

# **Betriebsbegleitender Einsatz von FEA und CFD für Wälzlager von Windenergieanlagen**

Andreas Schlereth  
Change Engineering GmbH

# Inhalt

- Windenergie in Deutschland
- Windenergieanlagen im Feld
- Herausforderungen für die Wälzlager
- Simulation im Einsatz
- Zusammenfassung

# Key learning objectives

Am Ende dieses Vortrags kennen Sie:

- die Hintergründe zur Stromerzeugung aus der Windenergie
- deren Herausforderungen für die Anlagentechnik
- deren Bedeutung für die Antriebstechnik
- insbesondere Wälzlagertechnik
- Beispiele für den Einsatz von CFD und FEA begleitend zum Anlagenbetrieb

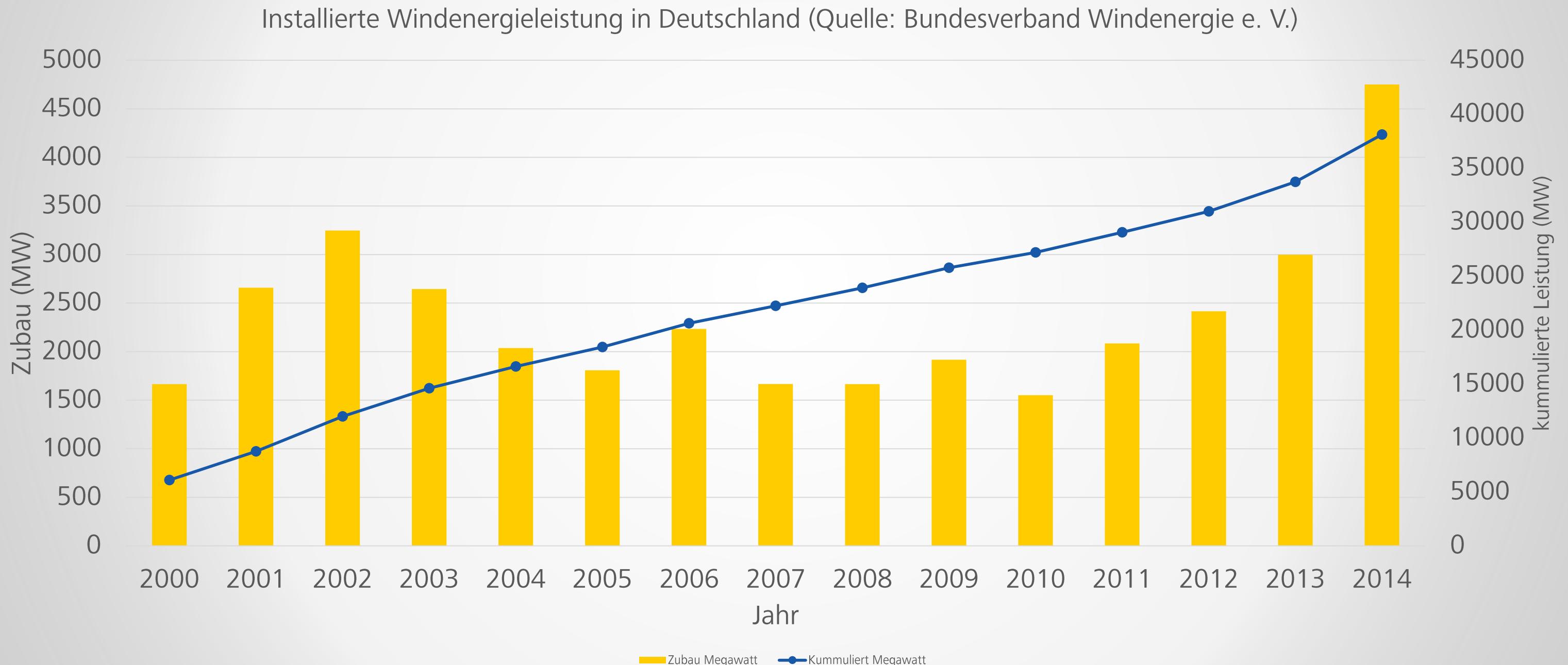
The background image shows a panoramic view of a city skyline under a clear blue sky. In the foreground, there's a bridge spanning a wide river, with several cars visible on the roads. The city features numerous skyscrapers of varying heights and architectural styles, some with reflective glass facades. A large stadium or arena is also visible in the middle ground. The overall scene is a blend of urban infrastructure and natural water bodies.

# Windenergie in Deutschland

# Windenergie in Deutschland

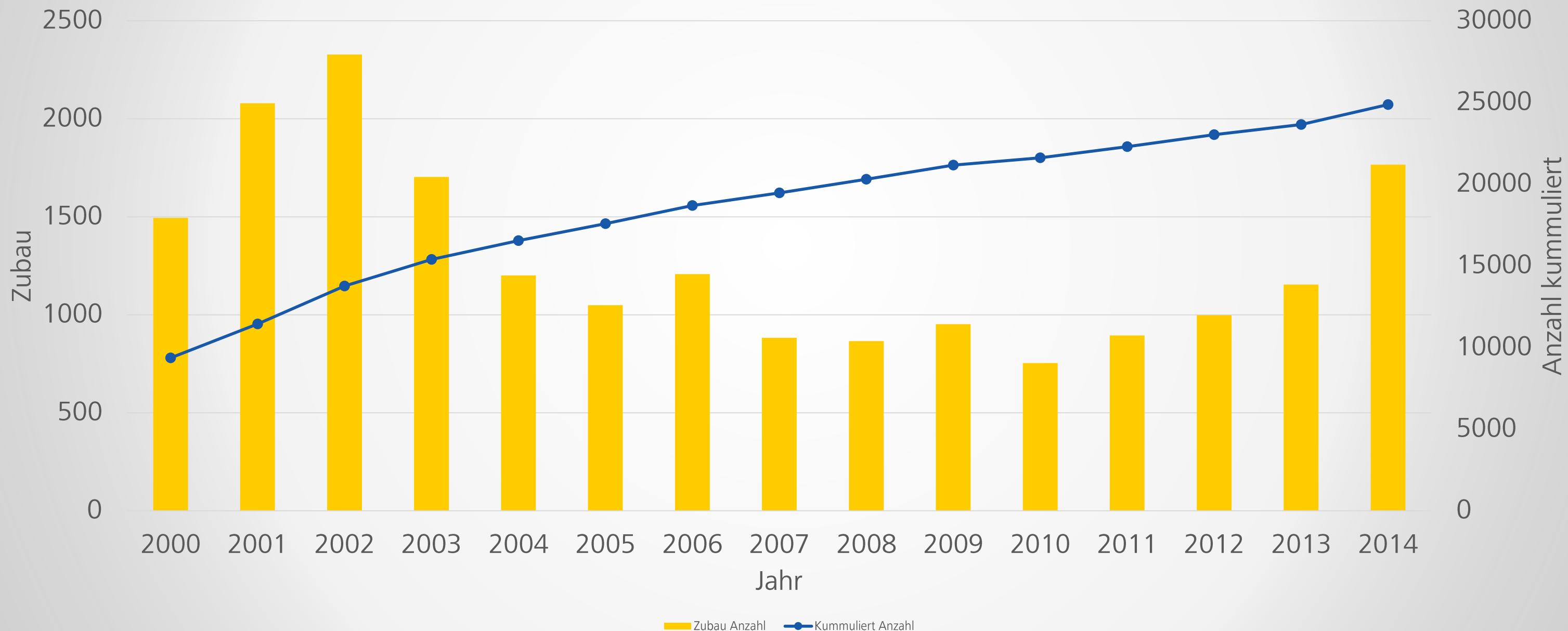


# Installierte Leistung in Deutschland



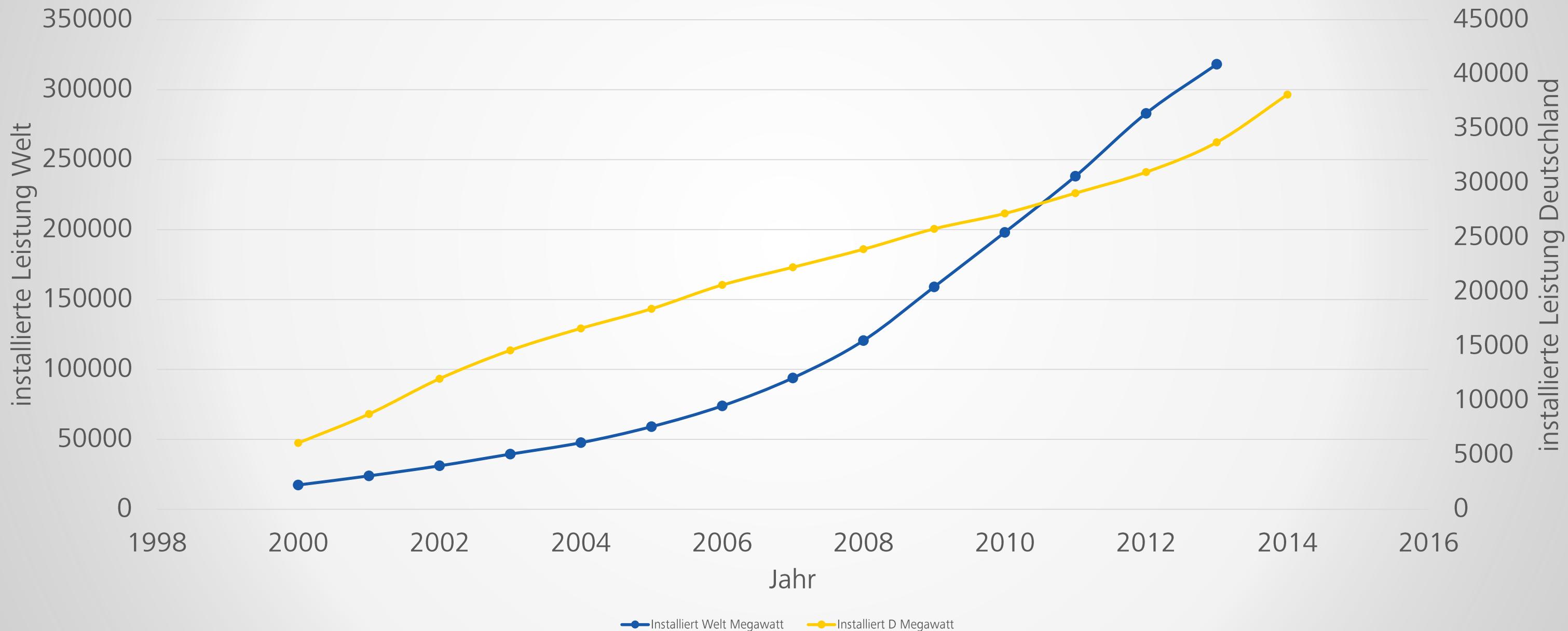
# Anzahl Windenergieanlagen in Deutschland

Installierte Windenergieanlagen in Deutschland (Quelle: Bundesverband Windenergie e. V.)



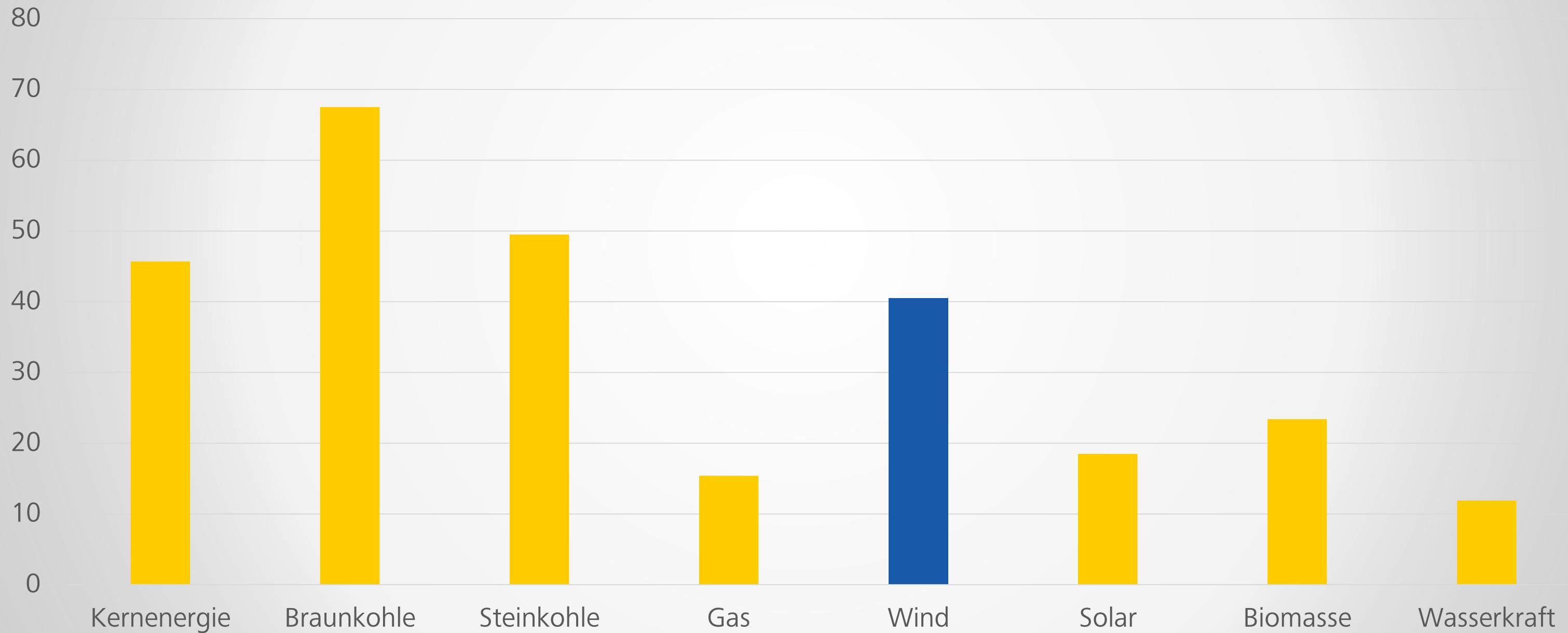
# Globale Entwicklung

Installierte Leistung weltweit (Quelle: Bundesverband Windenergie e. V.)



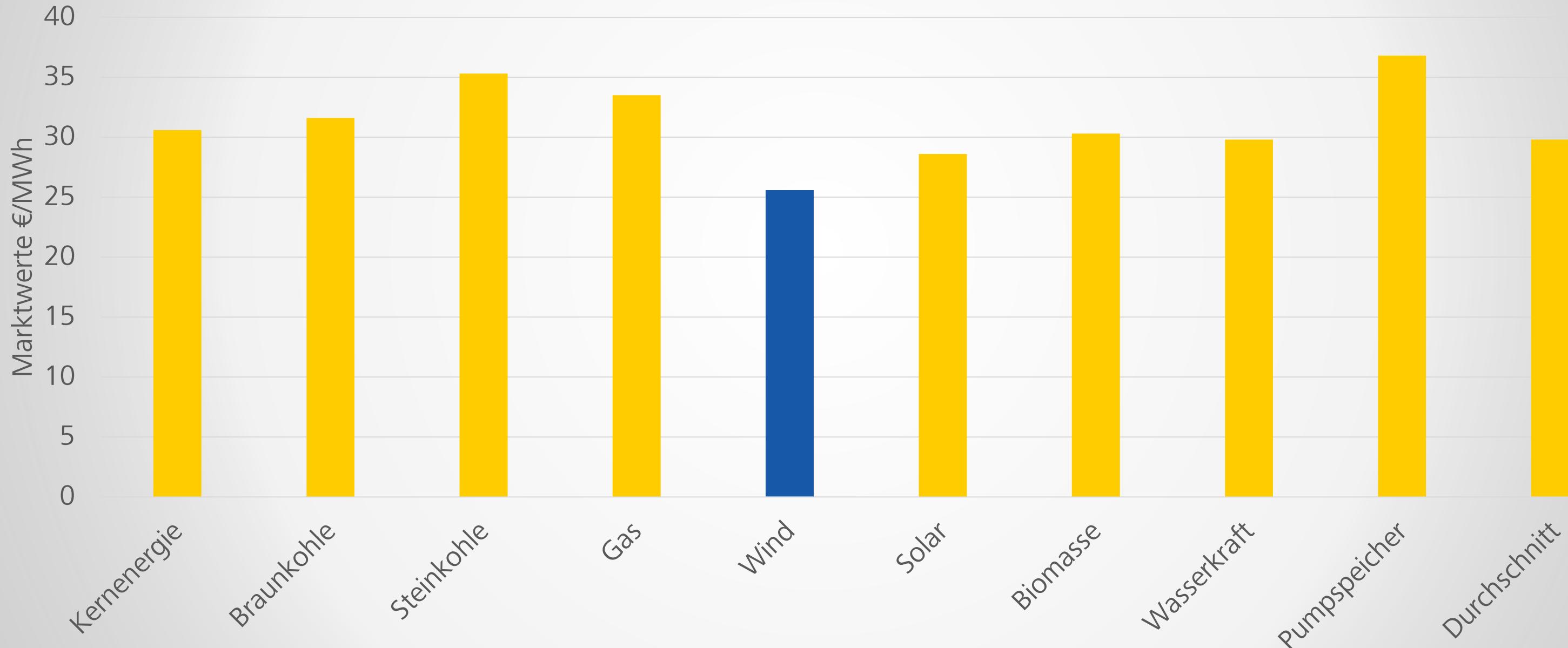
# Stromerzeugung in Deutschland – 1. Halbjahr 2015

Energie TWh für 1. Halbjahr 2015 (Quelle: Prof. Dr. Bruno Burger, Fraunhofer ISE)



# Marktwerte – 1. Halbjahr 2015

Marktwerte (Quelle: Prof. Dr. Bruno Burger, Fraunhofer ISE)



# Stand der Windenergie in Deutschland

## Stand:

- Weit verbreitet, dezentral
- Verschiedenste Standorte
- Viel Energie
- Kostengünstige Stromerzeugung
- Wetterabhängig

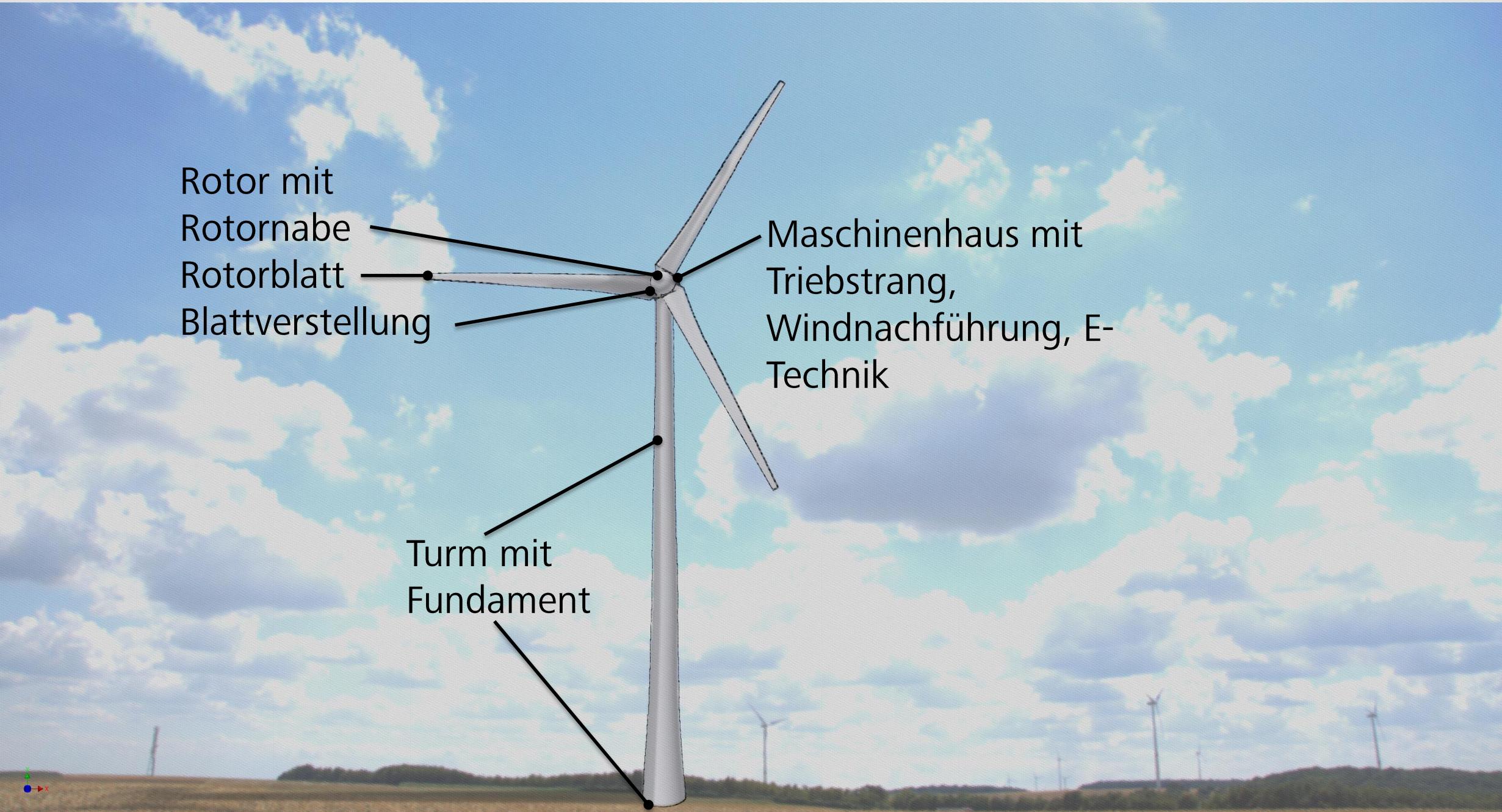
## Führt zu:

- Unterschiedlichste Betriebsbedingungen
- Streuungen
- Netzmanagement
- Einzelne WEA nicht immer wirtschaftlich
- Begrenzte Planbarkeit

