

# Ganzheitlicher Modellierungsansatz zur simulationsbasierten Strategiewahl in der Instandhaltung

Benchmarking operativer Instandhaltungsstrategien unter Berücksichtigung soziotechnischer Aspekte und Internet der Dinge am Beispiel eines Offshore-Windparks.

Clemens Gutsch

# Vorstellung

Dipl.-Ing. Clemens Gutschi



- **Institut für Maschinenbau- und Betriebsinformatik**
- **Leitung: Prof. Siegfried Vössner**
- **Forschungsgebiete**
  - Operation Research & Management Science
  - Human-centered System Design
- **Arbeitsgebiete**
  - Production & Logistics
  - Health Care
  - Public Safety and Disaster Relief

- **Forschungsgruppe Operation Research**
  - Modellierung und Simulation
  - Optimierung
  - Decision Support Systeme
- **Schwerpunkte**
  - Instandhaltungsstrategieauswahl
  - Instandhaltungsmanagement
  - Prädiktive Instandhaltung
  - Produktionsplanung und -kontrolle
  - Systems Engineering

# Agenda

- **Motivation**
- **Ganzheitlicher Modellierungsansatz**
  - Systemidentifikation
  - Konzeptuelle Modellierung
- **Simulationsstudie Offshore Windpark**
  - Problemsituation
  - Modellierung und Simulation
  - Evaluierung
- **Weitere Anwendungsbeispiele**
- **Zusammenfassung**

# Motivation

## Warum ganzheitliche Modellierung zur IH-Strategieauswahl?

- Digitalisierung
- IoT und Big Data
- IT-Sicherheit
- Technologischer Wandel
- Komplex verkettete Produktionssysteme



Sources: <https://www.youtube.com/watch?v=0ZRE4qjuYh8> „Rolls-Royce | Unsere Vision von der IntelligentEngine“

<https://www.un.org/development/desa/disabilities/about-us/sustainable-development-goals-sdgs-and-disability.html>

<https://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/ever-given-im-suezkanal-schiffsversicherer-will-kanalbehoerde-mitverantwortlich-machen-a-a5ba57b4-4ded-4407-b06a-82328b7697ac>

# Motivation

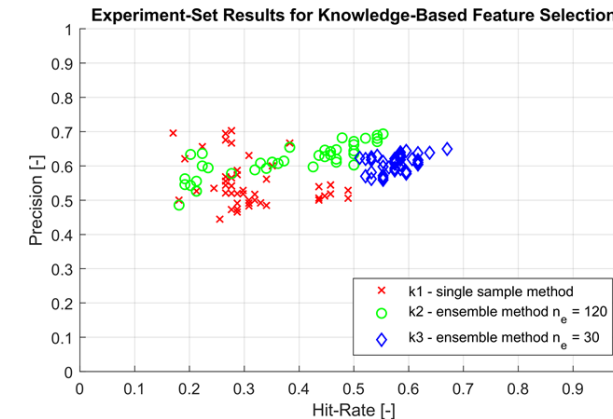
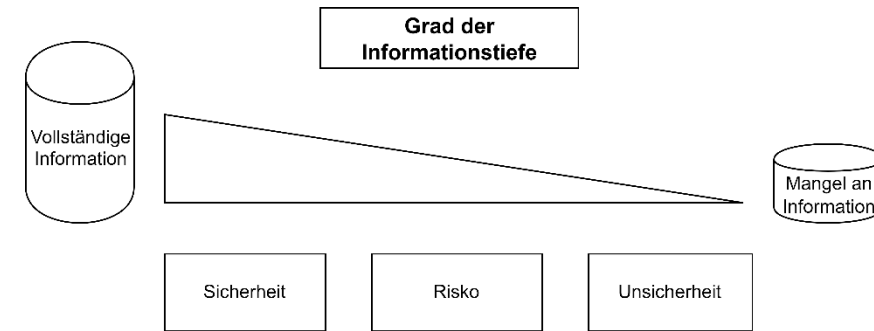
## Warum ganzheitliche Modellierung zur IH-Strategieauswahl?

### ■ Digitalisierung

- Höherer Wissensstand der Anlagenzustände
- datengetriebene Diagnose- und Prognosemodelle
- Data Mining und intelligente Analysemethoden
- Smarte Planung und Steuerung
- ...

### ■ Komplexität

- IT-Infrastruktur
- Sensornetzwerke
- Höchste Sicherheitsansprüche
- Zuverlässigkeit und Abhängigkeit?
- Vision vs. Nutzen?



## Wo ist der Einsatz von moderner Technologie sinnvoll?

Sources: Ding, S. H.; Kamaruddin, S. (2015): Maintenance policy optimization-literature review and directions. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 76, Nr. 5, S. 1263-1283  
Gutschi, C.; Furian, N.; Suschnigg, J.; Neubacher, D.; Voessner, S. (2019): Log-based predictive maintenance in discrete parts manufacturing. In: Procedia CIRP, Vol. 79, S. 528-533

