

# Photogrammetrische und geodätische Ansätze zur Deformationsmessung von Rotorblättern an Windenergieanlagen

10. Hamburger Forum für Geomatik

11.5.2022

Thomas Luhmann, Simon Nietiedt

Jade Hochschule Oldenburg

Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik

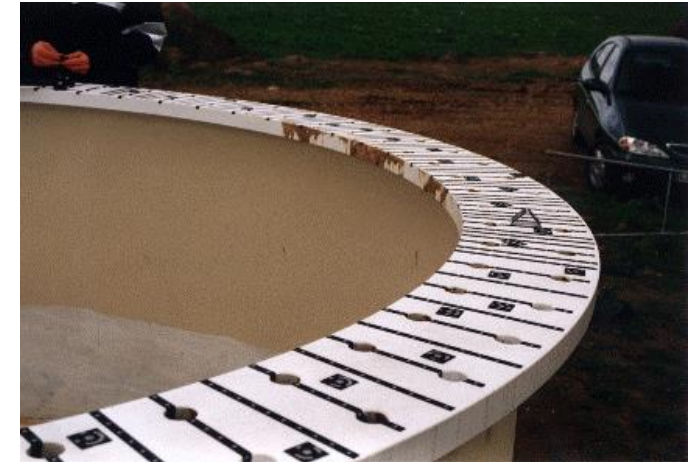
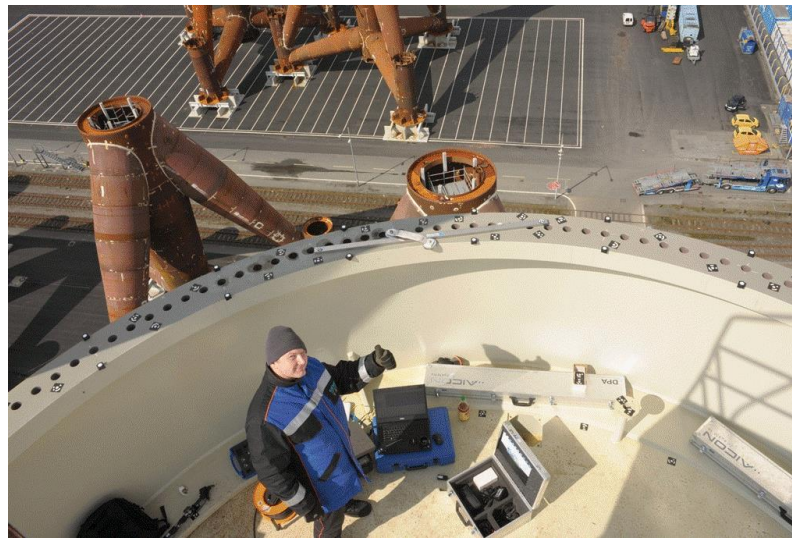
# GLIEDERUNG

---

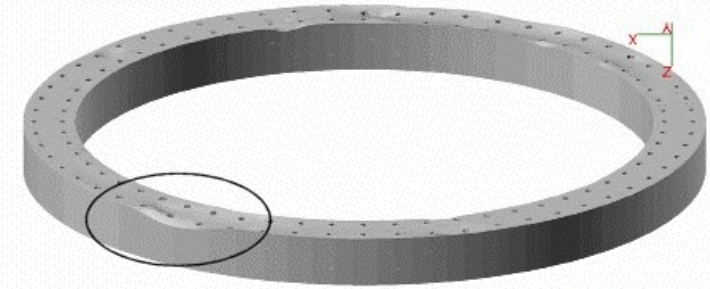
- Anwendungen
- Grundlagen
- Dynamische optische 3D-Messtechnik
- Projekte
  - WindScan
  - TurbuMetric
- Zusammenfassung

# ANWENDUNGEN

- Gründungsstrukturen: Fertigungsmesstechnik, Schweißverbindungen
- Turm: Schwingungen und Deformationen
- Rotorblätter: Biegung, Schlagbewegung, Torsion
- Teststände: Schwingungen, Belastungen
- Produktion: Qualitätssicherung, Form
- Windkanal: Fluid-Struktur-Interaktion
- ...

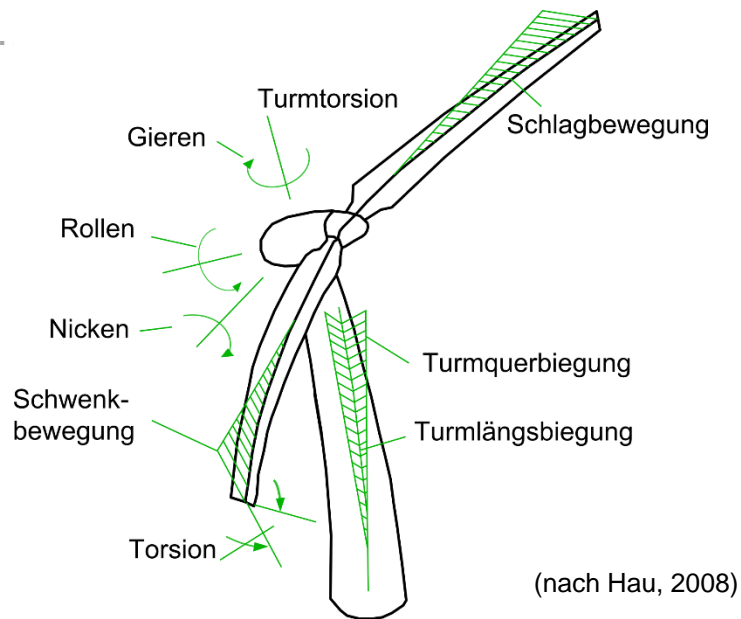


© AICON / Hexagon

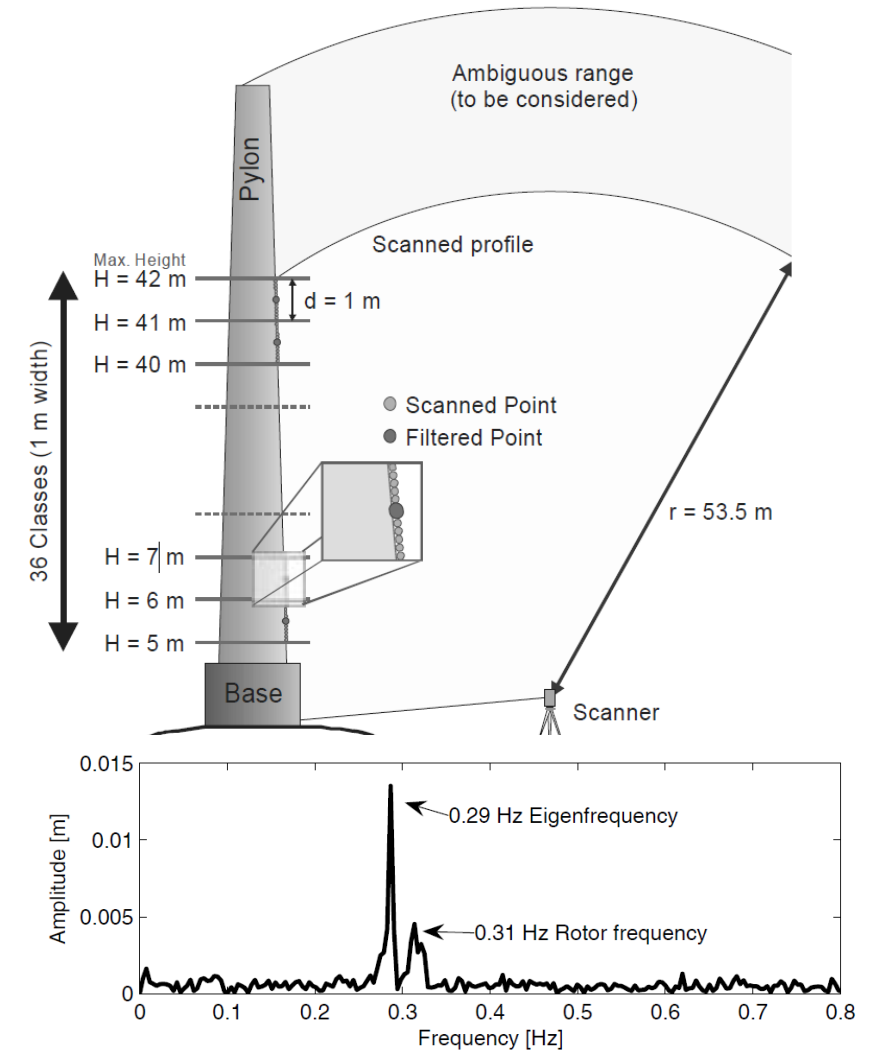


# ANWENDUNGEN

- Gründungsstrukturen: Fertigungsmesstechnik, Schweißverbindungen
- Turm: Schwingungen und Deformationen
- Rotorblätter: Biegung, Schlagbewegung, Torsion
- Teststände: Schwingungen, Belastungen
- Produktion: Qualitätssicherung, Form
- Windkanal: Fluid-Struktur-Interaktion
- .

