

Lastreduzierende Regelungssysteme für Multimegawatt Windenergieanlagen im Offshore-Bereich

Verbundprojekt:	0327676
Partner:	  
Förderer:	 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Martin Geyler,
Fraunhofer IWES (Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik)
Telefon: +49-561-7294-364
e-mail: mgeyler@iset.uni-kassel.de



Regelung von Windenergieanlagen 1990 - 2010

Drehzahlstarre WEA

- 100 .. 500 kW
- Starrer Blattwinkel
- Direktgekoppelter Asynchrongenerator

Drehzahlvariable WEA

- 1..3 MW
- Drehzahlvariables Generatorsystem
- Blattverstellung zur Leistungsbegrenzung

Große Offshore-WEA

- 5 .. 10 MW
- lastreduzierende Regelung
- Windparks als virtuelle Kraftwerke

1990-1992 Elektrisch geregelte Überlagerungsgetriebe in Windkraftanlagen (Förderer: BMFT)

1993-1996 Mechanische Belastung drehzahlvariabler Windkraftanlagen unter Mittelgebirgsbedingungen (Förderer: HMUB)

1995-1998 Regelung von Großwindkraftanlagen für Standorte in Mittelgebirgslagen (Förderer: BMBF)

2004-2008 Neue Generation von Regelungssystemen für Große Windkraftanlagen (Förderer: BMU)

2008-2011 Lastreduzierende Regelungssysteme für MultiMegaWatt Windkraftanlagen (Förderer: BMU)

2009-2011 Windparkregelungen zur Netzintegration (Förderer: BMU)



Warum lastreduzierende Regelungen ?

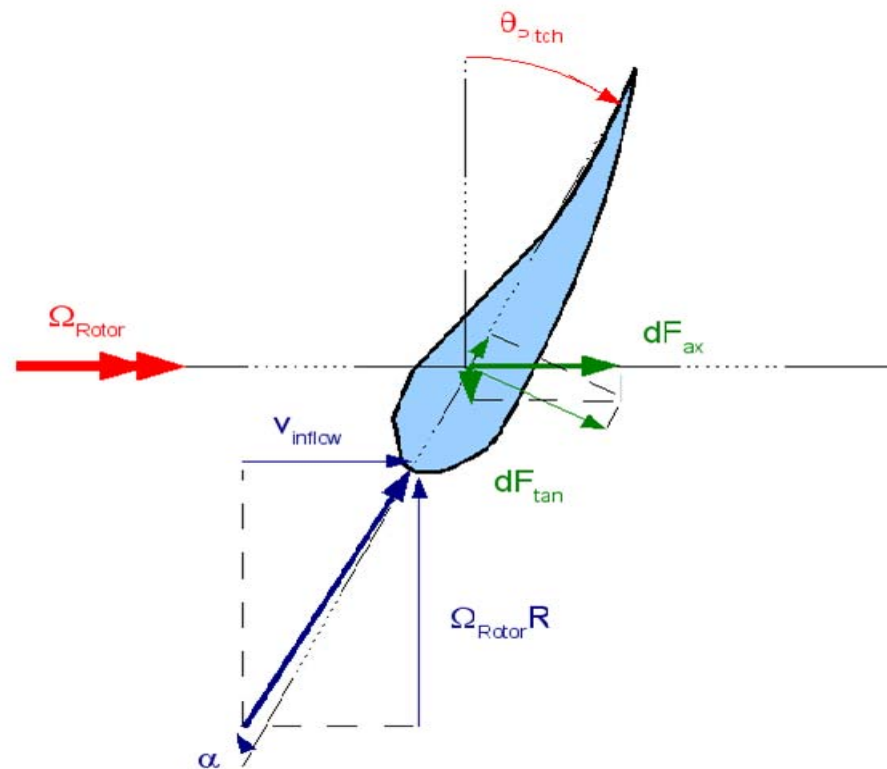
- Zunehmende Anlagengröße erfordert zunehmenden Leichtbau:
 - für ähnliche Skalierung: $P \sim R^2$, $m \sim R^3$
 - große effektive Turmlänge für Offshore-Anlagen

→ zunehmend schwingungsfreudige Strukturen
- zunehmend inhomogenes Windfeld für große Rotorflächen (zunehmender Einfluss der Windscherung, Rotorfläche in der Größenordnung der Turbulenzstrukturen)
- Zusätzliche Anregung aus Wellen

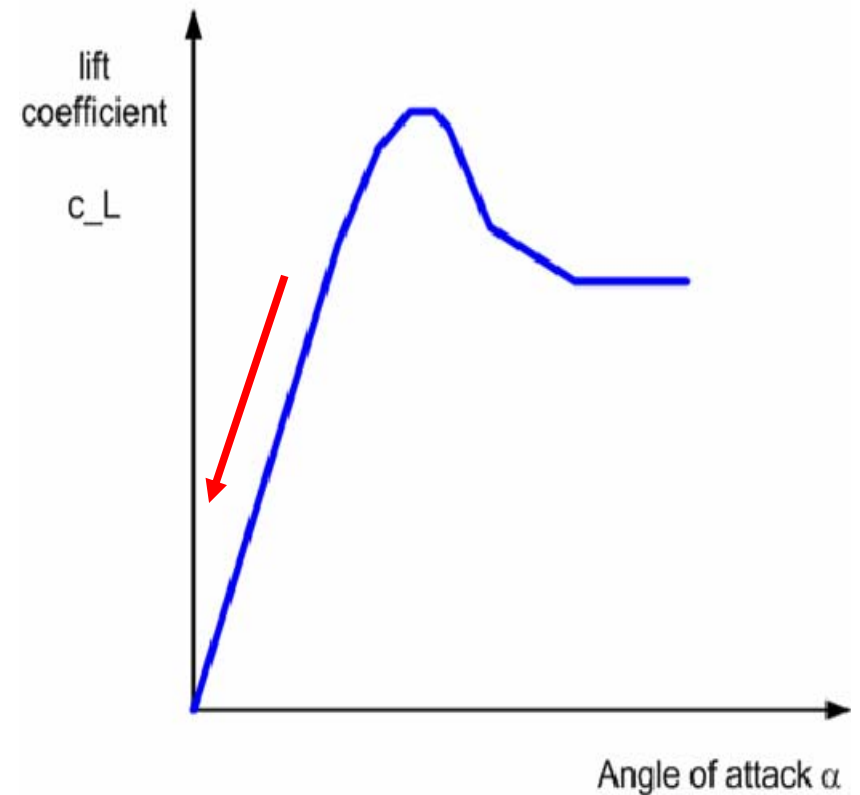
Mit Hilfe der Regelung sollen Schwingungen aktiv gedämpft und Kräfte aus unsymmetrischer Anströmung kompensiert werden

Einleitung: Aerodynamische Kräfte am Rotorblatt (1)

Über die Änderung des Pitchwinkels lassen sich die aerodynamischen Kräfte am Rotorblatt beeinflussen.