# Ganzheitlicher Modellierungsansatz

## Warum ganzheitliche Modellierung zur IH-Strategieauswahl?

### ■ Simulation

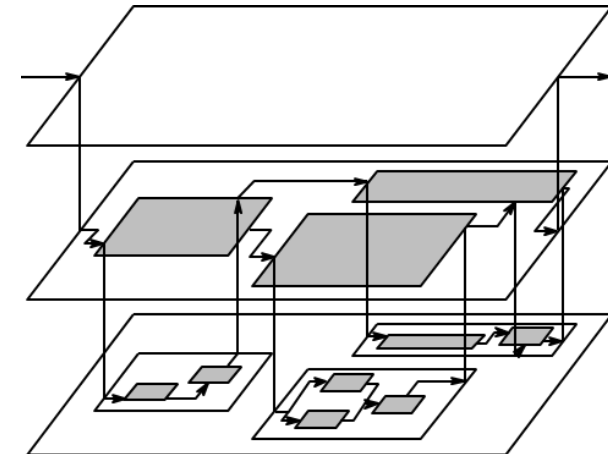
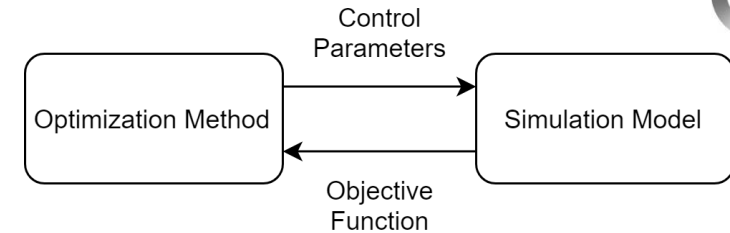
- Decision Support Tool bei (strategischen) Entscheidungen
- Kosten-Nutzen-Analyse: Reduktion der Unsicherheiten
- Optimierung von Systemen

### ■ ganzheitliche Modellierung

- Integration der Wertschöpfung
- Abbild des Zielsystems (so gut als nötig!)
- Entitäten, Abhängigkeiten, Prozesse (Relevanz?)
- Ressourcen, Verfügbarkeiten, Skills

### ■ Strategiefindung in der Instandhaltung

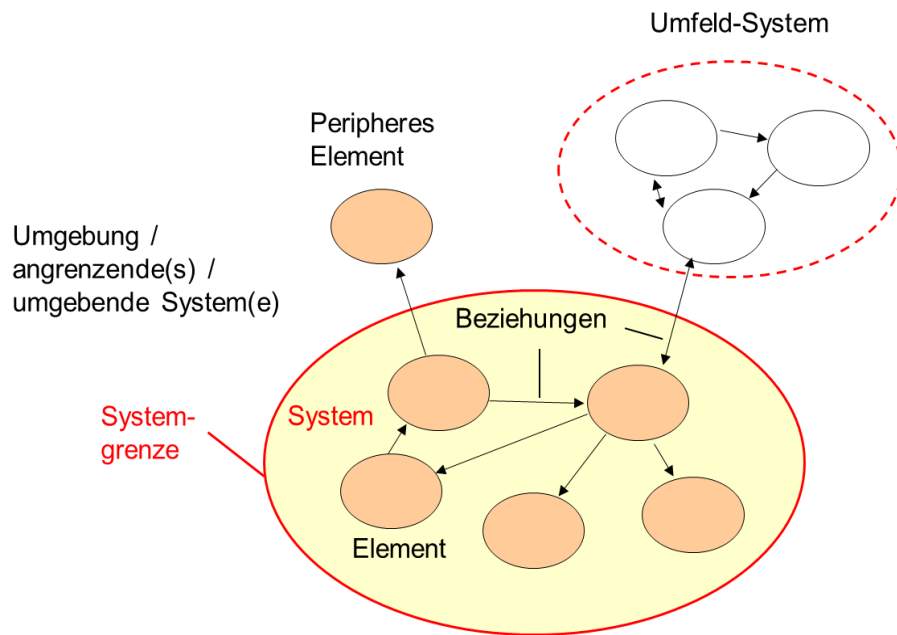
- Betriebssimulation
- Relevante (Sub)prozesse, Steuerung, Ressourcen



# Ganzheitlicher Modellierungsansatz

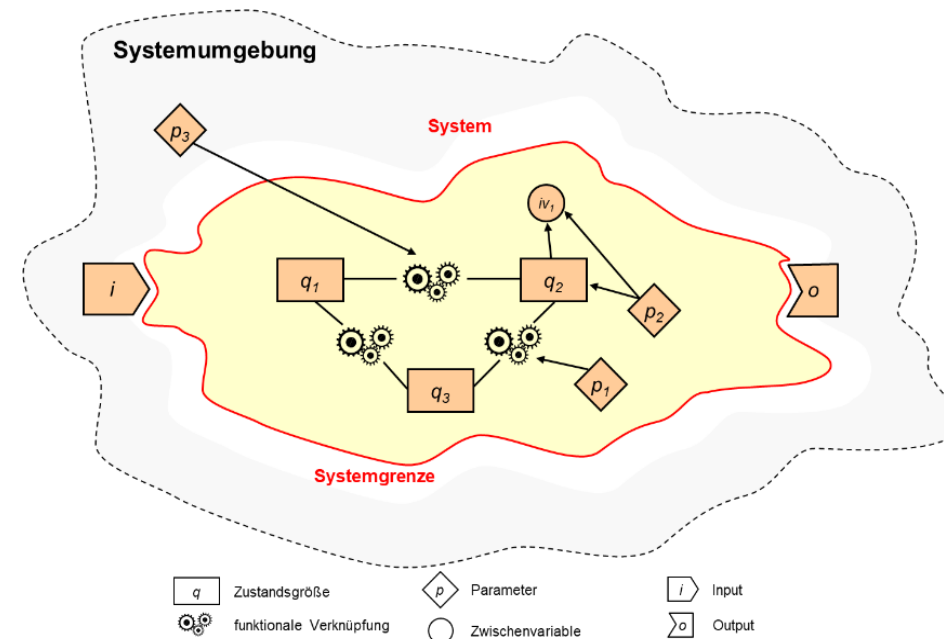
## Wesentliche Schritte zur Modellbildung

