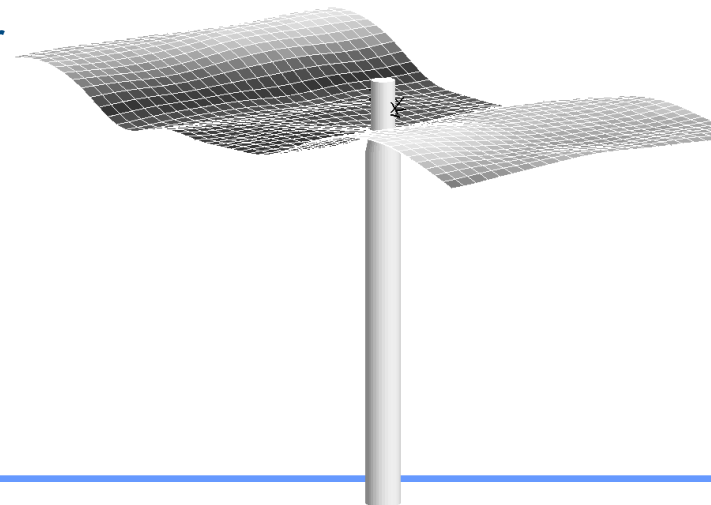
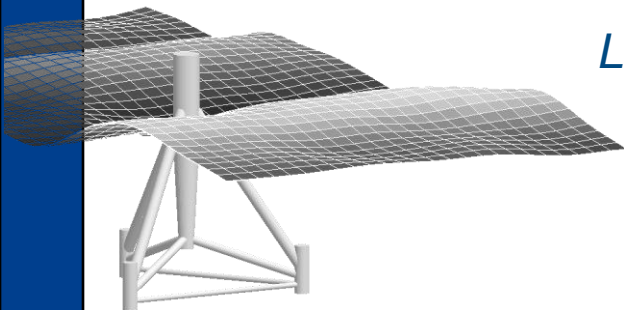


# **Integrale Simulationsumgebung für die dynamische Analyse verschiedener OWEA-Tragstrukturkonzepte**

M. Kohlmeier, T. Kossel und W. Zielke

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



# Überblick

## ■ Motivation

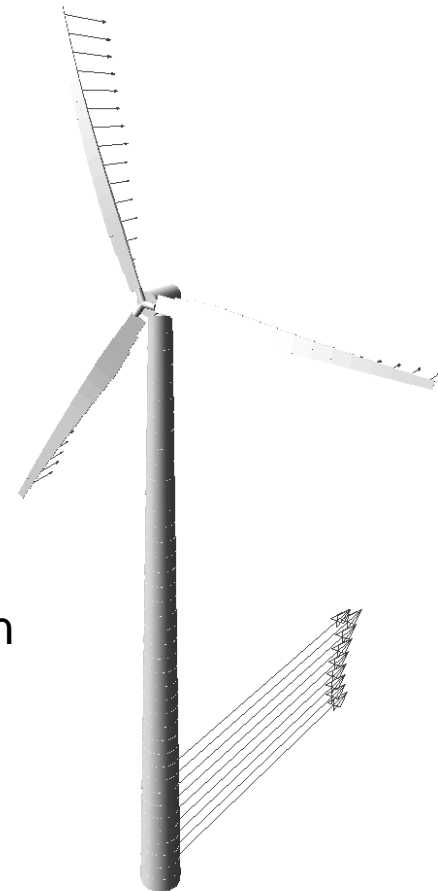
- Forschungsziele im ForWind Teilprojekt IX

## ■ Wellen- und Wellenlastsimulation

- Lastsimulation mittels „WaveLoads“
- Möglichkeiten der Anwendung

## ■ Integrierte Modellierung von OWEAs

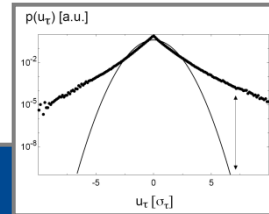
- Strategie der integrierten Simulation
- Komponenten der Simulationsumgebung
- Simulation einer WEA auf dem OC3-Tripod unter Anwendung von Wellen- und Windlastmodellen



# Motivation – Umfangreicher Simulationsbedarf

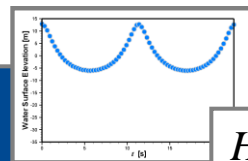
## ■ Wechselwirkungen

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

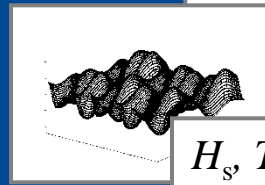


## ■ Einwirkungen

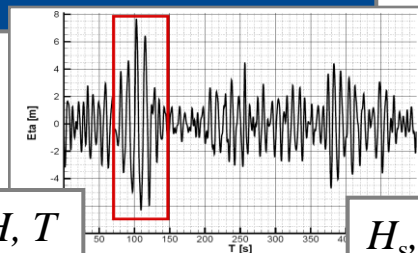
- Design Wave
- Stochastische Simulation
- Tailored Sequence



$H, T$



$H_s, T_p$



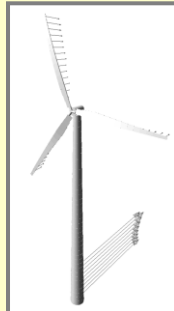
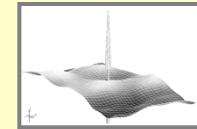
$H, T$