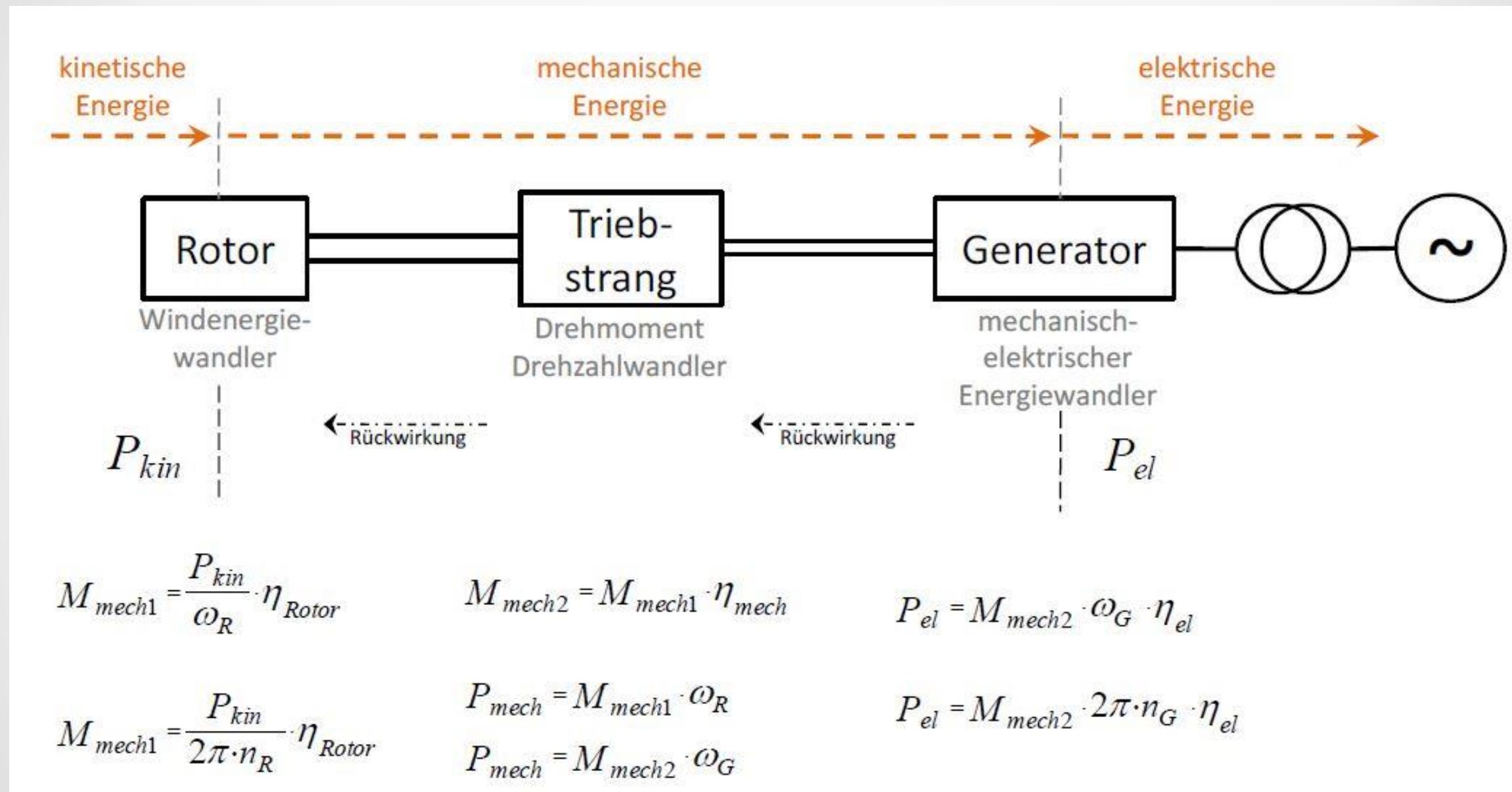
# Windenergieanlagen im Feld



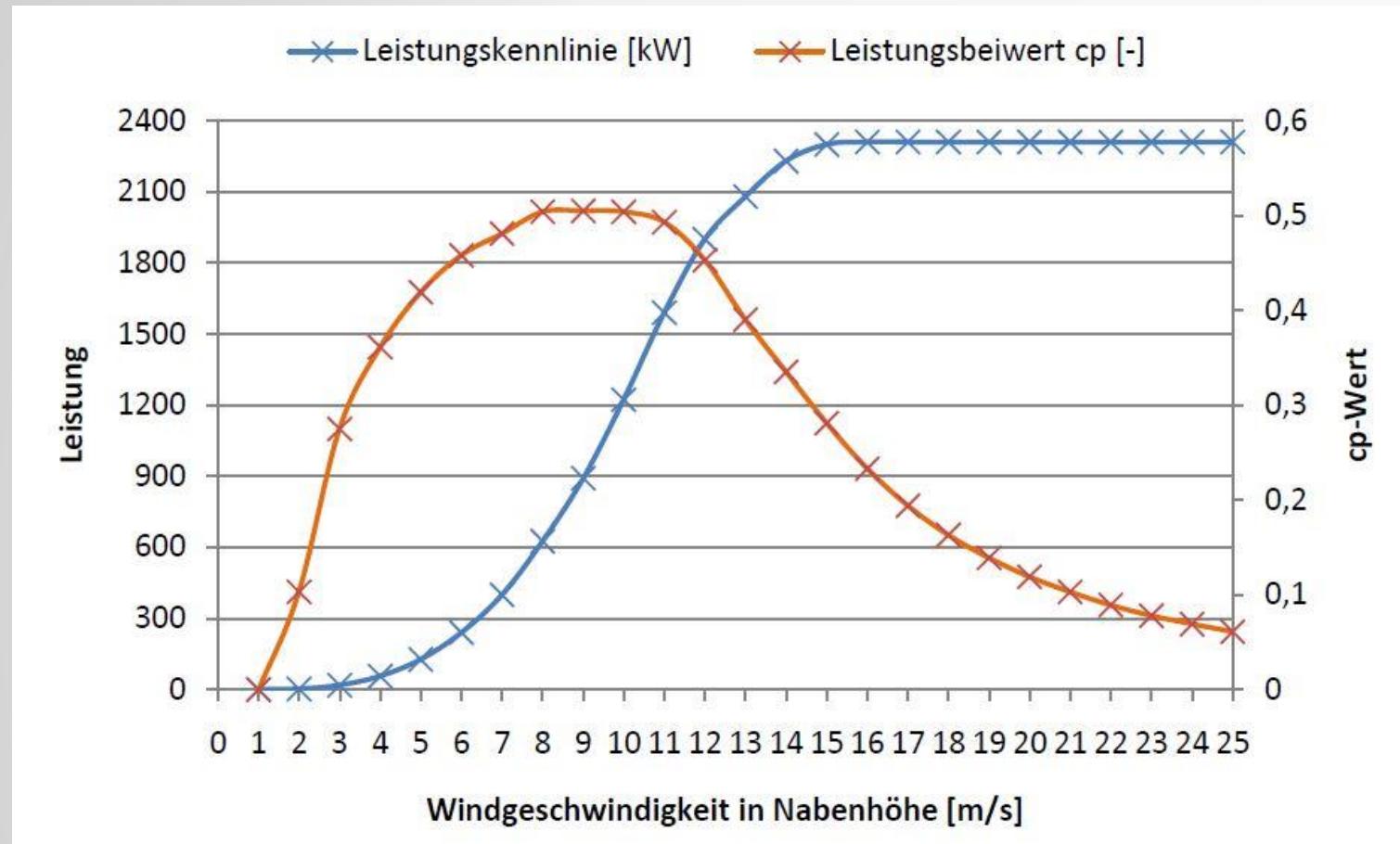
# Aufbau der Windenergieanlage



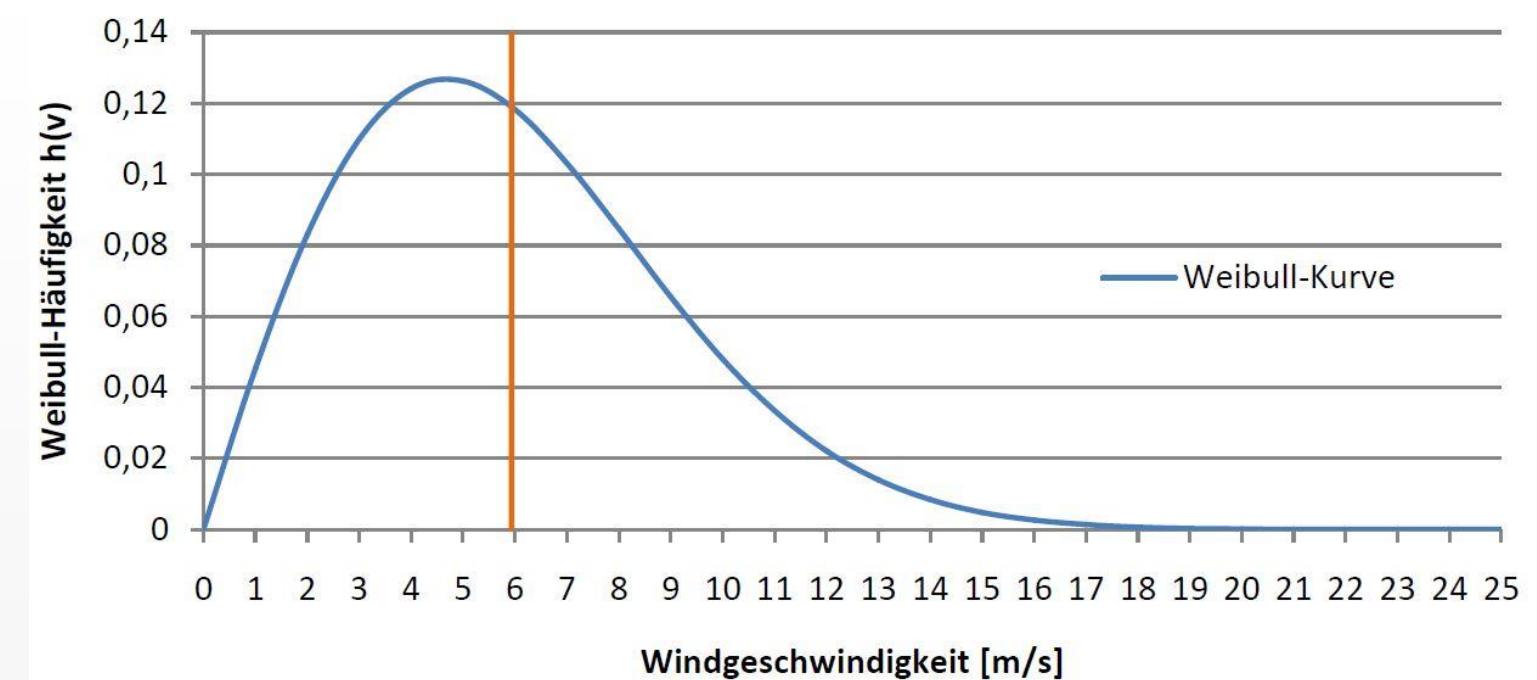
# Energiewandlung (1)



# Energiewandlung (2)



- Leistungskennlinie
- Leistungsbeiwert

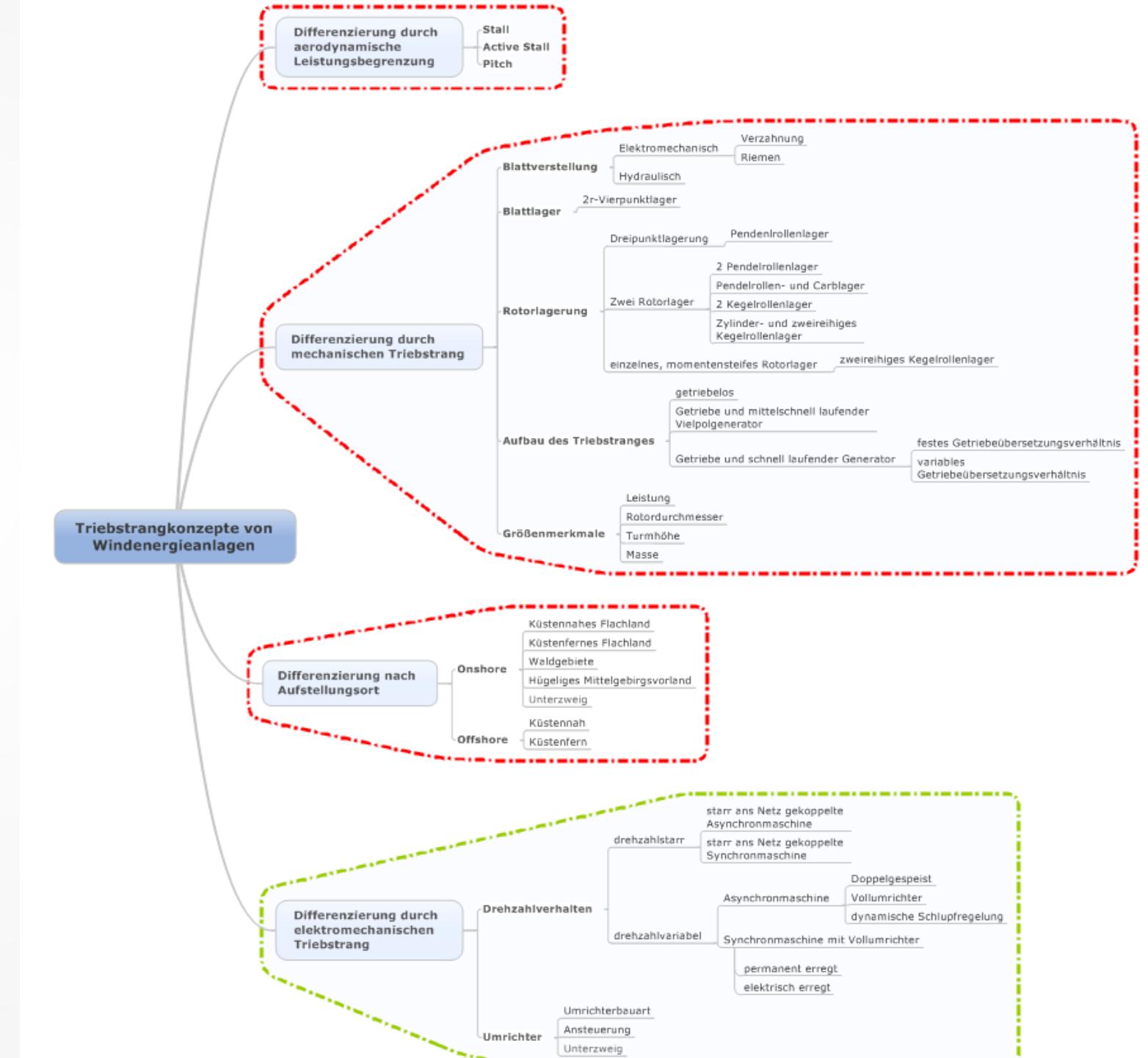


- Häufigkeitsverteilung Windgeschwindigkeit

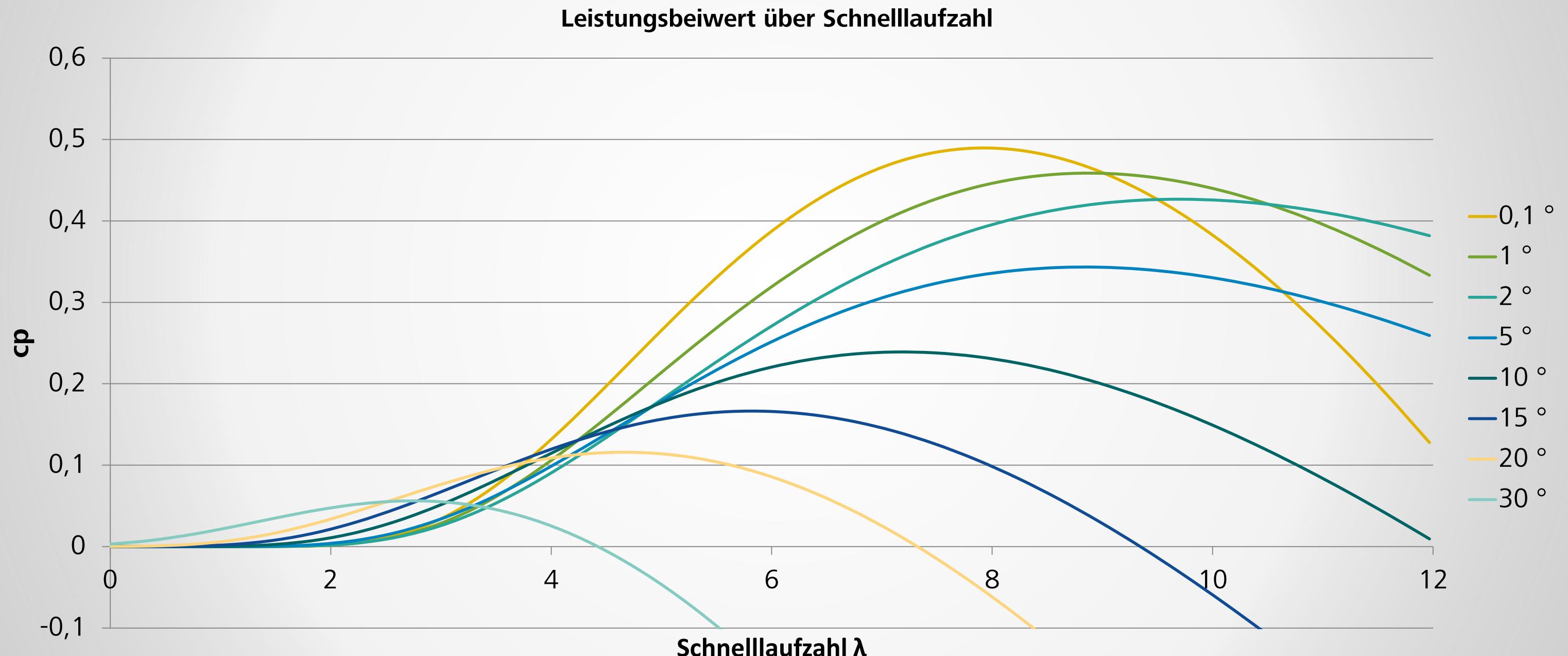
# Triebstangkonzepte von Windenergieanlagen

## Differenzierung nach

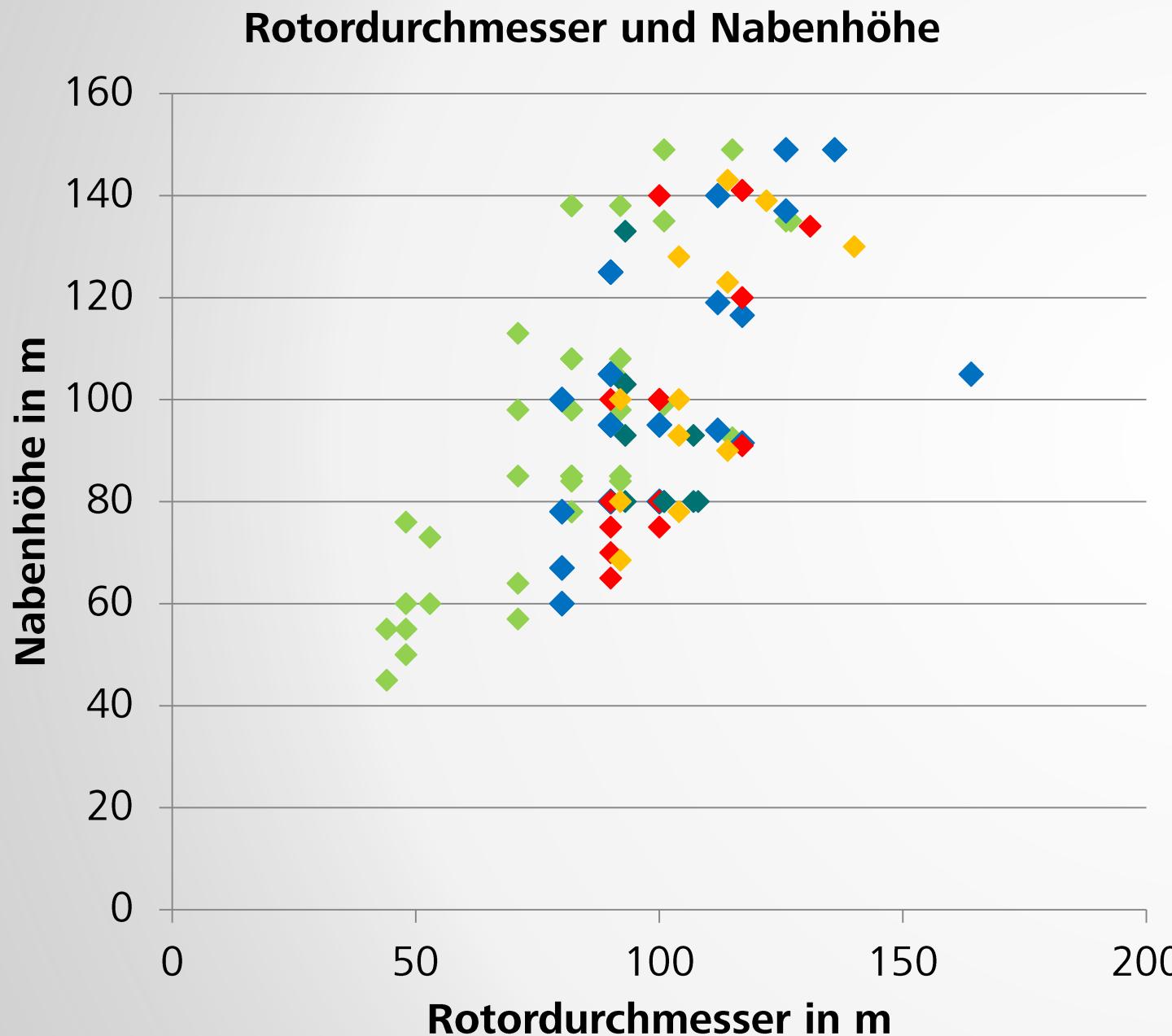
- Leistungsbegrenzung
- Aufstellungsort
- mechanischem Triebstrang
- elektromechanischem Triebstrang