### ■ Systemidentifikation



➔ von der Realität abgegrenztes Zielsystem

### ■ Systemstrukturierung

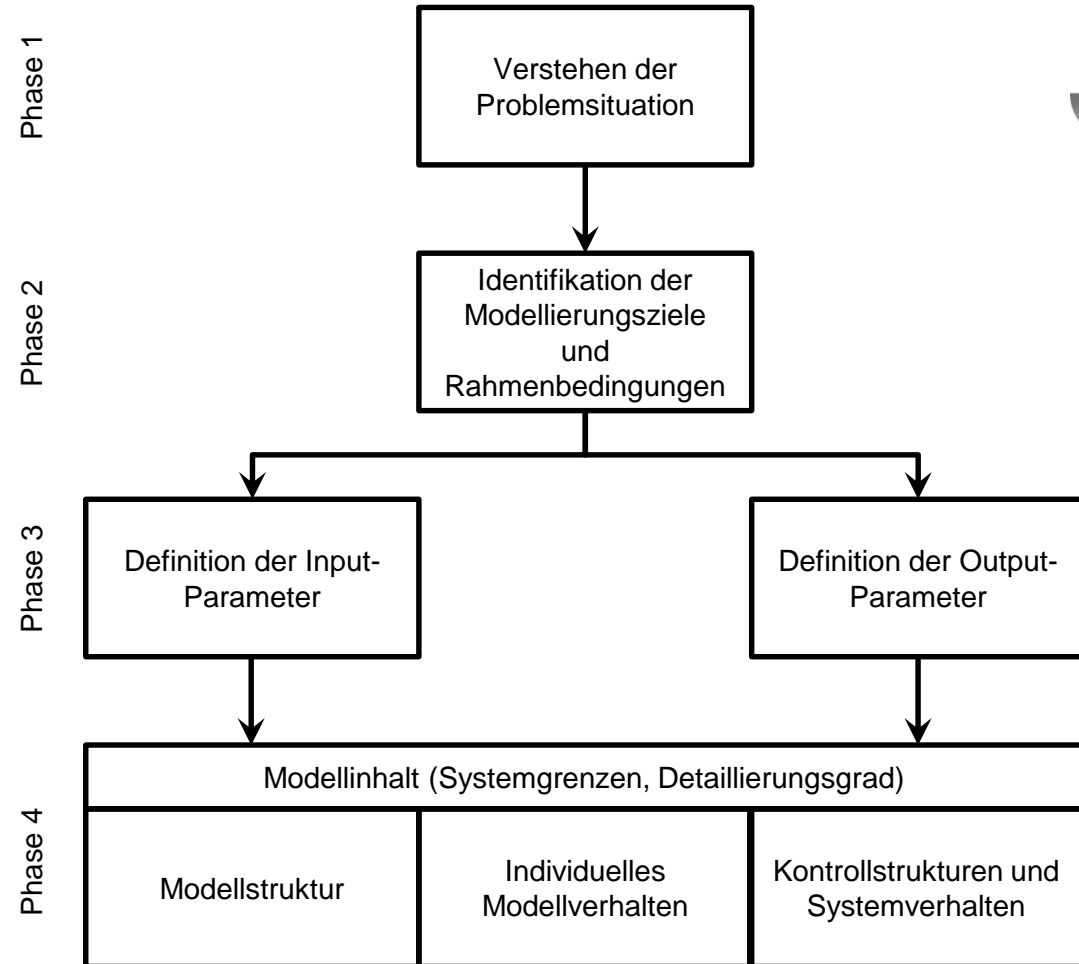


➔ funktionale Systembeschreibung

# Ganzheitlicher Modellierungsansatz

## Beispiel-Vorgehensmodell: Hierarchical Control Conceptual Modelling

- Basis für Simulationsstudien
- HCCM: 4 Phasenmodell nach Furian et al. (2015)
- Definierte und strukturierte Vorgehensweise
- Eignet sich für konzeptuelle Modellierung in einer Vielzahl von Anwendungsfeldern



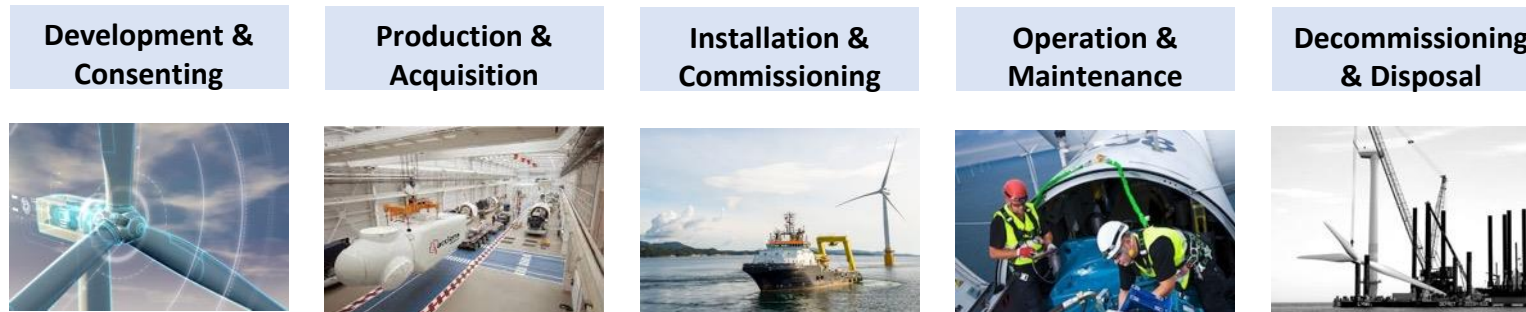
Source: Furian, N.; O'Sullivan, M.; Walker, C.; Vössner, S.; Neubacher, D. (2015): A conceptual modeling framework for discrete event simulation using hierarchical control structures. In: Simulation modelling practice and theory, Vol. 56, S. 82-96