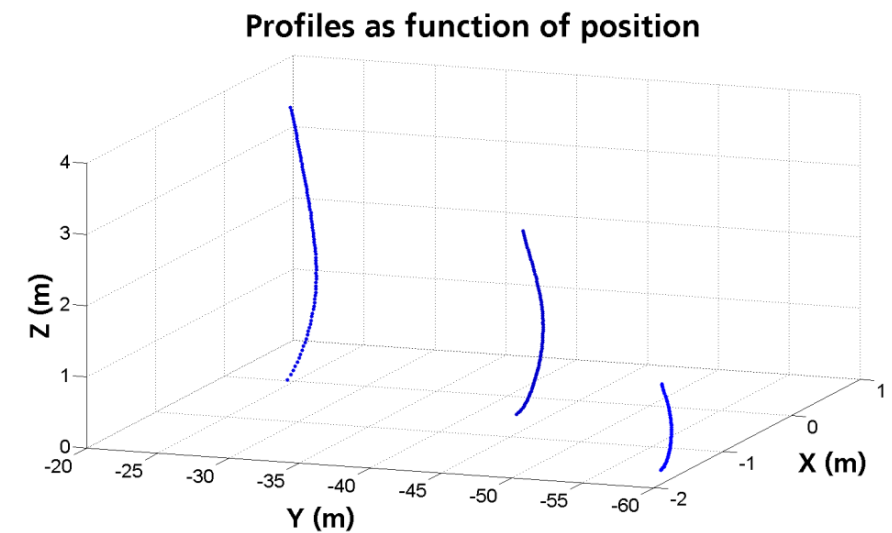


Hesse u.a., 2006



# ANWENDUNGEN

- Gründungsstrukturen: Fertigungsmesstechnik, Schweißverbindungen
- Turm: Schwingungen und Deformationen
- Rotorblätter: Biegung, Schlagbewegung, Torsion
- Teststände: Schwingungen, Belastungen
- Produktion: Qualitätssicherung, Form
- Windkanal: Fluid-Struktur-Interaktion
- ...



# ANWENDUNGEN

- Gründungsstrukturen: Fertigungsmesstechnik, Schweißverbindungen
- Turm: Schwingungen und Deformationen
- Rotorblätter: Biegung, Schlagbewegung, Torsion
- Teststände: Schwingungen, Belastungen
- Produktion: Qualitätssicherung, Form
- Windkanal: Fluid-Struktur-Interaktion
- ...



# ANWENDUNGEN

- Gründungsstrukturen: Fertigungsmesstechnik, Schweißverbindungen
- Turm: Schwingungen und Deformationen
- Rotorblätter: Biegung, Schlagbewegung, Torsion
- Teststände: Schwingungen, Belastungen
- **Produktion: Qualitätssicherung, Form**
- Windkanal: Fluid-Struktur-Interaktion
- ...



Vermessung der Rotornabe



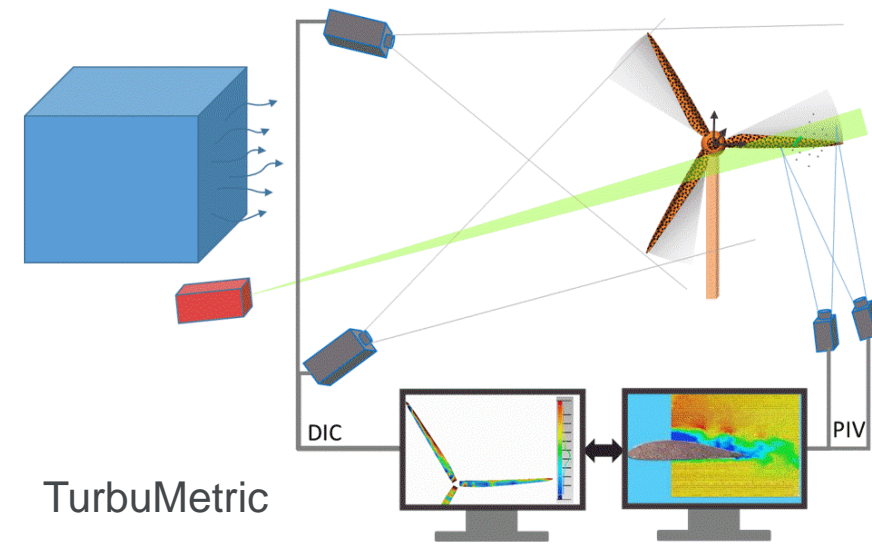
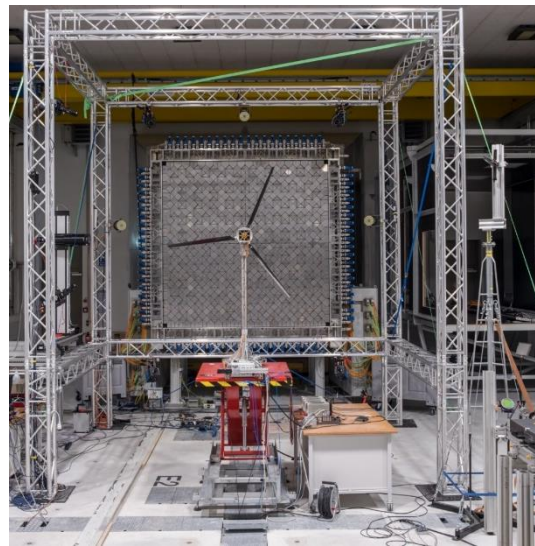
© AICON / Hexagon



© Siemens

# ANWENDUNGEN

- Gründungsstrukturen: Fertigungsmesstechnik, Schweißverbindungen
- Turm: Schwingungen und Deformationen
- Rotorblätter: Biegung, Schlagbewegung, Torsion
- Teststände: Schwingungen, Belastungen
- Produktion: Qualitätssicherung, Form
- Windkanal: Fluid-Struktur-Interaktion
- ...



# GRUNDLAGEN

## Optische 3D Messtechnik

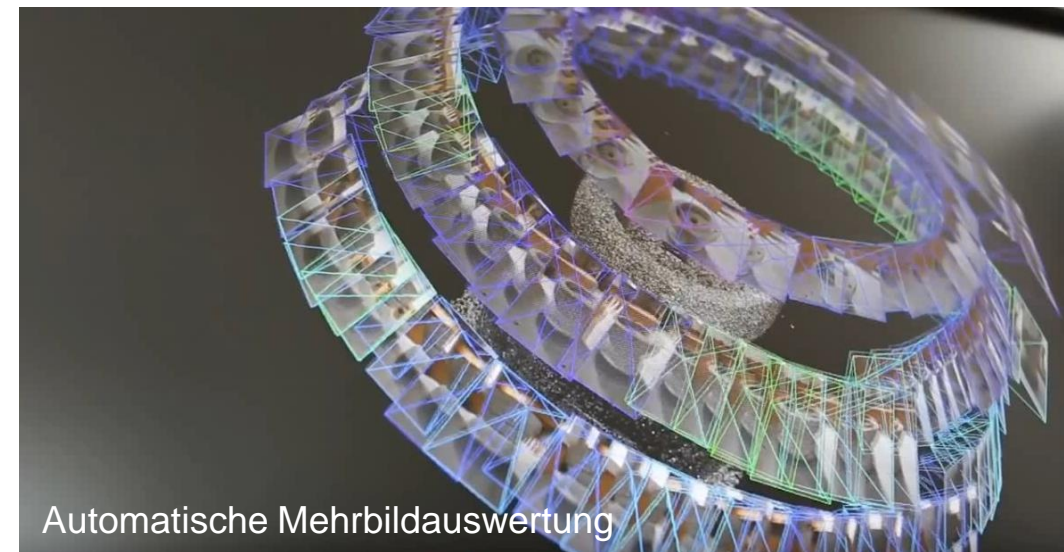
- Photogrammetrie  
Structure-from-Motion
- Strukturiertes Licht  
Streifenprojektion  
Laserprojektion
- Laserscanning
- Time-of-Flight-Kameras
- ...



Beliebiges Objekt



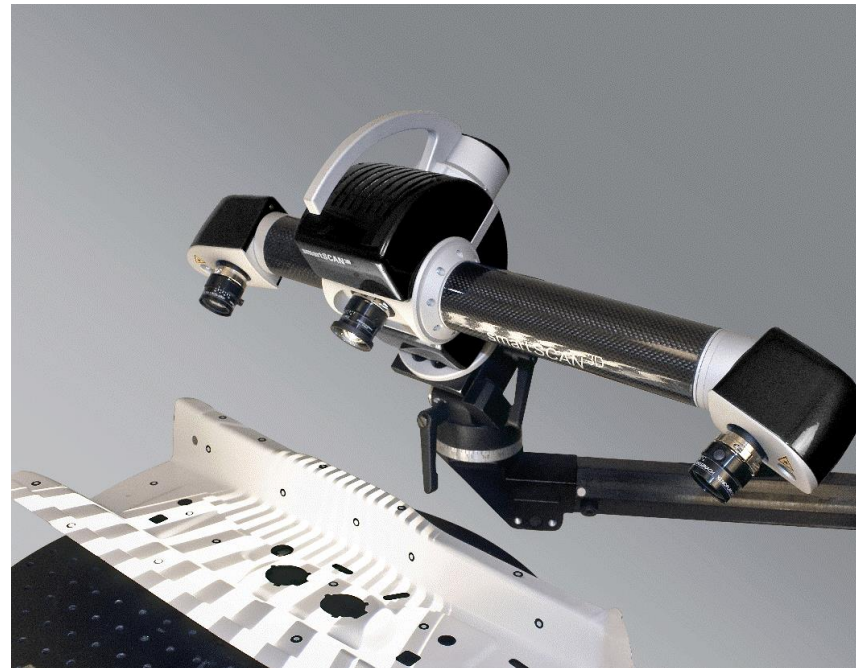
Bildaufnahme



Automatische Mehrbildauswertung

## Optische 3D Messtechnik

- Photogrammetrie  
Structure-from-Motion
- Strukturiertes Licht  
Streifenprojektion  
Laserprojektion
- Laserscanning
- Time-of-Flight-Kameras
- ...