# Regelung der Leistung



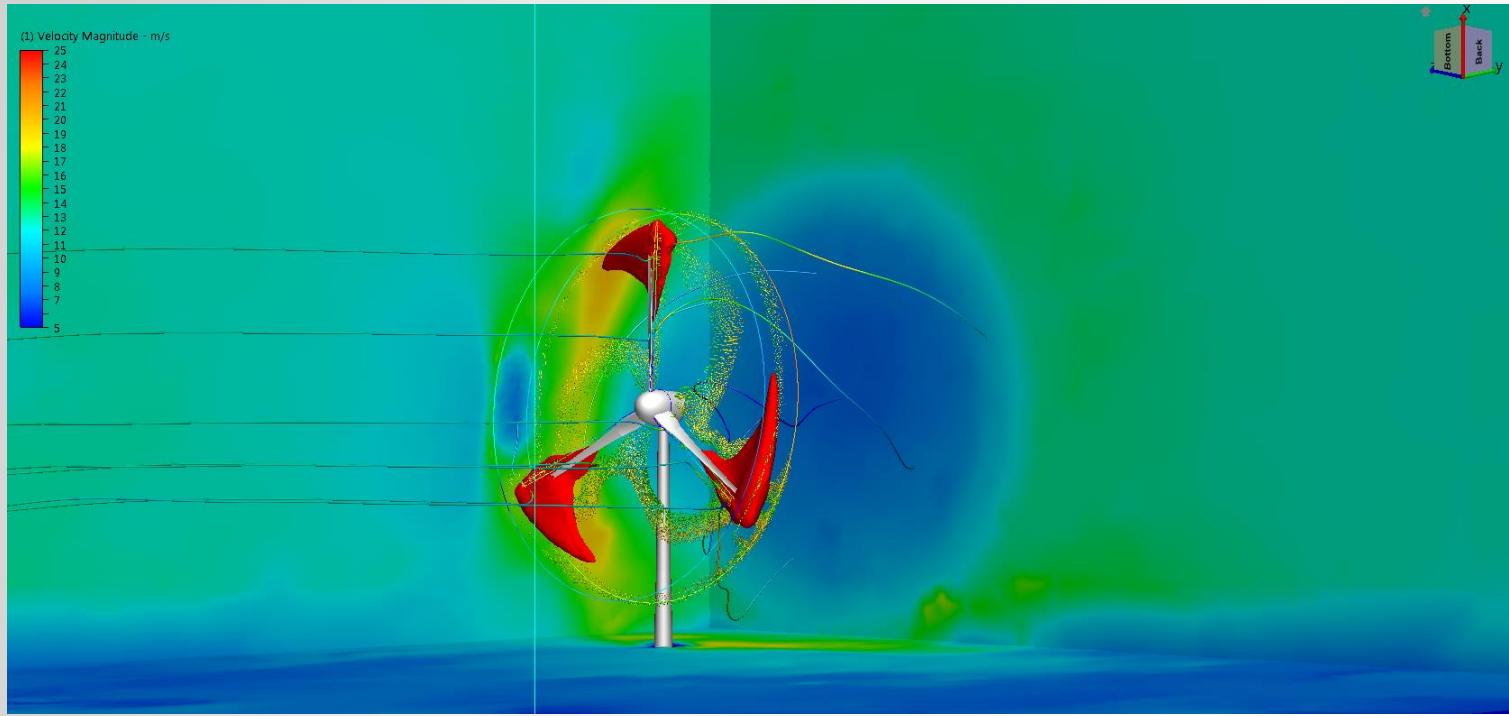
# Mehr-Ertrag durch Größenwachstum



**Mehrertrag durch:**

- Große Nabenhöhen
- Große Rotordurchmesser
- Große Leistung

# Große Rotoren – Freigang zum Turm

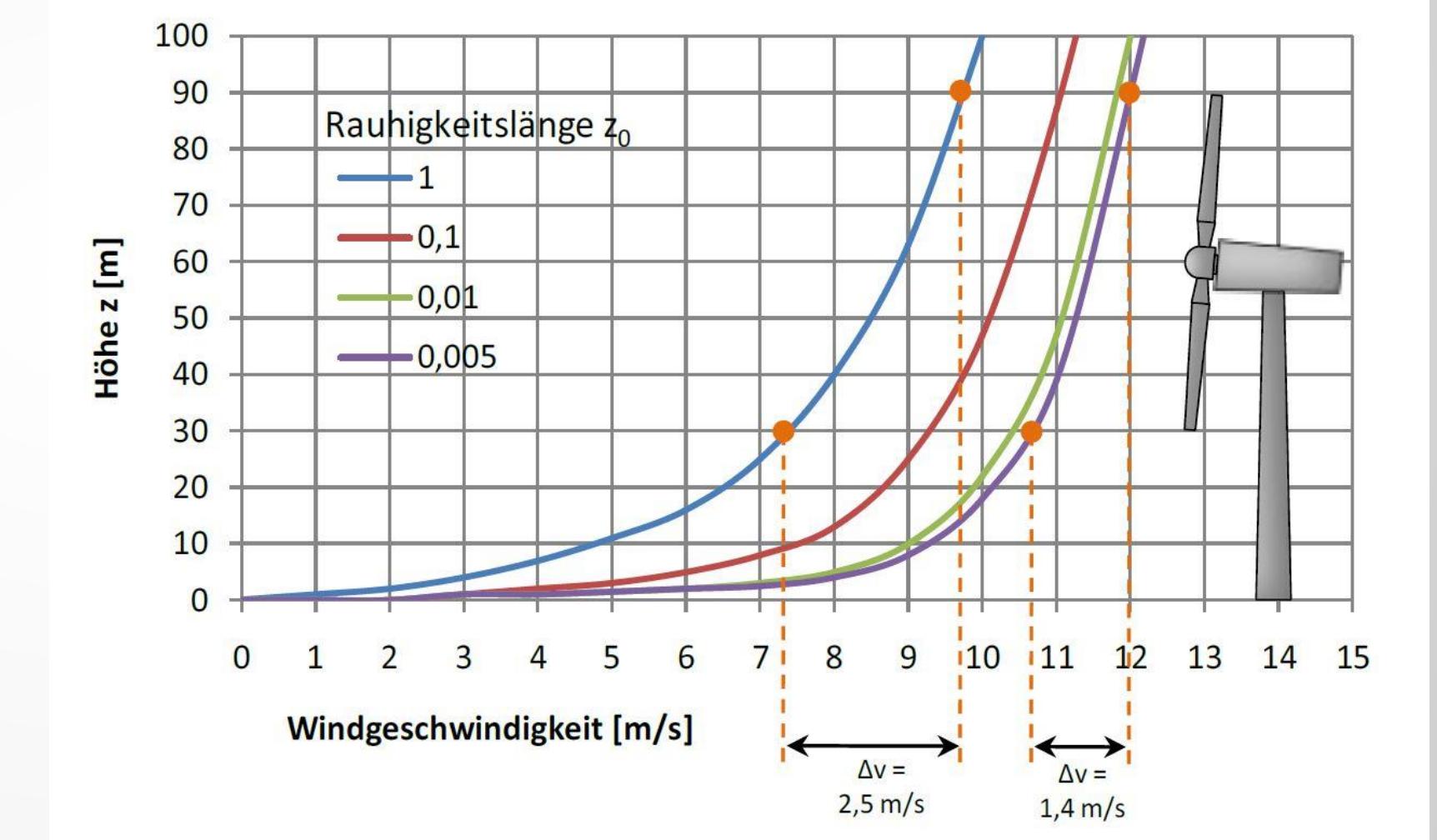
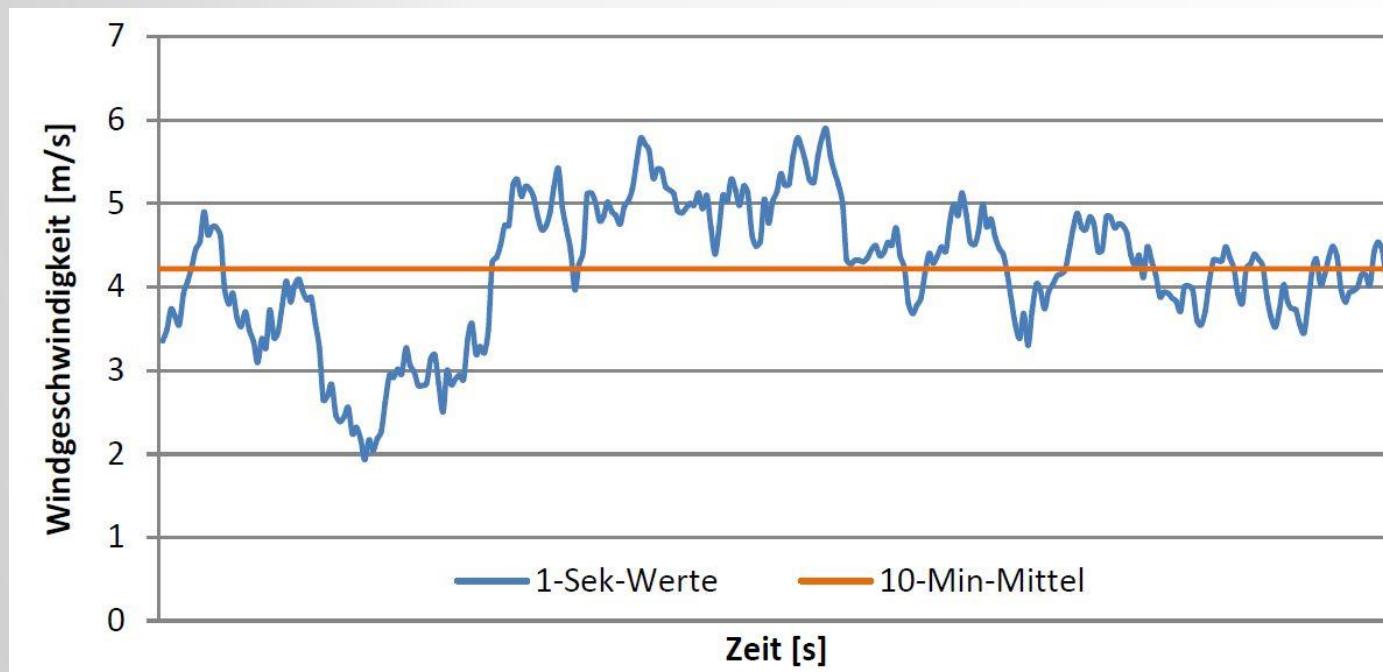


- Achsneigung
- Konus der Rotorblätter
- Gekrümmte Blätter
- Elastische Verformungen



# Windgeschwindigkeit

- streut zeitlich
- streut räumlich

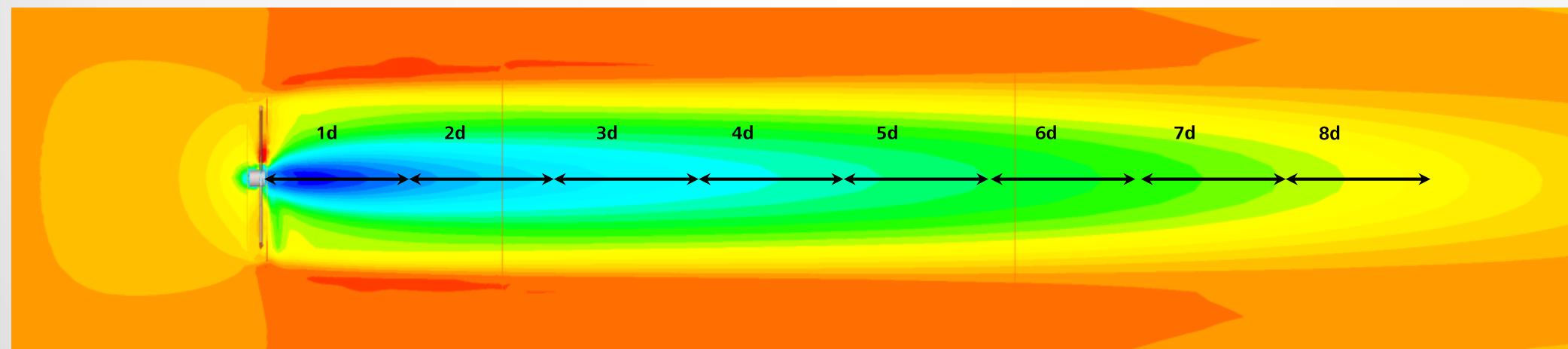


# Einflüsse auf die Windströmung



# Strömungsnachlauf

- Sogenannte Wakes stören die Strömung hinter dem Rotor für dahinter stehende Turbinen

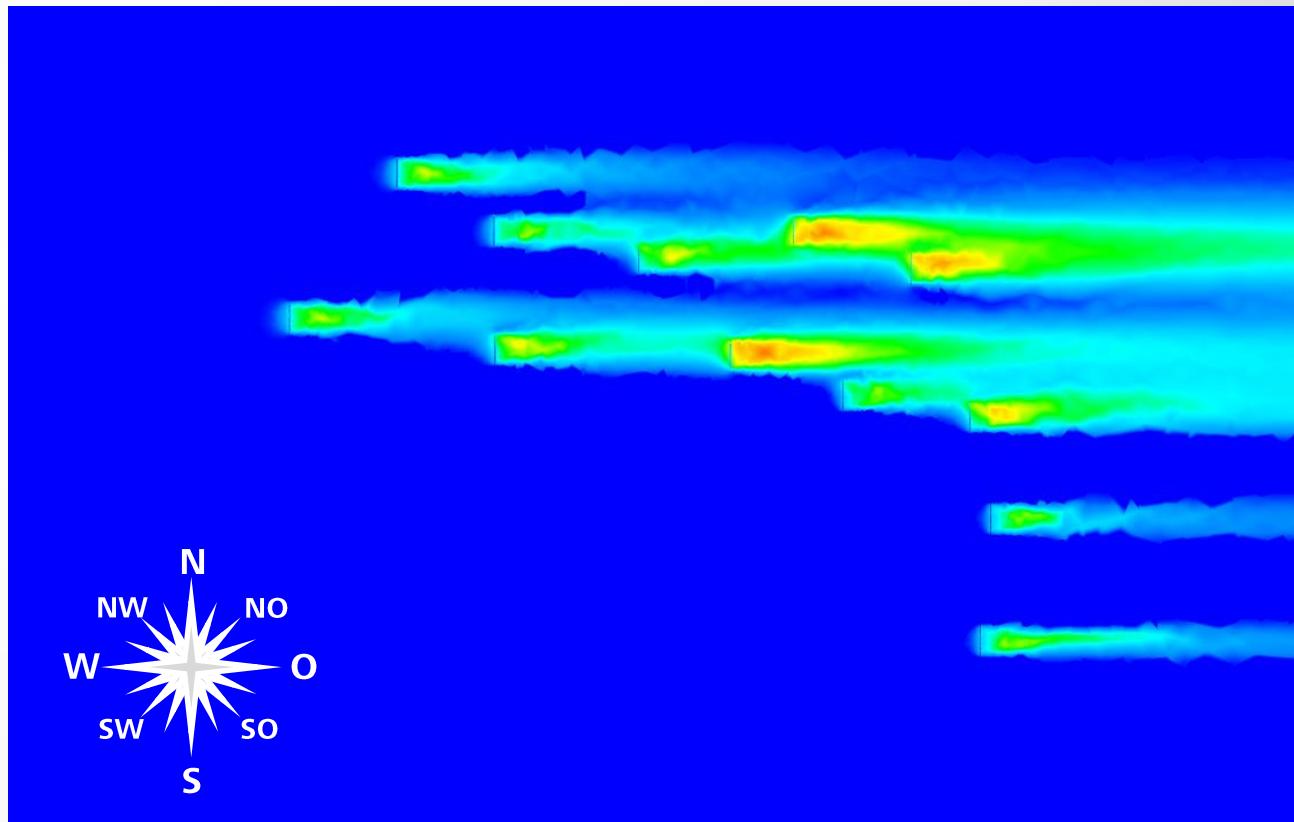


# Windrichtung

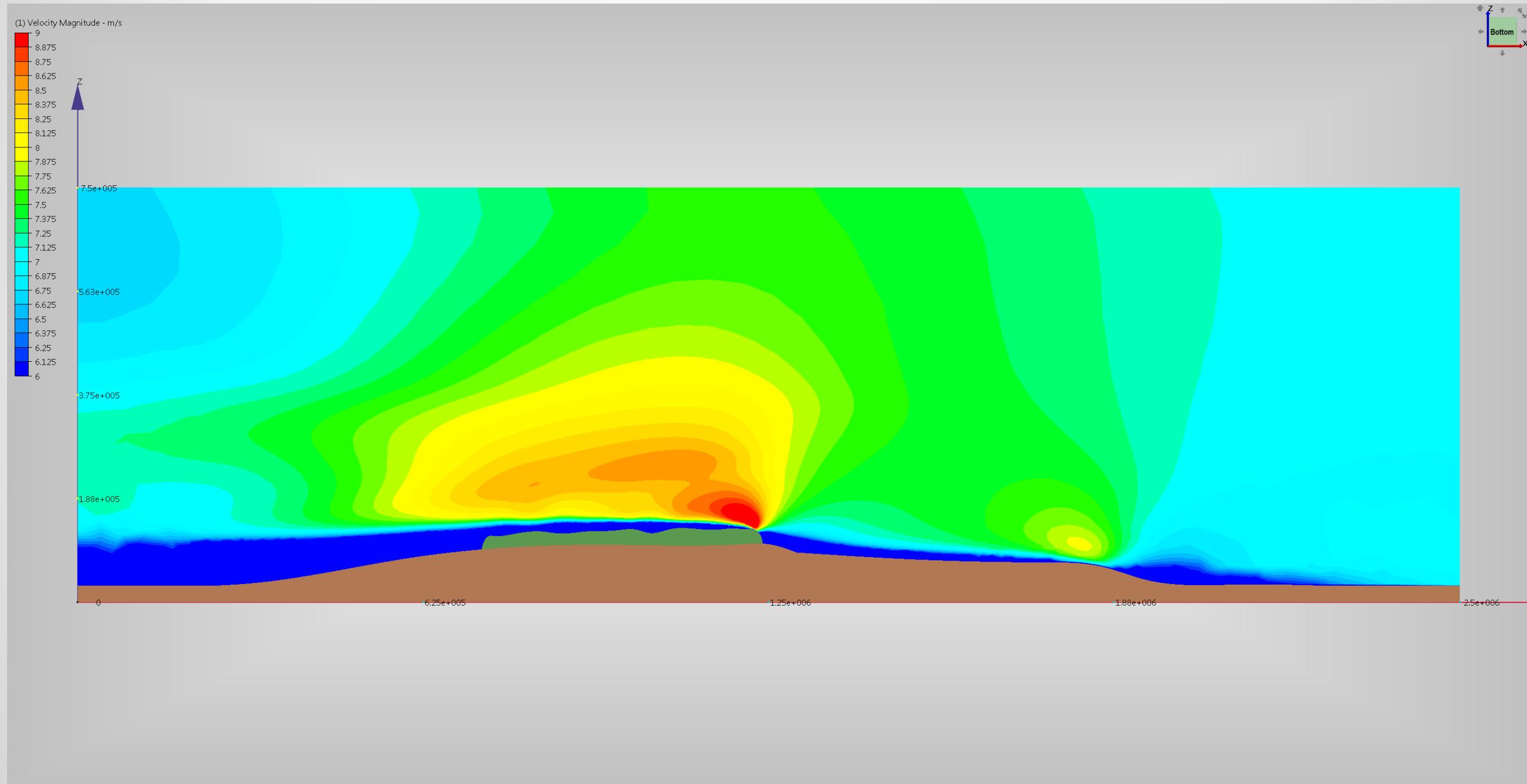
- Streut zeitlich
- Streut räumlich

Limitierung:

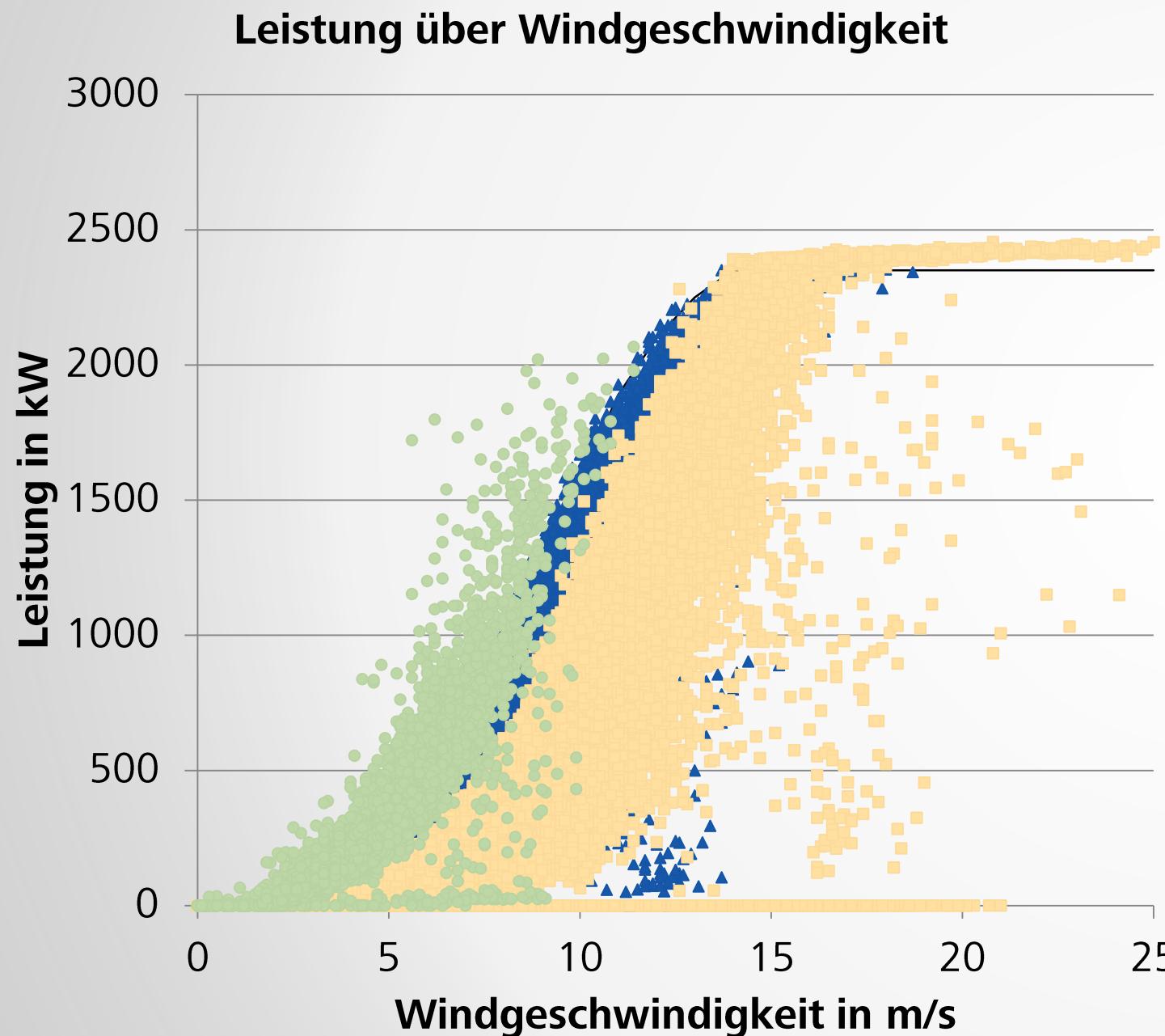
- Optimierung nur begrenzt möglich



# Wald und Hügel



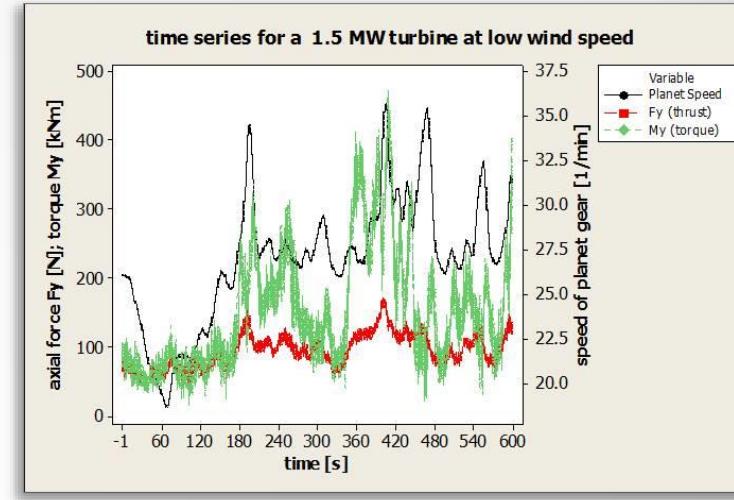
# Unstetigkeit der Stromproduktion



- Schwankende Windgeschwindigkeit
- Waldschneiße
- Wakeeffekte

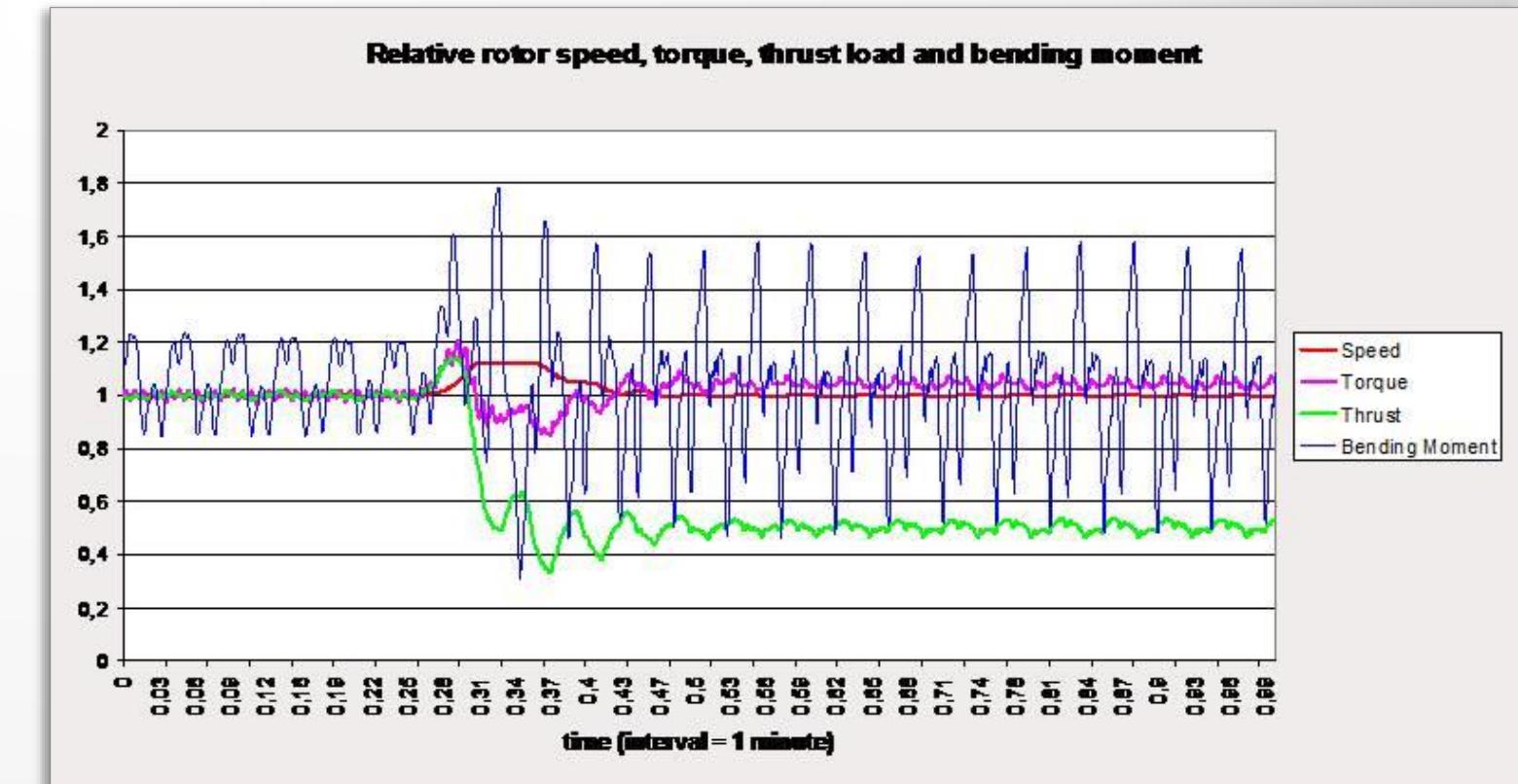
# Schwingende Belastungen

- Schwankung der Lasten
- Drehzahlschwankung
- Feder-Masse-Dämpfung



## Einflüsse:

- Windbedingungen
- Regelungssysteme



# Herausforderungen für die Wälzlager

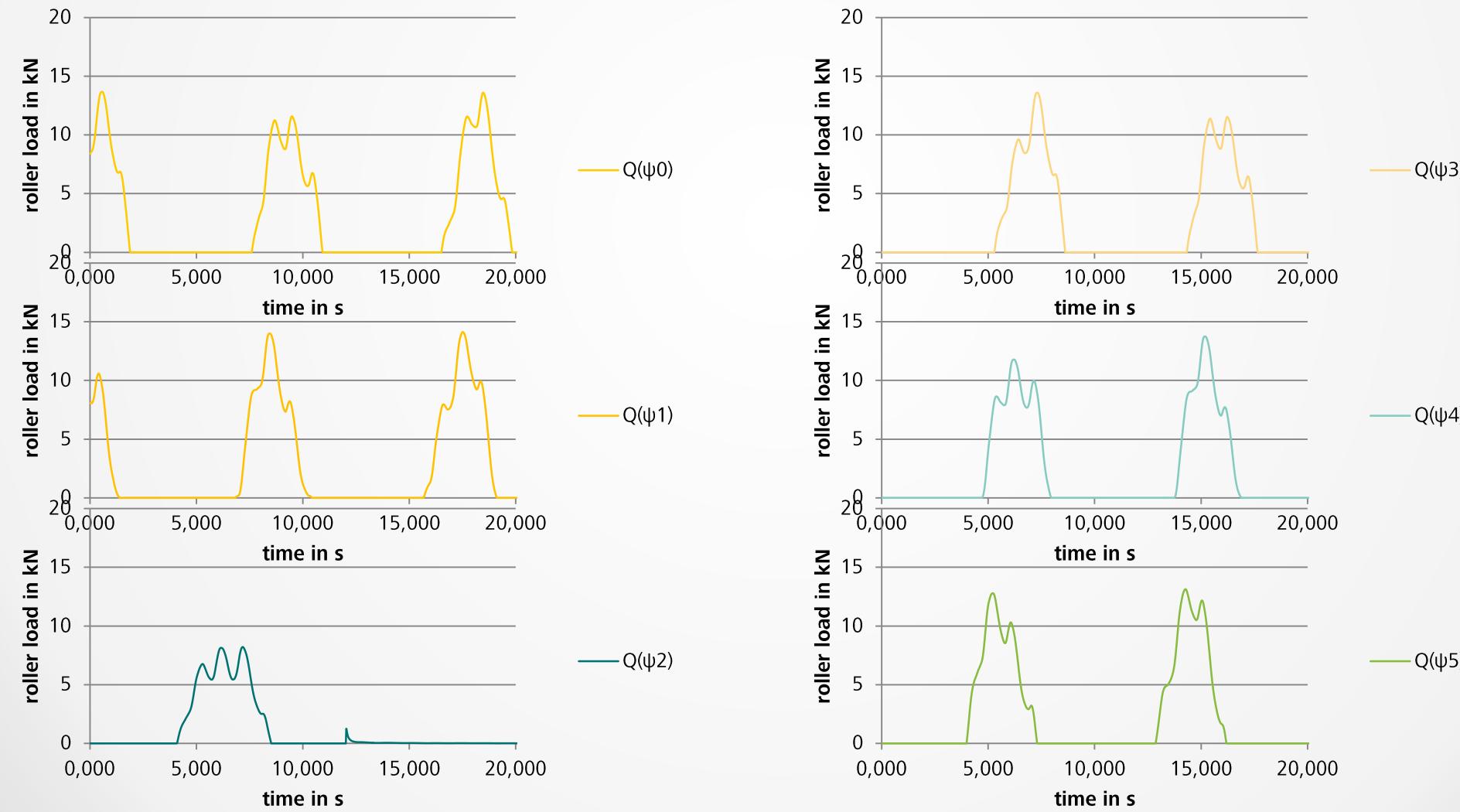


# Herausforderungen für die Wälzlager (1)

- Schwankende Windbedingungen, u. a.
  - Ständig schwankende und periodisch veränderliche Lasten
  - Vibrationen auch im Stillstand
  - Großer Drehzahlbereich
  - Ständige Drehzahlschwankungen
  - Ständige Drehmomentschwankungen

# Wälzkörperlasten im Rotorlager

- Lasten für 6 Wälzkörper über die Zeit



# Herausforderungen für die Wälzlager (2)

- Verändertes Lastprofil
  - Größere Lasten
  - Größere „statische“ Lastanteile (Gewichtskräfte)
  - Häufigeres Durchfahren von Eigenfrequenzen, z. B. Turm
  - Größere Betriebszeitanteile bei Mischreibung
  - Leistungsbegrenzung infolge Einspeisemanagement
  - Betrieb mit Umrichtern, dynamische Regelungen
  - Strengere Netzanschlussrichtlinien: u. a. High Voltage Ride Through (HVRT) und Low Voltage Ride Through (LVRT)

# Herausforderungen für die Wälzlager (3)

- Hohe Anforderungen an die Schmierung
  - Großer Temperaturbereich verglichen mit Standardanwendungen
  - Größere Rotoren bedeuten langsamere Drehzahl, also niedrigere Schmierfilmdicken
  - Niedrige Reibung im Betrieb
  - Erschwerter Schmierstoffwahl, erschwerte Additivierung
  - Schwierigere Schmierstoffversorgung
  - Dichtungsproblematik (Deformationen, Verschleiß, Alterung, Austauschbarkeit)
  - Ein Schmierstoff für Alles?

# Herausforderungen für die Wälzlager (4)

- Erschwerete Herstellung der Lager
  - Hohe Kosten, Hohe Härte bis in einige Millimeter Tiefe
  - Durchhärtung kaum mehr möglich
  - Härteverzüge
  - Hohe Anforderungen an die Reinheit des Stahls und das Gefüge
  - Kostengünstige Lager, kostengünstiges Material
  - Schwierigere Werkstoffauswahl und erschwerete Beschaffung
  - Herausforderung bei spanender Bearbeitung
  - Neue Härteverfahren

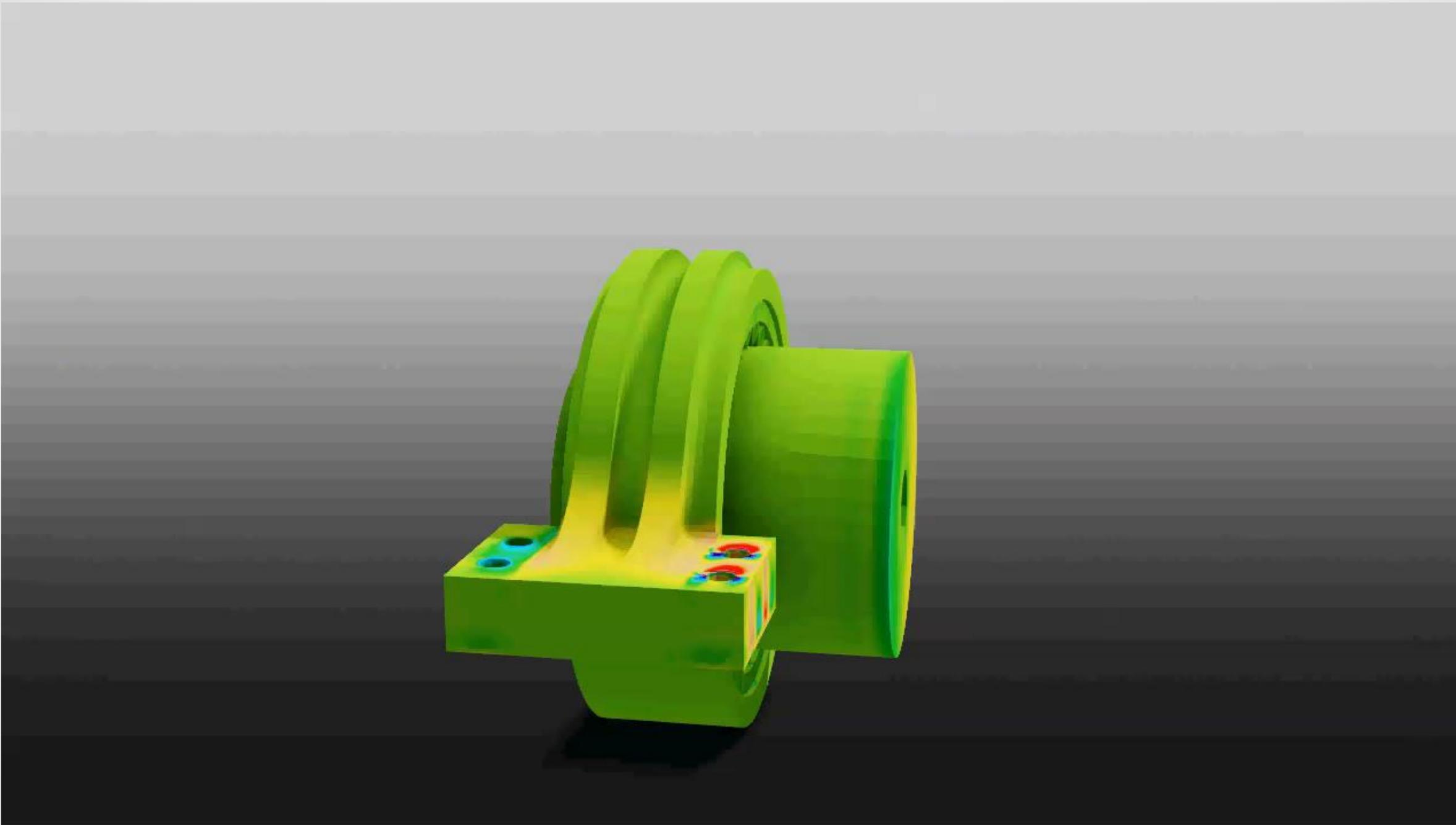
# Herausforderungen für die Wälzlager (5)

- Transport, Montage, Handling, Demontage
  - Erschwertes Handling (größere Dimension und Massen)
  - Größere Montage- und Haltekräfte
  - Größere Aufheiz- und Abkühlzeiten
  - Schwierigere Prozesse und Kontrolle
  - Demontage von Großlagern nicht ohne Großkran

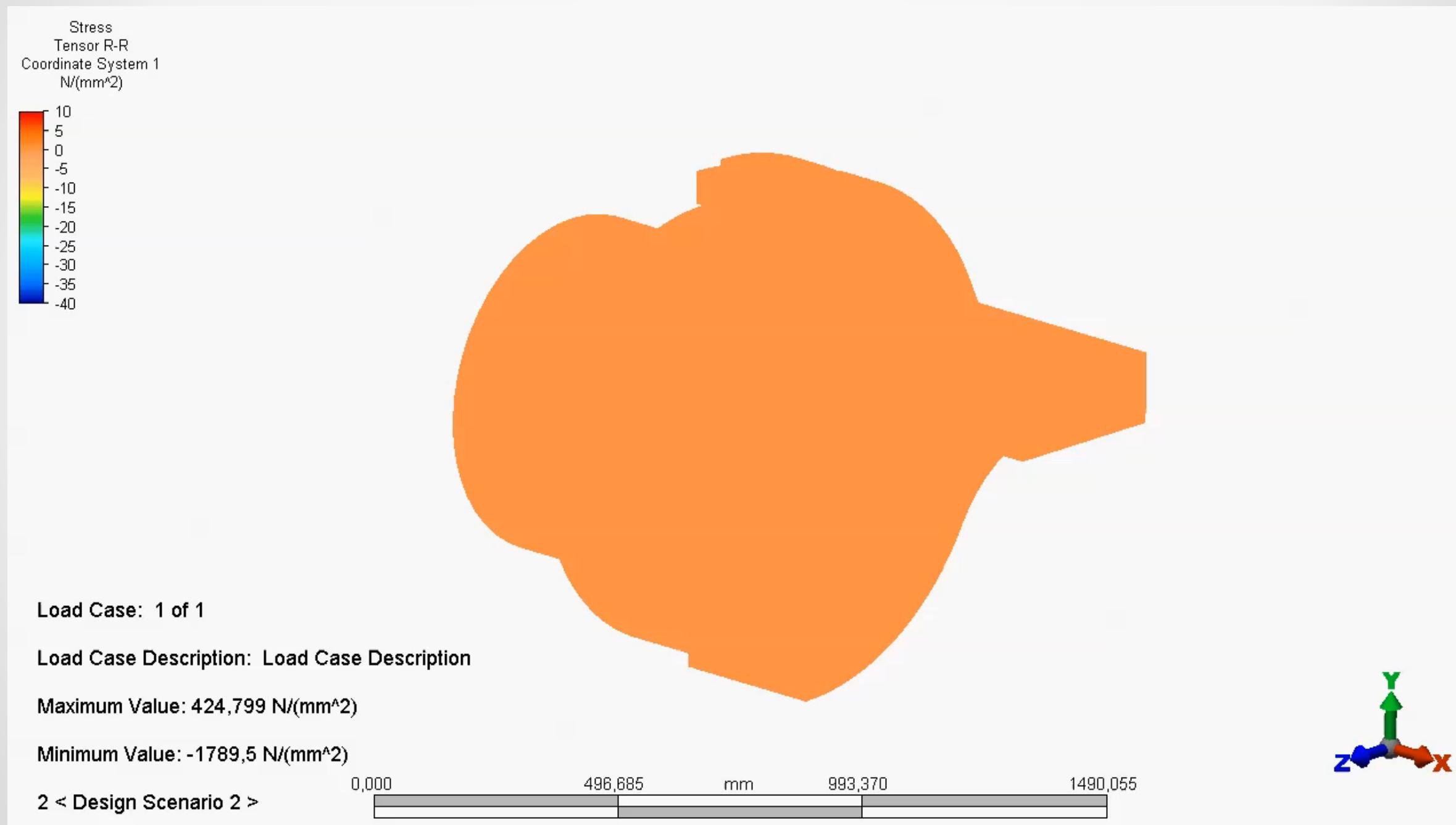
# Simulation im Einsatz



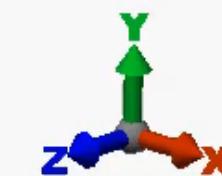
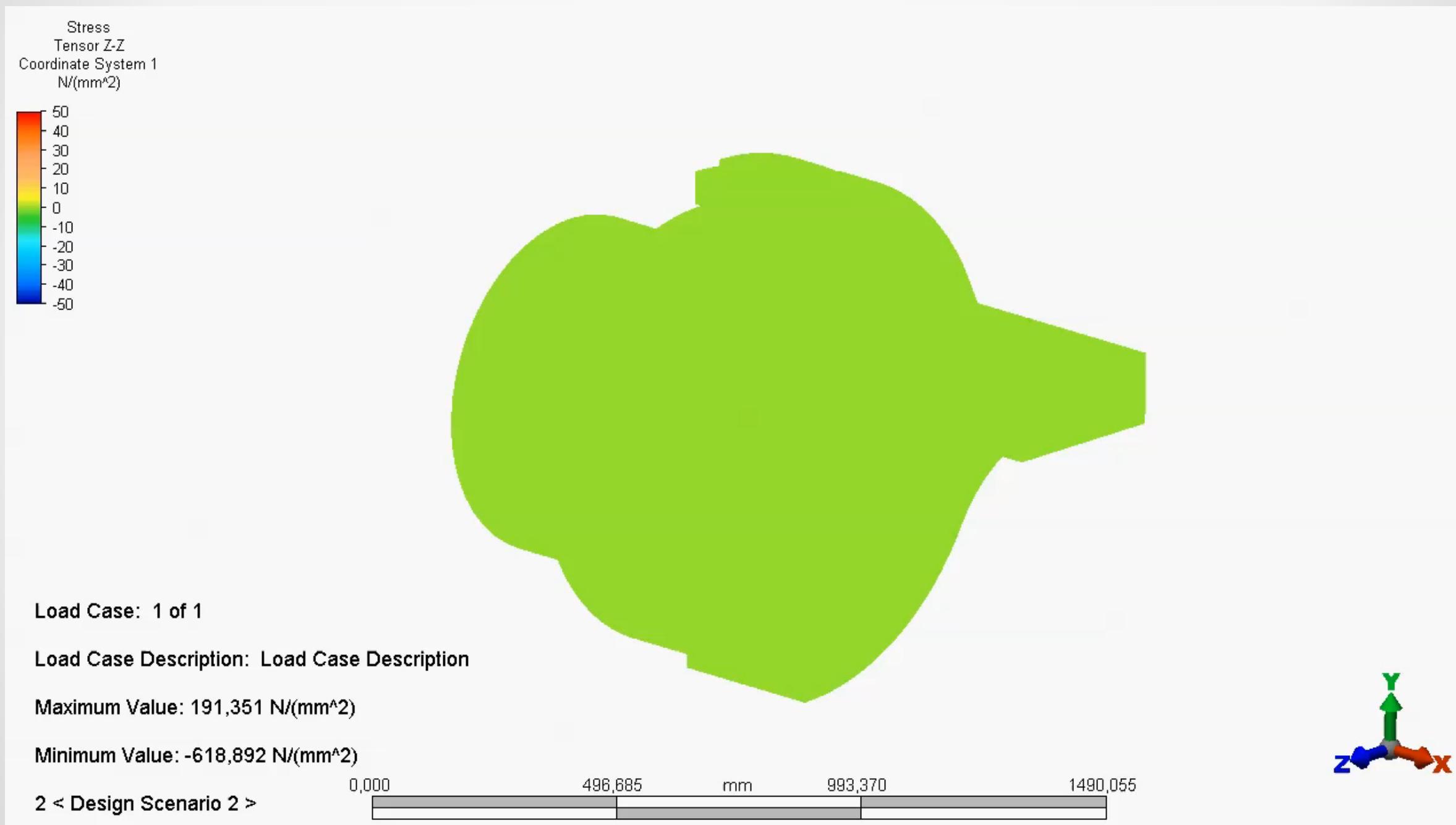
# Beispiel 1: Rotorlagerung mit Pendelrollenlager