# Simulationsstudie Offshore Windpark

## Hintergrund

- Teil einer Vorstudie
- Wirtschaftliche Abschätzung durch Simulation



- Kooperationsprojekt zwischen TU Graz und Universität Strathclyde<sup>1</sup>

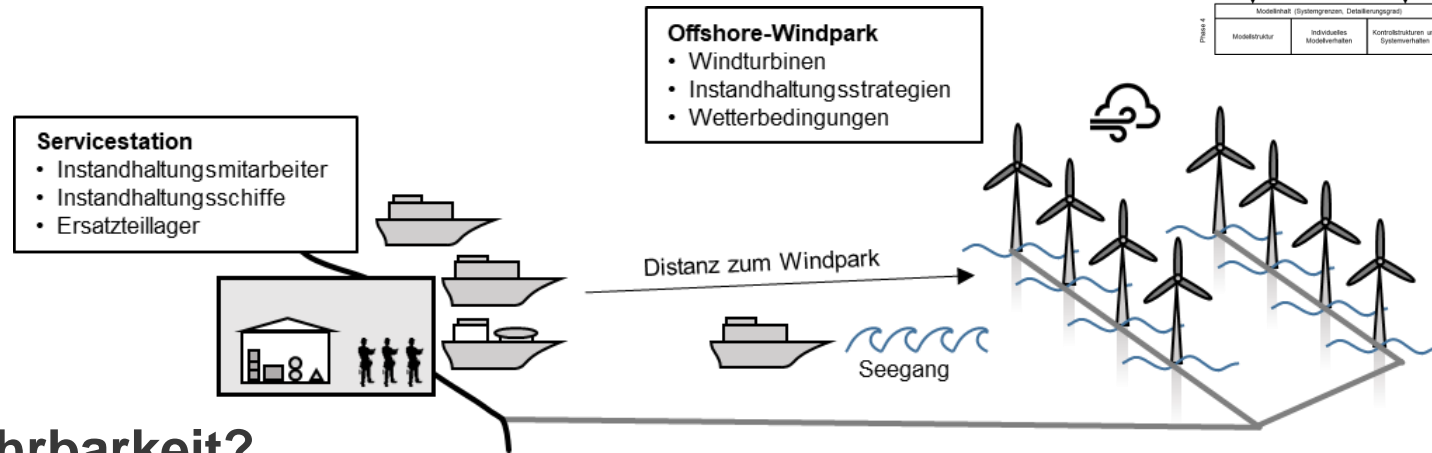
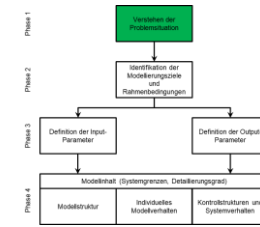
<sup>1</sup> Detaillierte Daten und Modellbeschreibung siehe Veröffentlichung der Winter Simulation Conference:

Gutsch, C.; Furian, N.; Voessner, S.; Graefe, M.; Kolios, A. (2019): Evaluating the performance of maintenance strategies: a simulation-based approach for wind turbines.

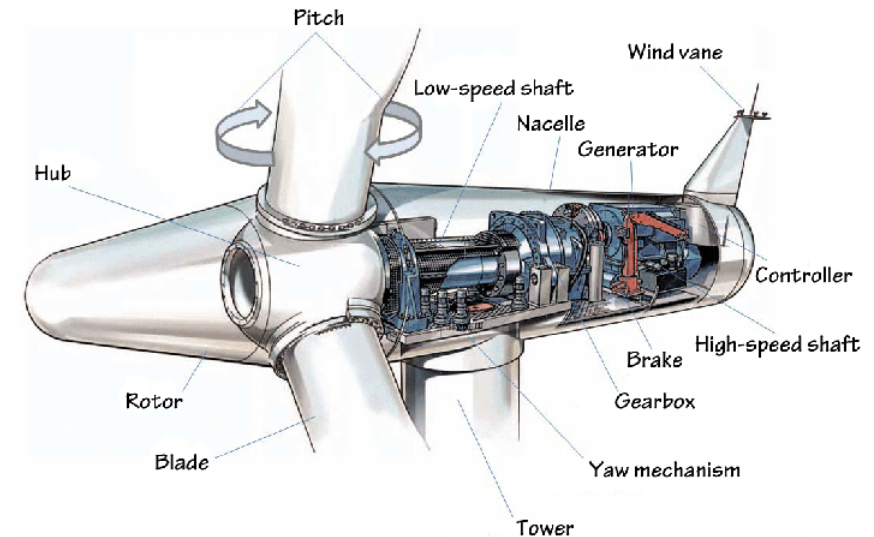
In: 2019 Winter Simulation Conference (WSC). S. 842-853

# Simulationsstudie Offshore Windpark

## Problemsituation



- **Ökonomische Durchführbarkeit?**
- **Energieproduktion → max**
- **Stromgestehungskosten → min**
- **Evaluierung der Auswirkungen unterschiedlicher Instandhaltungsstrategien pro Systemelement:**
  - **Reaktive Instandhaltung**
  - **Zustandsbasierte Instandhaltung**

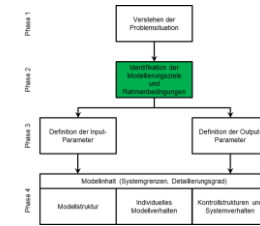


Source: [https://www.bls.gov/green/wind\\_energy/](https://www.bls.gov/green/wind_energy/)

# Simulationsstudie Offshore Windpark

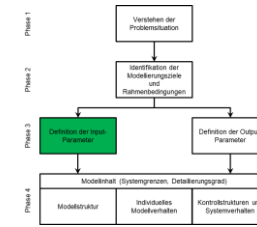
## Modellierungsziele und Rahmenbedingungen