$H_s, T_p$

## ■ Gesamtsimulation

- Analyse der Tragstruktur im Zeitbereich

- Schnelle und verlässliche Methoden
  - Vereinfachte Simulationsansätze
  - Hochaufgelöste Strukturmechanik
  - 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

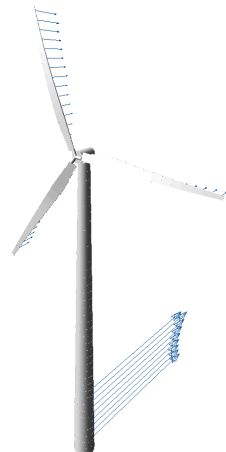
- TP IV: Belastungsansätze von Offshore-Windkraftanlagen

## 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

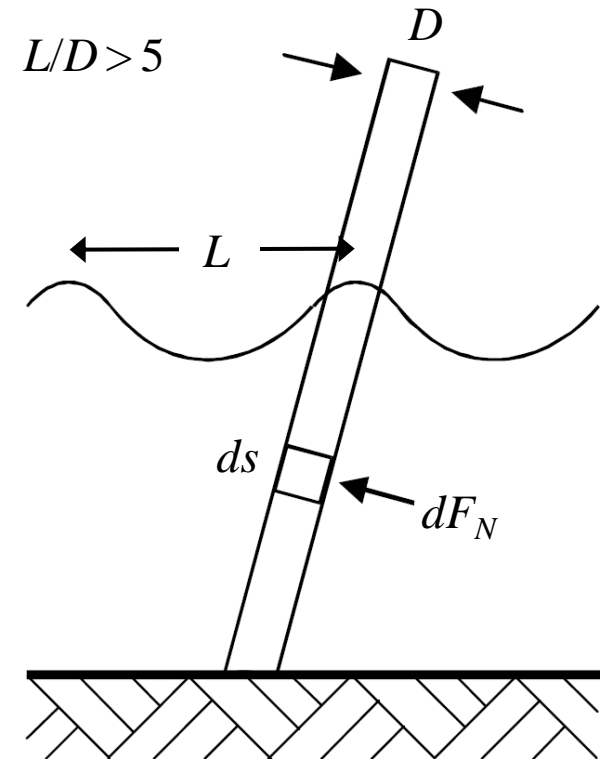
## Morison-Gleichung:

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

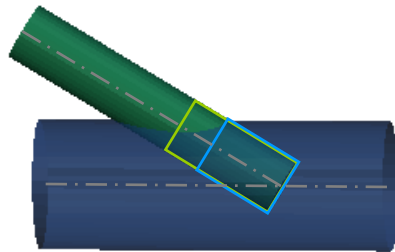
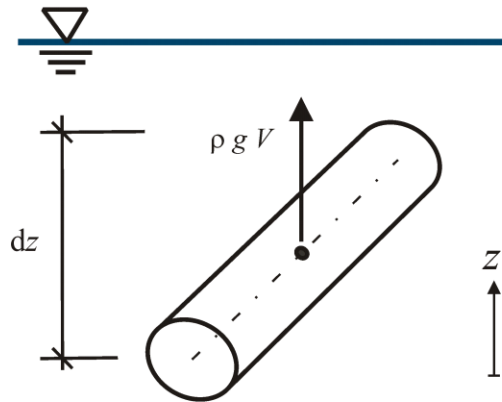
$$\underbrace{c_m \rho A \frac{\partial u_N}{\partial t}}_{\text{Beschleunigungswiderstand}} = \underbrace{c_a \rho A \frac{\partial u_N}{\partial t}}_{\text{Froude-Kryloff-Kraft}} + \underbrace{\rho A \frac{\partial u_N}{\partial t}}_{\sim \text{verdrängte Wassermasse}}$$

~ hydrodynamische Wassermasse

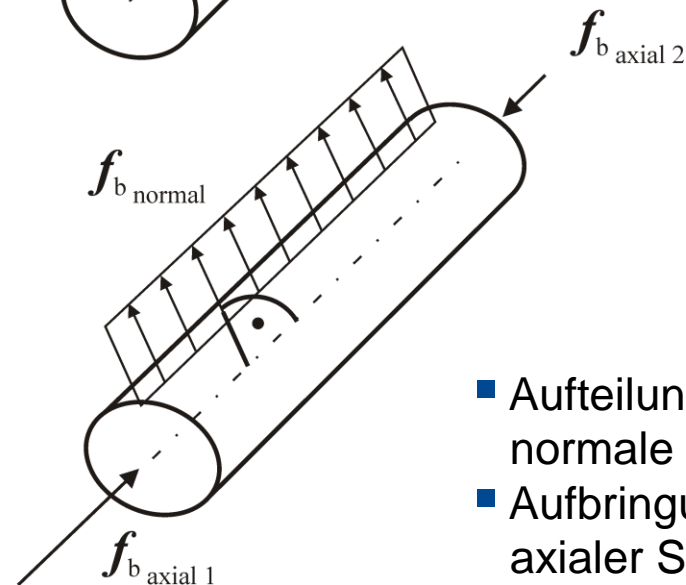
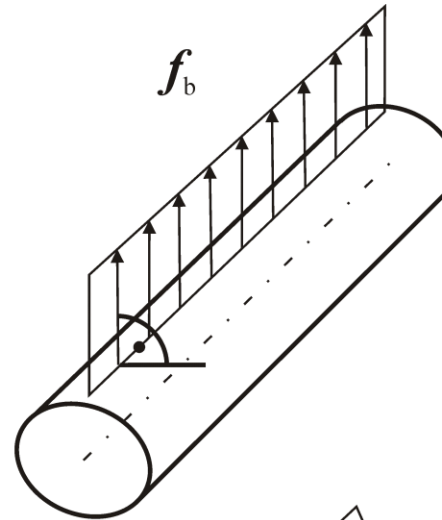
$c_D$	Widerstandsbeiwert	} abhängig von Struktur und Strömungsverhältnissen
$c_m = 1 + c_a$	Trägheitsbeiwert	