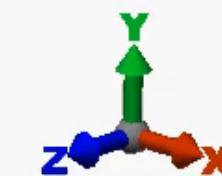
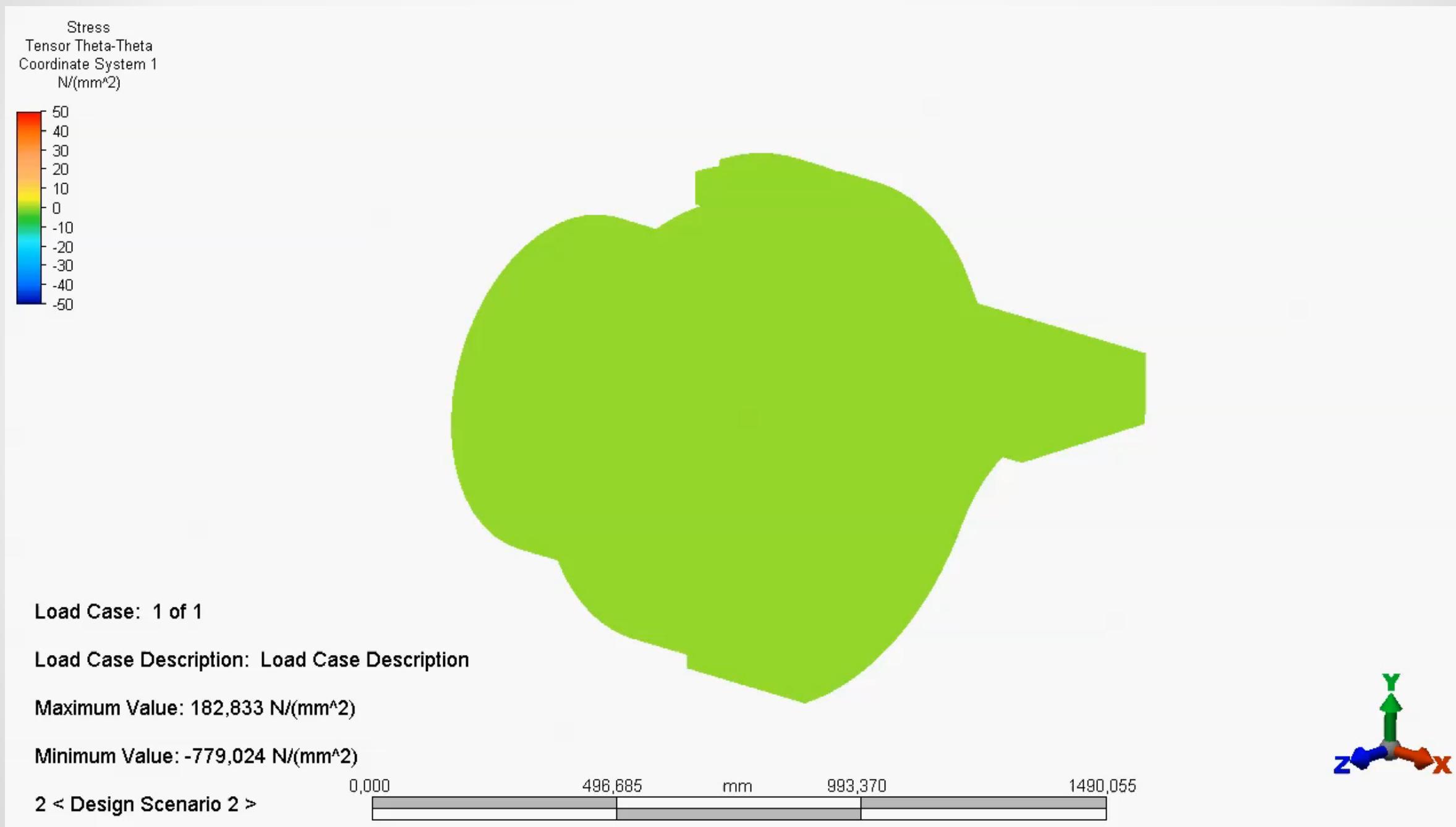
# Beispiel 1: Beurteilung von Passfugen (1)



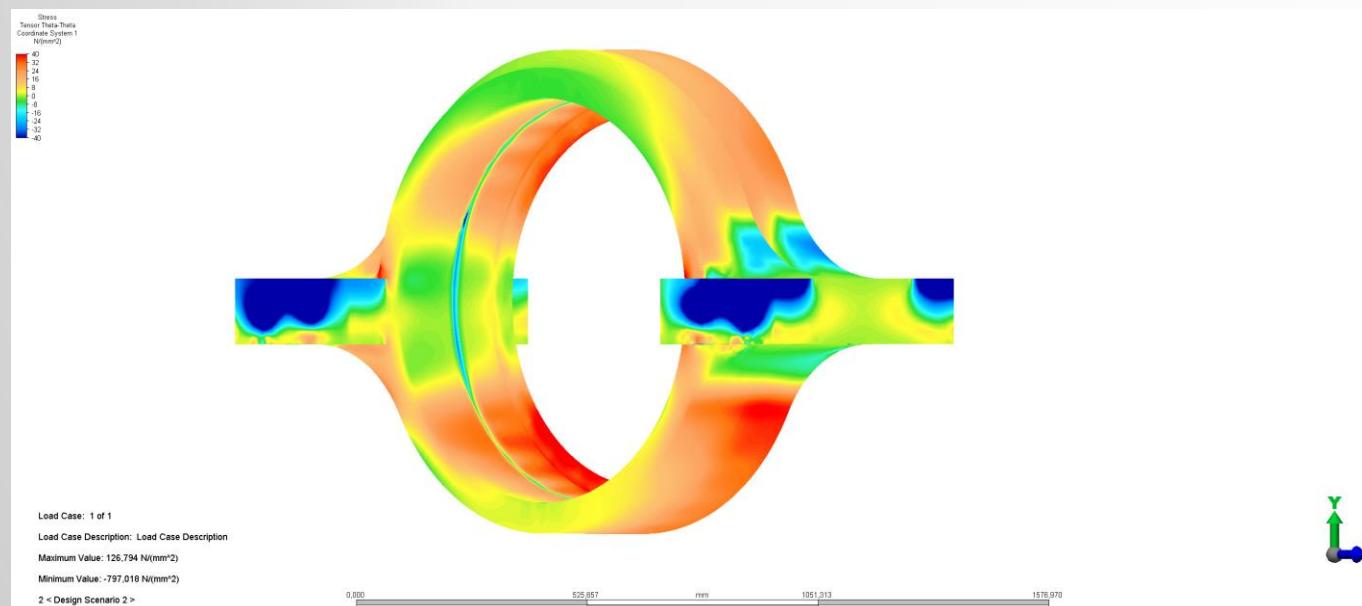
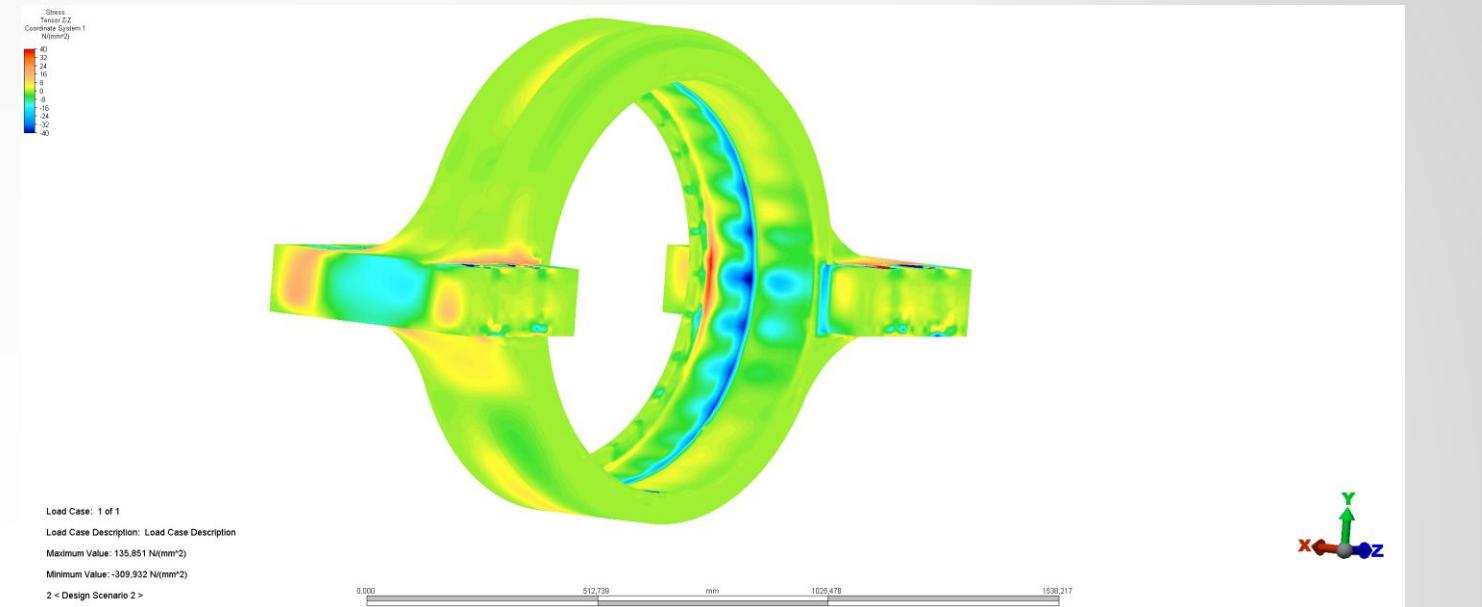
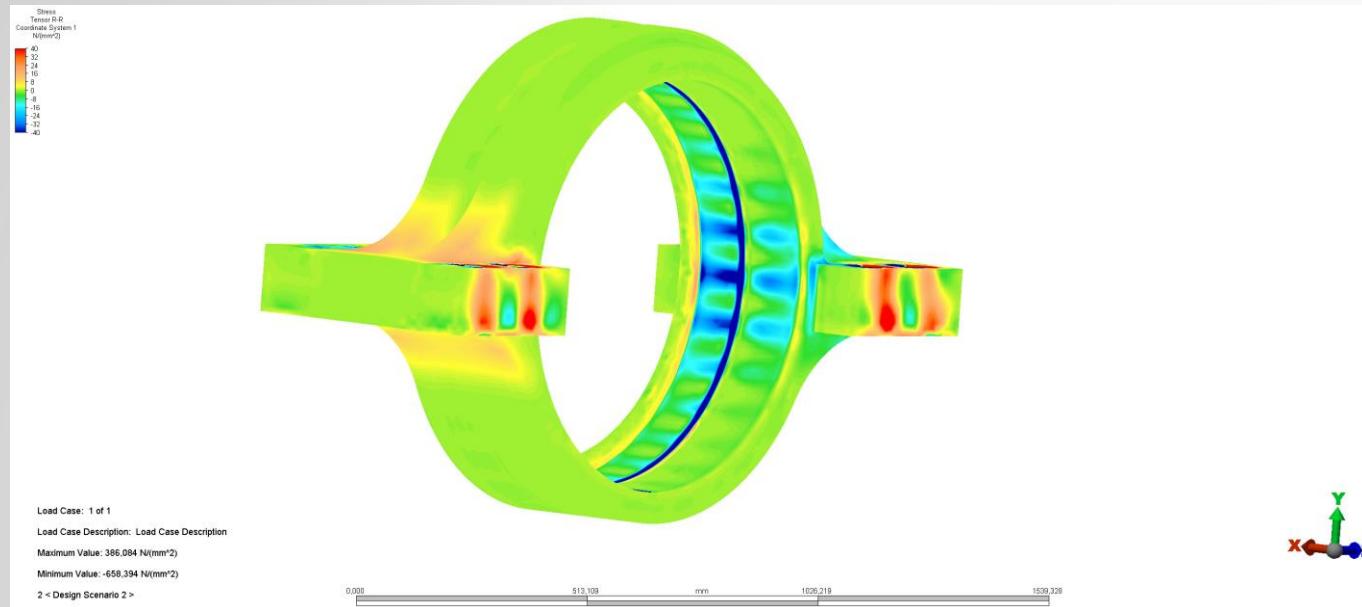
# Beispiel 1: Beurteilung von Passfugen (2)



# Beispiel 1: Beurteilung von Passfugen (3)

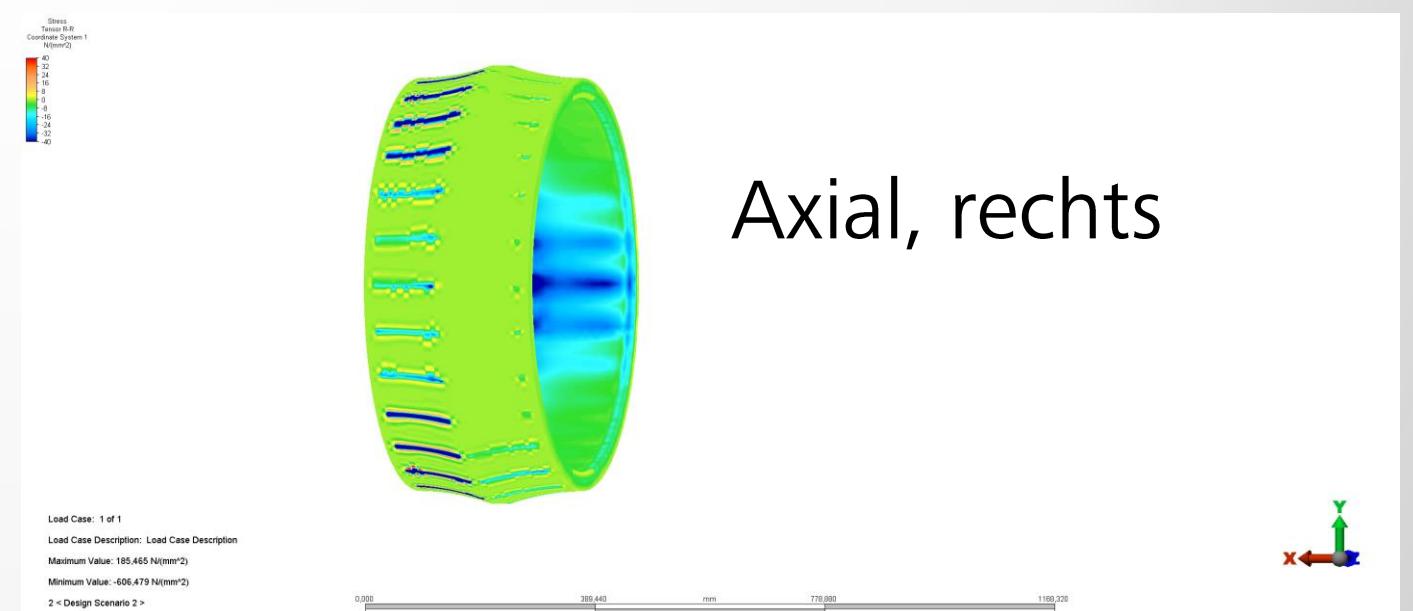
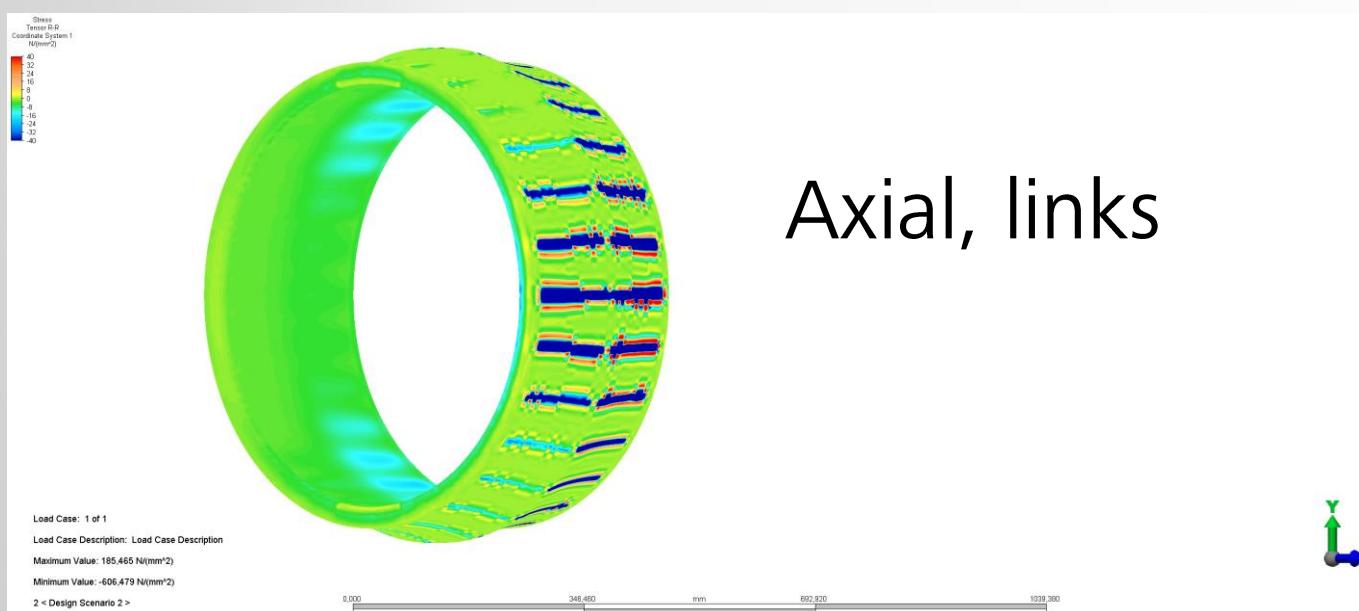
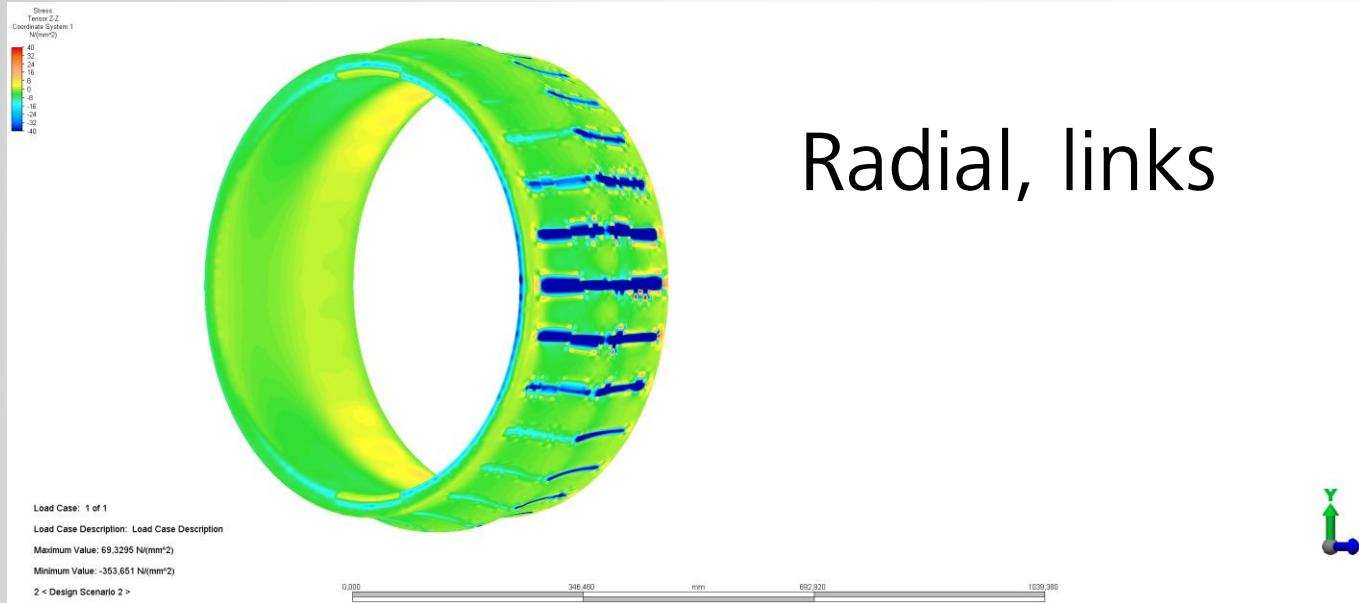