- **Stromgestehungskosten [€/MWh]**
  - produzierte Energiemenge =  $f(\text{Windgeschwindigkeit, Verfügbarkeit})$
  - Kosten, u.a. Instandhaltungskosten
- **Windturbine als Multikomponentensystem**
  - IH-Tätigkeiten: kleine, große Reparatur & Austausch
  - Ausfallsverteilungen, Materialkosten
  - IH-Ressourcen: Mitarbeiter, Schiffstypen, Dauer der IH, Kostensätze
- **Reaktive vs. zustandsbasierter Instandhaltung**
  - Reaktiv: Stillstandszeit = Vorbereitungs- & Reisezeit + Dauer der IH
  - Zustandsbasiert: Stillstandszeit = Dauer der IH
- **Sicherheit für Mitarbeiter und Schiffe**

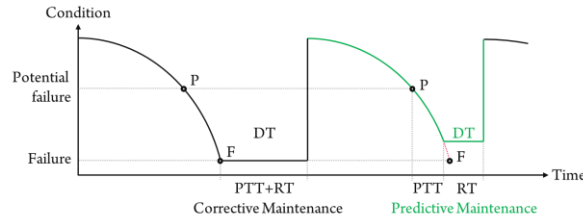


# Simulationsstudie Offshore Windpark

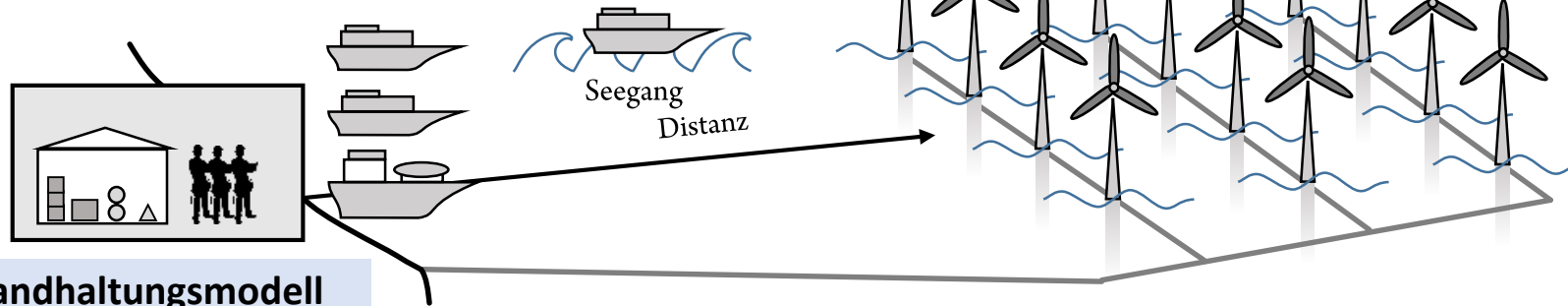
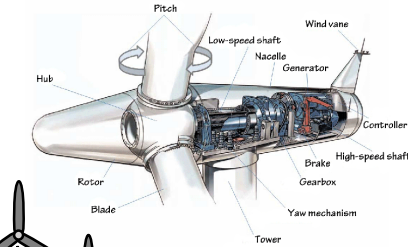
Input: Welche Modelle werden benötigt?



## Fehlermodell



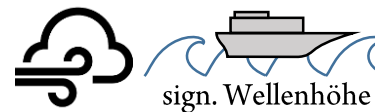
## Windturbinenmodell



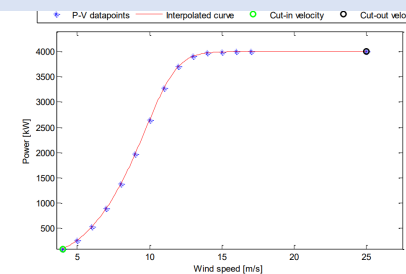
## Instandhaltungsmodell

- IH-Strategien
- Prozesse
- Mitarbeiter
- Schiffe
- Ersatzteile
- Materialkosten

## Wettermodell

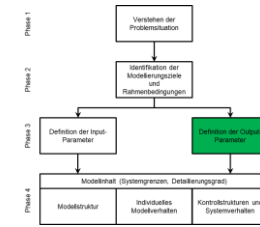


## Leistungsmodell



# Simulationsstudie Offshore Windpark

Output: Welche Indikatoren werden benötigt?