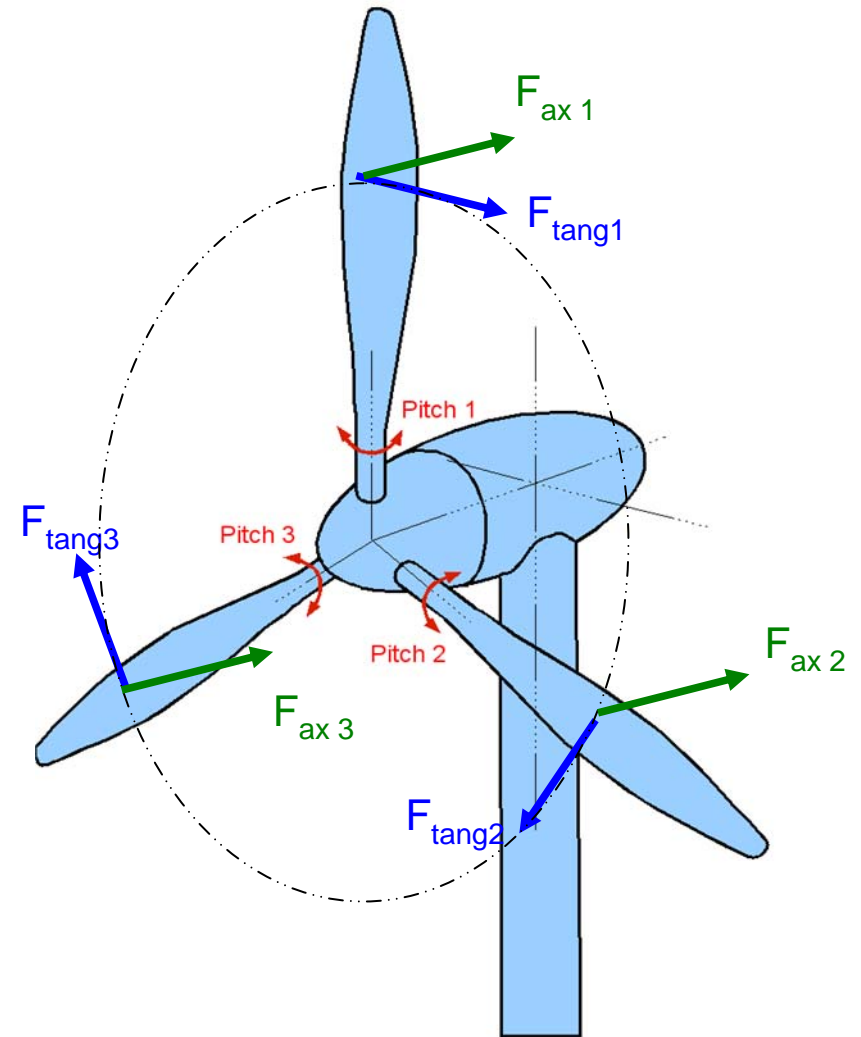
$$dF_L = 1/2 \rho d c_L(\alpha) w^2 dr$$



Einleitung: Aerodynamische Kräfte am Rotorblatt (2)

Jede Änderung des Pitchwinkels bewirkt dabei gleichzeitig:

- eine Änderung des aerodynamischen Drehmomentes um die Rotorachse
- eine Änderung der Schubkraft auf das Rotorblatt



Aufgaben der Blattverstellung (2)

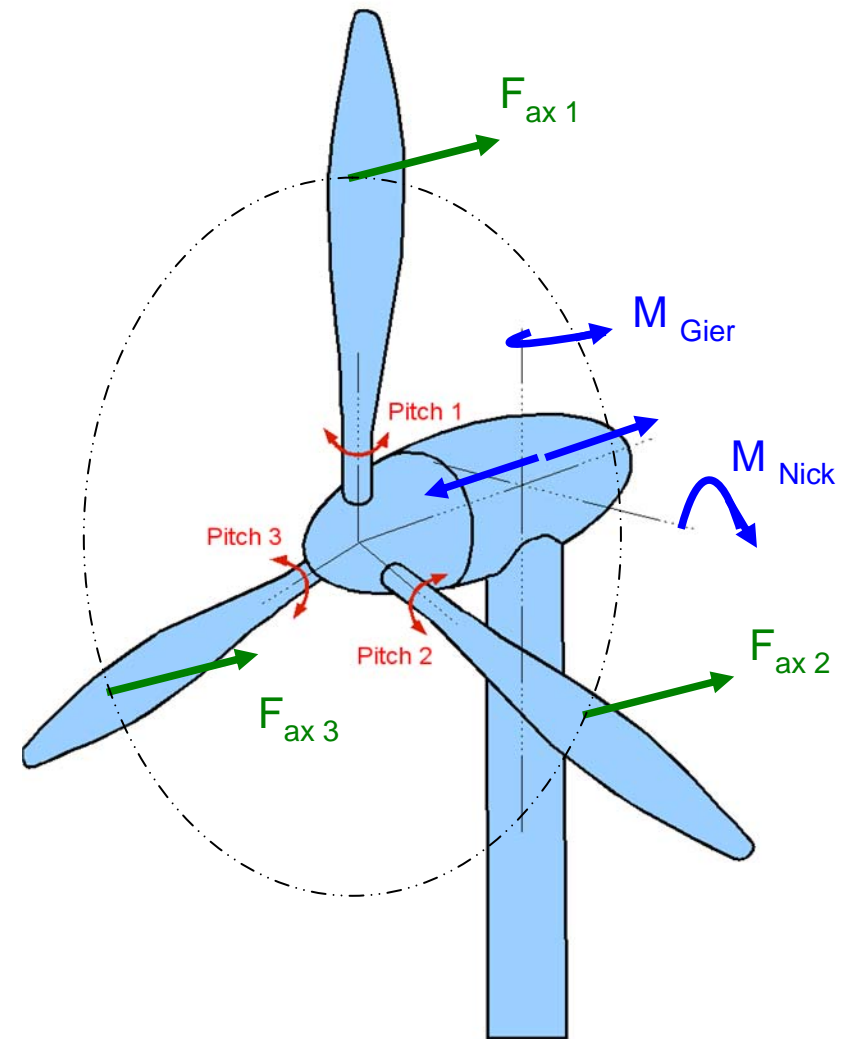
Mit Hilfe der Einzelblattverstellung kann nicht nur die Leistung / Drehzahl der WEA begrenzt werden, sondern es ist auch möglich, gezielt Lasten zu reduzieren.

Nick- und Giermomentkompensation:

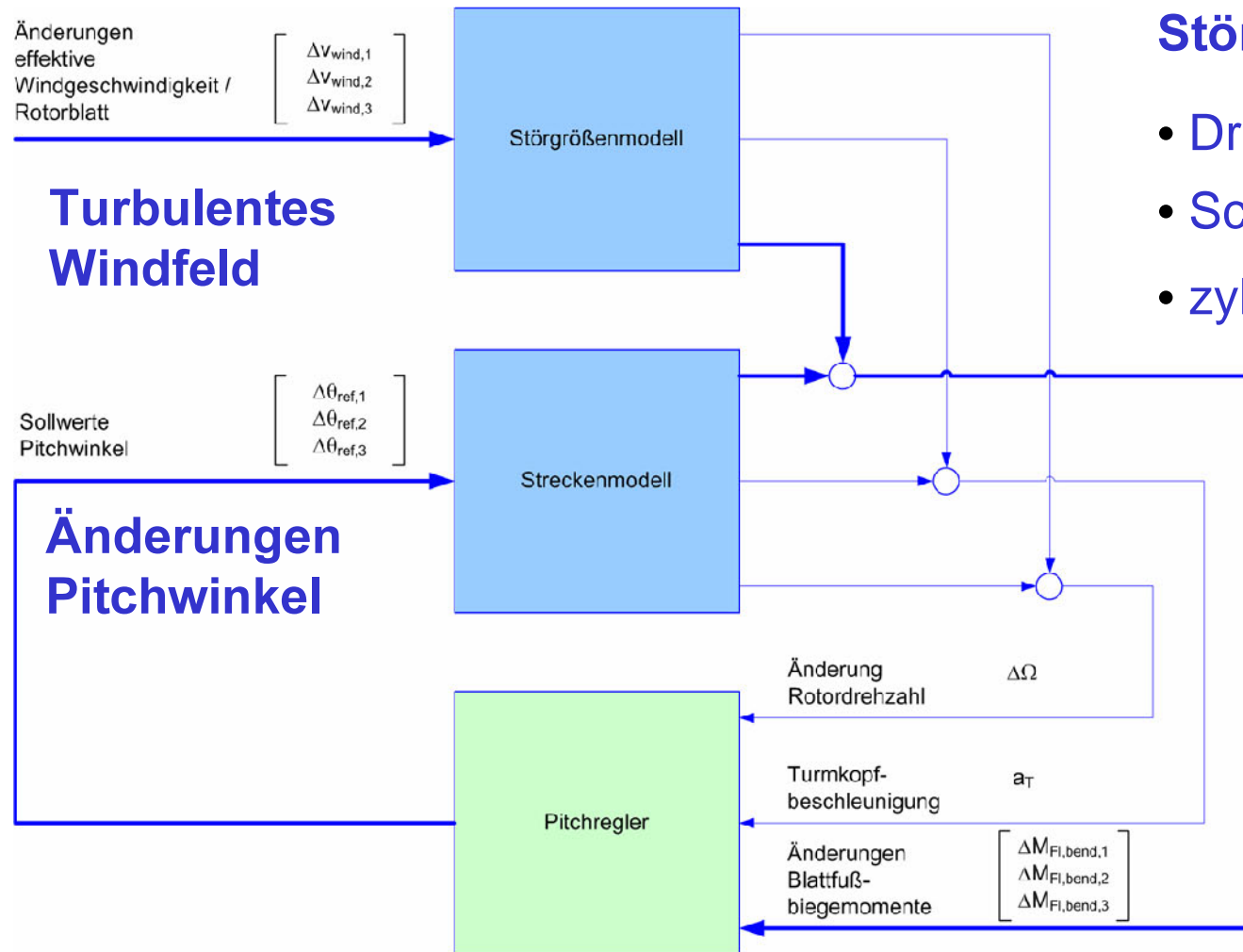
- Kompensation räumlich unterschiedlicher Anströmung über die Rotorfläche durch zyklische Einzelblattverstellung

Aktive Dämpfung von Turmschwingungen:

- Modulation der aerodynamischen Kräfte in Gegenphase zur Auslenkungsgeschwindigkeit



Allgemeine Struktur Regelungsproblem



Störungen:

- Drehzahländerungen
- Schwingungen
- zyklische Blattlasten

Randbedingungen für den Reglerentwurf

Begrenzungen in Pitchgeschwindigkeit und -beschleunigung

- Auslegung der Pitchmotoren, Pitchgetriebe etc.
- Belastung der Rotorblätter und der Nabe

Vermeidung unerwünschter Kopplung mit Strukturschwingungen

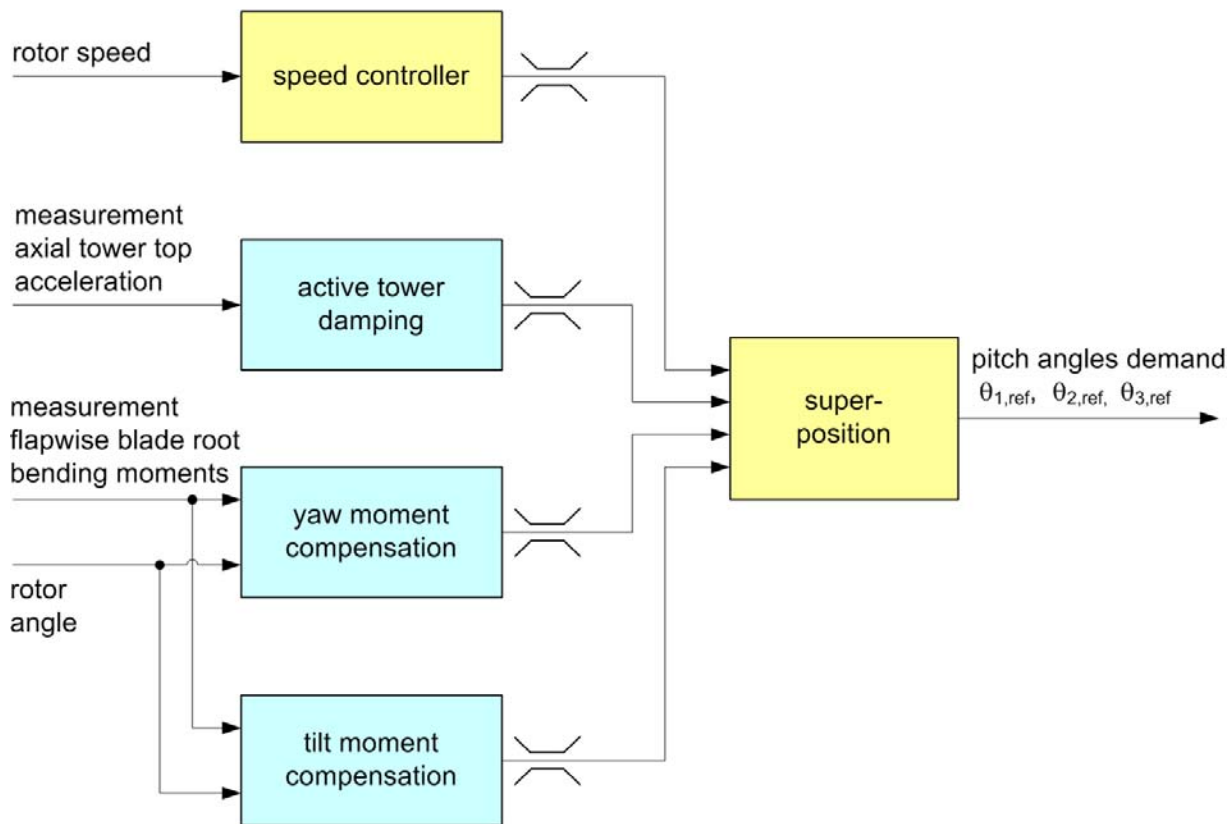
- Kopplung zwischen axialen und tangentialen aerodynamischen Kräften
- Drehzahlregler \leftrightarrow 1. axialer Turmbiegemodus
- aktive Turmdämpfung \leftrightarrow synchrone Blattbiegemodes
- Nick- und Giermomentkompensation \leftrightarrow asynchrone Blattbiegemodes

Robustheitsanforderungen

- Nichtlinearität: Einfluss der Pitchverstellung ändert sich über den Betriebsbereich,
- Unsicherheit in den aerodynamischen Koeffizienten,
- Ungenauigkeiten bei der Modellierung (z.B. Vernachlässigung höherer Modes)