# Auftriebslasten



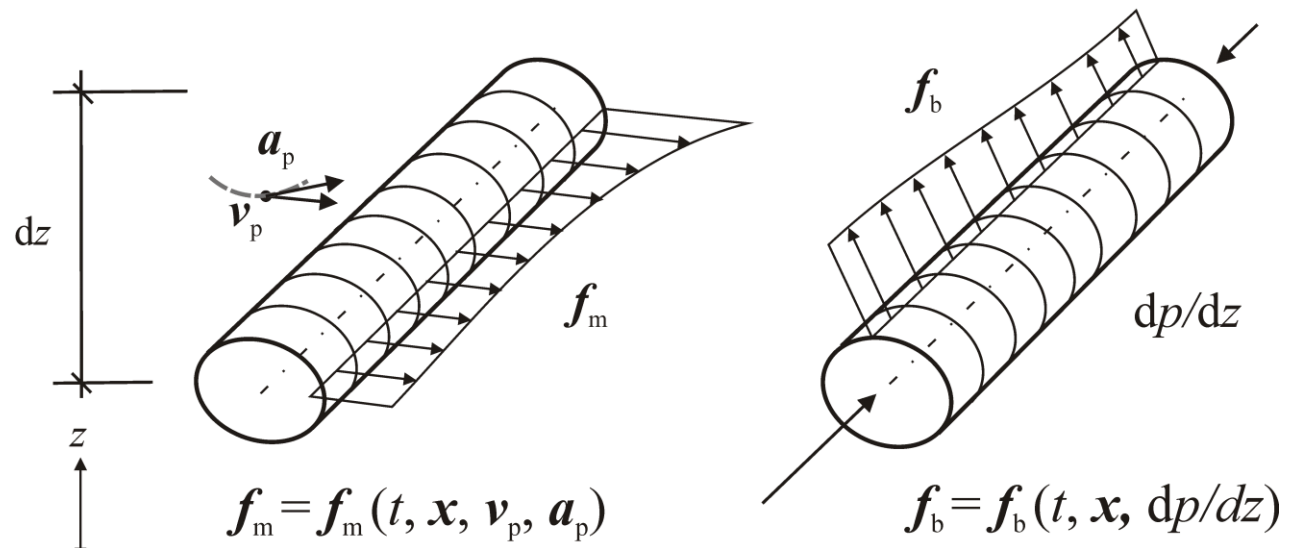
- Korrekte Berücksichtigung des Volumens überlappender Elemente am Knoten



- 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
- Berücksichtigung der aktuellen Lage der Struktur
- Lasten aus Strukturbewegungen sind noch unberücksichtigt



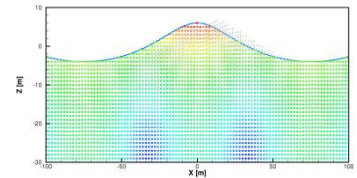
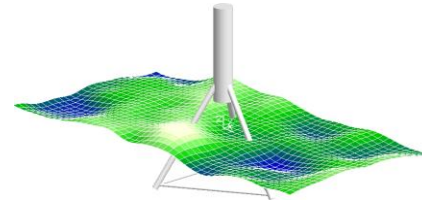
Wellenlasten