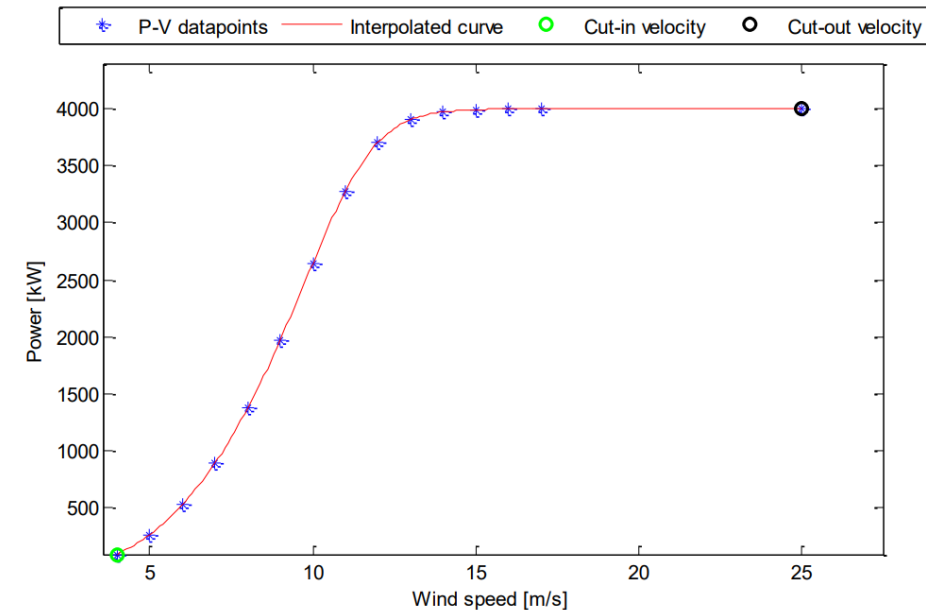


## ■ Produzierte Energie

- Turbinenverfügbarkeit  $s(t)$
- Windgeschwindigkeit

## ■ Instandhaltungskosten

- IH-Aufträge (Subsystem & Fehlermodus)
  - Materialkosten
  - Mitarbeiter- & Schiffskosten
- Strategie: korrektiv oder zustandsbasiert
- Stillstandsdauer: Vorbereitungs- & Reisezeit, Dauer der IH

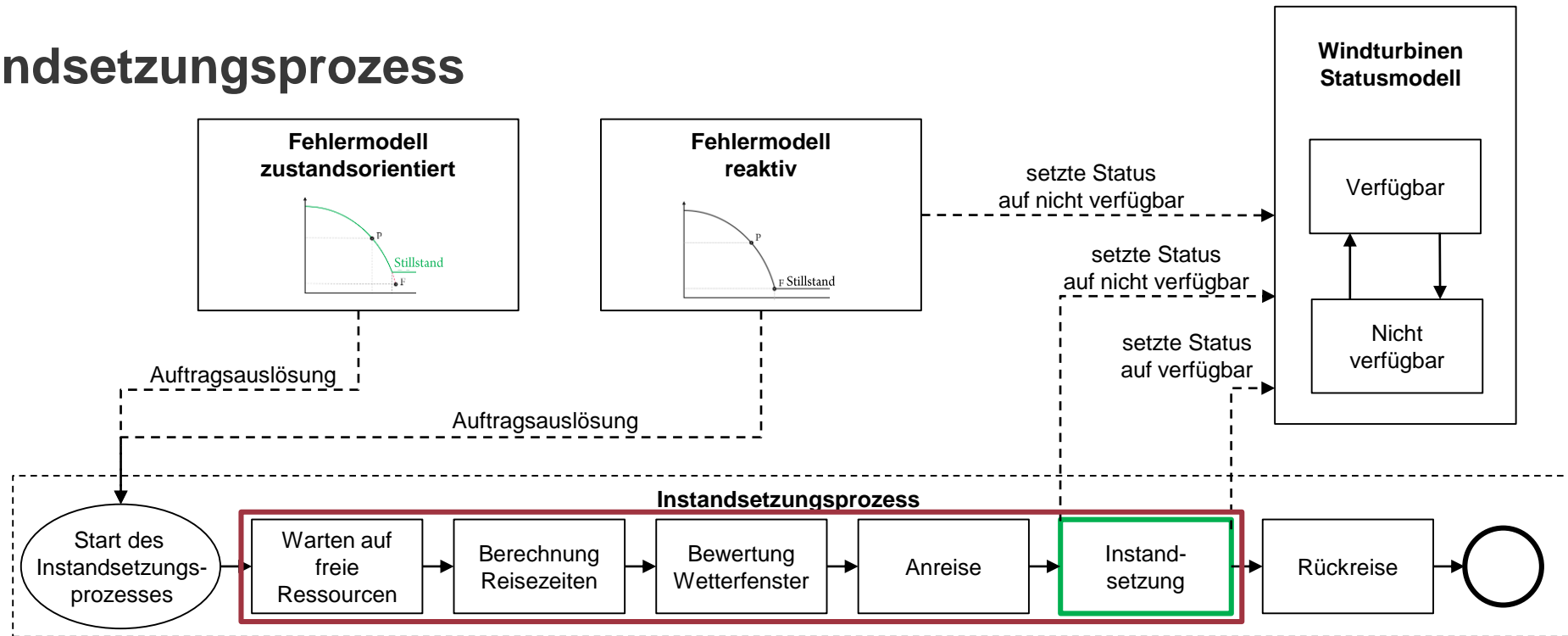


➔ **Stromgestehungskosten**

# Simulationsstudie Offshore Windpark

## Modellinhalt

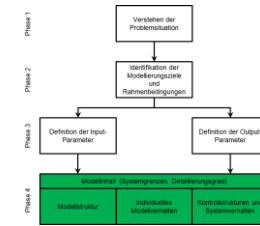
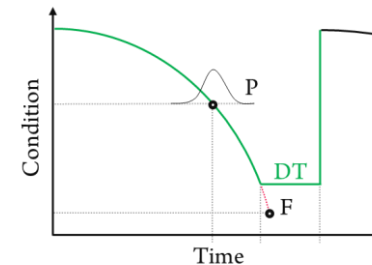
### ■ Instandsetzungsprozess



### ■ Fehlermodelle

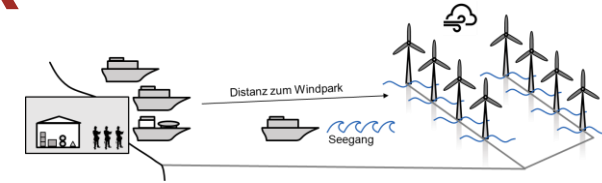
...

