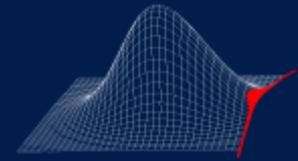




TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



Rolls-Royce

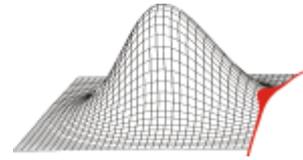


Fakultät Maschinenwesen · Institut für Strömungsmechanik · Professur für Turbomaschinen und Strahlantriebe

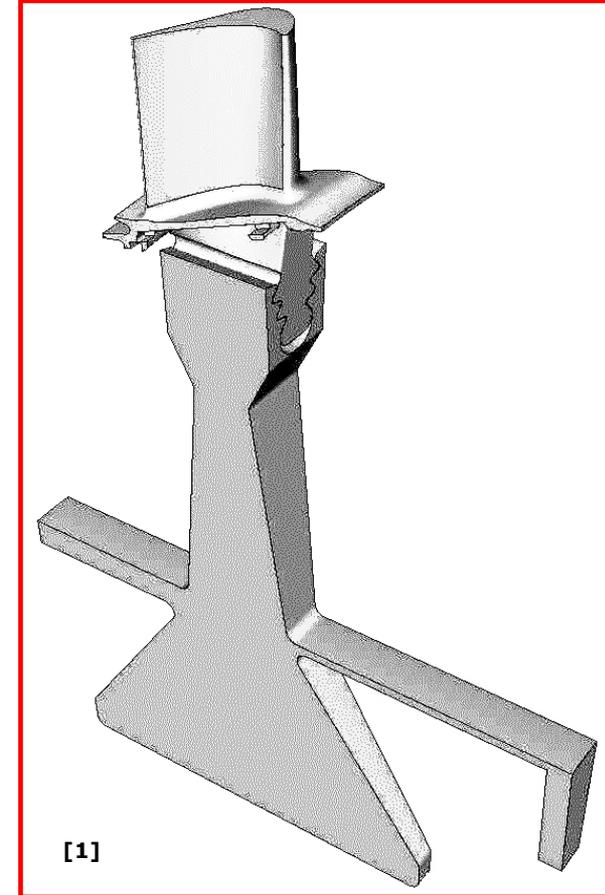
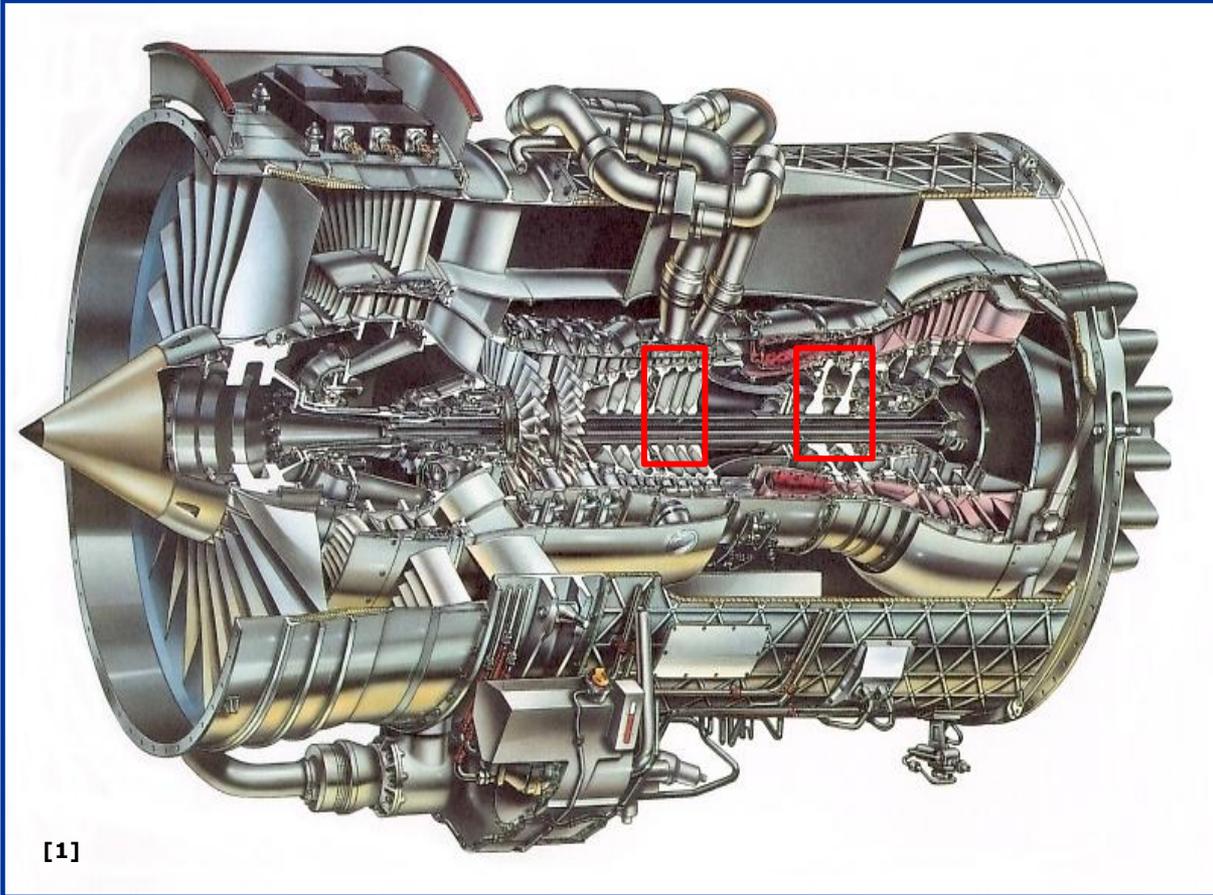
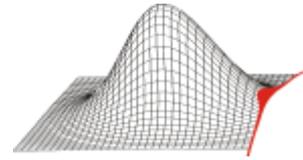
Probabilistische, strukturmechanische Untersuchung von Rotorscheiben unter Berücksichtigung geometrischer Streuungen