Klassischer Ansatz: Modulare Reglerstruktur

Modular Controller Structure



Transparente Struktur

- Parameter-Tuning,
- Begrenzung der Ausgangsgrößen

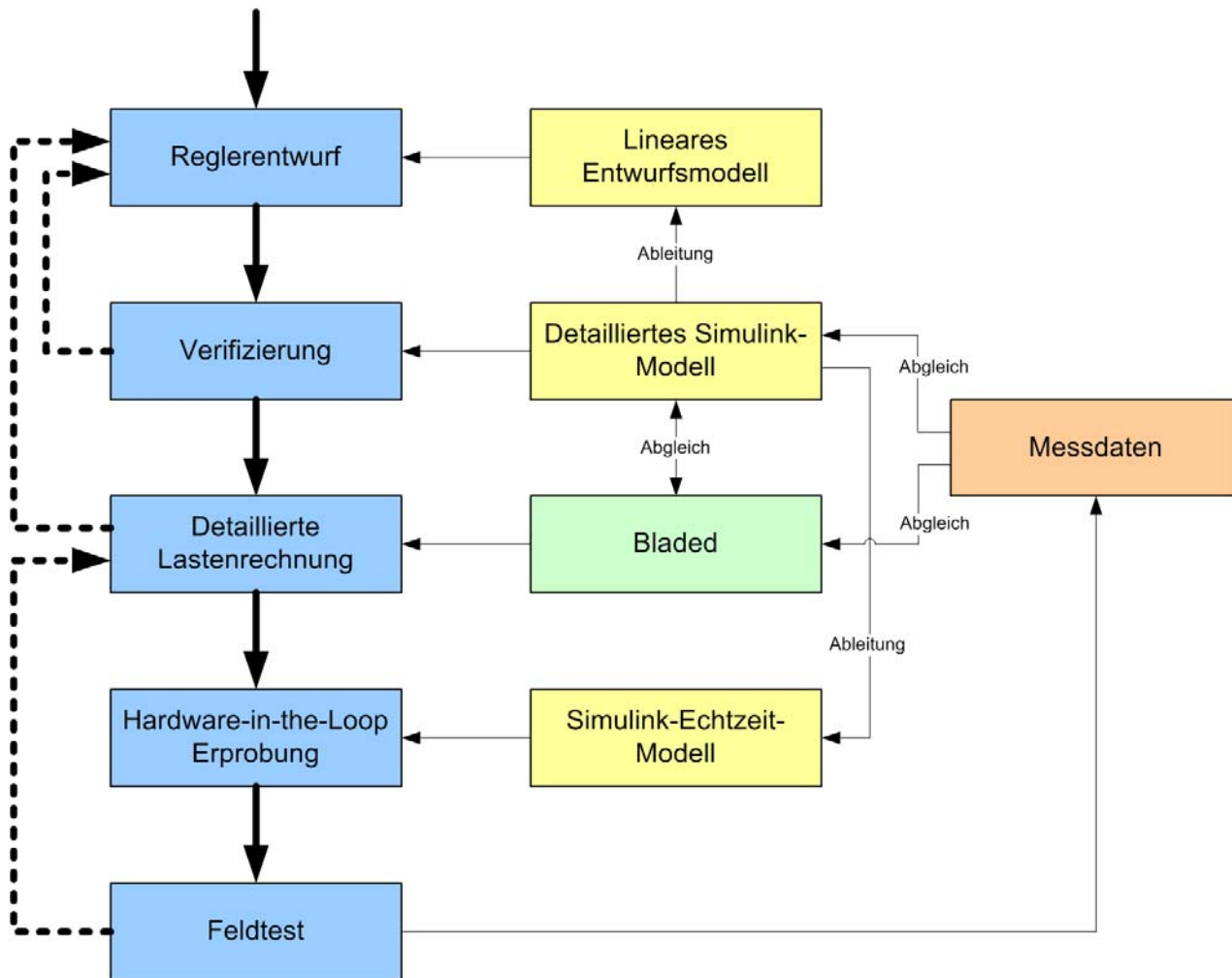
Alle Regler beeinflussen den Pitchwinkel-Sollwert

- Kopplungen, insbesondere zwischen Drehzahlregler und Turmdämpfung

Iterativer Ansatz:

- Sukzessiver Entwurf der einzelnen Reglerschleifen

Feldtest M5000 – Modellbasierte Vorgehensweise



Messsystem

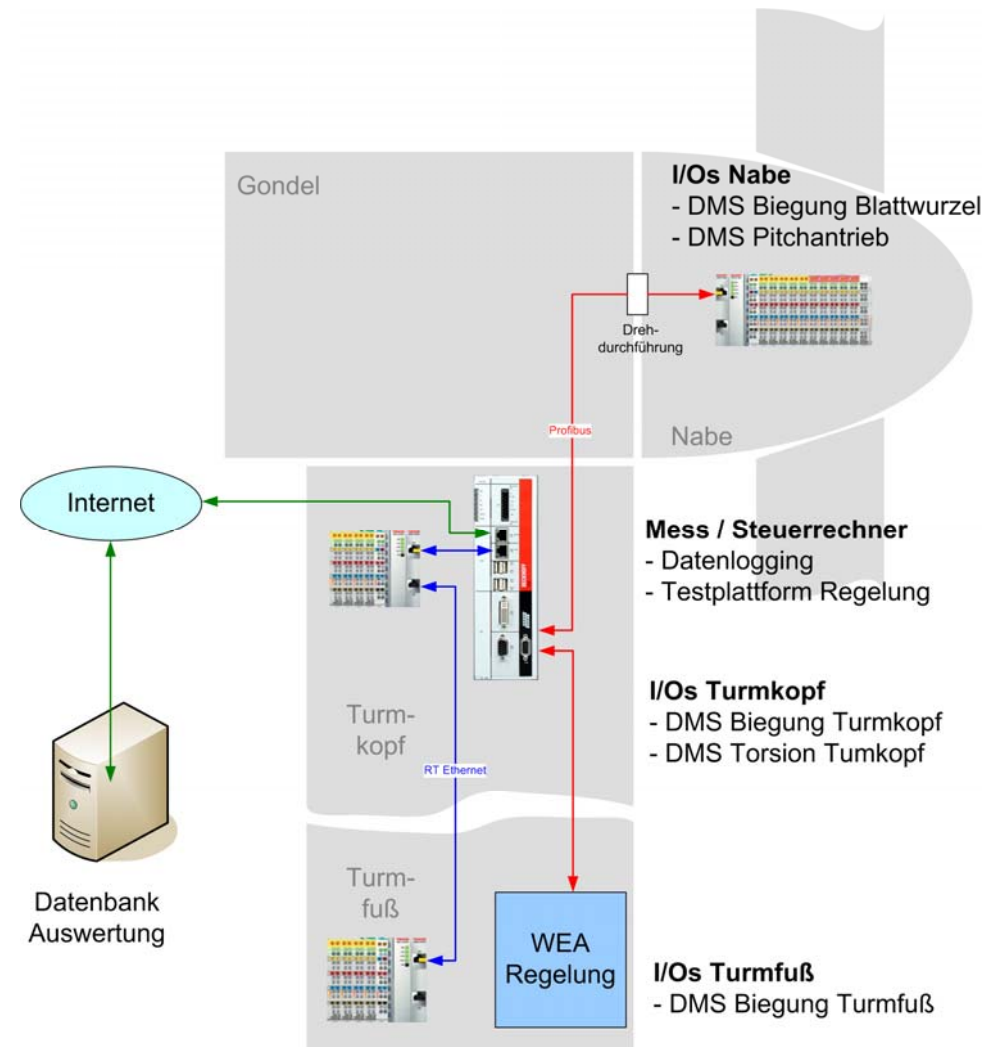
- 55 Kanäle, 100 Hz basierend auf IPC/
Feldbus-Technologie

Messsignale für die Regelung:

- Messung Blattwurzelbiegemomente
- Redundante Messung
Turmkopfbeschleunigung

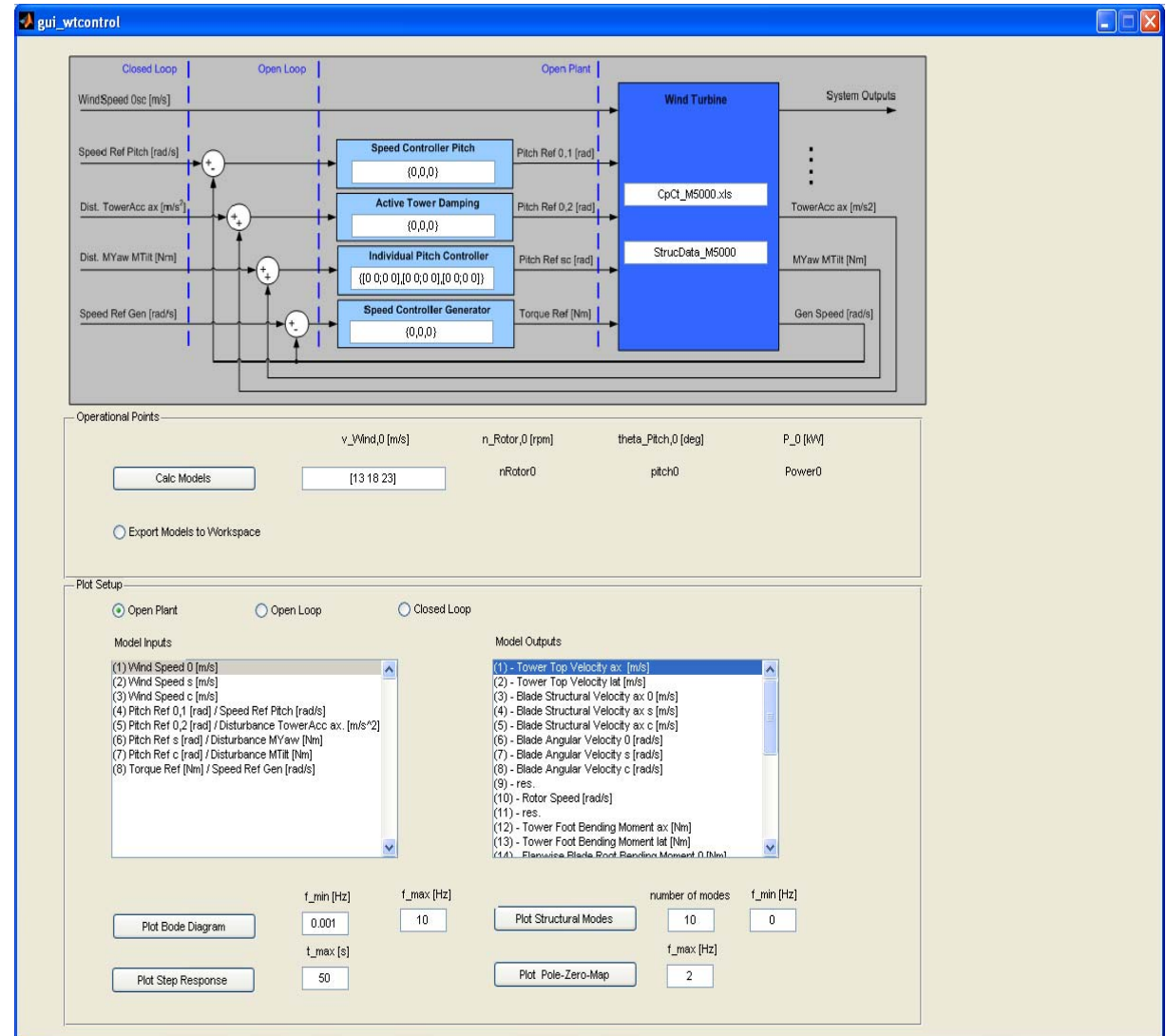
Zusätzliche Messsignale:

- Turmbiegung / Turmtorsion (Turmkopf /
Turmfuß)
- Lastmoment Pitchgetriebe
- Signale aus der Betriebsführung
(Rotordrehzahl, Pitchwinkel, Leistung,
Windgeschwindigkeiten ...)



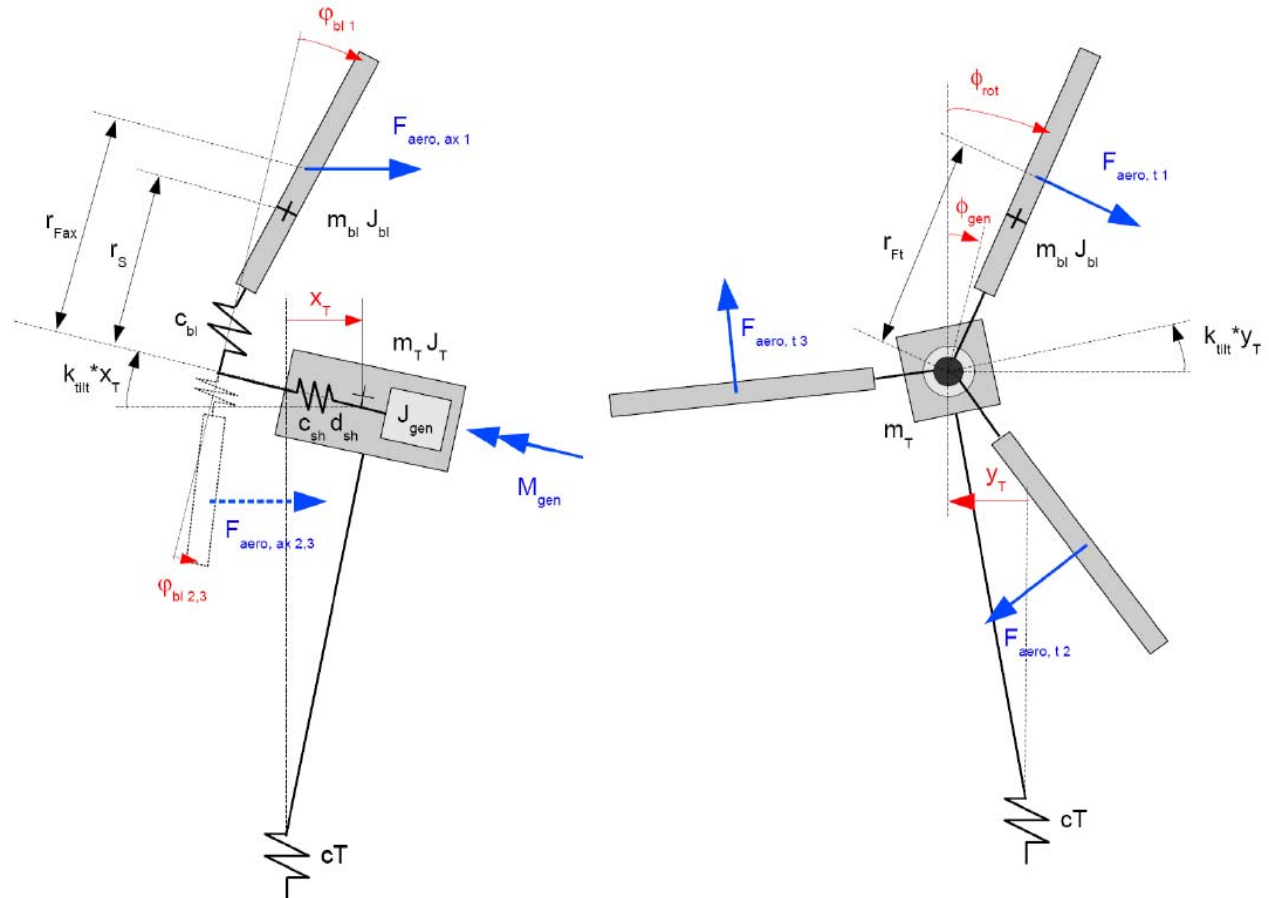
Entwicklungsumgebung Reglerentwurf

- Generalisierte Entwicklungsumgebung für die lastreduzierende Regelung
- linearer Reglerentwurf in verschiedenen Arbeitspunkten
- Werkzeuge:
 - Frequenzgang-Analyse
 - Pole-Zero-Analyse
 - Strukturelle Eigenmodes