	Failure Mode 1	Failure Mode 2	Failure Mode 3	$\sum$ Subsystem $i$
Subsystem 1	$\lambda_{i=1,j=1}$	...	$\lambda_{i=1,j=3}$	$\lambda_i = \sum_{j=1}^3 \lambda_{i=1,j}$
...	...	...	...	...
Subsystem $n$	$\lambda_{i=n,j=1}$	...	$\lambda_{i=n,j=3}$	$\lambda_i = \sum_{j=1}^3 \lambda_{i=n,j}$
			$\sum_{total}$	$\lambda_{total} = \sum_{i=1}^n \lambda_i$



# Simulationsstudie Offshore Windpark

## Szenariendefinition



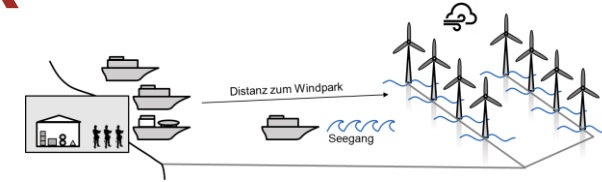
Szenario	Instandhaltungsstrategie		Erwartungswerte			
	TbM	korrektiv	zustandsbasiert	Aufträge	PE	LCoE
SI Baseline	X	alle Subsysteme alle Fehlermodi		↓	↓	↑
SII Prädiktiv	X		alle Subsysteme alle Fehlermodi	↑	↑	↓
SIII RCM	X	alle Subsysteme alle Fehlermodi außer PdM	Subsysteme: - Generator - Getriebe Fehlermodi: - Große Reparatur	?	?	?

Source: Andrawus, J. A., J. Watson, M. Kishk, and A. Adam. 2006. "The Selection of a Suitable Maintenance Strategy for Wind Turbines". Wind Engineering 30(6):471–486.



# Simulationsstudie Offshore Windpark

## Modellinput Evaluationsmodell 1/3



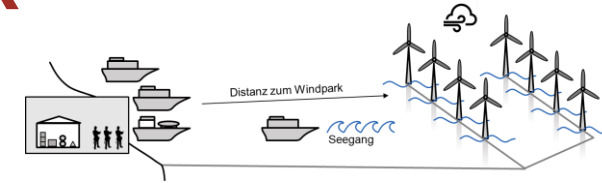
- 100 Windturbinen (5 MW, 5m/s – 25 m/s)
- WT: 19 Subsysteme á 3 Fehlermodi
- 20 Jahre Betriebsdauer
- 75 km Distanz zur Servicestation
- 80 Instandhaltungsmitarbeiter (250€/h)
- 15 Mitarbeitertransportschiffe (Kapazität 12MA, Reisezeit 2h, 1350€/h)
- 1 Errichterschiff (Reisezeit 3h, 4700€/h)
- 1 Tauchschiff (Reisezeit 2h, 2500€/h)
- Jede IH am Fundament → 1 Tauchschiff
- Austausch des Transformators → Errichterschiff
- Alle indirekten Kosten sind enthalten (Miete, Versicherung,...)
- Stromtransportkosten sind nicht enthalten

Source: Andrawus, J. A., J. Watson, M. Kishk, and A. Adam. 2006. "The Selection of a Suitable Maintenance Strategy for Wind Turbines". Wind Engineering 30(6):471–486.



# Simulationsstudie Offshore Windpark

## Modellinput Evaluationsmodell 1/3



- Fehlerrate [1/Jahr], Reparaturdauer [h], benötigte MA & MK, Ausfallsschwere

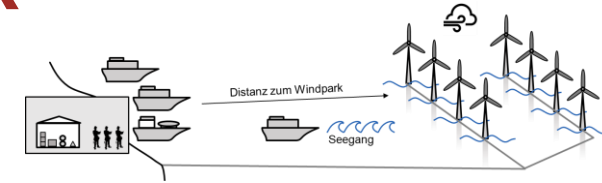
Subsystem $i$	Minor repair				Major repair				Major replacement			
	$\lambda_{i,1}$	RT	RS	I	$\lambda_{i,2}$	RT	RS	I	$\lambda_{i,3}$	RT	RS	I
Pitch	0.82	9	2.3	<b>7.4</b>	0.18	19	2.9	3.4	0.001	25	4	0.0
Other Components	0.81	5	2	<b>4.1</b>	0.04	21	3.2	0.9	0.001	36	5	0.0
Generator	0.49	7	2.2	3.4	0.32	24	2.7	7.7	0.095	81	7.9	<b>7.7</b>
Gearbox	0.40	8	2.2	3.2	0.04	22	3.2	0.8	0.154	231	17.2	<b>35.6</b>
Blades	0.46	9	2.1	<b>4.1</b>	0.01	21	3.3	0.2	0.001	288	21	0.3
Grease/oil/cooling liq.	0.41	4	2	1.6	0.01	18	3.2	0.1	0	0	0	0
Electrical components	0.36	5	2.2	1.8	0.02	14	2.9	0.2	0.002	18	3.5	0.0
Contactors/circuit	0.33	4	2.2	1.3	0.05	19	3	1.0	0.002	150	8.3	0.3
Controls	0.36	8	2.2	2.8	0.05	14	3.1	0.8	0.001	12	2	0.0
Safety	0.37	2	1.8	0.7	0.00	7	3.3	0.0	0	0	0	0
Sensors	0.25	8	2.3	2.0	0.07	6	2.2	0.4	0	0	0	0
Pumps/motors	0.28	4	1.9	1.1	0.04	10	2.5	0.4	0	0	0	0
Hub	0.18	10	2.3	1.8	0.04	40	4.2	1.5	0.001	298	10	0.3
Heaters/coolers	0.19	5	2.3	1.0	0.01	14	3	0.1	0	0	0	0
Yaw system	0.16	5	2.2	0.8	0.01	20	2.6	0.1	0.001	49	5	0.0
Tower/foundation	0.09	5	2.6	0.5	0.09	2	1.4	0.2	0	0	0	0
Power supply	0.08	7	2.2	0.5	0.08	14	2.3	1.1	0.005	57	5.9	0.3
Service items	0.11	7	2.2	0.8	0.00	0	0	0.0	0	0	0	0
Transformer	0.05	7	2.5	0.4	0.00	26	3.4	0.1	0.001	1	1	0.0

Sources: Carroll, J., A. McDonald, and D. McMillan. 2016. "Failure Rate, Repair Time and Unscheduled O&M Cost Analysis of Offshore Wind Turbines". Wind Energy 19(6):1107–1119.  
 Andrawus, J. A., J. Watson, M. Kishk, and A. Adam. 2006. "The Selection of a Suitable Maintenance Strategy for Wind Turbines". Wind Engineering 30(6):471–486.