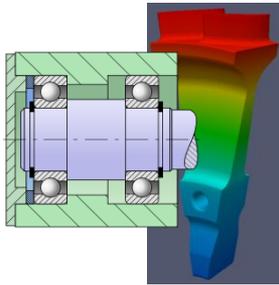
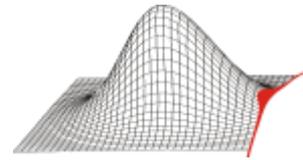
I. Reuter, M. Voigt, K. Vogeler - *Technische Universität Dresden*
T. Weiß, H. Schlums - *Rolls-Royce Deutschland*
K.-H. Becker, A. Fischersworing-Bunk - *MTU Aero Engines*

5. Dresdner-Probabilistik-Workshop



- Motivation / Probabilistik
- Vorstellung Modell
 - Deterministisch / Probabilistisch
 - Prozesskette
- Analyse von Beispiel Einzelrechnungen
 - Problematik der Auswertung
 - Lösung
- Neuer Ansatz statistische Auswertung
 - Vorgehen
 - Werkzeuge
- Anwendung auf Rotorscheiben
 - Ergebnisse
- Zusammenfassung und Aussichten

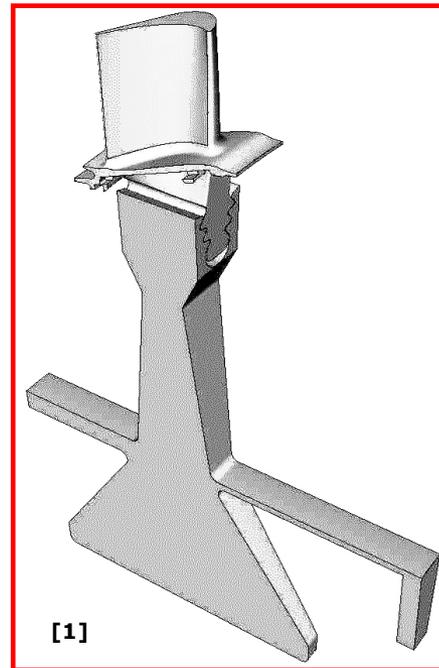
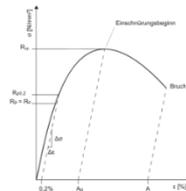




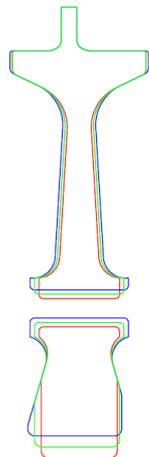
- Zyklische Belastungen
- hohe Drehzahlen
- Temperaturen bis 600 °C

- Kein Casing Containment
- Konkurrierende Bedingungen:
 - 100 % Zuverlässigkeit
 - Wirtschaftlichkeit

- Hochtemperatur Werkstoffe
 - Nickelbasislegierungen
 - TiAl
- Fertigungsverfahren

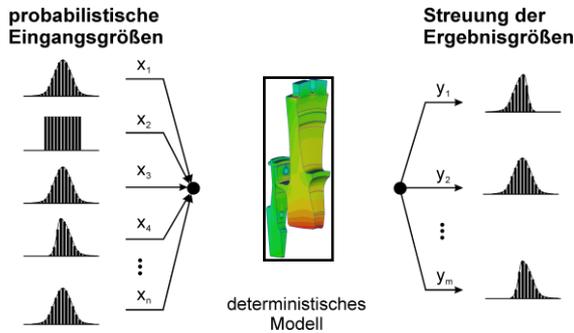
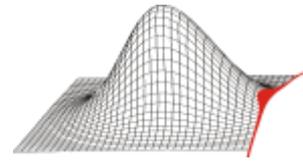


[1]



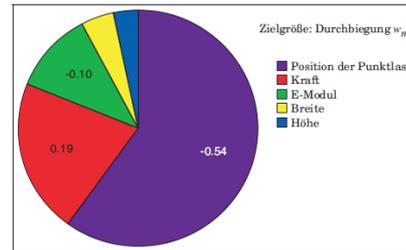
- Rim, Web, Flansch, Radien ...
- Fertigungstoleranzen
- Optimierungen