Entwurfsmodell Regelung

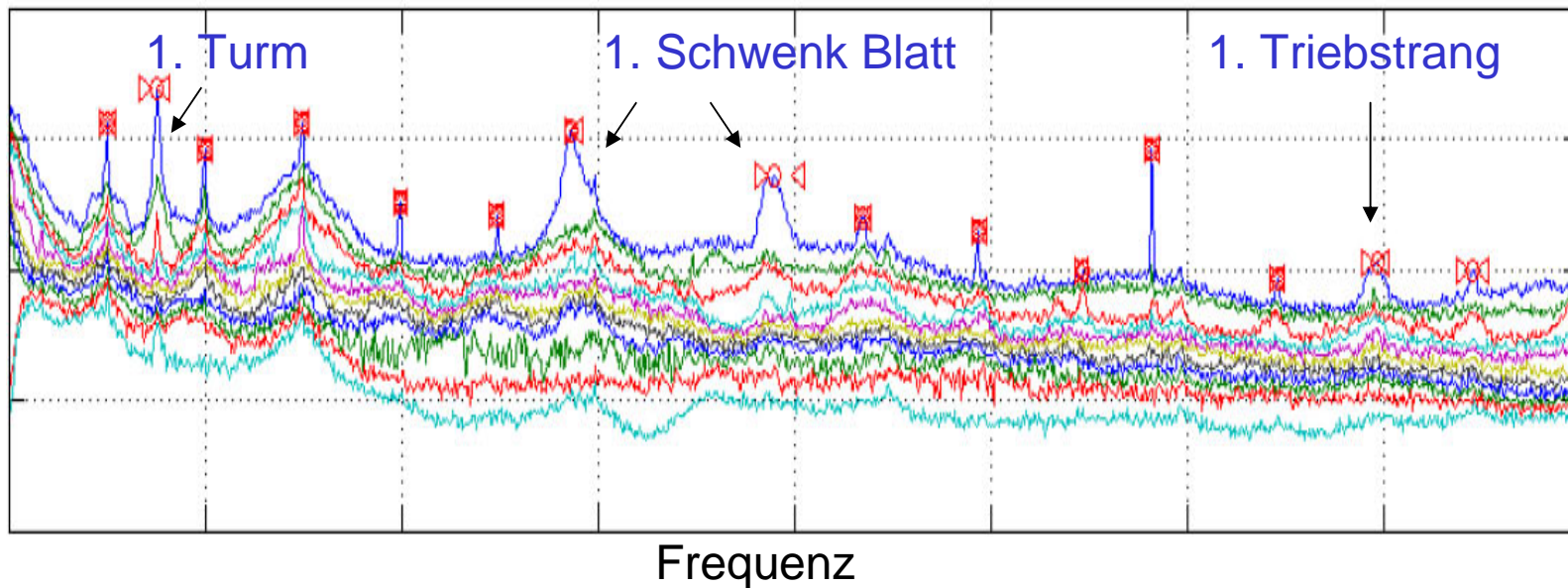
- Vereinfachtes lineares Entwurfsmodell
- Nur die relevanten Eigenmodes berücksichtigt:
 - 1. Turmbiegung längs und quer
 - 1. Blattbiegung Schlag/Schwenk
 - 1. Triebstrangtorsion
- linearisierte Aerodynamik (aerodynamische Koeffizienten, Dynamic Inflow)



Modellabgleich (1): Eigenmodes

Operational Modal Analysis: Bestimmung der aeroelastischen Eigenmodes im Betrieb der Anlage für verschiedene Betriebspunkte

- Frequenz,
- Eigenform,
- aeroelastische Dämpfung

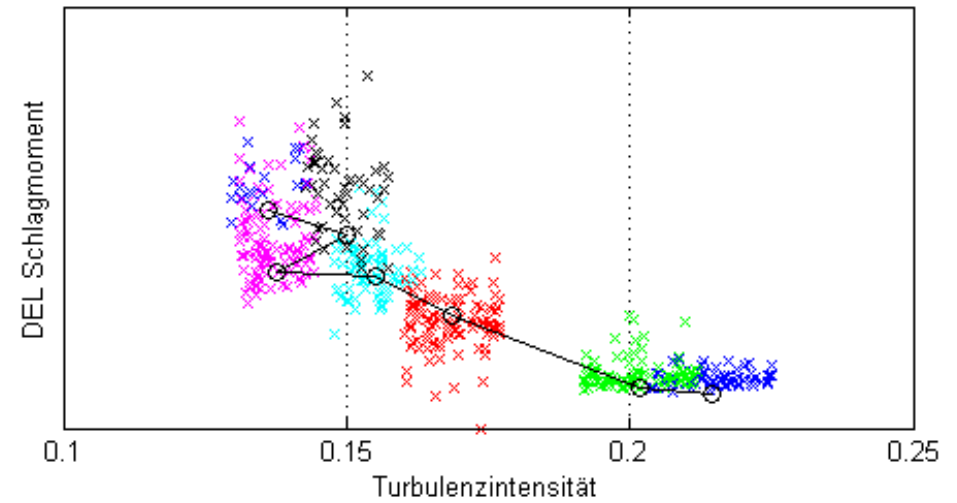
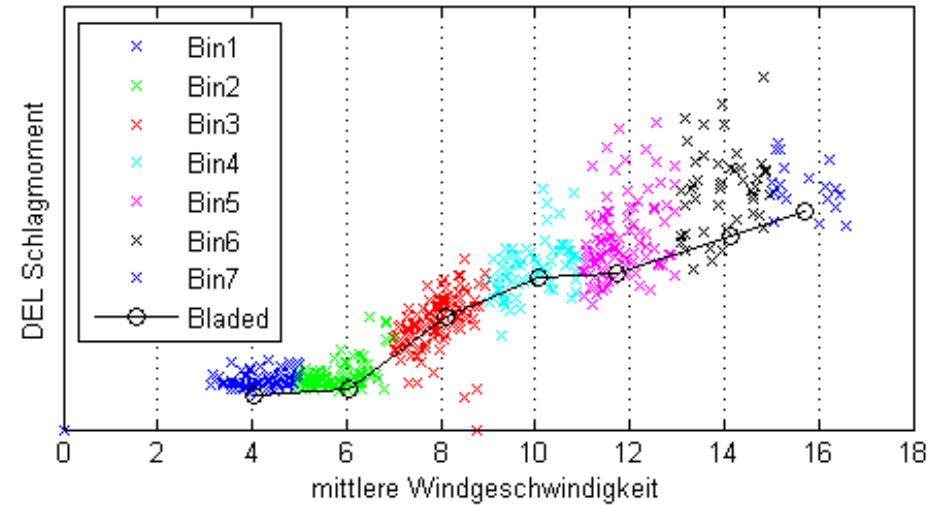
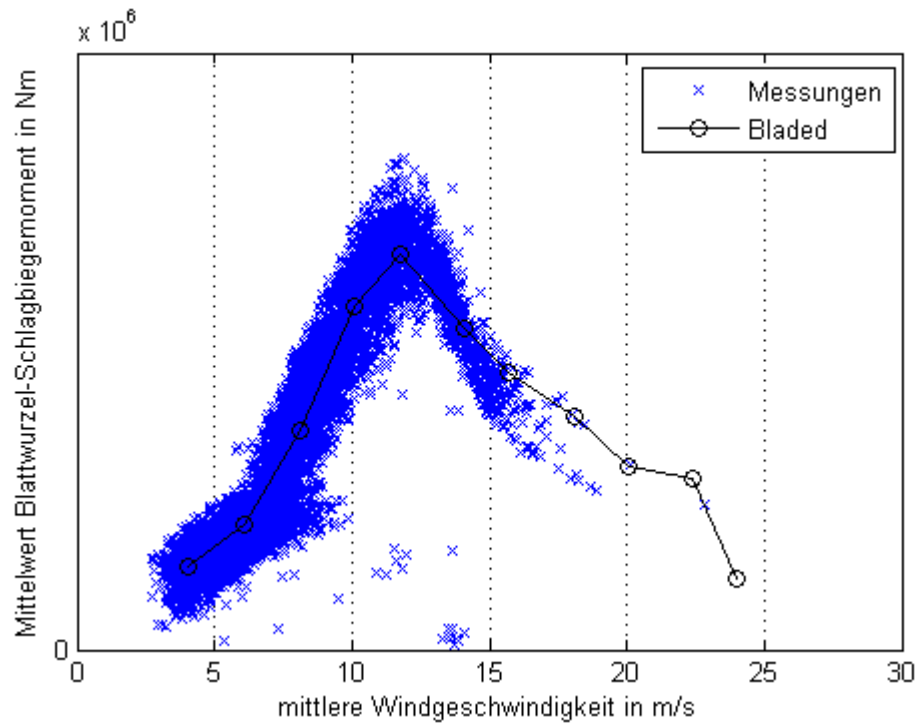