Streifenprojektionssystem (AICON)



Handscanner (Creaform)

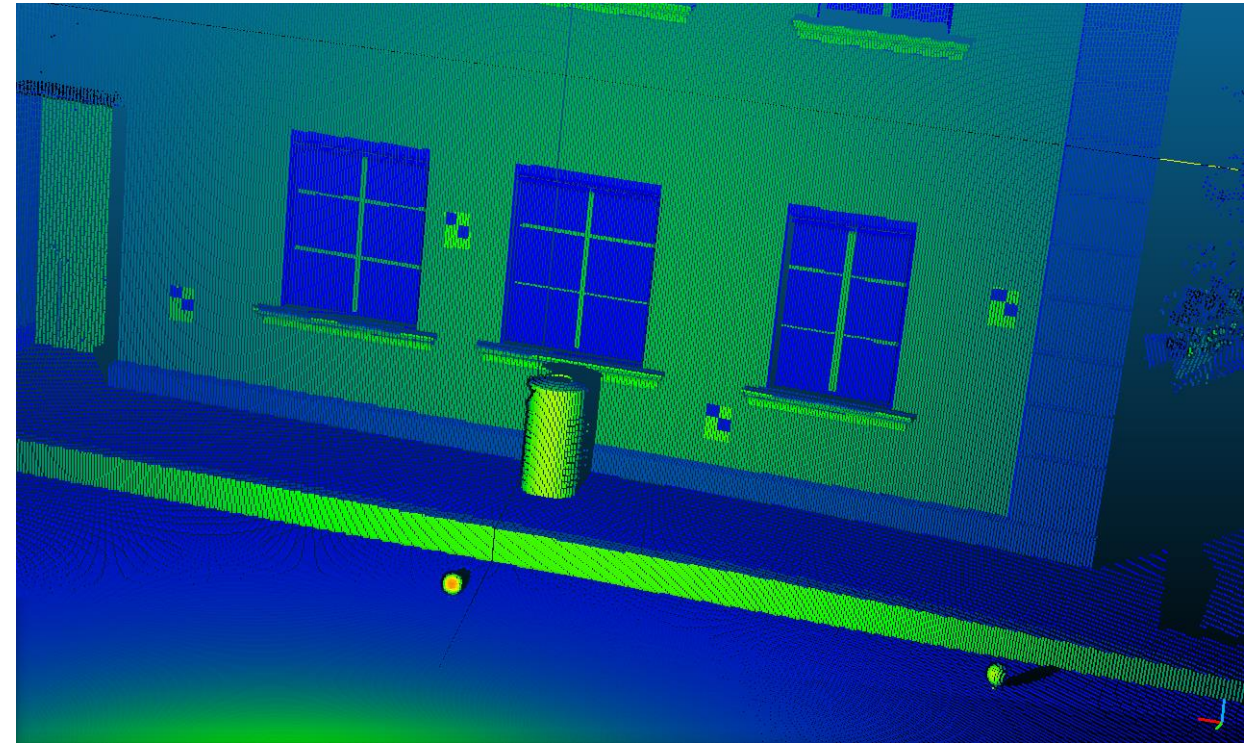
# GRUNDLAGEN

## Optische 3D Messtechnik

- Photogrammetrie  
Structure-from-Motion
- Strukturiertes Licht  
Streifenprojektion  
Laserprojektion
- Laserscanning
- Time-of-Flight-Kameras



Terrestrische Laserscanner (Faro, Leica)

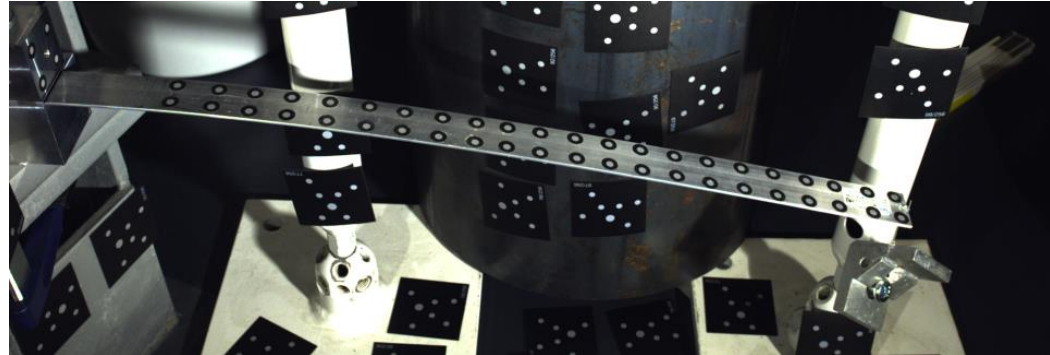


Prinzip des Laserscannings (VRscan3D)

# GRUNDLAGEN

## Photogrammetrie

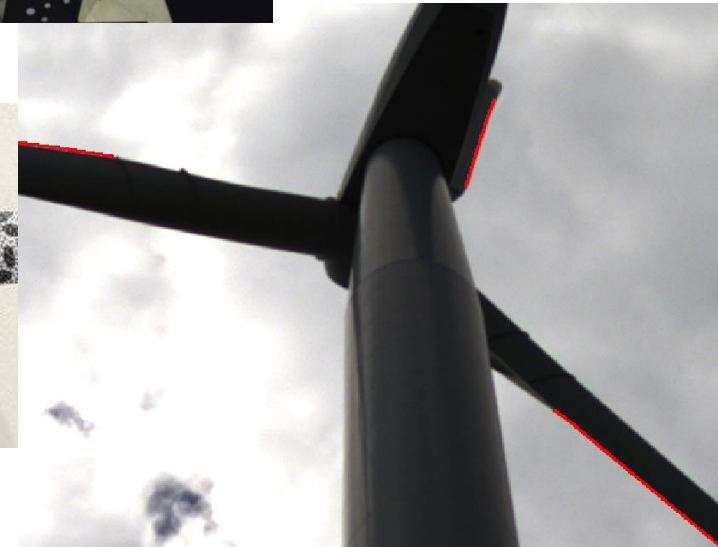
- Signalisierte Punkte
- Natürliche Merkmale
- Matching (Bildzuordnung)
- Kamerakalibrierung
- 3D-Koordinatensystem
- Bildorientierung
- 3D-Punkte (Punktwolken)
- Deformationen, Trajektorien
- Entzerrungen, Orthophotos
- Statische und dynamische Vermessung
- Messgenauigkeit ca. 10-20 ppm  
z.B. 0.2 mm auf 10 m Objektgröße



Punktförmige Zielmarken



Flächenhaftes Zufallsmuster

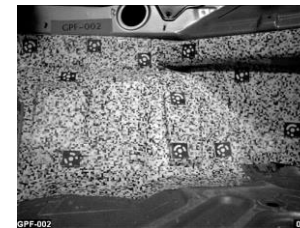
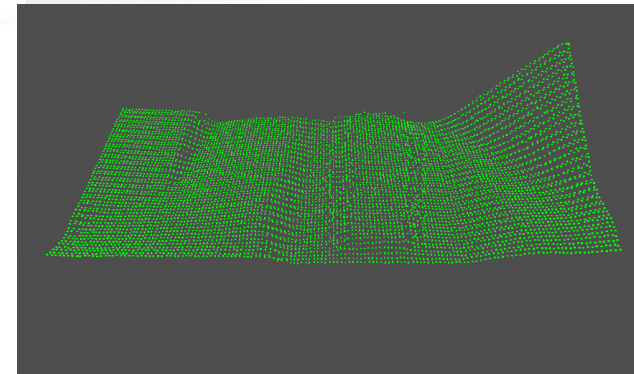


Konturextraktion (rot)

# DYNAMISCHE OPTISCHE 3D MESSTECHNIK

## Dynamische optische 3D Messtechnik

- Erfassung von raumzeitlichen Informationen (4D)
  - Geometrie
  - Zeit
- Aufnahme von (Highspeed) Bildsequenzen
- Flächenhaftes und berührungsloses Messverfahren
- Etabliert in unterschiedlichsten Anwendungen
  - Fahrzeugsicherheit
  - Materialprüfung (Digital Image Correlation DIC)
  - Deformationsmessungen
  - Bewegungsanalyse (motion tracking)



linke Kamera



rechte Kamera

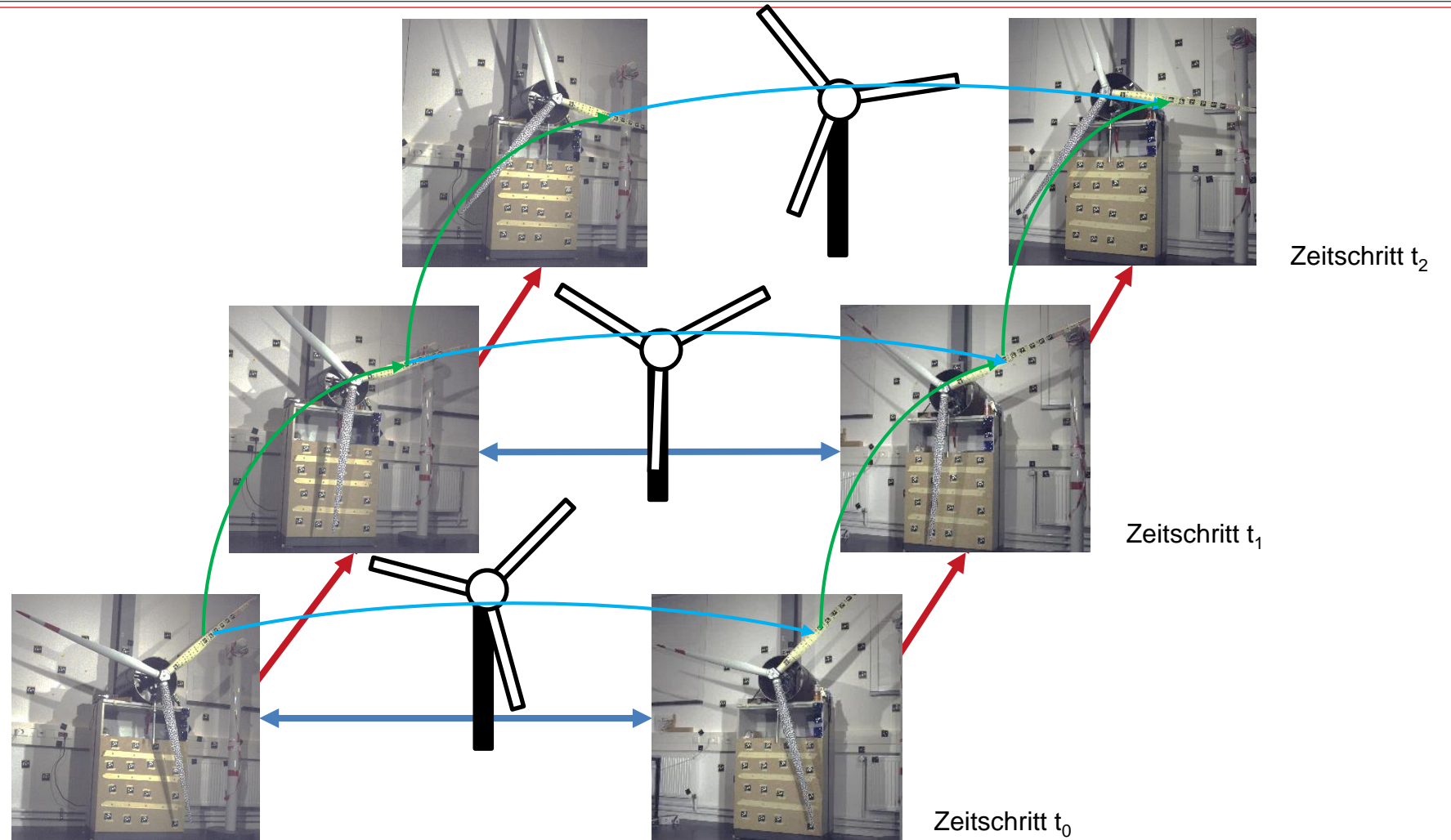
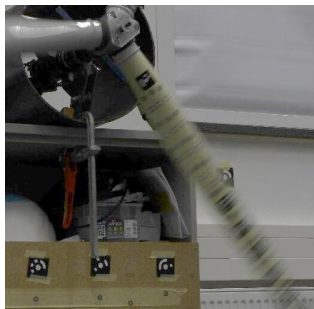
# DYNAMISCHE OPTISCHE 3D MESSTECHNIK