- Anpassung von:
 - Sicherheitsfaktoren
 - Auslegungskonzepten

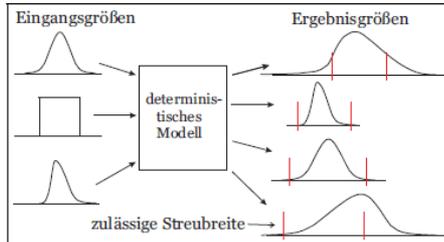


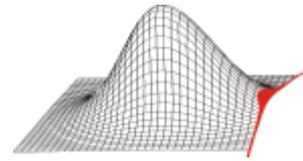
n - Einzelrechnungen

- Versagenswahrscheinlichkeiten
- Sensitivitäten
 - Systemverhalten ableiten
- System verbessern
 - Robustheit
 - stochastisch

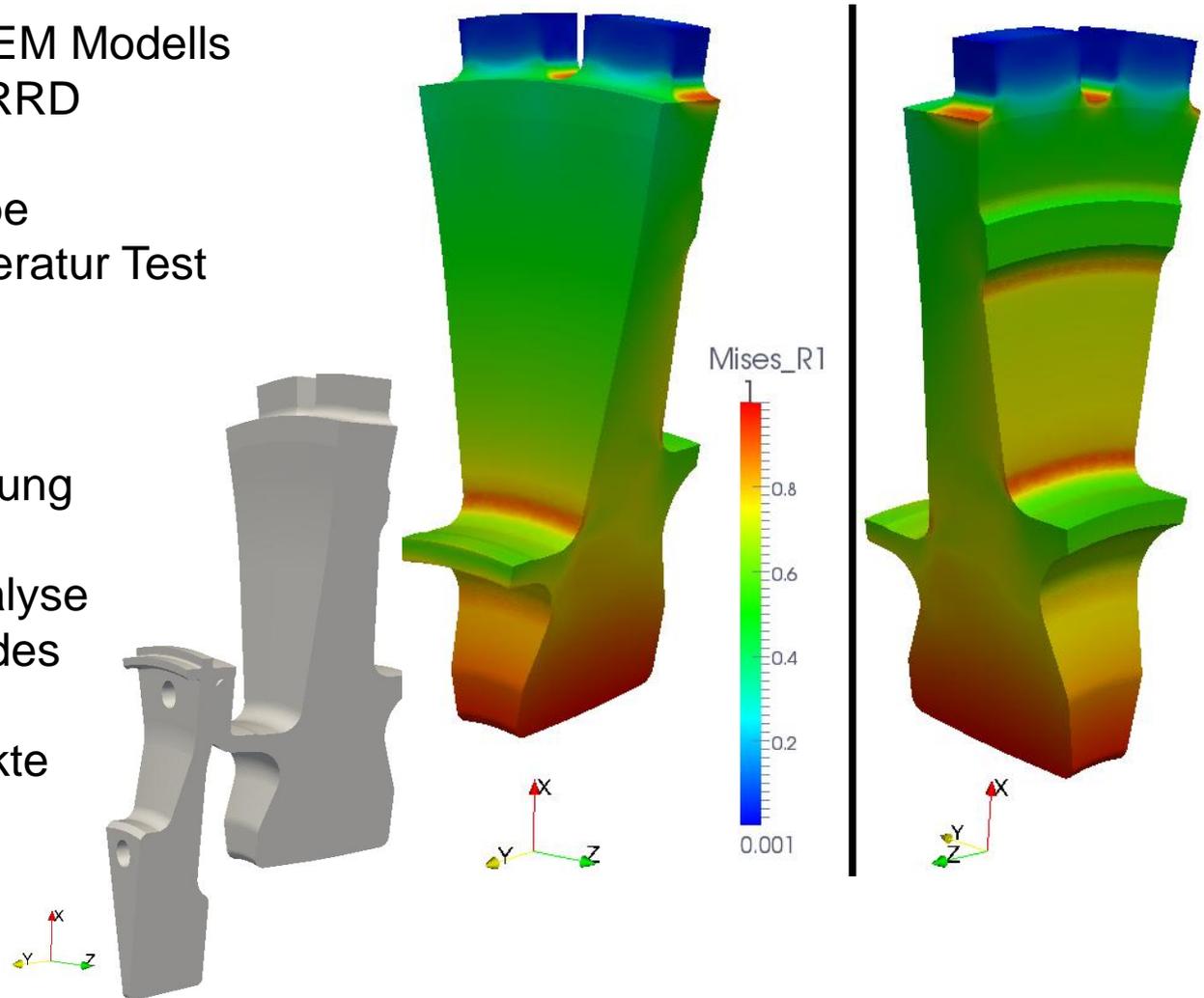


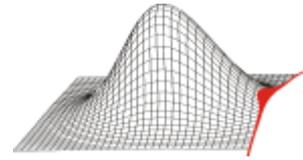
- Min, Max – Werte
- Standardabweichung
- Mittelwert
- Korrelationskoeffizienten
- COI