Auftriebslasten

# Anwendungsbereiche des Programms „WaveLoads“

## Seegangsbeschreibung

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

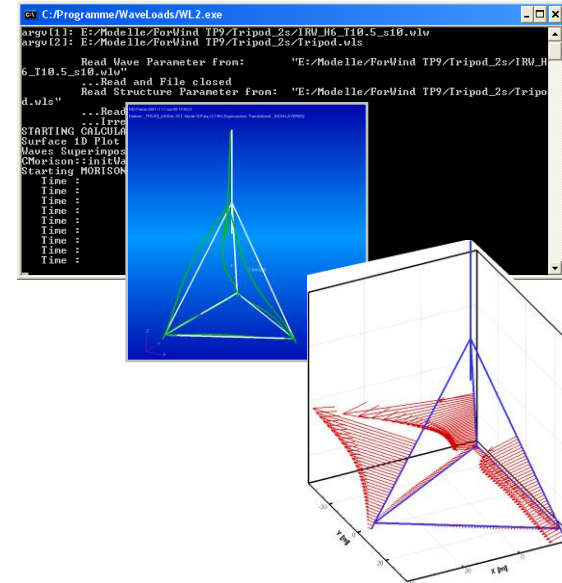


## Lastermittlung

- 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

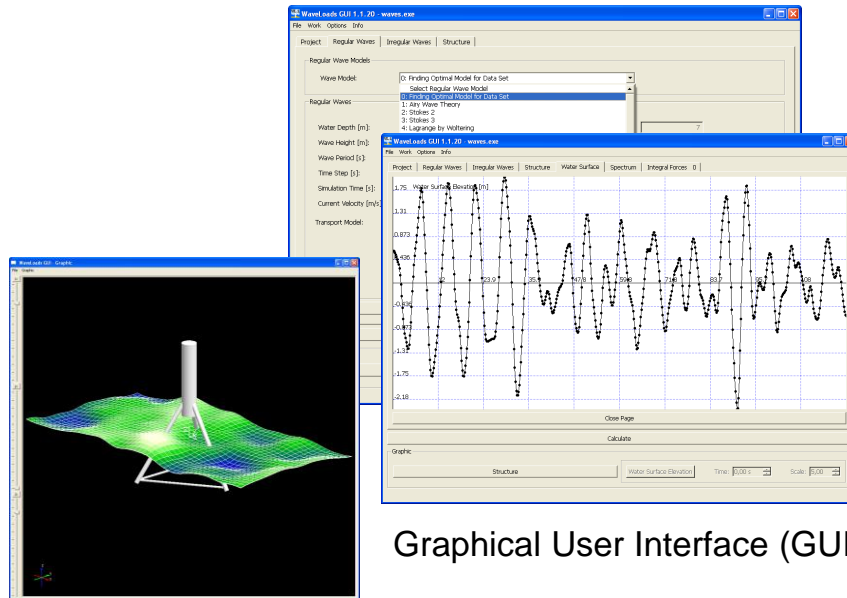




# Vorteile der Modularität

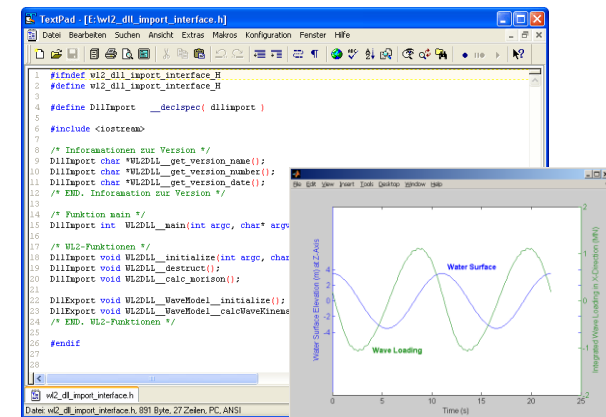
- Eigenständige Entwicklung der Module (C/C++, Fortran, MATLAB)
- Einfache Verifikation des Teilmoduls und Validierung im Gesamtmodell
- Weitergabe an Dritte als Teilmodul inkl. Schnittstellenmodul

## WaveLoads als dynamisch eingebundene Bibliothek (DLL)



Graphical User Interface (GUI)

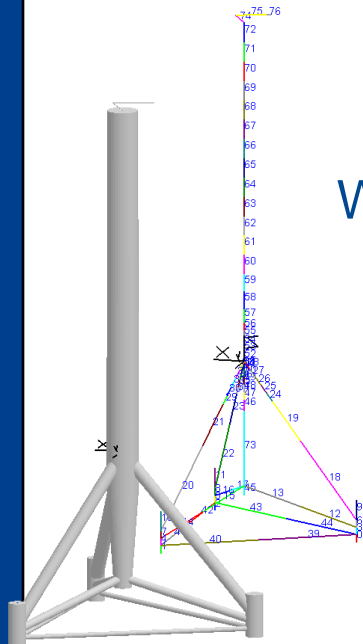
WaveLoads (DLL) in graphischer Oberfläche



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)”