## Ablauf

- Örtliche Korrespondenz
- Zeitliche Korrespondenz

## Herausforderungen

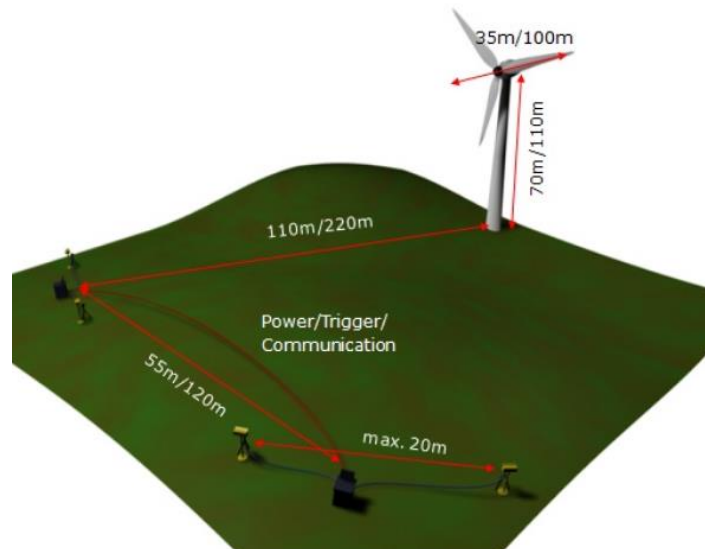
- Belichtungszeit
- Synchronisierung
- Koordinatensystem



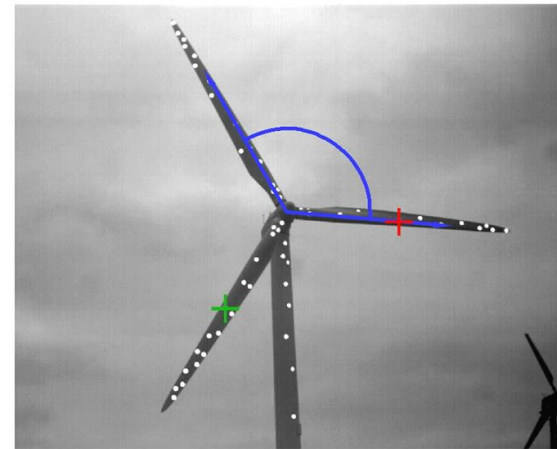
# DYNAMISCHE OPTISCHE 3D MESSTECHNIK

## Photogrammetrie

- Messung an realer Anlage mit **Punktmarken**
  - Einsatz von mehreren Stereokamerasystemen
  - 30cm Messmarken  $\hat{=}$  10 Pixel
  - Punkttracking über die Epochen

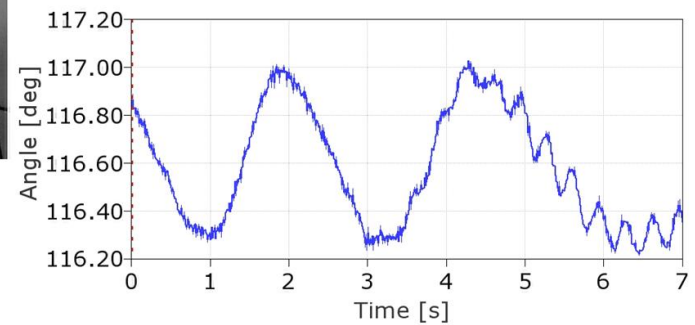
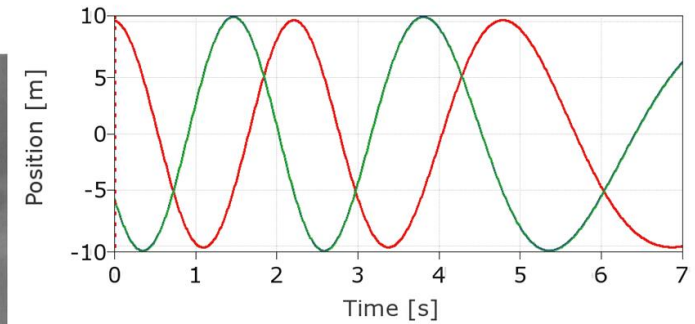


### Dynamic 3D Analysis



### Wind Turbine Measurement

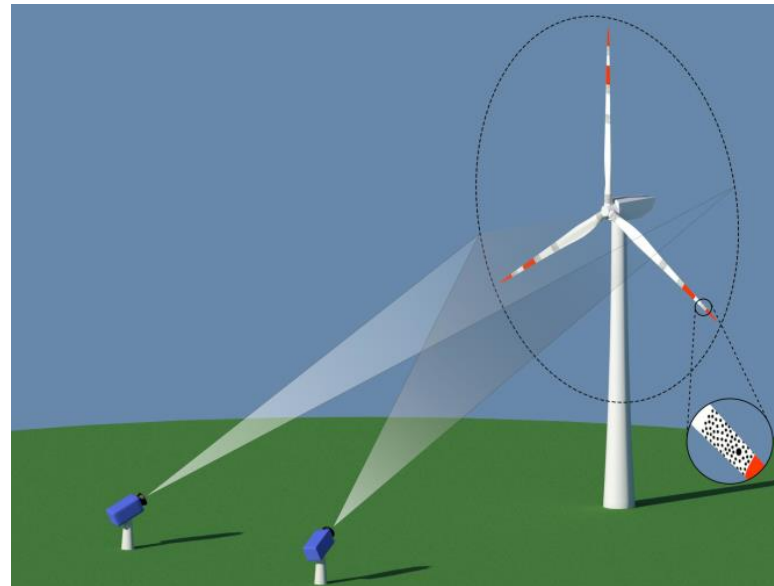
Diameter: 40 m  
Hub Height: 40 m



Schmidt Paulsen et al. 2009

## Photogrammetrie

- Messung an realer Anlage **mit Zufallsmuster**
  - 3 Positionen mit Zufallsmuster beklebt
  - Einsatz von 2 Kameras
  - Tracking über die Epochen



Winstroth et al. 2014



# WINDSCAN

## Ziel: Torsionsbestimmung an realen Anlagen **ohne Markierung**

Idee: Aufnahme von Profildaten mit Laserscanner im 1D-Modus

### Messaufbau mit Laserscannern

- 3D-Modus für die Orientierung
- Transformation der Profildaten ins Koordinatensystem der Nabe

### Kamera(s)

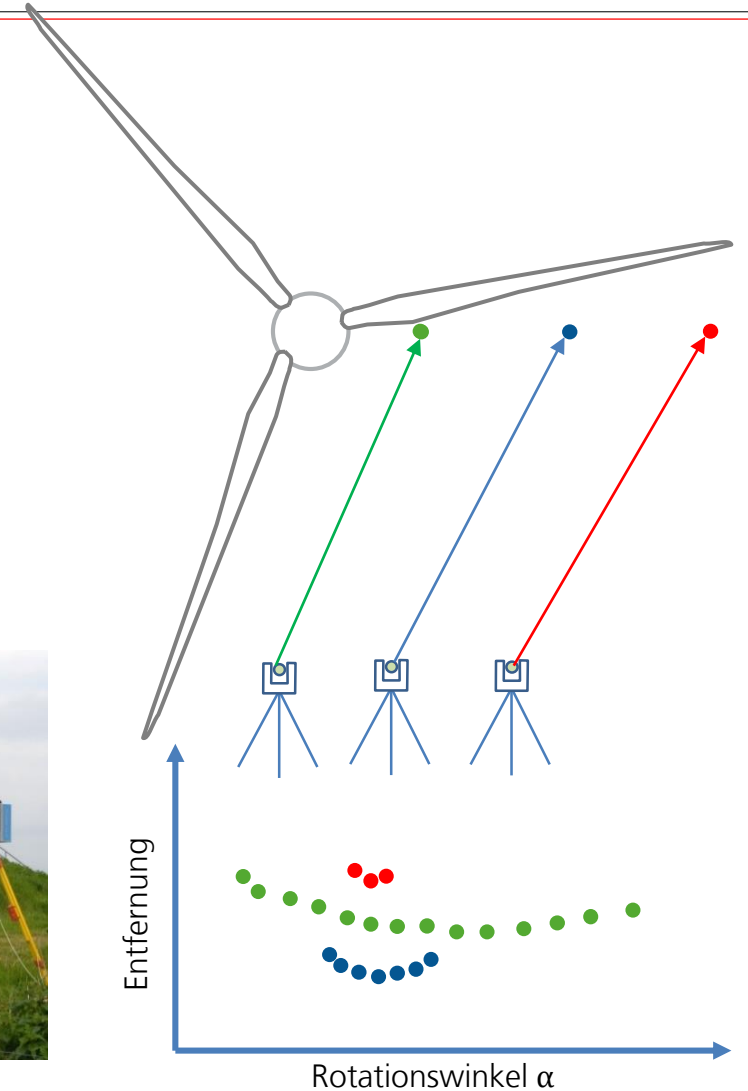
- Gondelbewegung (Verfolgung markanter Punkte)