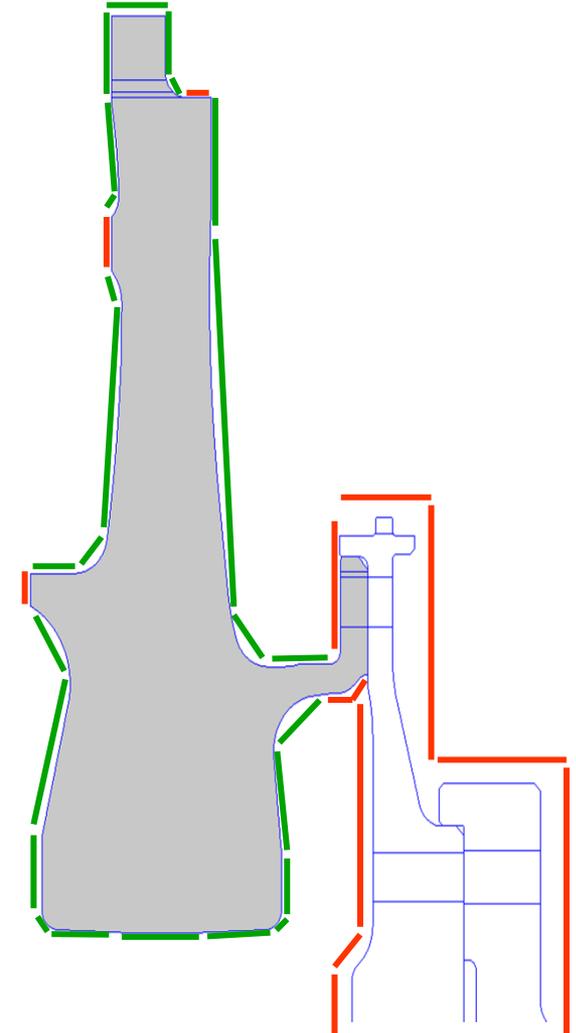
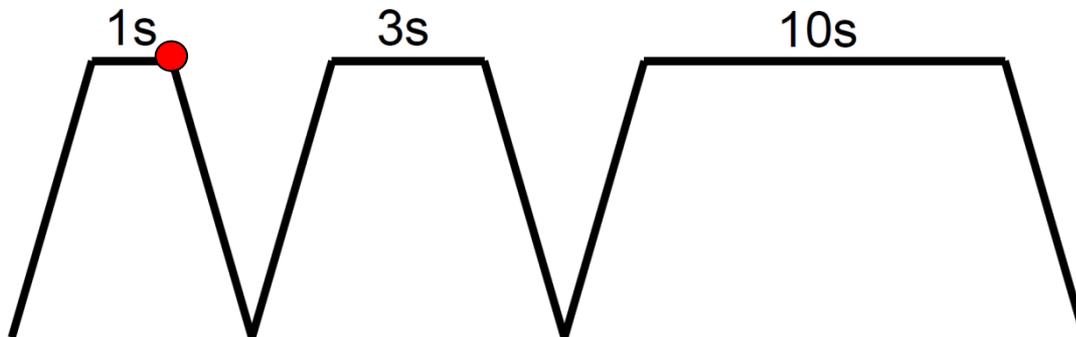


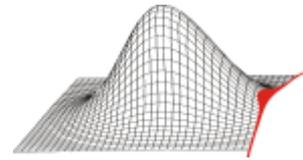
- Bereitstellung eines FEM Modells vom Industriepartner RRD
 - Schleudertestscheibe
 - Test Feature: Nabe
 - Isothermer Hochtemperatur Test
 - Material A718+
-
- RRD Solver SC03
 - Zyklische Beanspruchung
 - Arkwright Zyklen
 - Plastische Strukturanalyse
 - Integrierte Dummyblades
 - 20° Sektormodell
 - ~ 250 000 Knotenpunkte
 - Auswertung ohne Antriebsscheibe



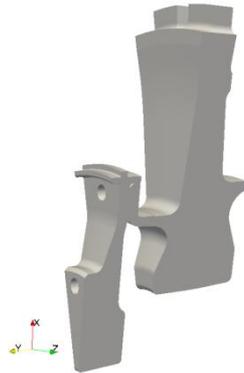


- Probabilistisches Modell
 - Eingangsgrößen
 - 21 Parameter - Winkel, Radien, Abstände
 - Große Variationen
 - Ergebnisgrößen
 - Mises Spannung erster Arkwright - Zyklus
 - Monte Carlo Simulation mit Descriptive Sampling
 - 50 deterministische Rechnungen