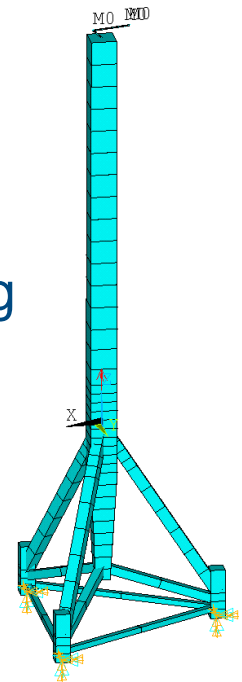


## WaveLoads Präprozessor

- Struktur + Lastzeitreihen
- Struktur + DLL

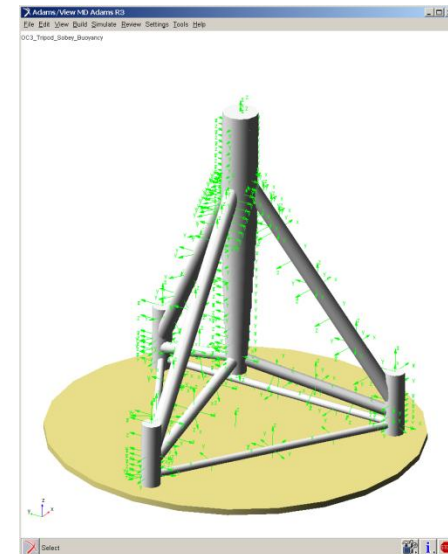
## Finite-Element-Modellierung

- ANSYS
- MD Nastran
- Abaqus



## Mehrkörperdynamik

- MD Adams

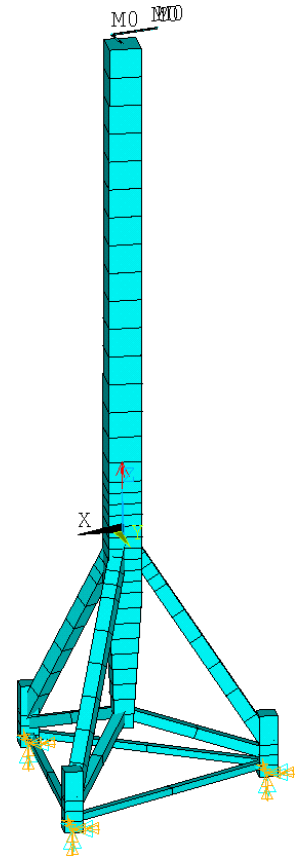
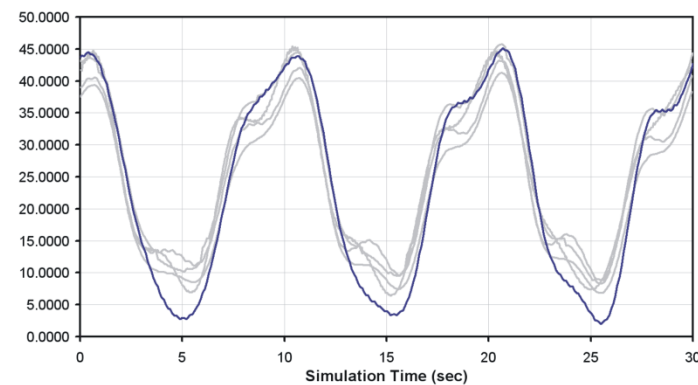
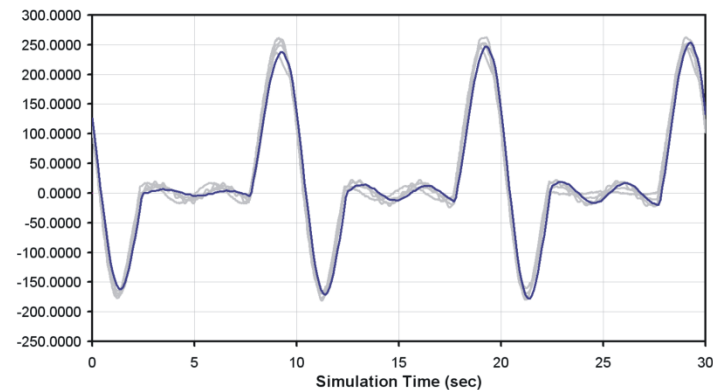
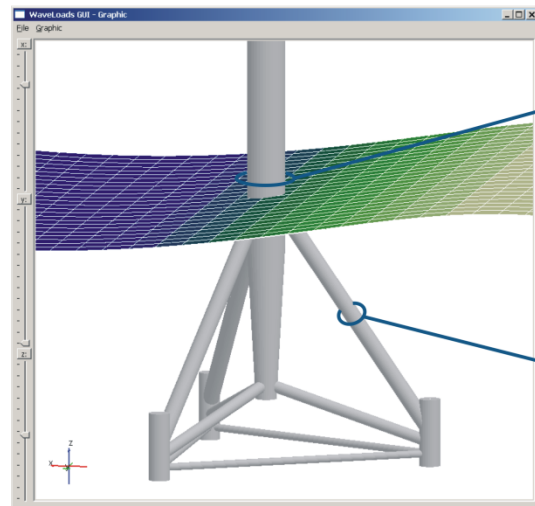


# OC3 Phase III – Offshore-Tripod unter hydrodynamischer Last

## Finite-Elemente-Simulation in ANSYS

### ■ OC3-Tripod-Tragstruktur

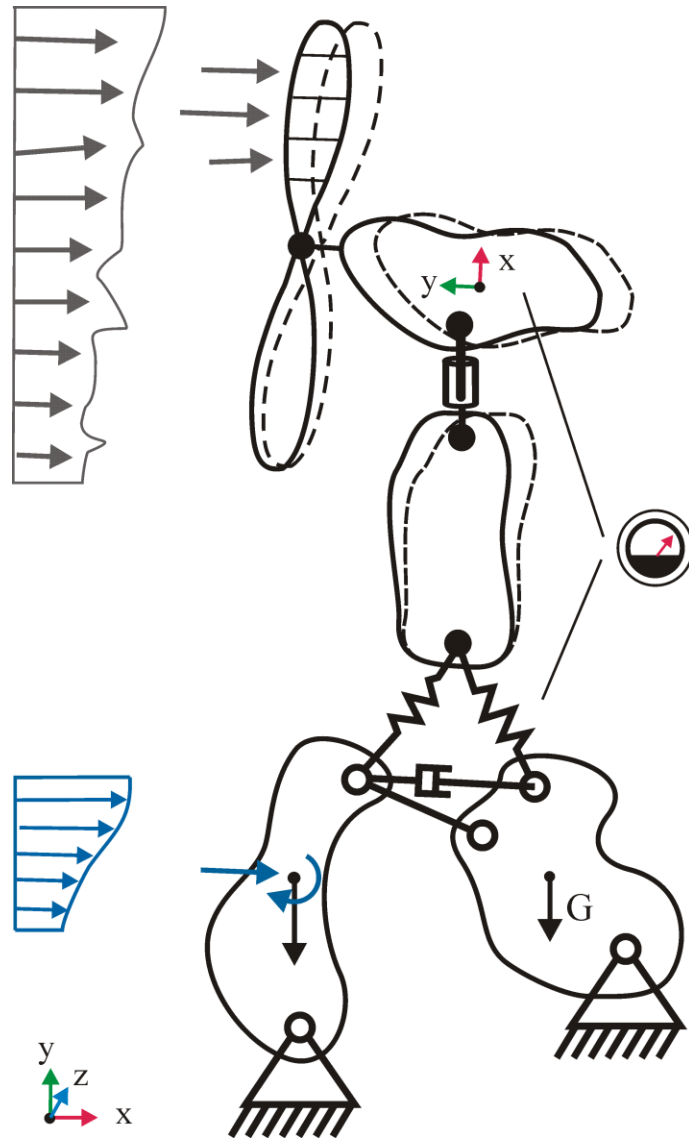
- Wellenlasten
- Auftriebskräfte



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)

