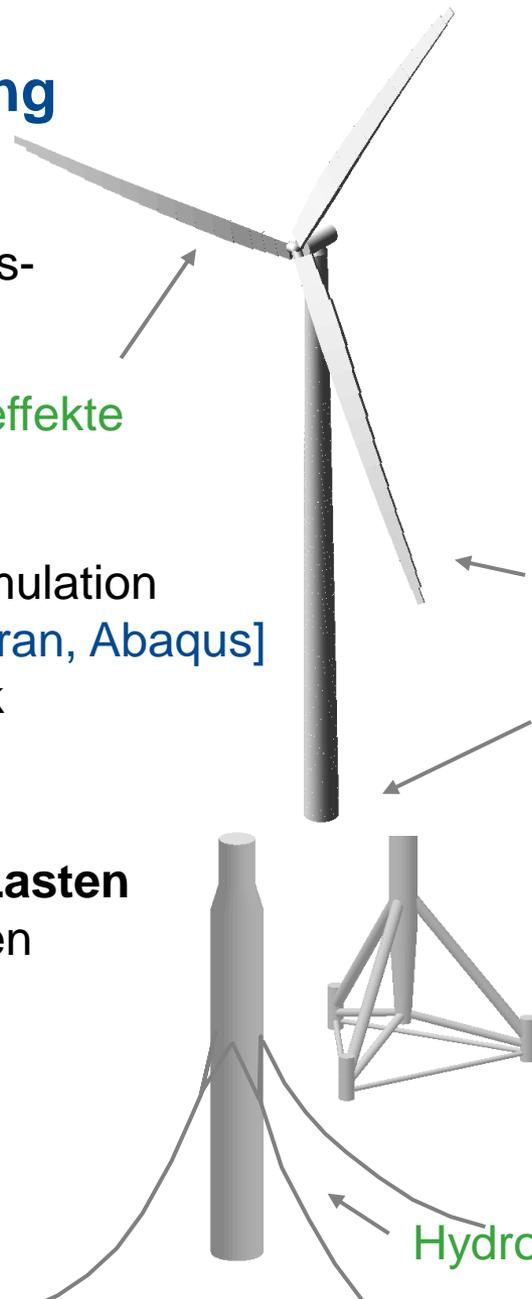
- Hydrodynamische Wechselwirkungen bei Strukturbewegungen
- Dämpfungseffekte und ihre Wirkung im Gesamtsystem

Aeroelastische Dämpfung

- Berücksichtigung verschiedener Tragstrukturen und Verbindungstypen

- Einbeziehung von bodenmechanischen Modellen

Hydrodynamische Dämpfung



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

www.forwind.de