# Beispiel 1: Beurteilung von Passfugen (4)

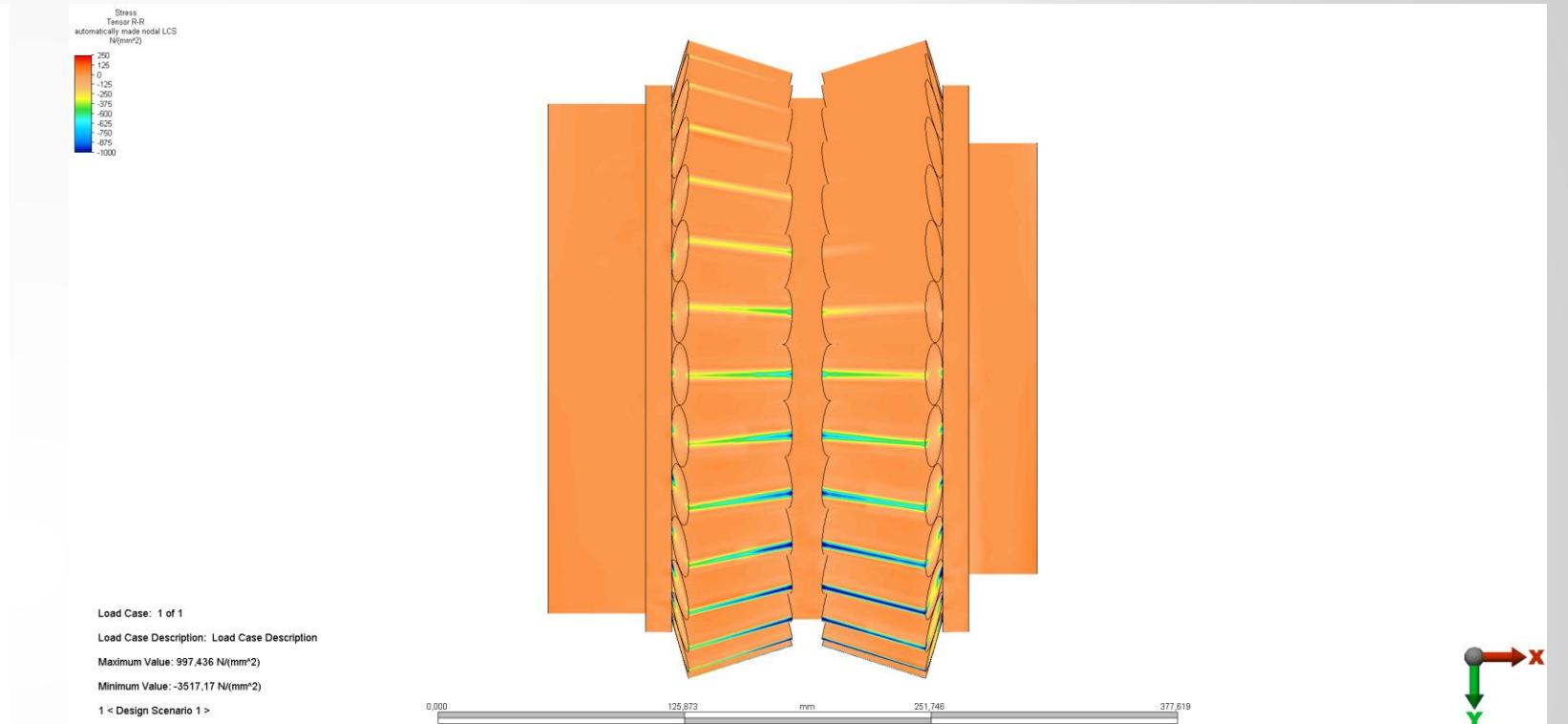
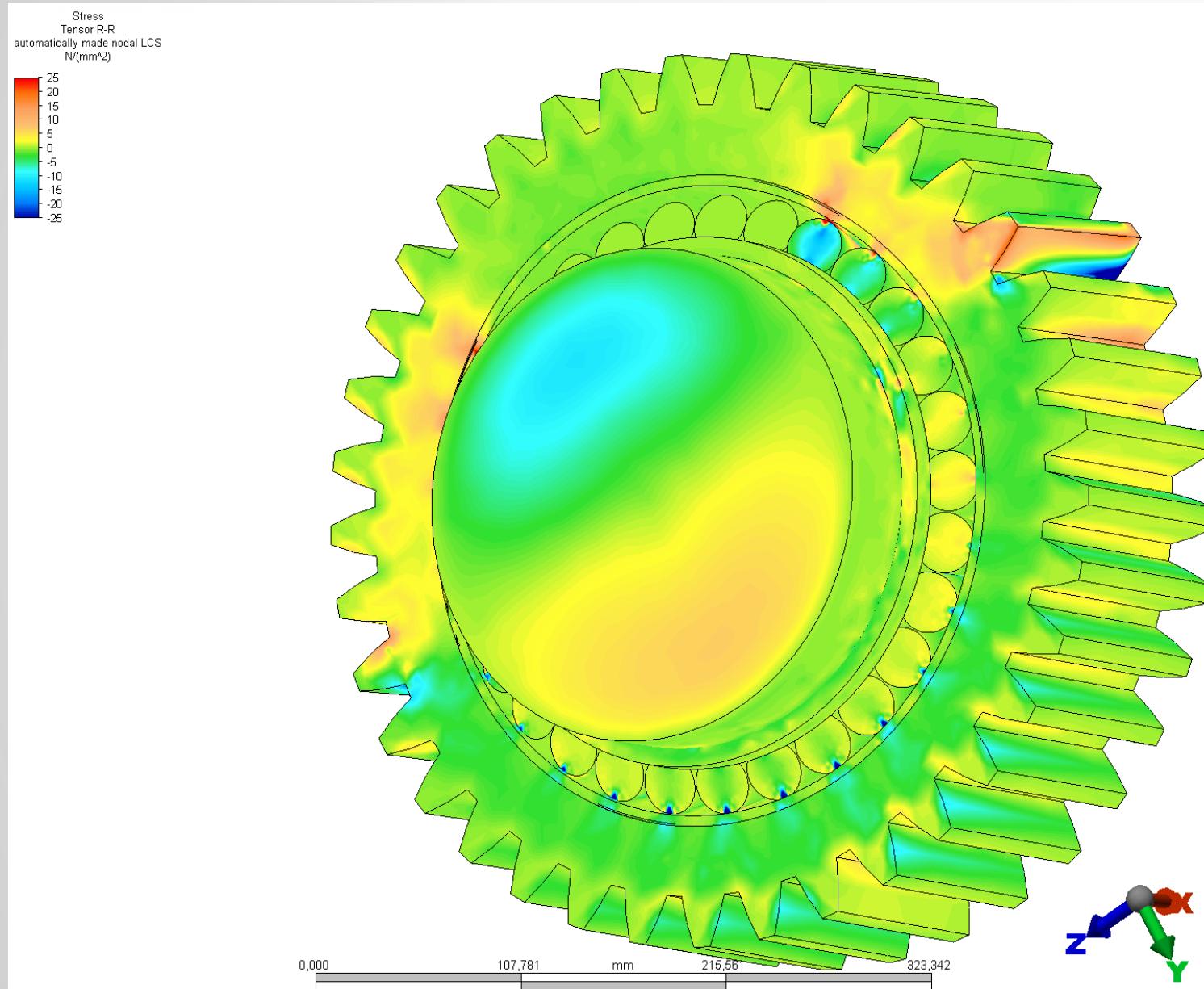


- ## Spannungen
- Radial (oben links)
  - Axial (oben rechts)
  - Umfangsrichtung (unten)

# Beispiel 1: Beurteilung der Lastverteilung



# Beispiel 2: Planetenrad – Kegelrollenlager

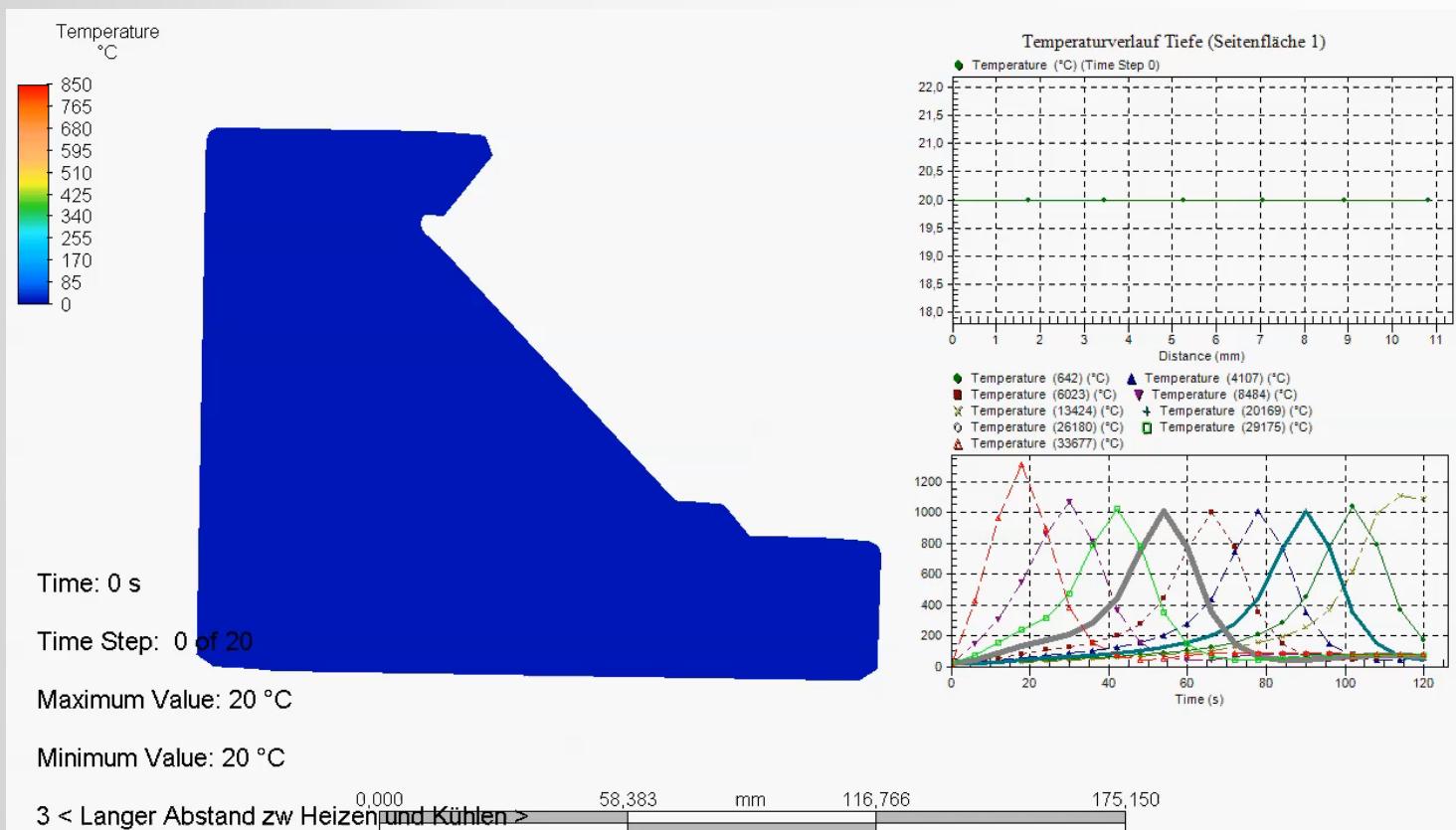


## Radiale Spannungen

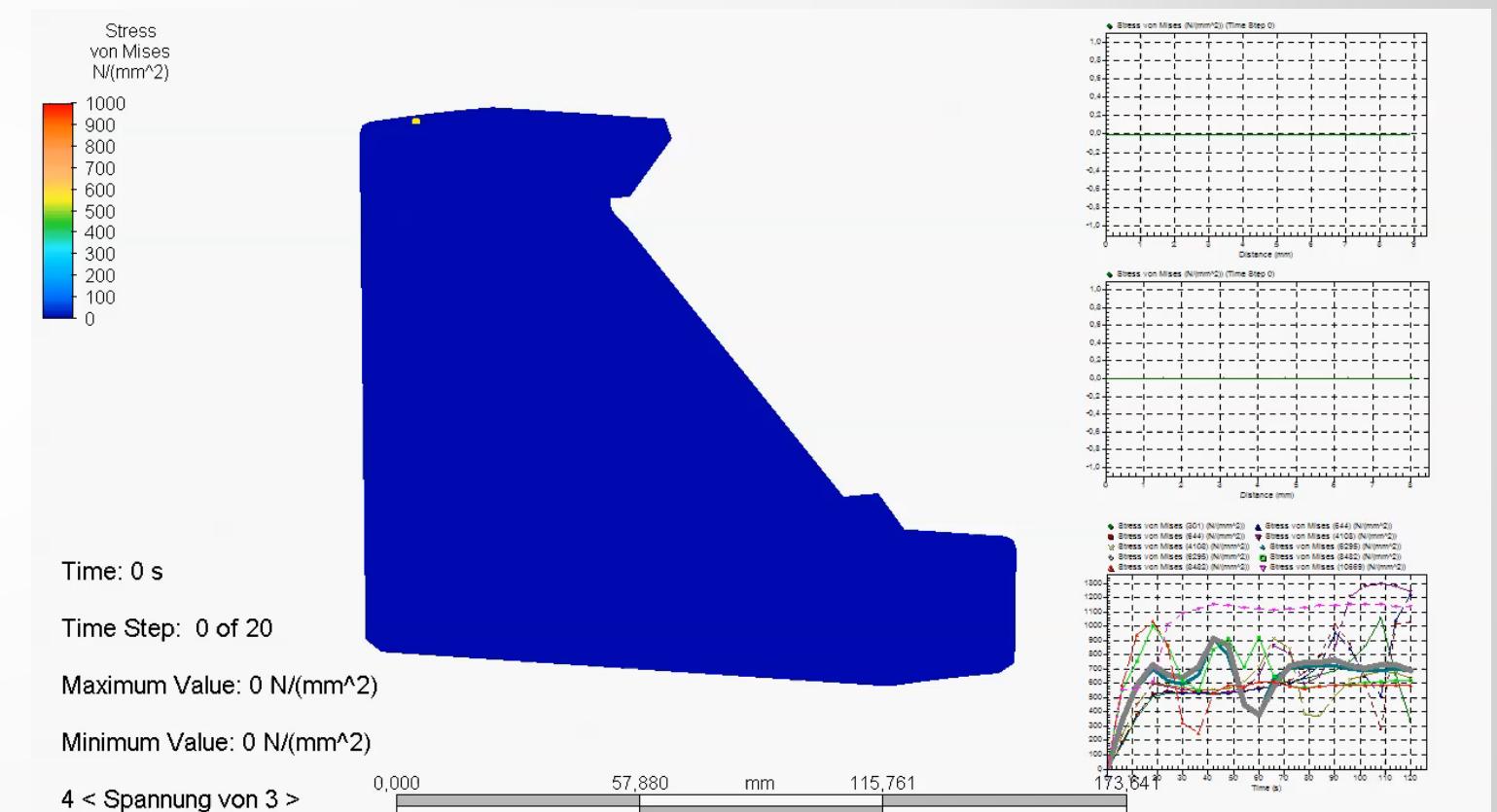
- Gesamt (links)
- Wälzkörpersatz (rechts)

# Beispiel 3: Rotorlagerung – induktive Härtung

- Temperaturverteilung über die Zeit

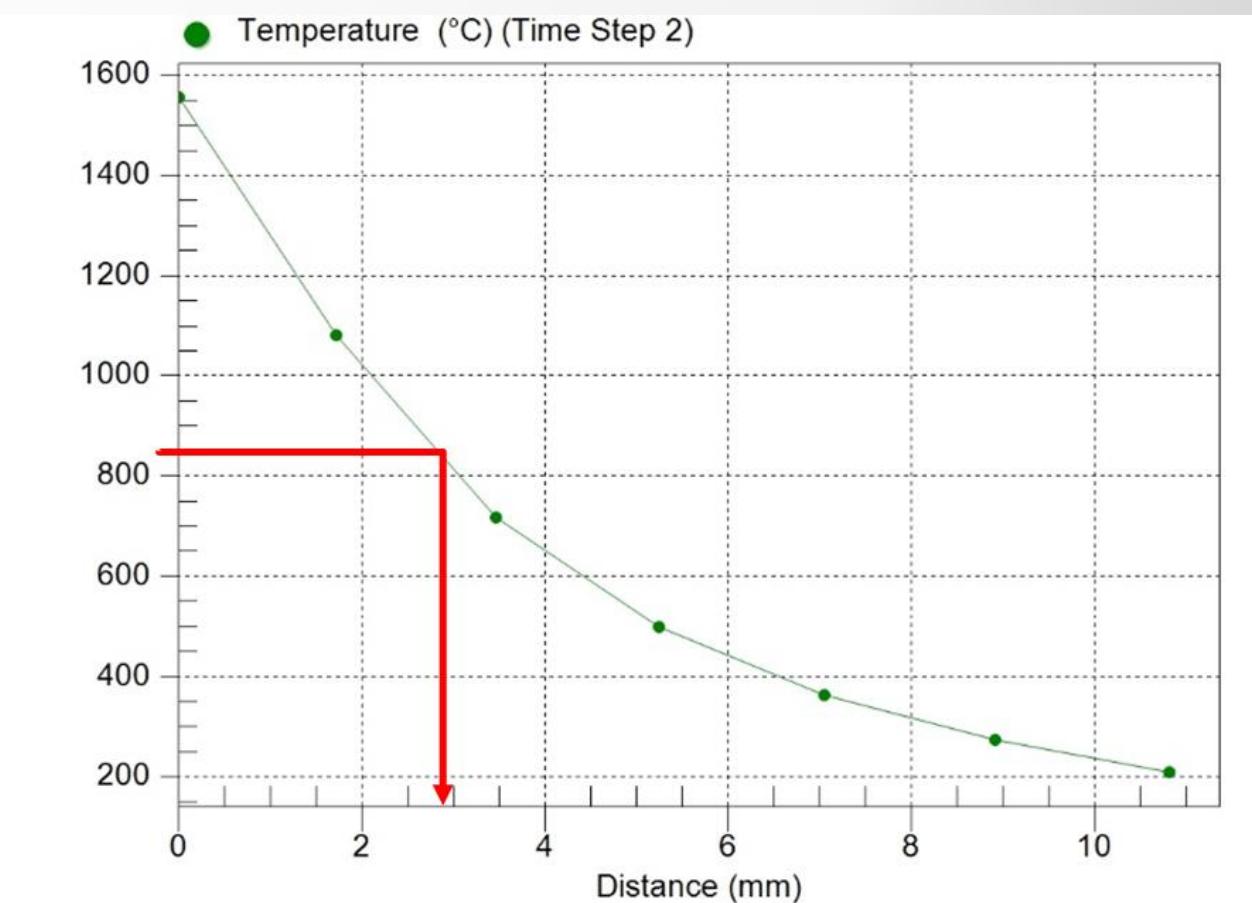


- Spannungsverteilung über die Zeit



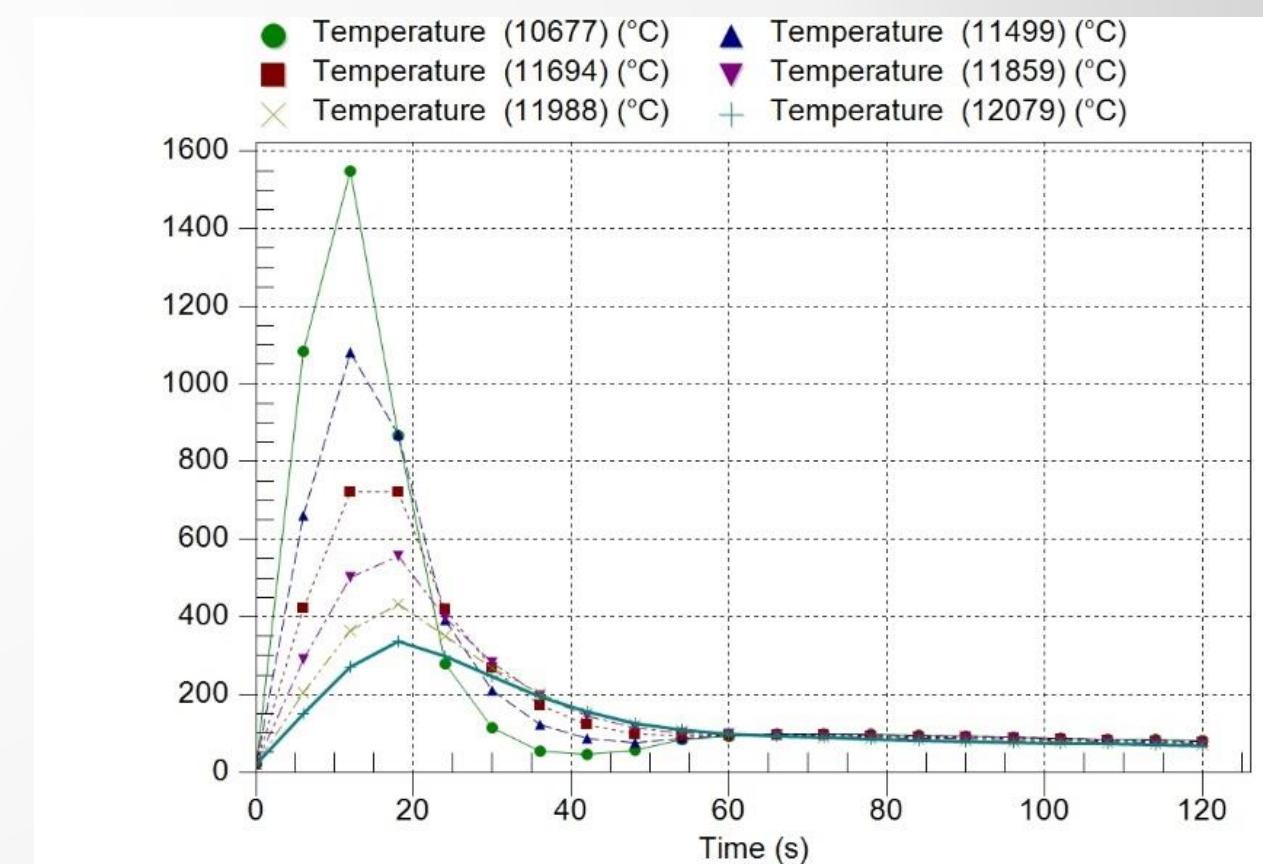
# Beispiel 3: Fragestellungen bei der Härtung

- Temperaturverlauf unter der Oberfläche
- Erreicht das zu härtende Volumenelement die erforderliche Temperatur?
- Bis in welche Tiefe könnte bei Überschreiten der Mindesttemperatur gehärtet werden?
- Kritische Bereiche?