### Laserscanner

- 1D-Modus für Profile
  - Rotorblatt Rotationswinkel  $\alpha$
  - 2 oder mehr Profile notwendig

### Auswertung

- Transformation ins CAD-Modell des Rotorblattes
- Berechnung der Torsion



## Laserbasierter Fächersensor

Entwicklung des fächerartigen Distanzmesssystems

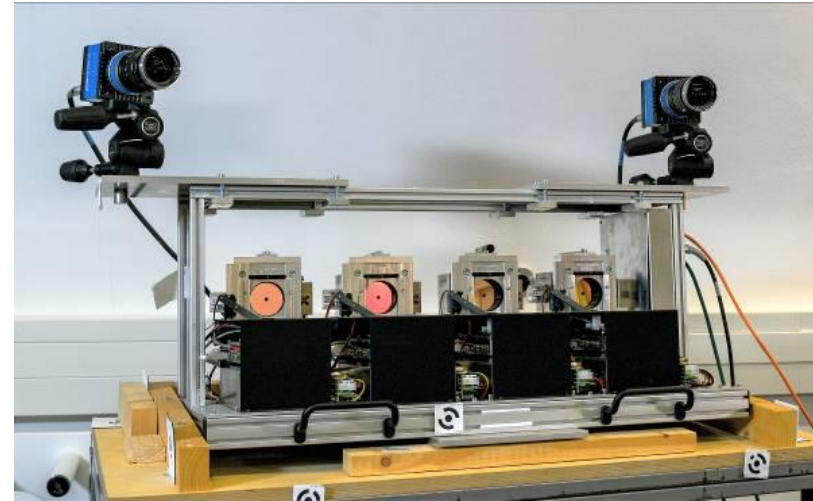
- Vereinfachte Ausrichtung auf die Rotorblätter
- Verbessert die Genauigkeit der Orientierung
- Kostengünstiger als Laserscanner

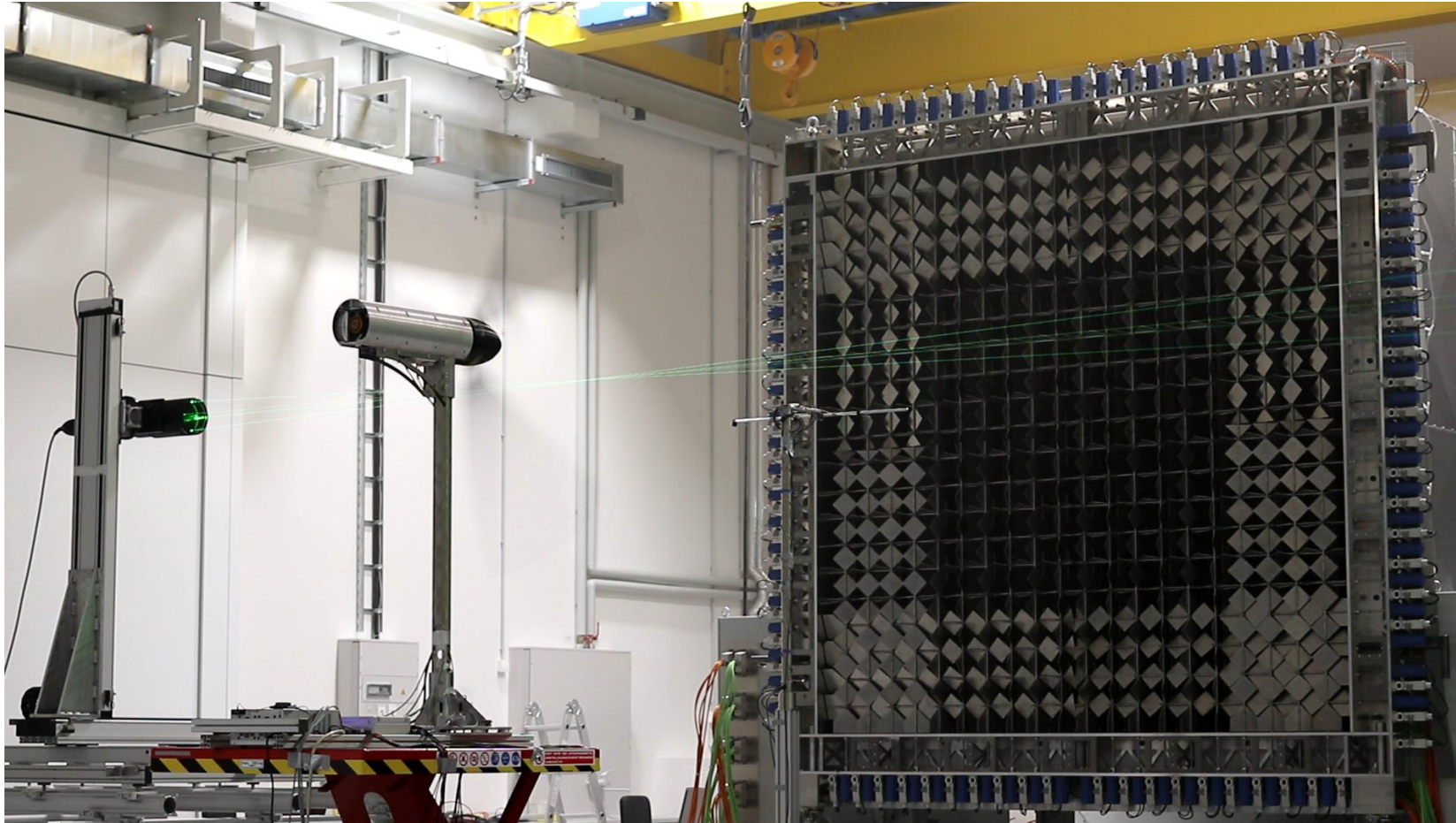
Praktische Umsetzung

- 4 Distanzmesser des Laserscanners Z+F Imager 5006
- Fächersensor wird mit Kameras kombiniert und synchronisiert

Laufendes Promotionsvorhaben M. Göring

[Göring, M.](#); [Luhmann, T.](#) (2020): Development of a Fan-Shaped Distance Meter System for Measuring Moving Rotor Blades - Concept, Photogrammetric Orientation and first results. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume V-2-2020, 2020 XXIV ISPRS Congress (2020 edition) , doi: [10.5194/isprs-annals-V-2-2020-711-2020](https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-2-2020-711-2020)





eSys), realistischer &  
TWiSt) und **Messung der**

- Auslass 3m x 3m
- Aktives Gitter → Turbulenz
- Messstrecke 15m
- Particle Imaging Velocimetry
- Highspeed-Photogrammetrie
- MoWiTO Modellwindenergieanlage

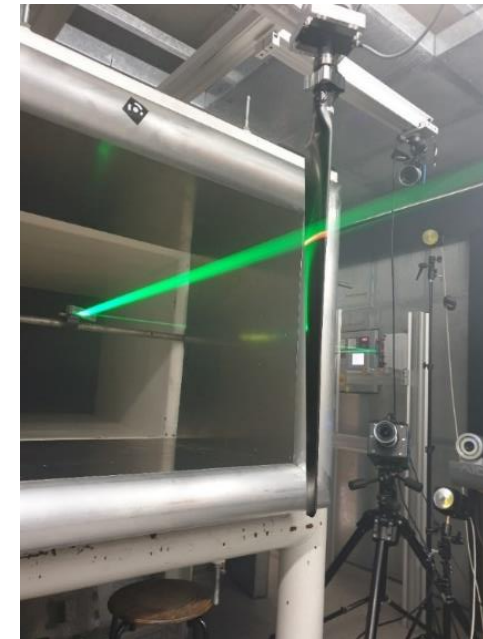
Kombination aus realistischer Modell-Windkraftanlage (Uni OL, WeSys), realistischer & reproduzierbarer Einströmung, aerodynamischer Analyse (Uni OL, TWiSt) und **Messung der resultierenden Verformungen** (Jade HS, IAPG)