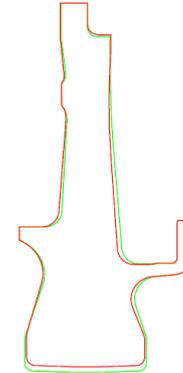
**Geometrie in
CAD NX6**



Parameterdatei

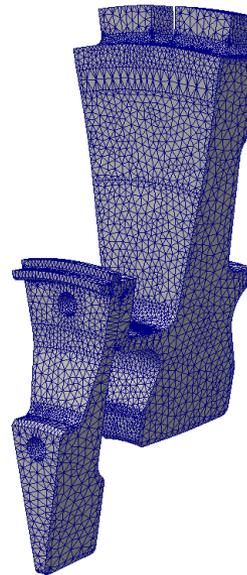
```

[degrees]a1_BoreAng_AngFront=2
[degrees]a2_BoreAng_AngRear=2
[degrees]a3_DiaCobRim_DiaGlAng=8
[degrees]a4_DiaCobRim_DiaOrAng=0
[degrees]a5_RimSlot_Angle=4
[mm]a6_Bore_Rad=52.5
[mm]a7_BoreAng_BIFront=4
[mm]a8_BoreAng_BIRear=4
[mm]a9_BoreAng_FlatOff=0
[mm]a10_BoreAng_FlatW=12
[mm]a11_DiaCobRim_CobCIOff=0.05
[mm]a12_DiaCobRim_CobHFront=76.6
[mm]a13_DiaCobRim_CobHRear=68
[mm]a14_DiaCobRim_CobW=58
[mm]a15_DiaCobRim_DiaNeCLOff=1
[mm]a16_DiaCobRim_DiaNeW=20
[mm]a17_DiaCobRim_RimRad=232.5
[mm]a18_DiaCobRim_RimW=24
[mm]a19_RimSlot_Height=15.85
[mm]a20_RimSlot_Thickness=13
[mm]a21_RimSlot_Width=12.650
    
```



Export

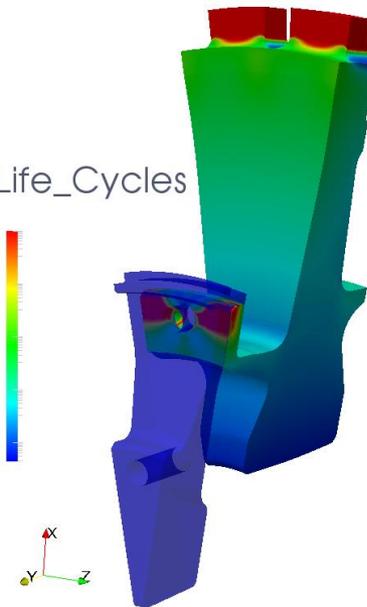
Neu-Vernetzung

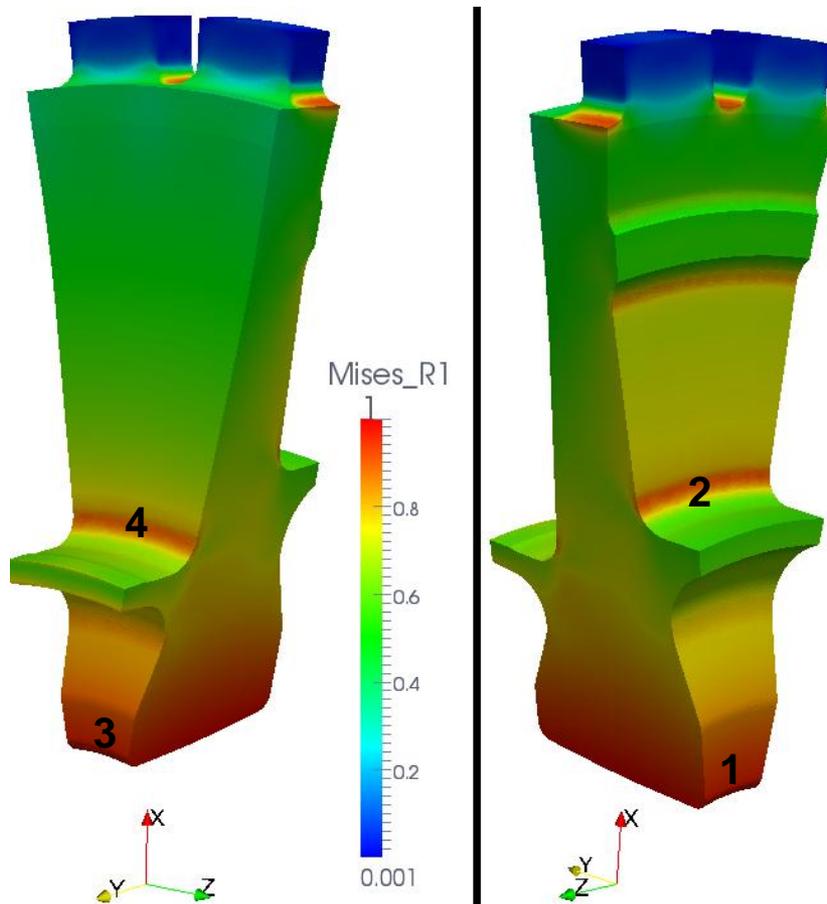
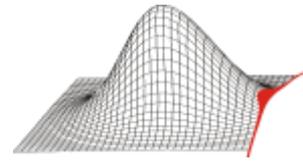


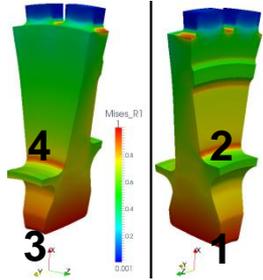
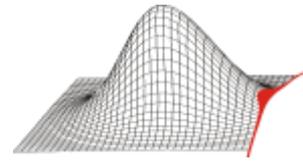
FEM Berechnung