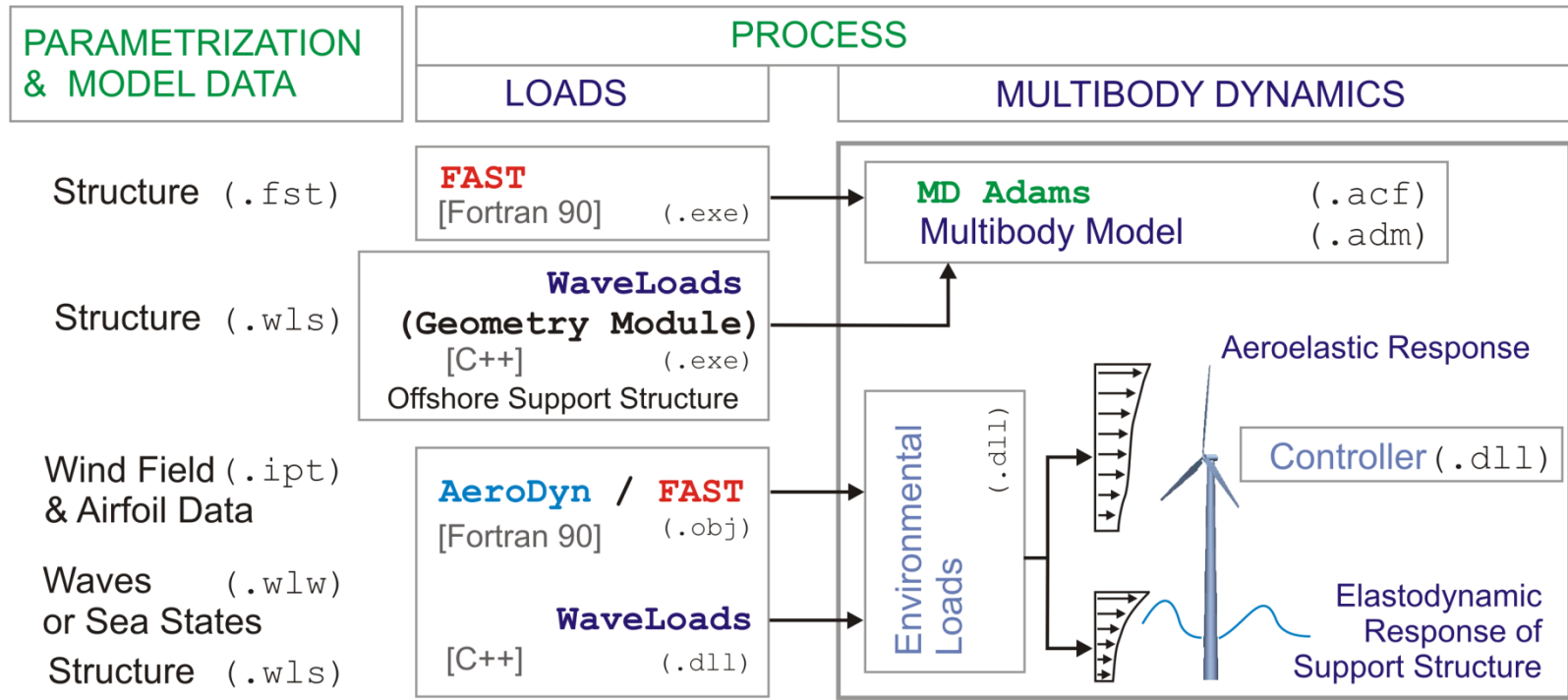
## Einwirkung des Wellenfelds

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

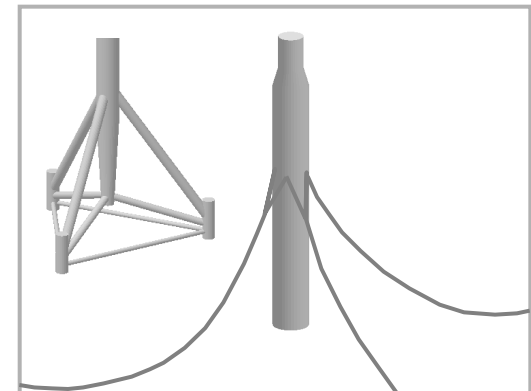
## Gründungsproblematik

- 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

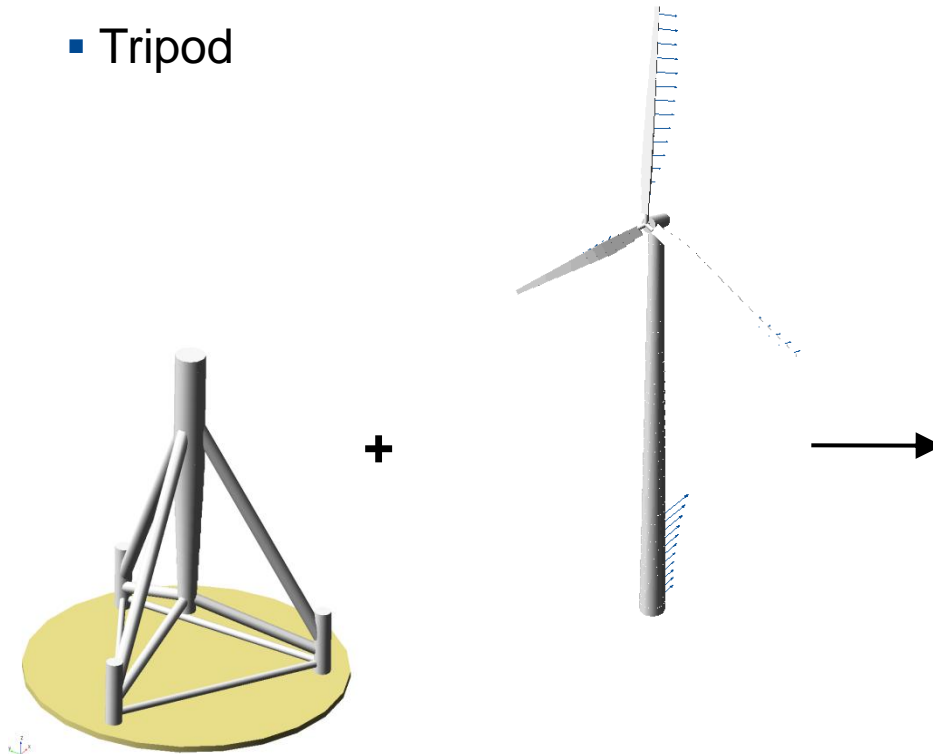


# Mehrkörperdynamik

## Gesamtsimulation in MD Adams

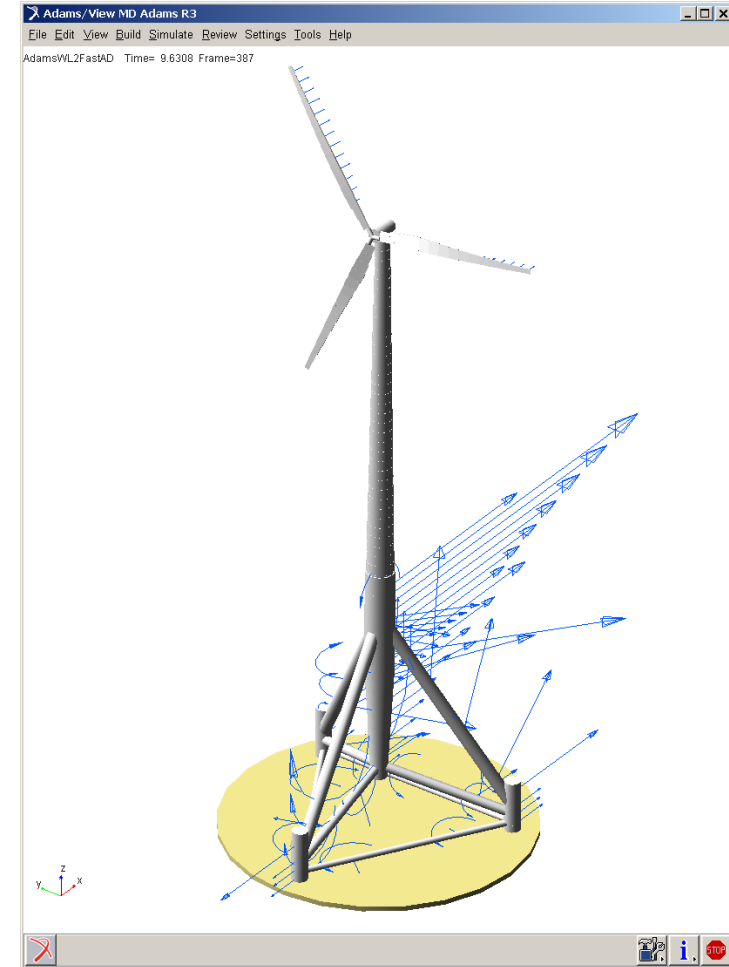
### ■ Modellzusammenstellung

- Windturbine
- Tripod