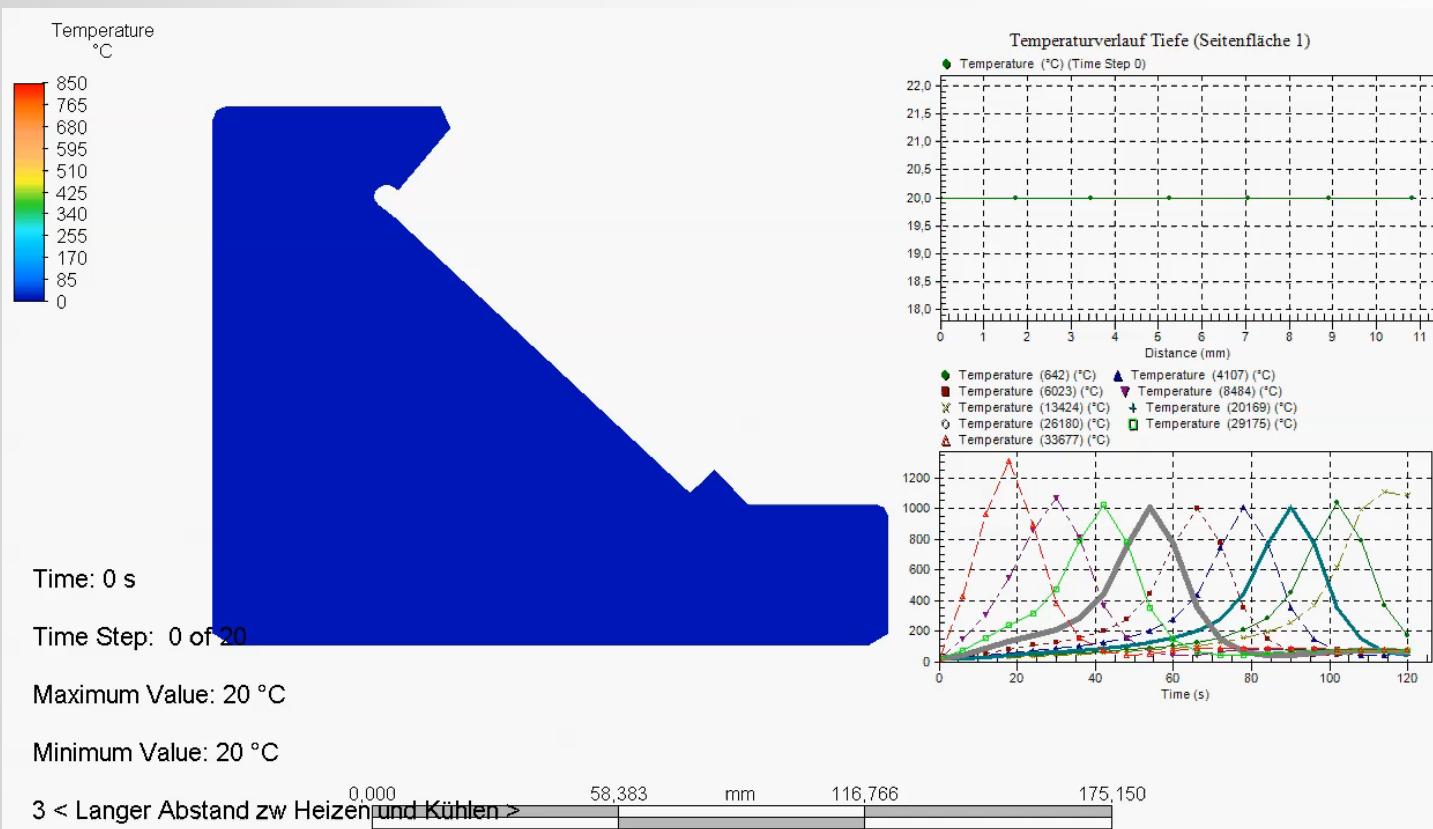
# Beispiel 3: Fragestellungen bei der Härtung

- Erreicht das zu härtende Volumenelement die erforderliche Geschwindigkeit beim Abkühlen (ZTU)?
- Bis in welche Tiefe könnte bei Überschreiten der min. Geschwindigkeit gehärtet werden?
- Ist die Geschwindigkeit in Bereichen sehr hoch / zu hoch?
- Reicht die Haltezeit?

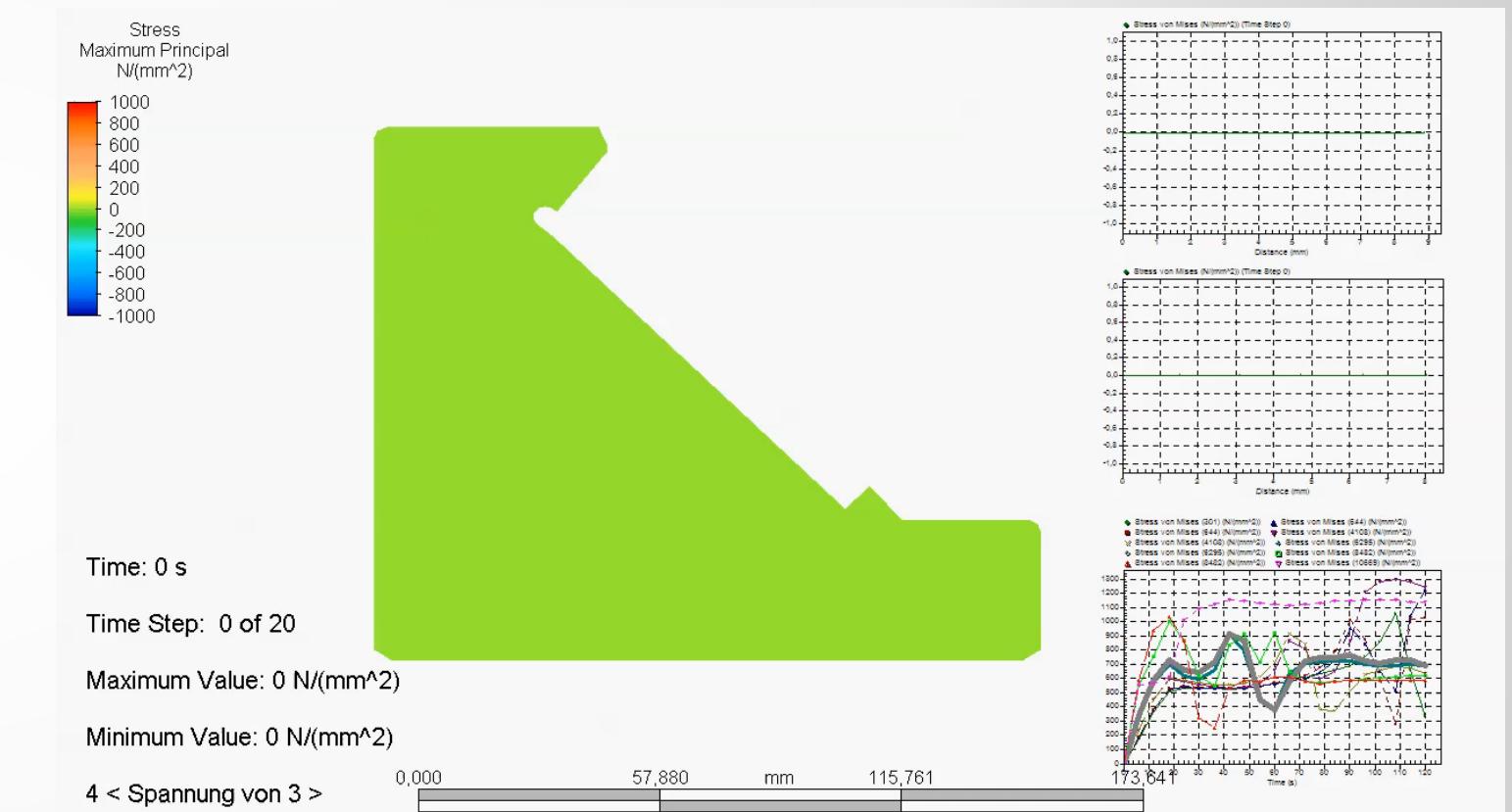


# Beispiel 3: Hauptspannungen

Temperaturverteilung über die Zeit (Seitenansicht)

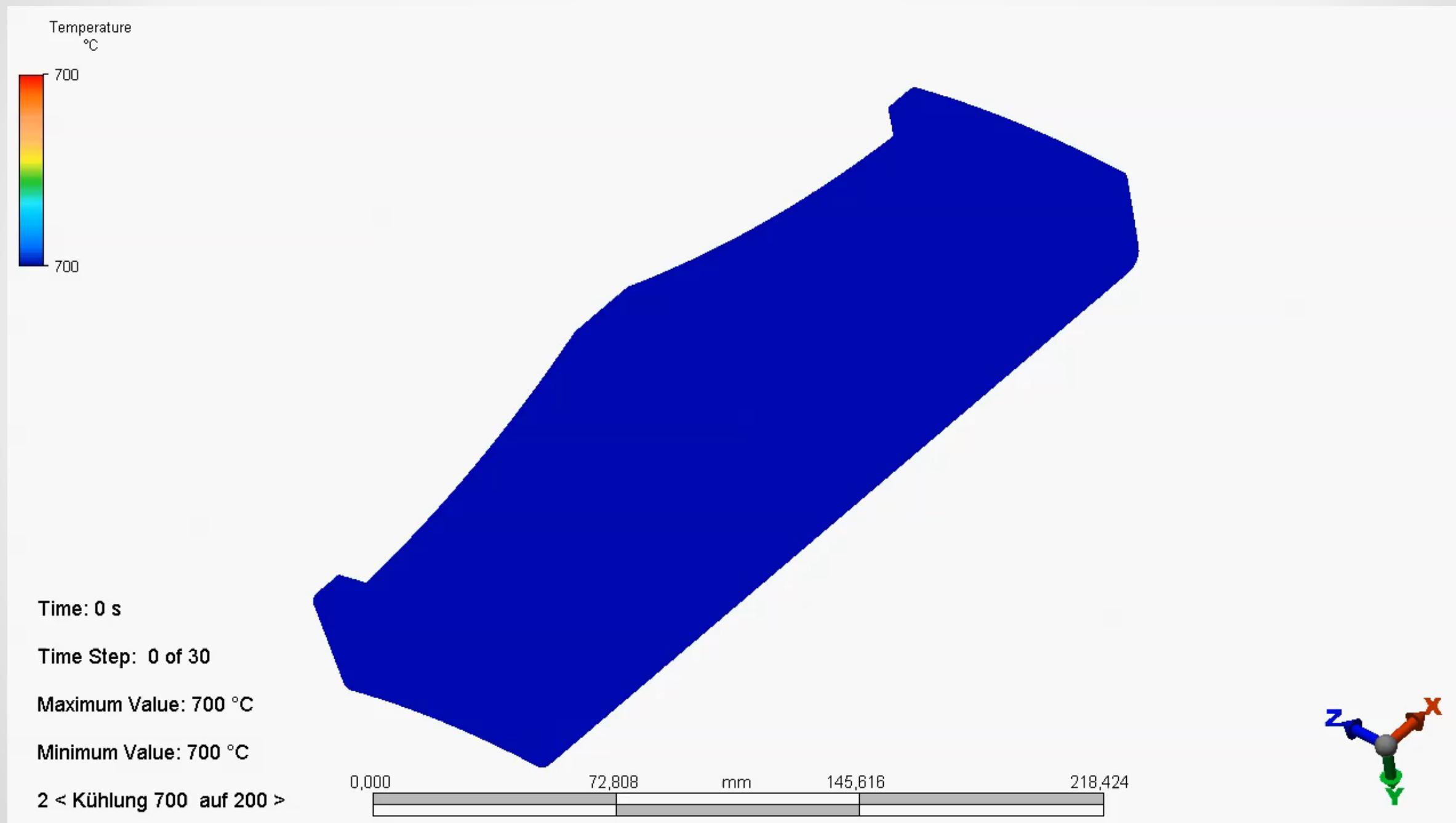


Verteilung der max. Hauptspannung über die Zeit (Seitenansicht)

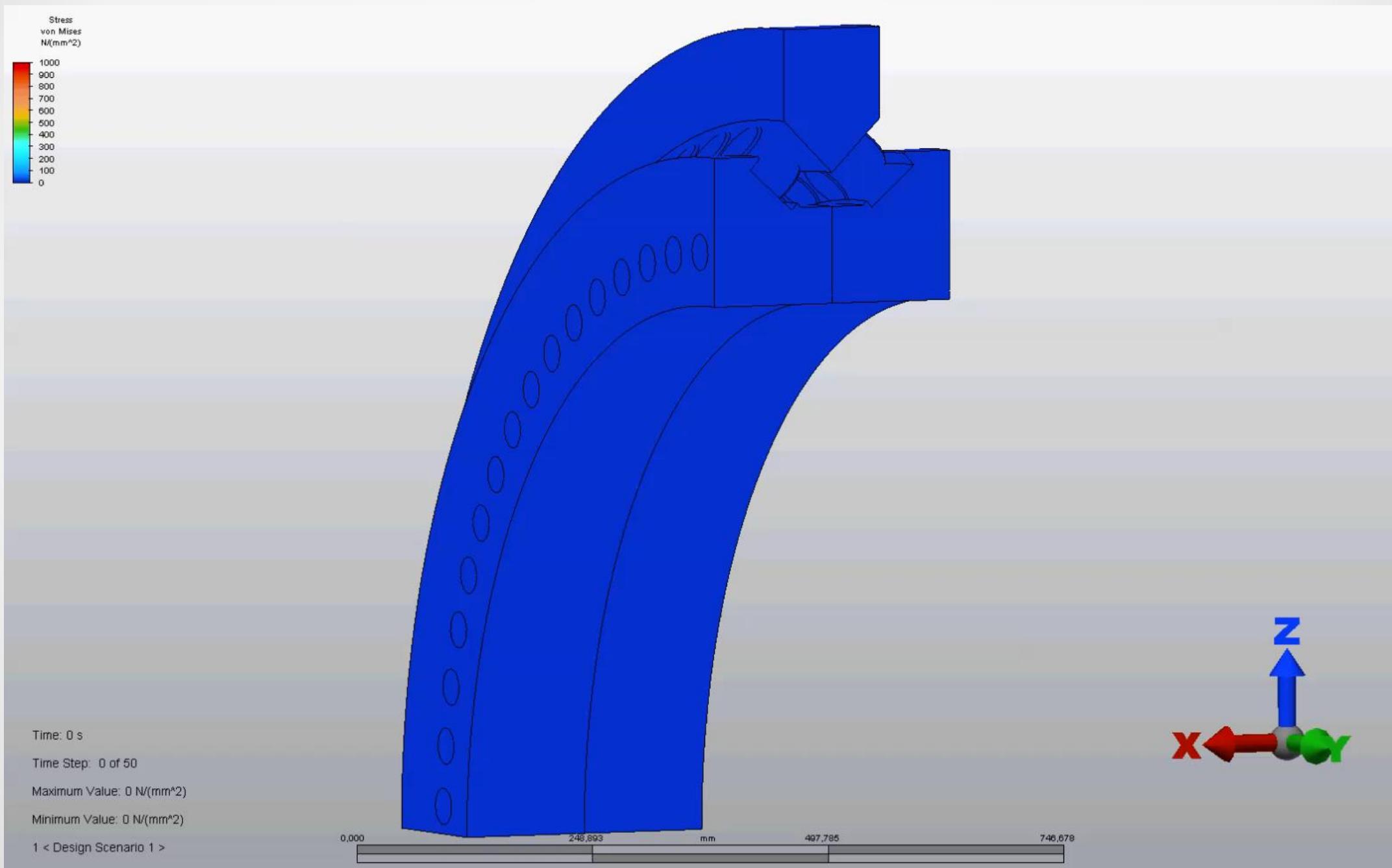


Zugspannungen an der Oberfläche  
Druckspannungen unterhalb der Oberfläche

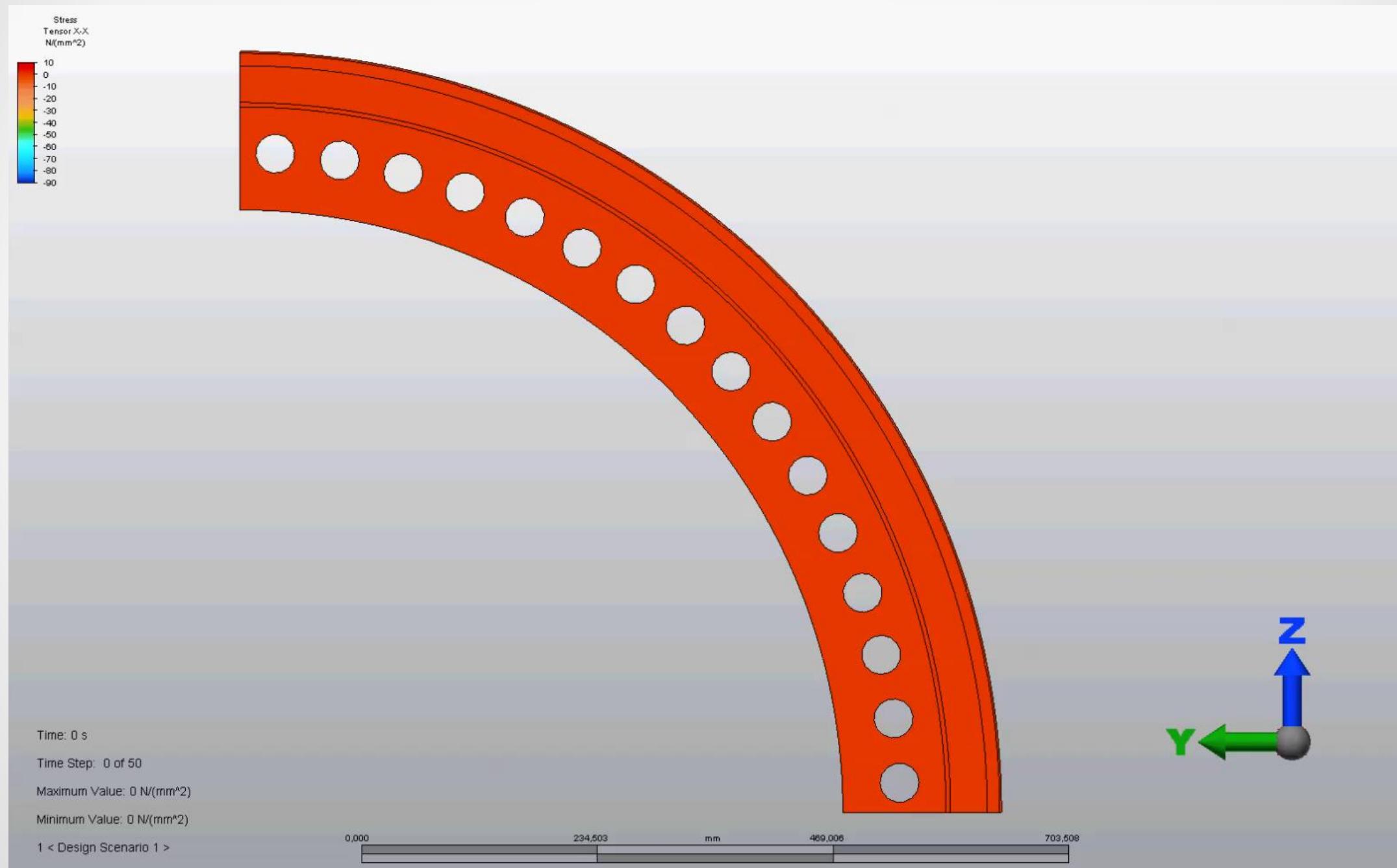
# Beispiel 4: Bainitische Härtung



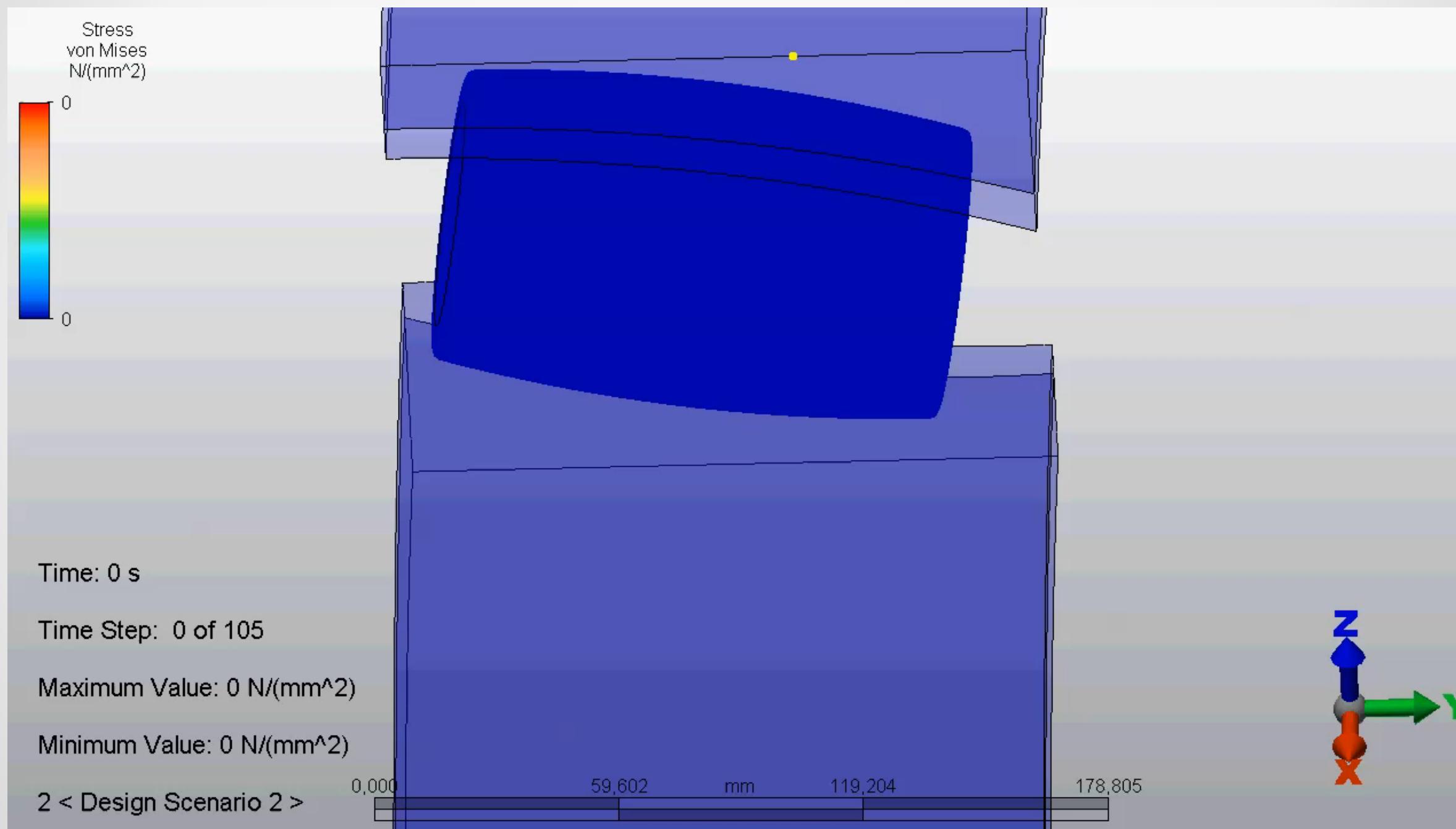
# Beispiel 5: Verschraubte Innenringe am Rotorlager