**Lebensdauerberechnung –
Ergebnisgrößen für jeden Knoten**

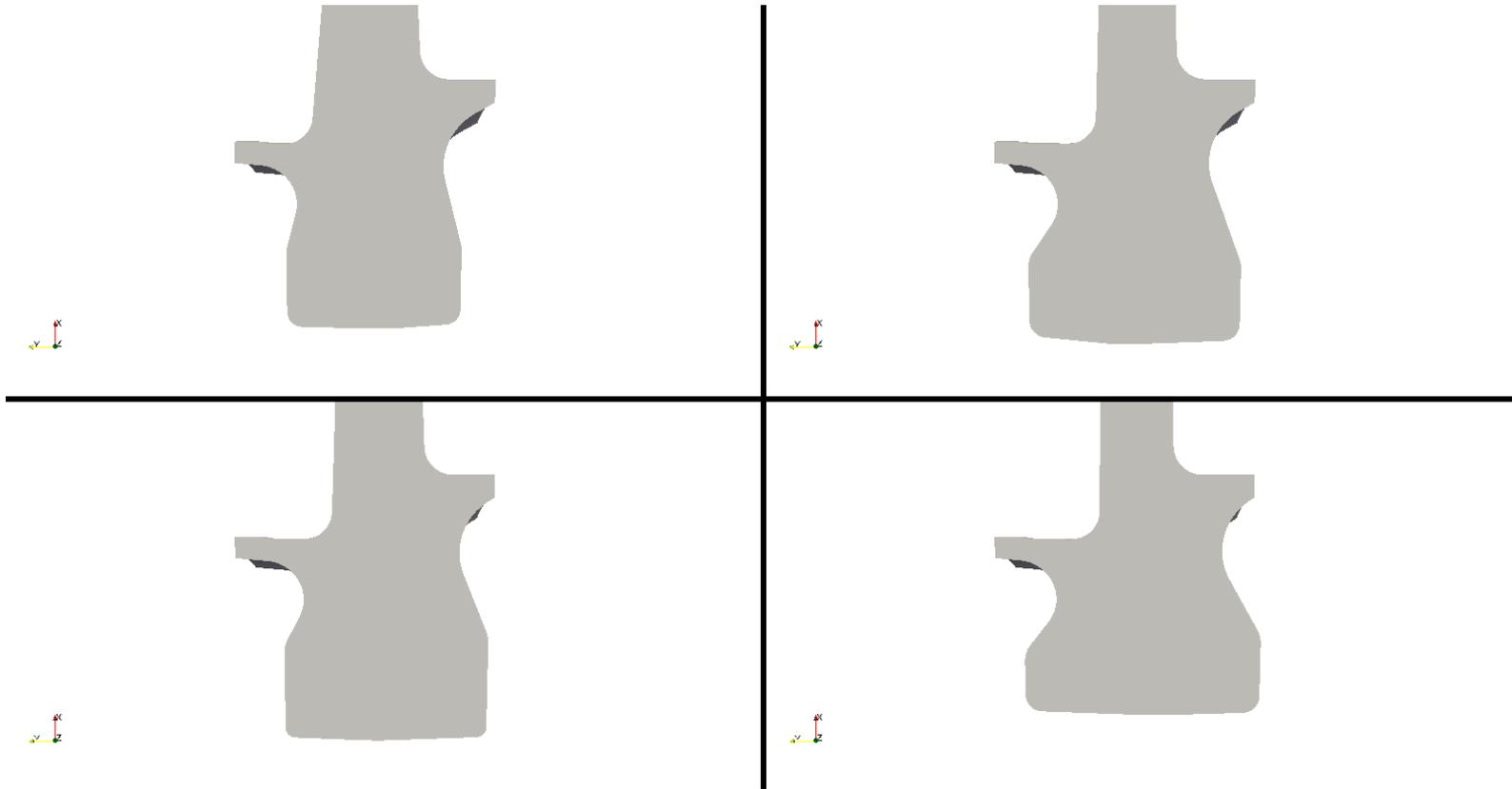
Life_Cycles

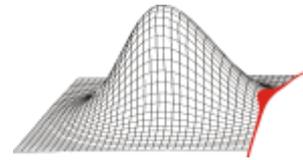




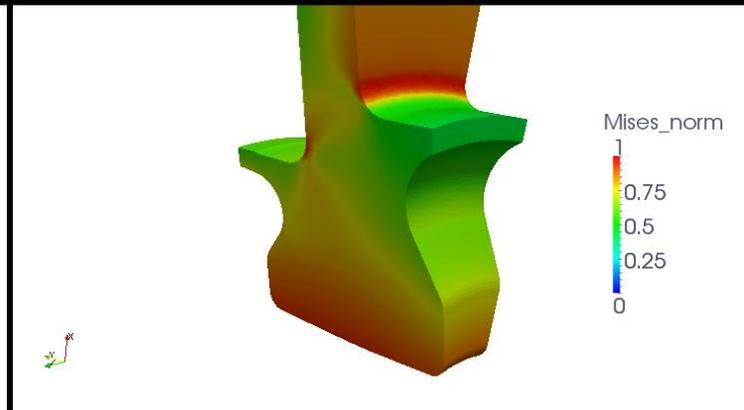
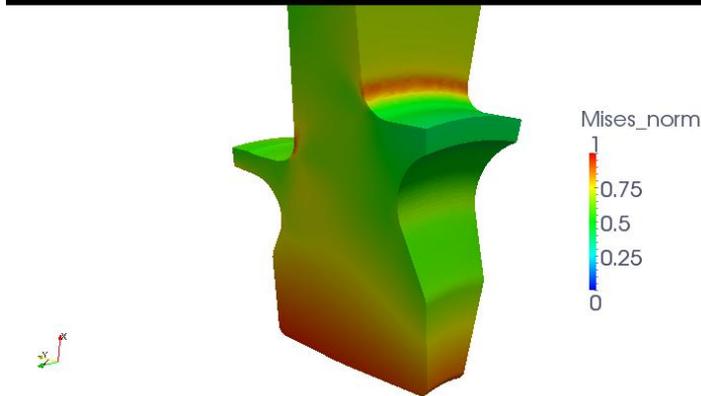