OC3-Tripod

1,5 MW NREL-Turbine



Windturbine auf Offshore-Tripod

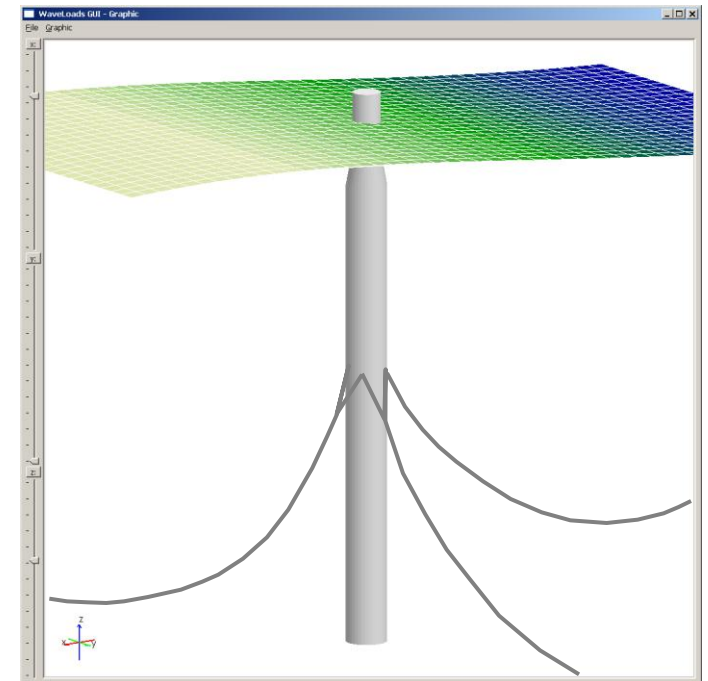
# OC3-Phase IV – Schwimmende Strukturen

- ✓ 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

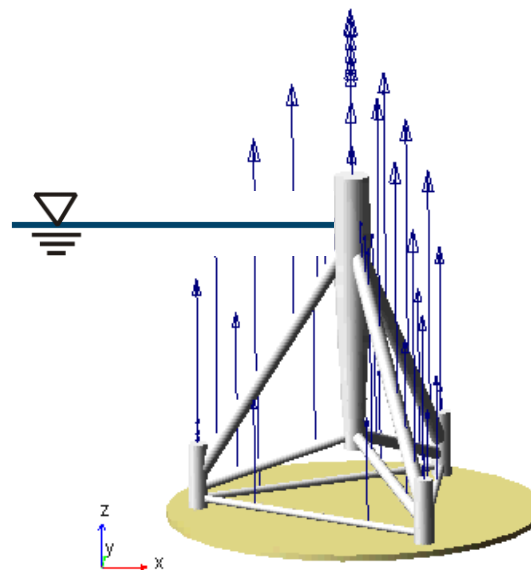




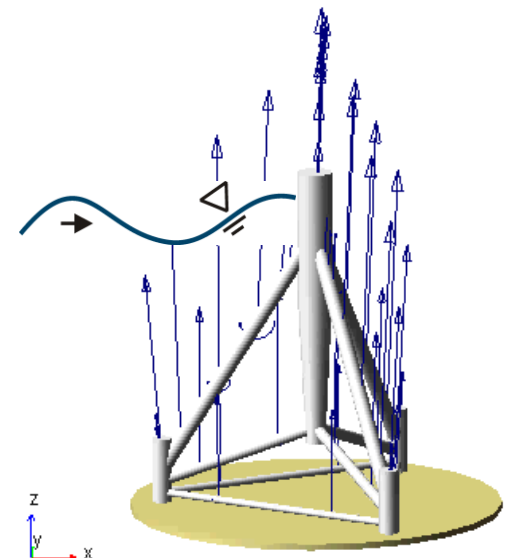
# OC3-Phase IV – Schwimmende Strukturen

## 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



Ruhender  
Wasserspiegel



Welle