# Simulationsstudie Offshore Windpark

## Modellinput Evaluationsmodell 3/3

- Auftragspriorisierung: Schwere und FIFO
- 2 Jahre Einlaufphase der Simulation
- 100 Replikationen pro Szenario

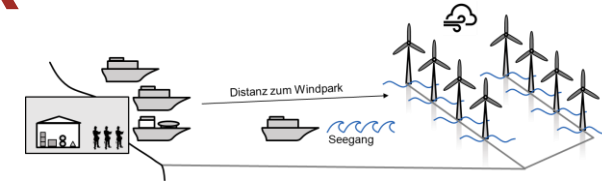


- Diskontierung ( $t=0$ ) aller Kosten und produzierter Energie für die LCoE-Berechnung
- WACC = 6.15%

Source: Graefe, M. 2019. "Development of a Life Cycle Cost and Impact Assessment Tool for Floating Wind Turbines". Master's thesis, Graz University of Technology, Graz, Austria.

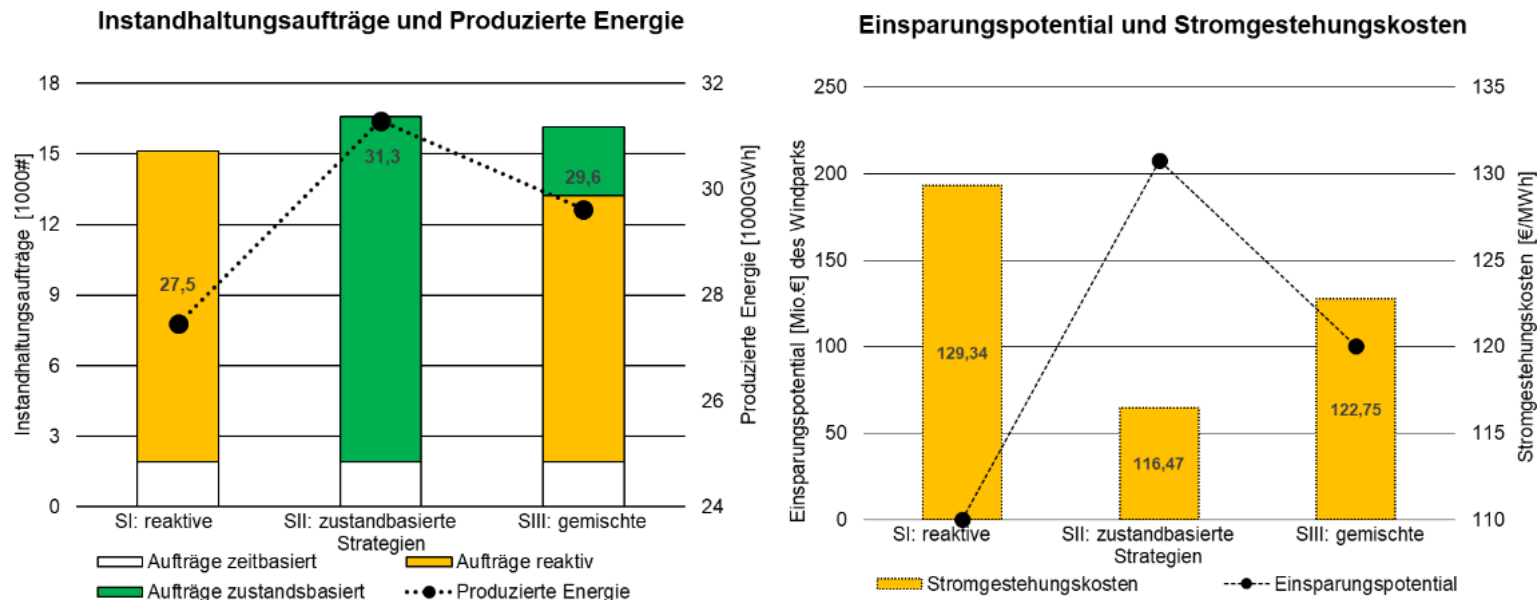
# Simulationsstudie Offshore Windpark

## Simulationsergebnis



### ■ Einsparungspotential

- ~200 Mio. € in einem optimistischen Szenario
- ~100 Mio. € in einem realistischen Mix an IH-Strategien



- zusätzliche Einsparungen durch verbesserte IH-Planung oder Auftragsbündelung

# Zusammenfassung

## Ganzheitliche Modellierung als Decision Support Tool

- Decision Support bei strategischen Entscheidungen (quantifizierbar)
- Abbilden von gesamten Systemen
- modellbasierte Evaluierung frühzeitig einsetzen
- Risikominimierung
- Wiederverwendbarkeit

# Ganzheitlicher Modellierungsansatz zur simulationsbasierten Strategiewahl in der Instandhaltung

Benchmarking operativer Instandhaltungsstrategien unter Berücksichtigung soziotechnischer Aspekte und Internet der Dinge am Beispiel eines Offshore-Windparks.



Dipl. Ing. Clemens Gutschi  
Institut für Maschinenbau- und Betriebsinformatik  
[clemens.gutschi@tugraz.at](mailto:clemens.gutschi@tugraz.at)  
+43 316 873 8007