## 1. Eingespanntes Rotorblatt

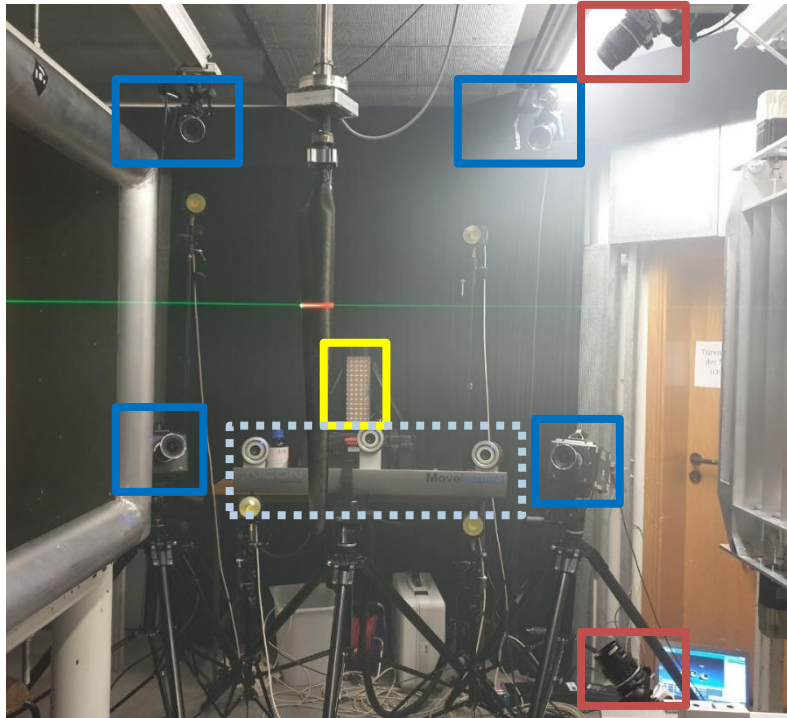
- Wechselseitige Einflüsse der Messverfahren
- Genauigkeitsvalidierung

## 2. Rotierende Modellwindenergieanlage

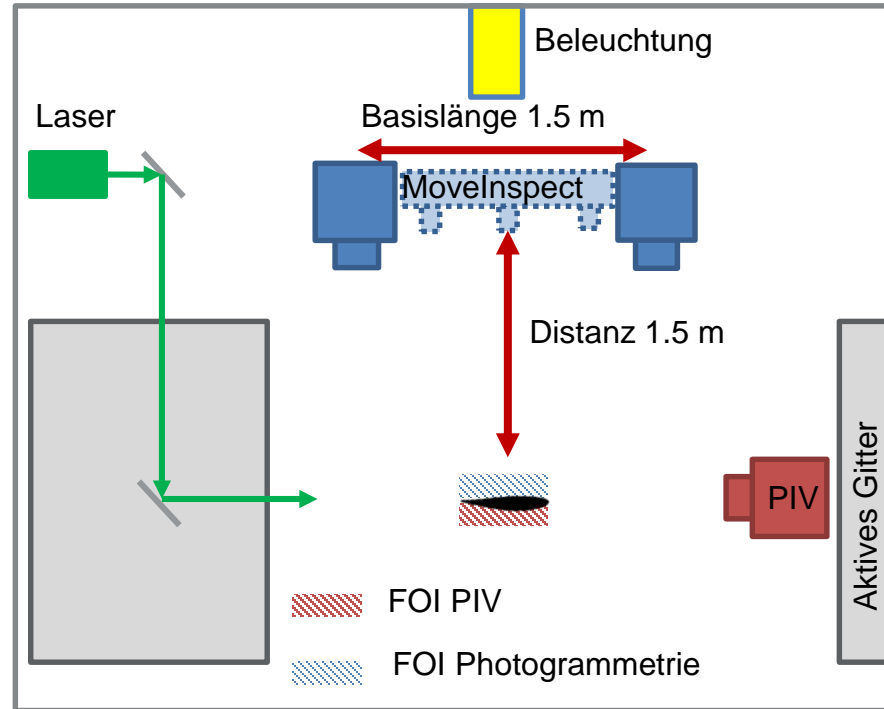
- Realistische Modellwindenergieanlage (MoWiTO)
- Synchronisation aller Messsysteme mit der MoWiTO
- Eigenrotation ca. 8 Hz
- Eigenbewegung der Anlage beeinflusst Verformungsanalyse



## Eingespanntes Rotorblatt



Verwendete Messtechnik



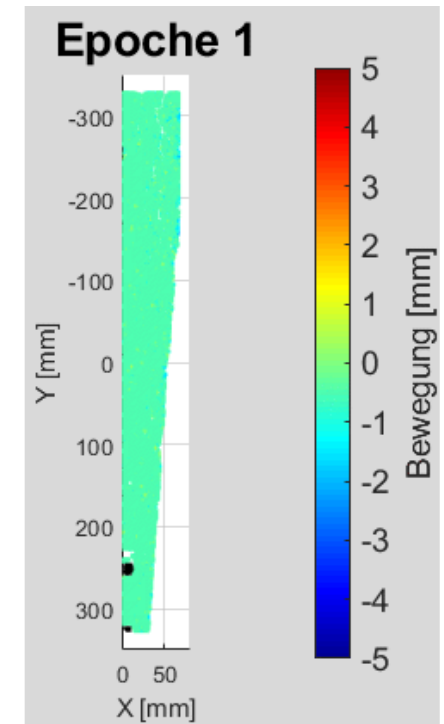
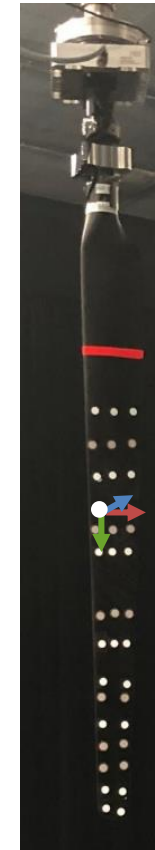
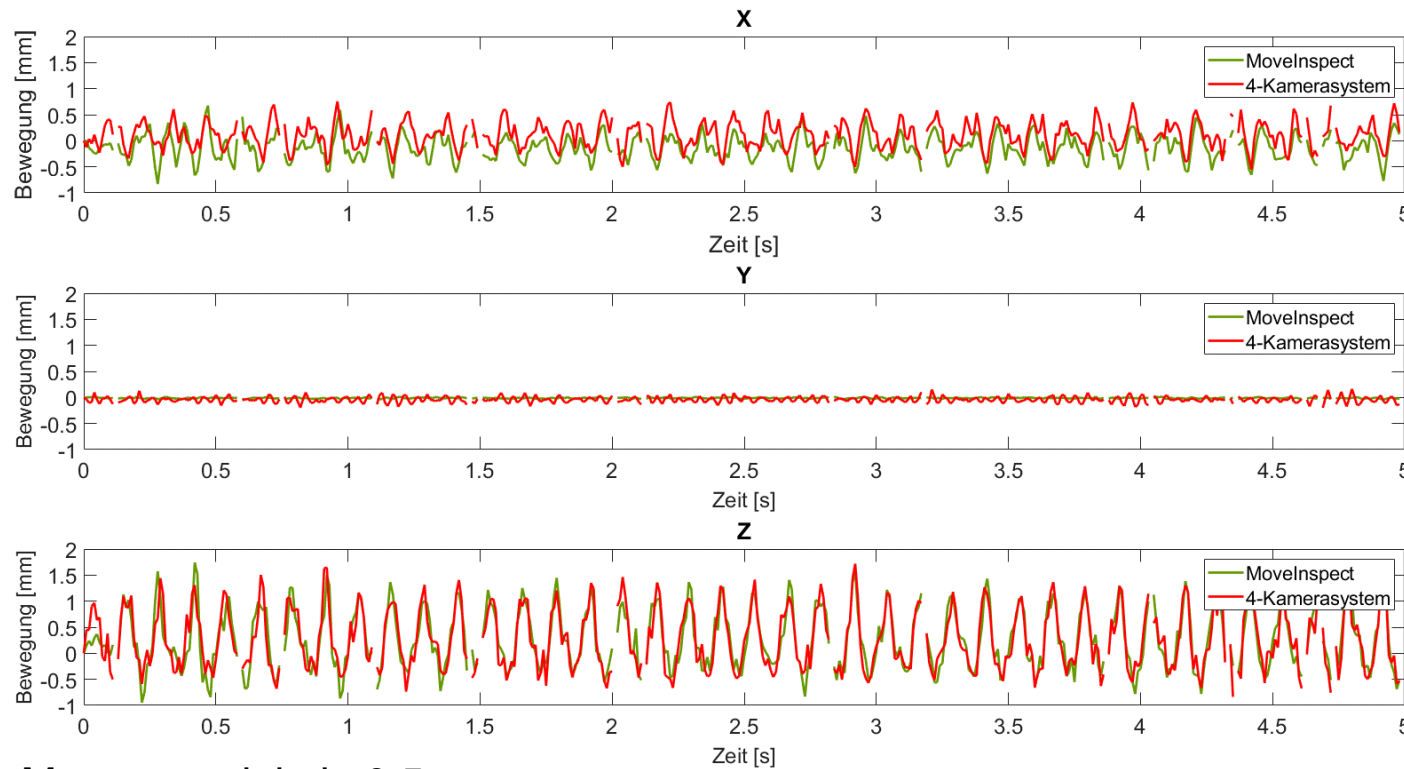
Draufsicht

- 4 Highspeed Kameras
  - 2x PCO Dimax HD+ (1920 x 1440 px)
  - 2x PCO CS3 (1920 x 1440 px)
  - 21 mm Objektive
  - 0.7 mm GSD
- 100 Hz Aufnahmefrequenz
- Belichtungszeit  $100 \mu\text{s} \pm 1/10.000 \text{ s}$
- AICON MoveInspect
- Sinusförmige Einströmung (8 Hz)