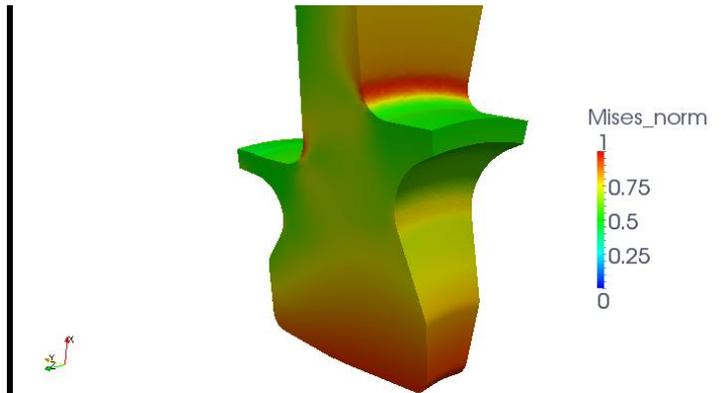
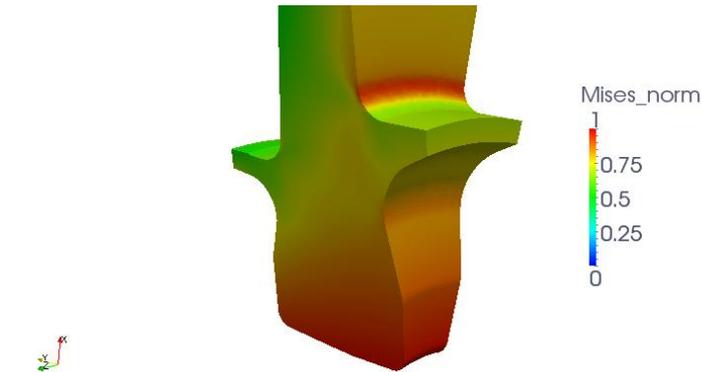
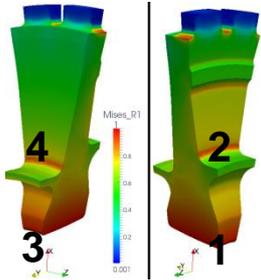


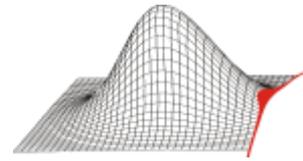
- 4 Beispiel Geometrien aus 50 FEM – Berechnungen