# 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

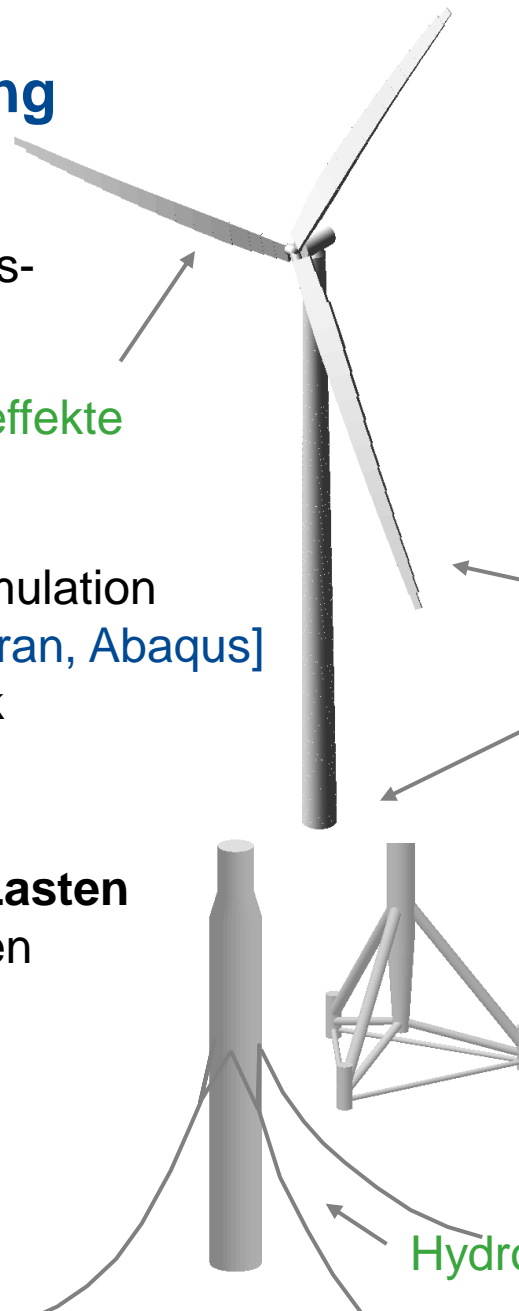
- Hydrodynamische Wechselwirkungen bei Strukturbewegungen
- Dämpfungseffekte und ihre Wirkung im Gesamtsystem

Aeroelastische Dämpfung

- Berücksichtigung verschiedener Tragstrukturen und Verbindungstypen

- Einbeziehung von bodenmechanischen Modellen

Hydrodynamische Dämpfung



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

[www.forwind.de](http://www.forwind.de)