## Eingespanntes Rotorblatt bei sinusförmiger Einströmung

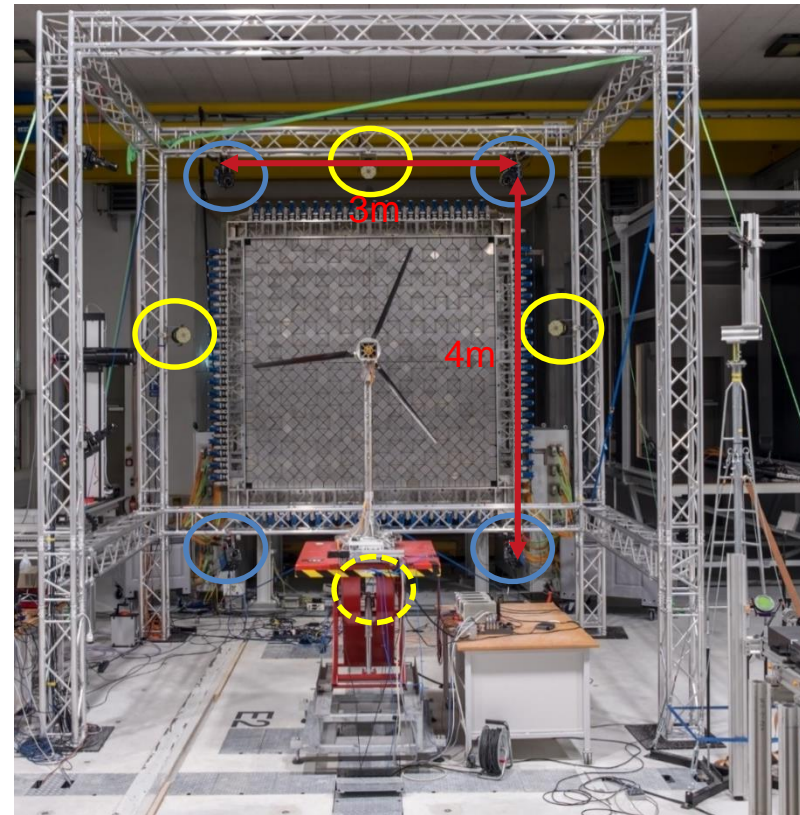
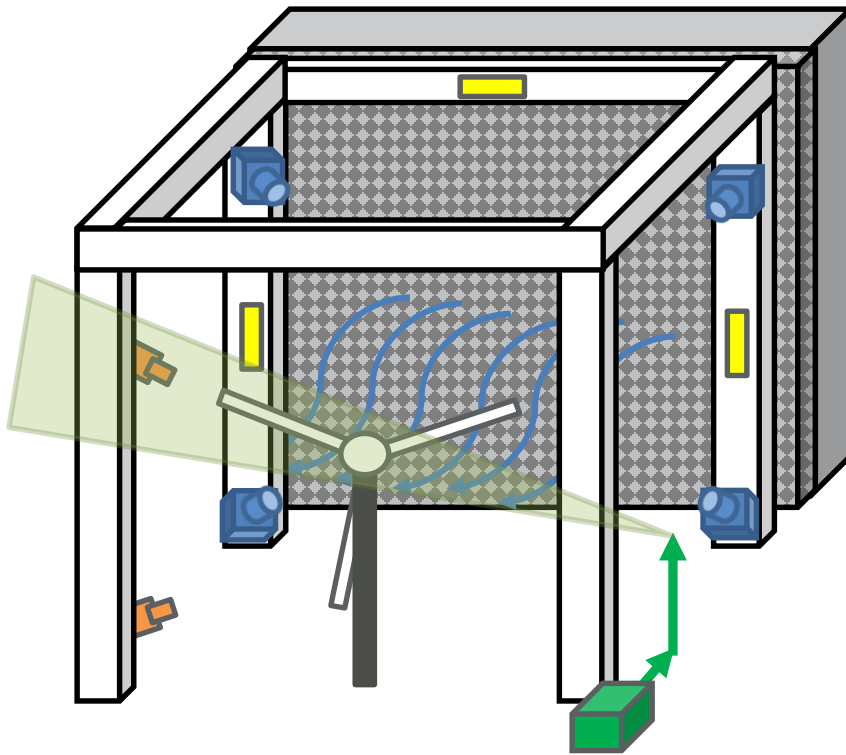
Ergebnis: diskrete Punkte



flächenhafte Rekonstruktion

Messgenauigkeit: 0.5 mm

## Rotierende Modellanlage



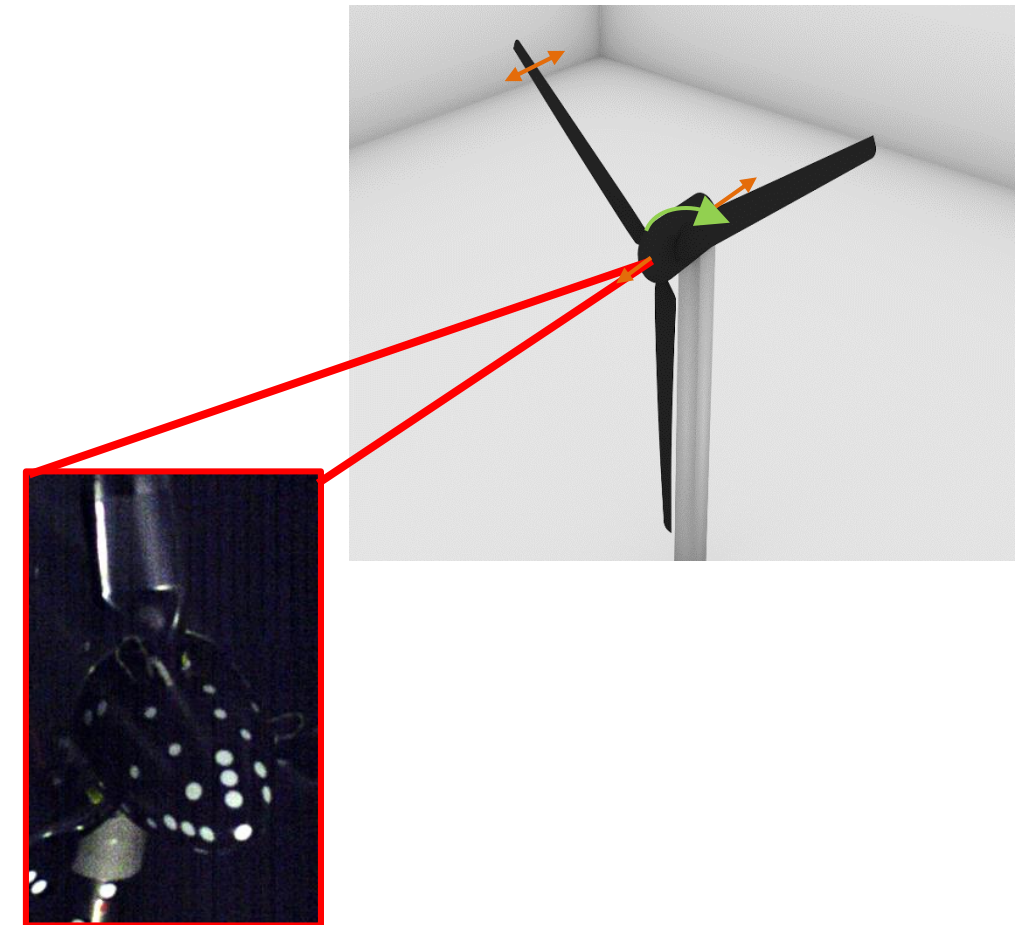
### Aufbau

- 4 Highspeed Kameras  
3x PCO Dimax HD+ (1920 x 1440 px)  
1x PCO S4 (2016 x 2016 px)  
35 mm Objektive  
0.9 mm GSD
- 4 IES Lampen
- Synchronisation via MoWiTO
- Belichtungszeit  $50 \mu\text{s} \pm 1/20.000 \text{ s}$
- 200 - 1000 Hz Aufnahmefrequenz
- $14.4^\circ - 2.8^\circ$  Drehwinkel pro Bild

## Rotierende Modellanlage

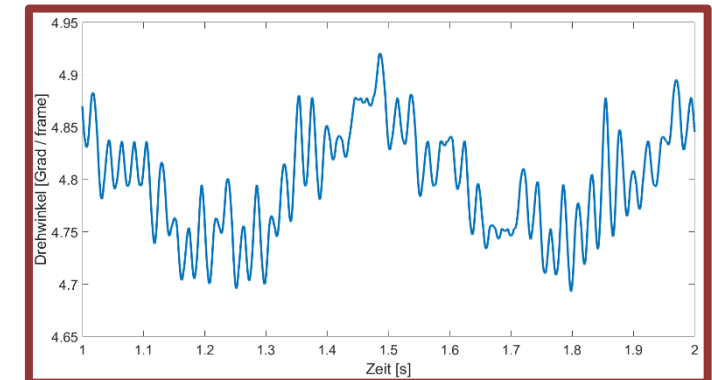
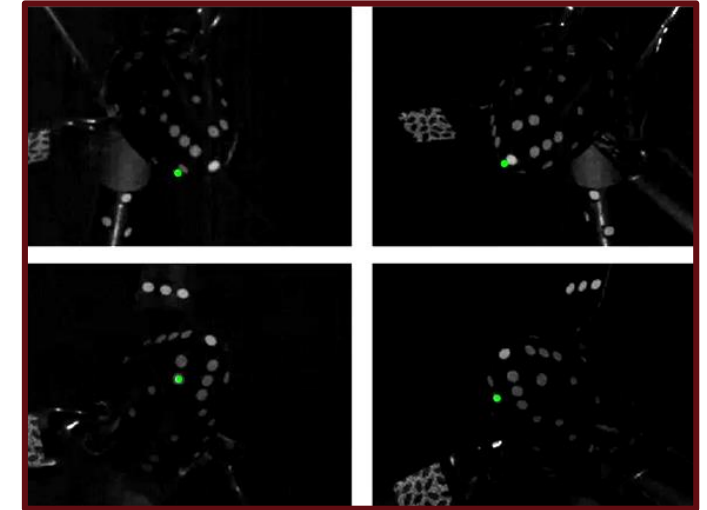
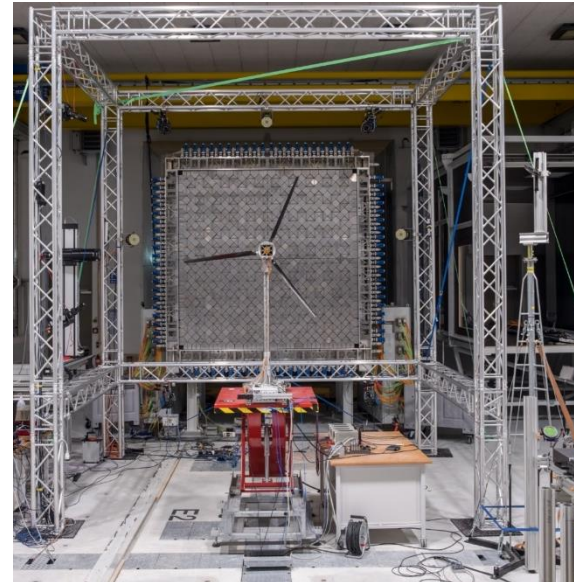
### Photogrammetrische Verformungsanalyse