Modellabgleich (2): Extrem- und Ermüdungslasten

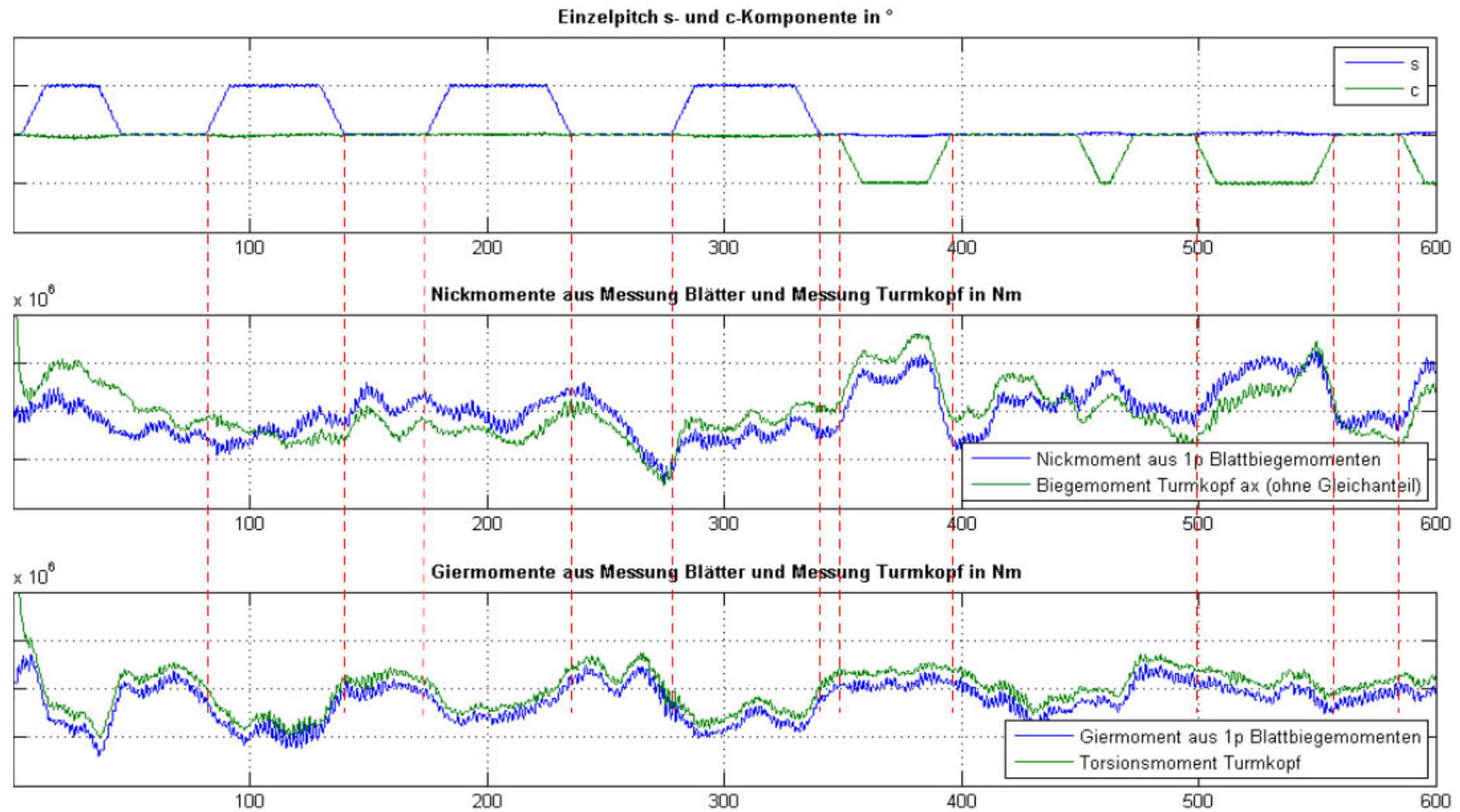
Vergleich Messung / Rechnung

für verschiedene Betriebspunkte

- mittlere Windgeschwindigkeit,
- Turbulenzintensität



Modellabgleich(3): Open-Loop-Test



Lastrechnungen

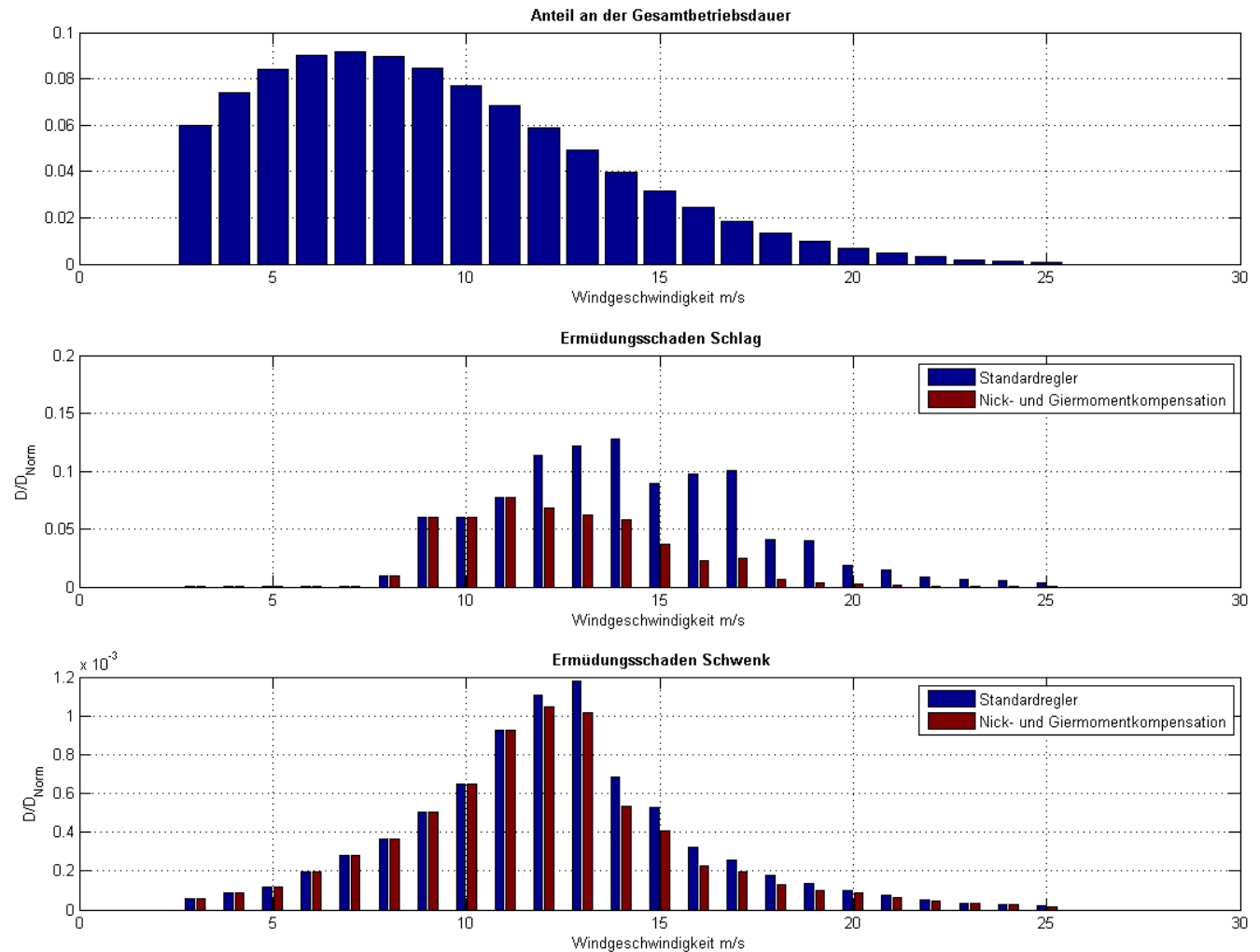
Lastrechnung mit Bladed,
Einbindung
Regler/Überwachungs-
algorithmen als DLL