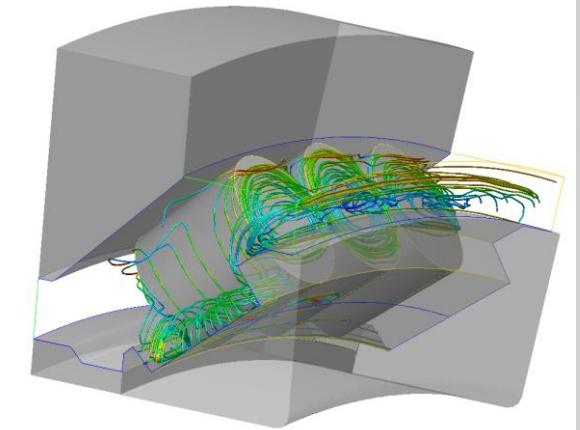
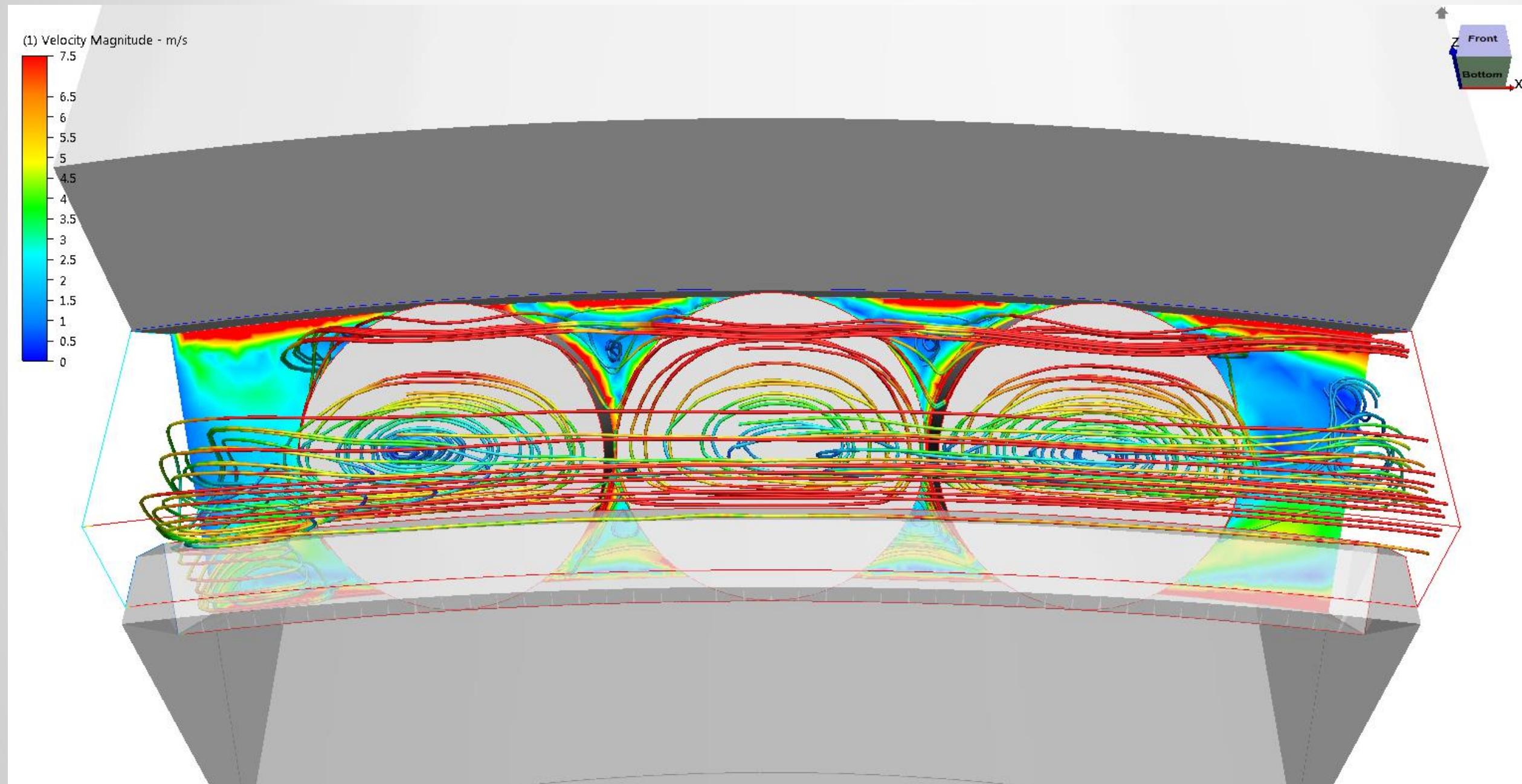
# Beispiel 5: Verschraubte Innenringe am Rotorlager



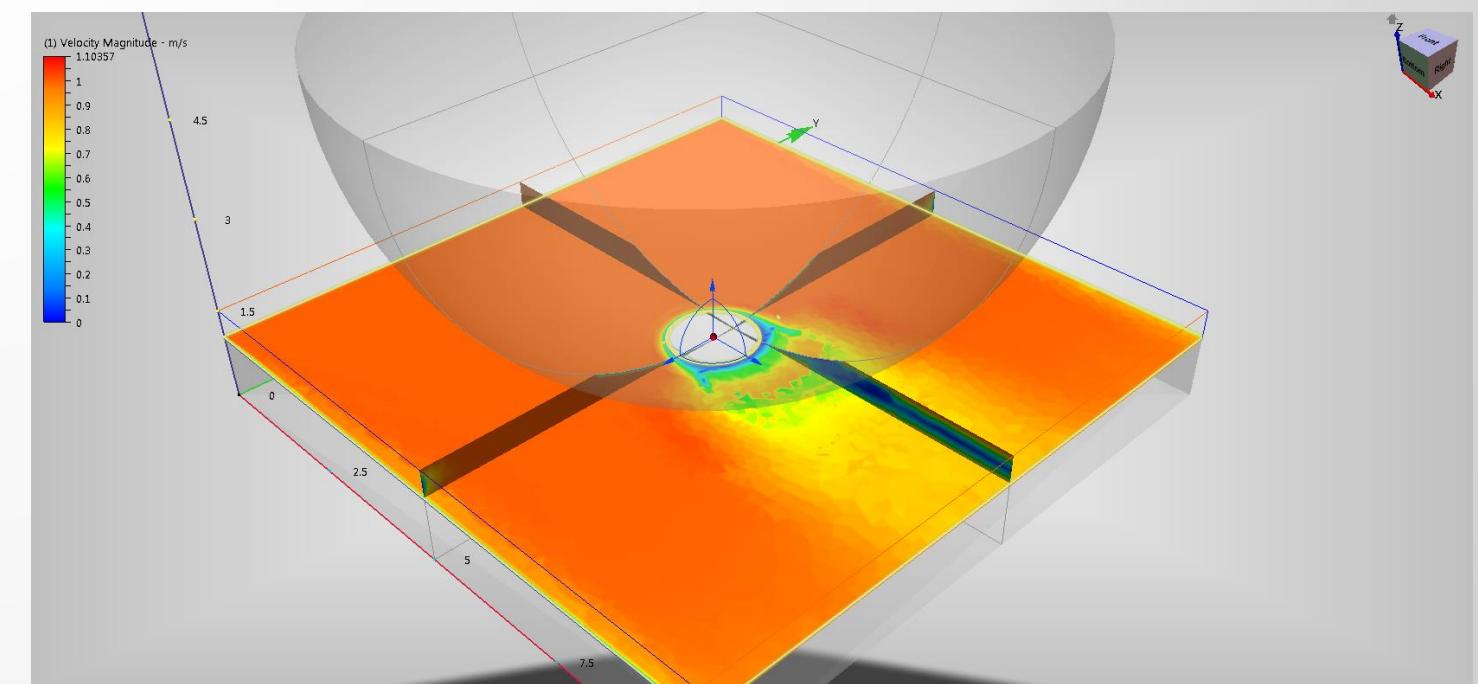
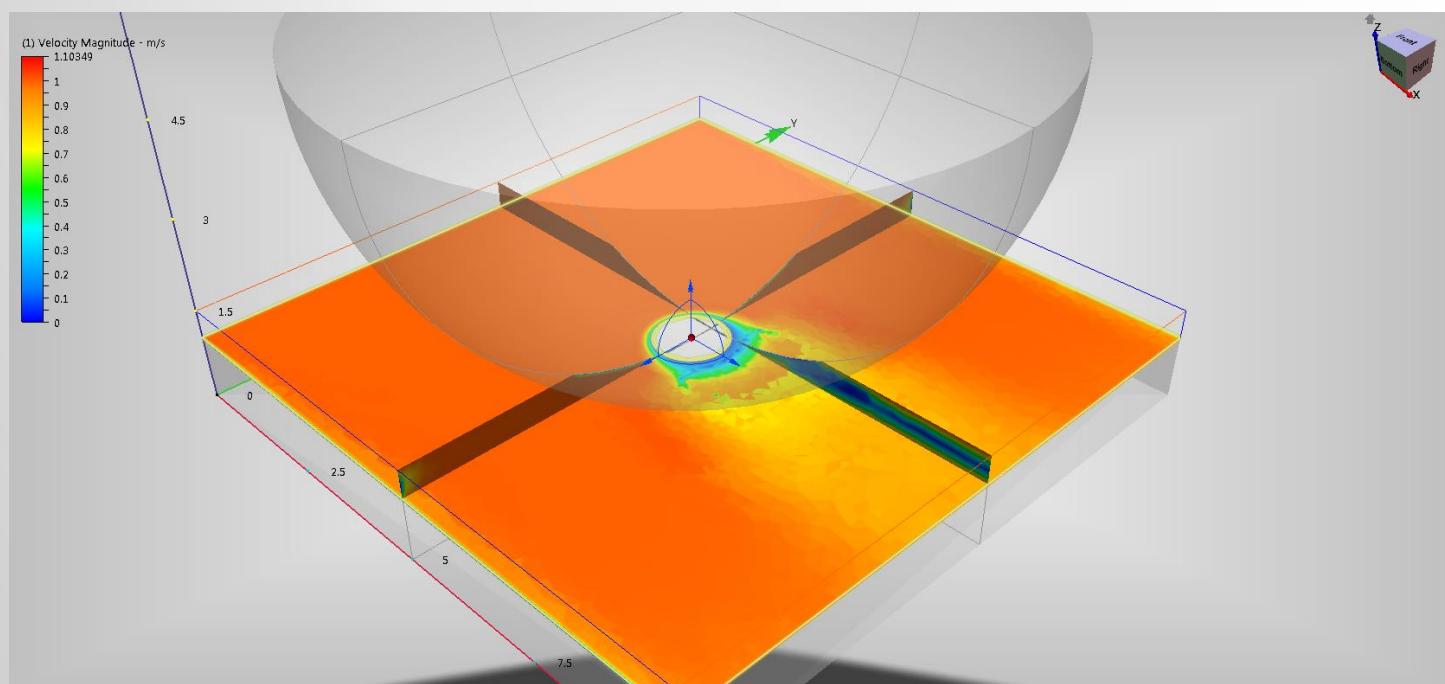
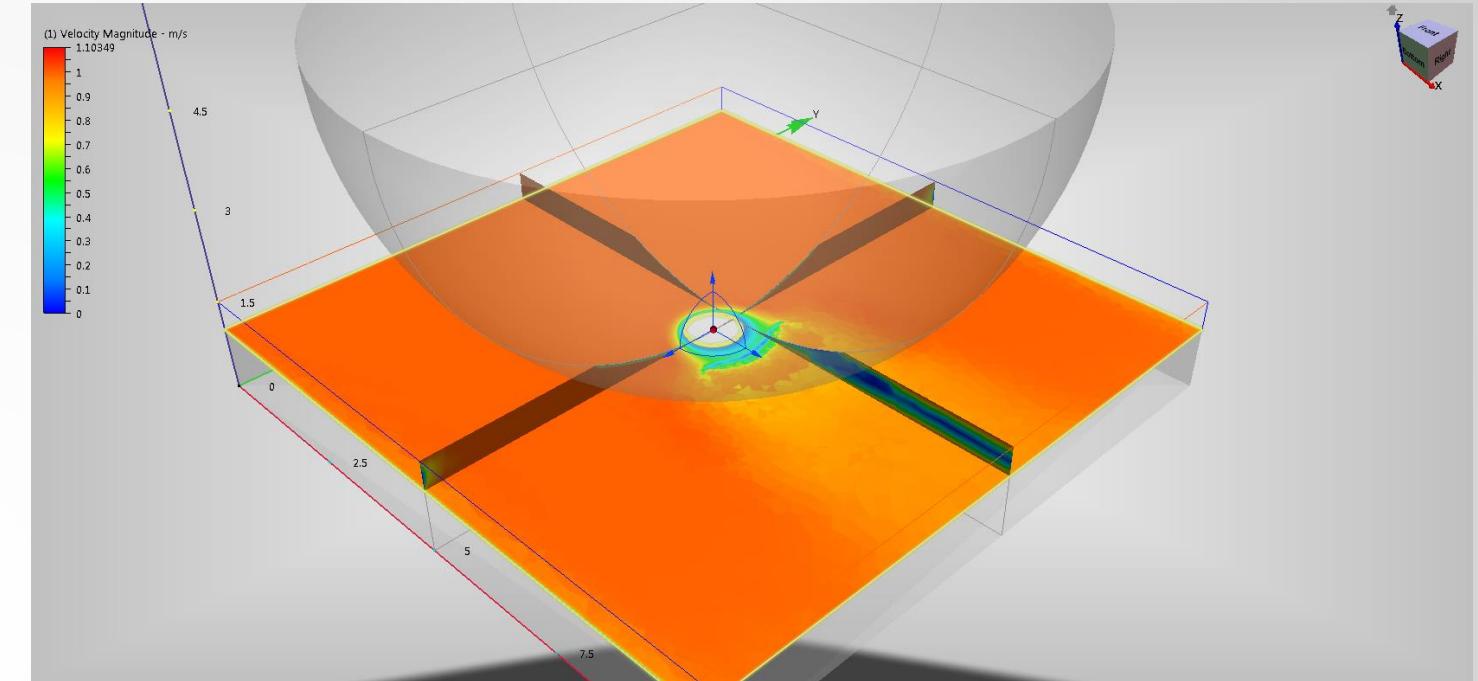
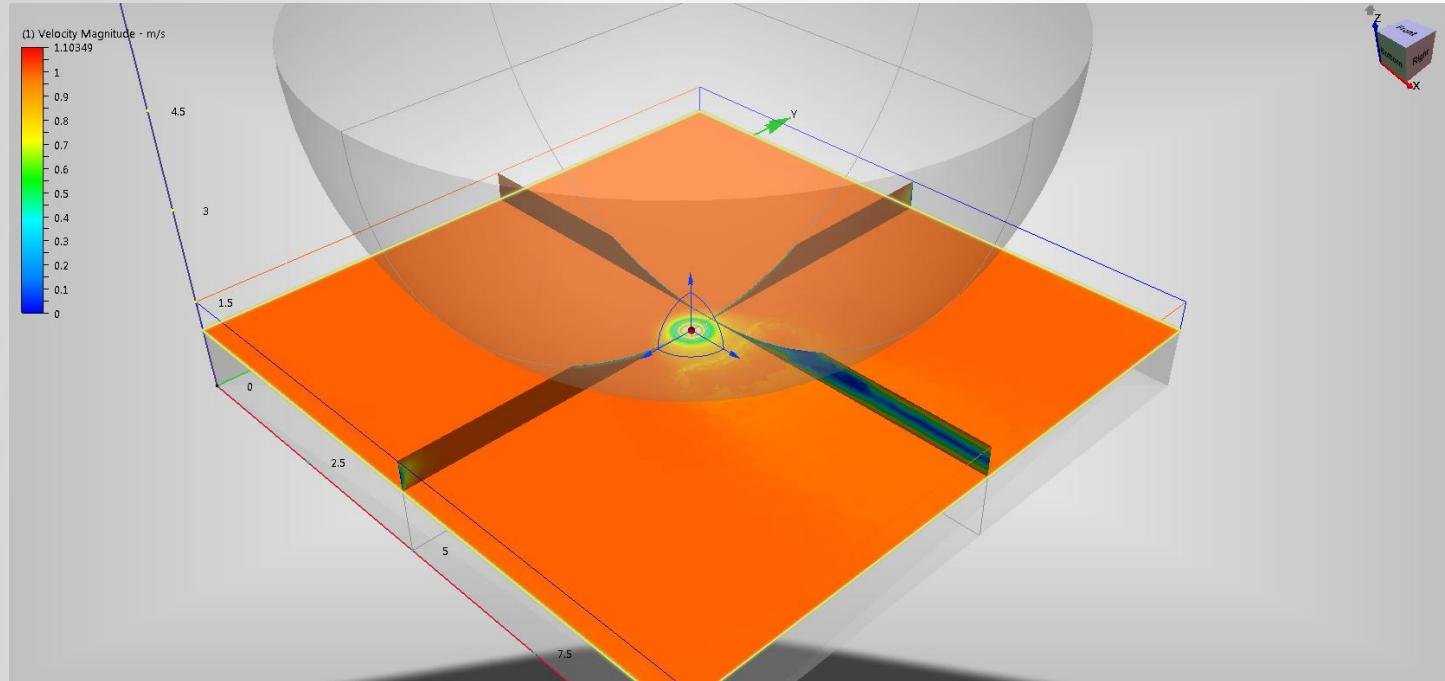
# Beispiel 6: dynamische Simulation Pendelrollenlager



# Beispiel 7: Schmierung im Rotorlager



# Beispiel 8: Mangelschmierung (Starvation)



# Zusammenfassung



# Windenergie

- Weit verbreitet
- Kostengünstige Stromerzeugung
- Dezentral
- Fluktuierend
- Weiterer Kostendruck
- Weiteres Optimierungspotential insbesondere für Binnenlandwindparks

# Windenergieanlagen

- High Tech verschiedenster Disziplinen
- Komplexe Steuerungen, autonomer Betrieb
- Weiter wachsende Anlagengrößen
- Verstärkte Optimierung für Schwachwindstandorte
- Gestiegene Anforderungen für Netzanbindung
- Kraftwerkseigenschaften
- Vielfalt von Maschinenkonzepten
- Weiteres Optimierungspotential

# Wälzlager

- Wachsende Größen
- Kostendruck
- Verschiedene Konzepte, neue Designs
- Neue Fertigungsverfahren
- Herausforderungen bei der Herstellung
- Teilweise eingeschränkte Zuverlässigkeit
- Hohe Austausch- und Folgekosten

# Autodesk Simulation Mechanical und CFD

- Gute Bedienbarkeit
- Vielfältige Berechnungsmöglichkeiten
- Verschiedenste Materialmodelle
- Gute Vernetzungstools
- Einfache Einbringung der Randbedingungen
- Übernahme von Ergebnisse aus CFD in Mechanical
- Strategische Verbesserung der Programme
- (Noch) Einschränkungen bei FSI

# Autodesk Simulation Mechanical und CFD

- Hoher Nutzen beider Programmsysteme
- Guter und meist schneller Support
- Richtige Wahl für Change Engineering
- Würden uns wieder so entscheiden

# Vielen Dank

Change Engineering GmbH  
Wiesenweg 4  
97490 Poppenhausen

[info@change-engineering.com](mailto:info@change-engineering.com)

[www.change-engineering.com](http://www.change-engineering.com)