- Modellanlage ist kinematisches System
- Eigenbewegung limitiert Verformungsanalyse
  - Verformung
  - Starrkörperbewegung
- Bestimmung der Eigenbewegung
- Eigenbewegung "eliminieren"
  - Transformation in statisches Koordinatensystem
  - Klassische Verformungsanalyse



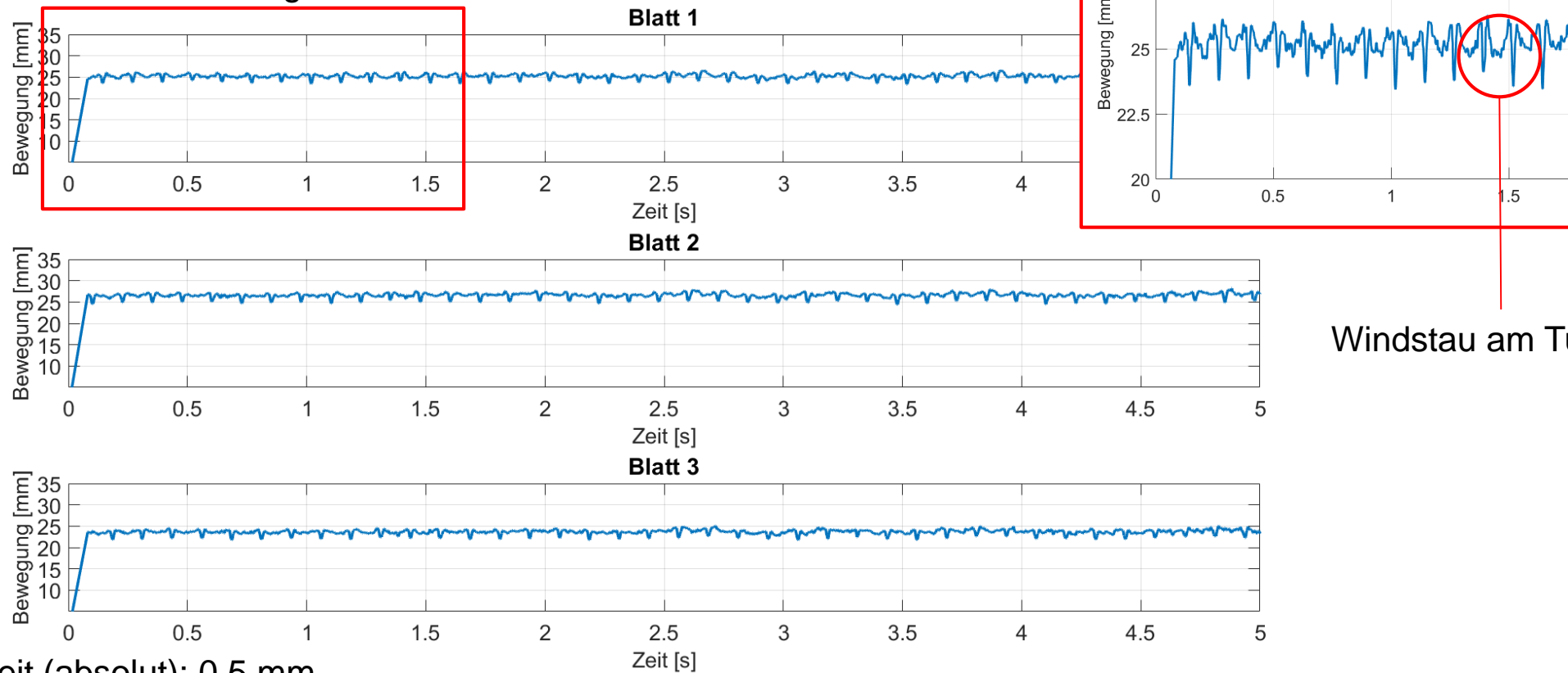
## Herausforderungen

- Gewicht
- Interaktion beider Messsysteme
- Verknüpfung Photogrammetrie u. PIV
  - Einheitliches Koordinatensystem
  - Einheitliches Zeitsystem (Synchronisation)
- Prozesskette Photogrammetrie (Tracking)
  - Eliminierung der Starrkörperbewegung
  - Uncodierte Punkte
  - Geringer Punktabstand
  - Punktzahl und Drehgeschwindigkeit variiert



## Rotierende Modellanlage

Ergebnisse, Laminare Einströmung

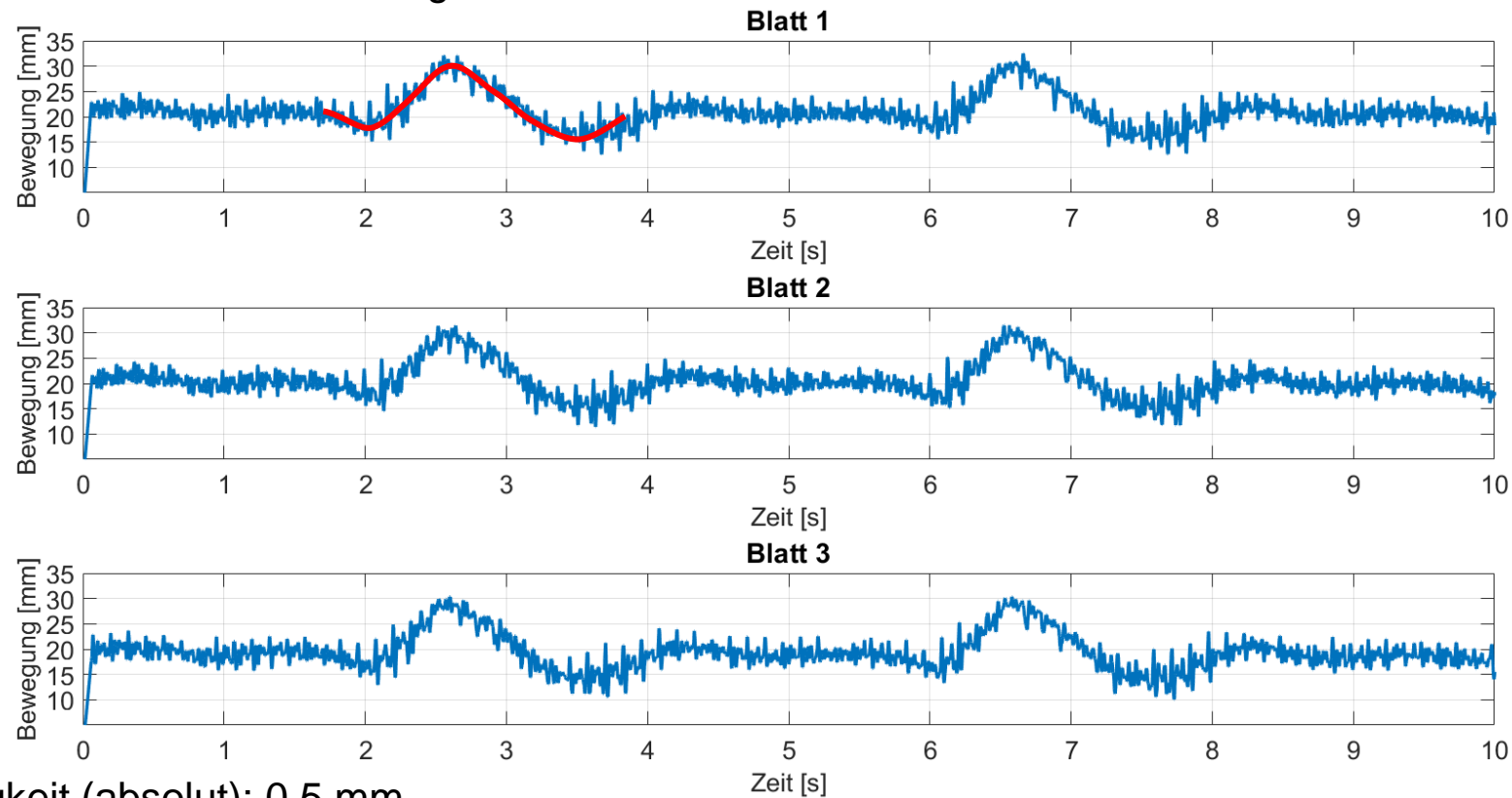


Windstau am Turm

Messgenauigkeit (absolut): 0.5 mm

## Rotierende Modellanlage

Ergebnisse: Mexican-Hat-Einströmung



Messgenauigkeit (absolut): 0.5 mm

# ZUSAMMENFASSUNG

## Fazit

- Erfolgreiche Anwendung optischer 3D-Messtechnik in Labor- und Freifeldversuchen
- Erfassung von diskreten und flächenhaften Verformungen
- Kombination mit weiterer Messtechnik

## Ausblick

- Weiterentwicklung bisheriger Ansätze
- Kombination mit Strömungsmesstechnik in Freifeldversuchen
- Monitoring von laufenden WEA
- Simultane Bestimmung von 3D-Form und Kinematik in der Bildzuordnung (DFG-Projekt 2022-2025)