Lastreduktionen für
Strukturkomponenten

- Blätter
- Hauptlager
- Turm

Lasterhöhungen für das
Pitchsystem

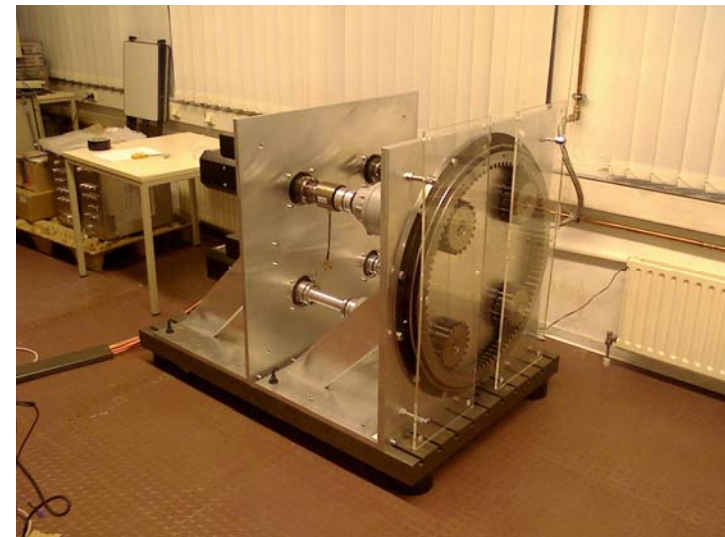
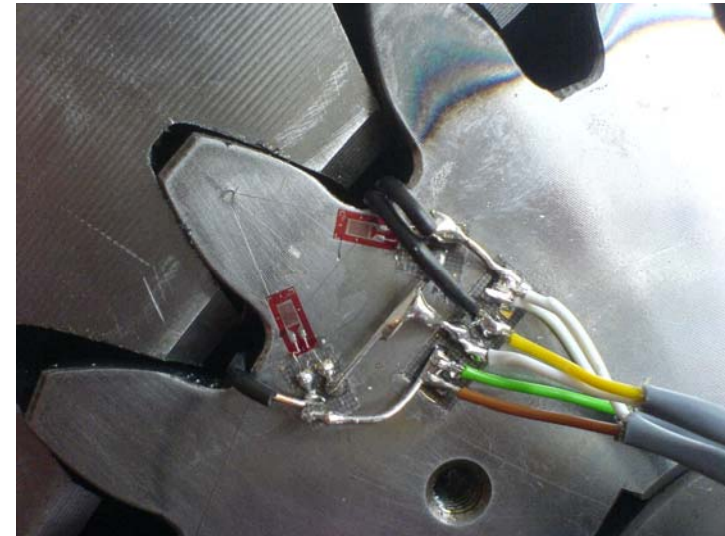
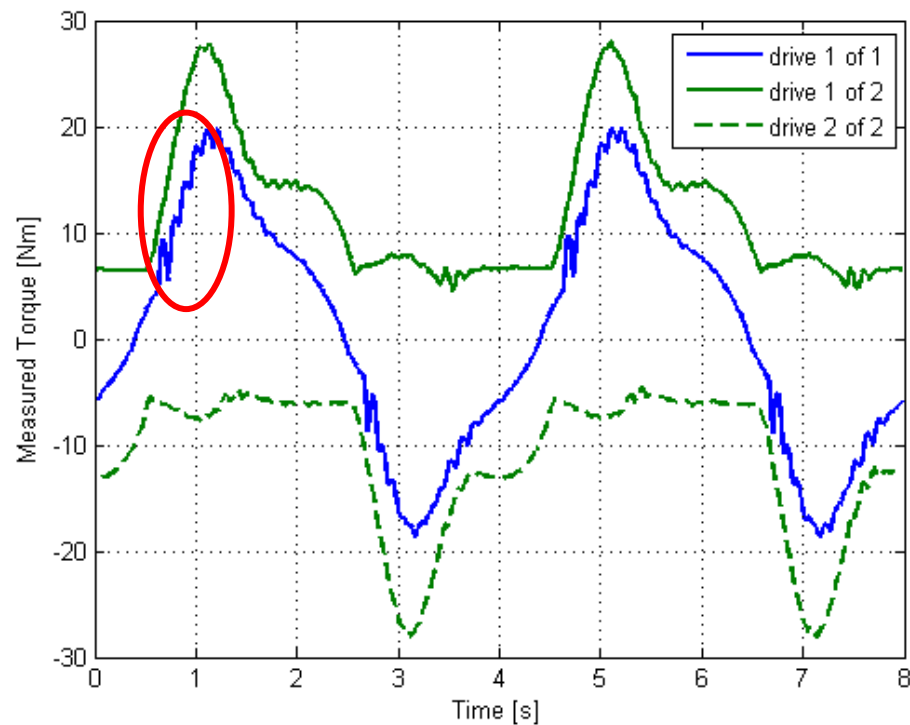
- Pitchgetriebe
- Blattlager



Optimierung Pitchsystem

Teststand Pitchsysteme

- Optimierung Fahrprofilgenerator für Einzelpitch
- Untersuchung zu lastarmen Pitchantrieben



Entwicklung / Test Überwachungsalgorithmen

Entwicklung neuer Überwachungsalgorithmen notwendig für sicheren Remote-Betrieb der lastreduzierenden Regelung

- Abweichungen zwischen einzelnen Pitchwinkeln erlaubt
- Überwachung Sollwertfolge Pitchwinkel, Überwachung von Abweichungen im Mittelwert der Pitchwinkel
- Überwachung Lastsensoren
- Verhalten bei Not-Stop-Vorgängen

Test

- in der Lastrechnung
- auf dem HIL-Teststand Multibrid



Nächste Schritte

- **Inbetriebnahme der lastreduzierende Regelung mit Remote-Freigabe/Überwachung**
- **Test der Regelung in verschiedenen Arbeitspunkten**
 - Nachweis der Reglerfunktionalität
 - Validierung der Lastenrechnung
- **Ermittlung der Kosteneinsparpotentiale / Optimierung der Anlagenkonstruktion**
 - Ggf. veränderte Komponentenauslegung

Vielen Dank.