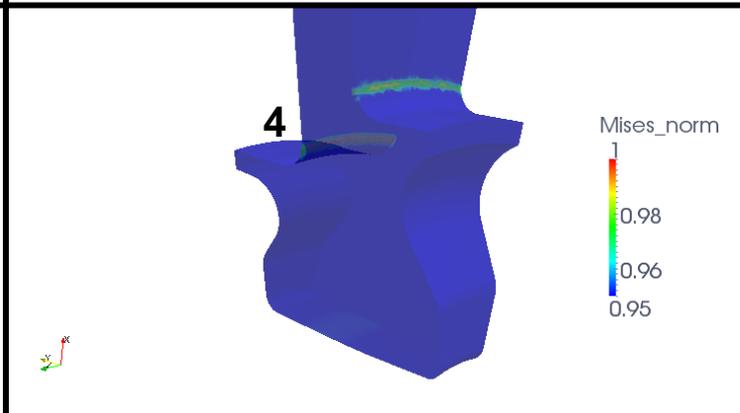
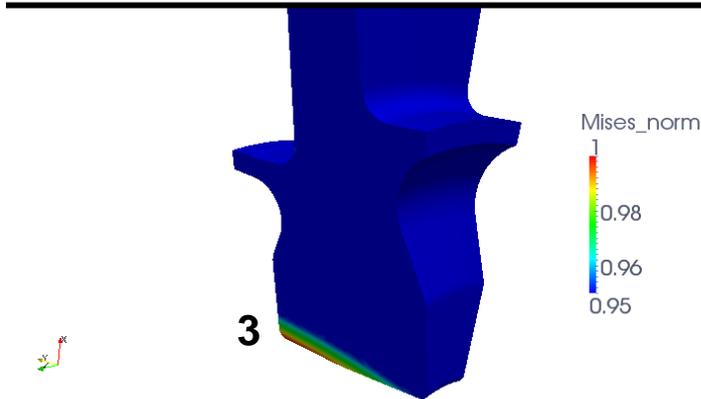
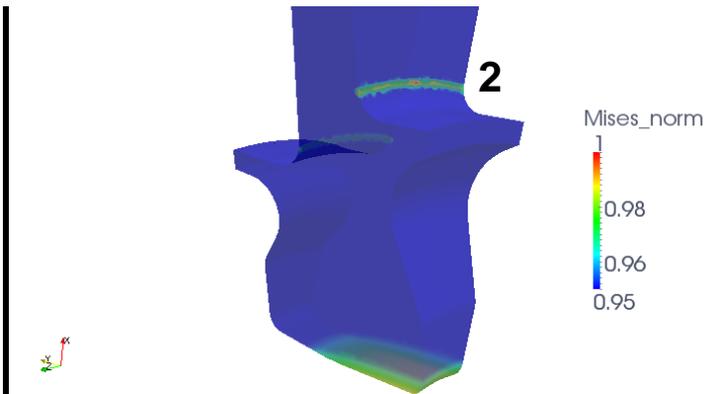
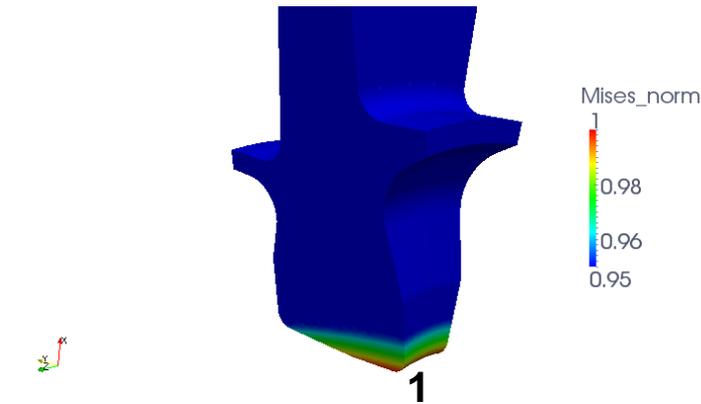
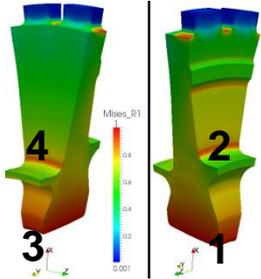


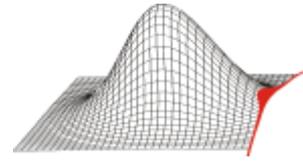
- 4 Beispiel Geometrien aus 50 FEM – Berechnungen



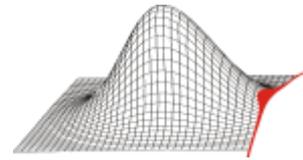


- 4 Beispiel Geometrien aus 50 FEM – Berechnungen

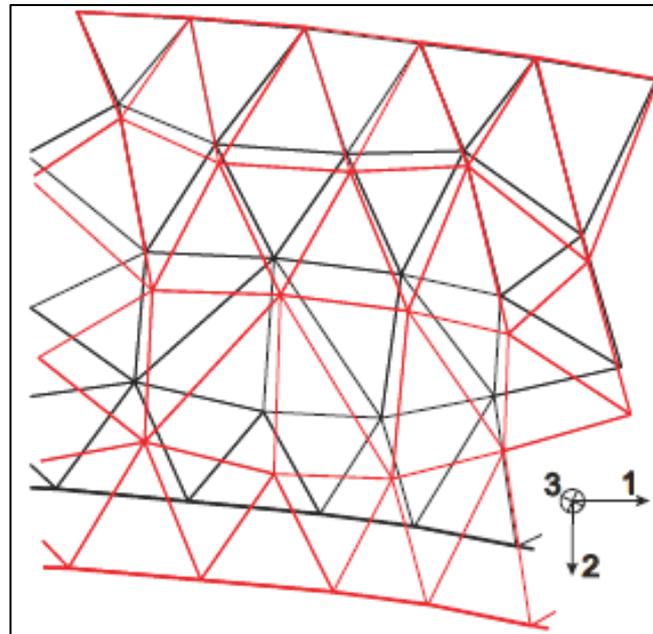


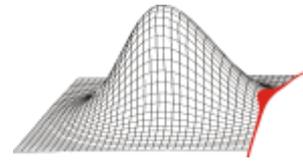


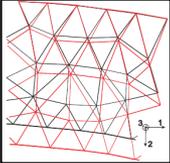
- **Bedingungen:**
 - Neuvernetzung für gute numerische Ergebnisse
 - Verlust jeglicher Knotenzuordnungen zwischen den einzelnen FEM – Berechnungen
 - verschiedene Anzahl von Knoten
 - verschiedene Positionen der Maximalen Mises – Spannung
 - Verschiedene Sensitivitäten an der jeweiligen Position
- **Ziel:**
 - Verbindung zwischen den einzelnen FEM- Berechnungen
 - Übertragung aller Einzelrechnungen auf eine Basisgeometrie
 - Rückführung aller det. Daten auf statistische Größen
 - Betrachtung aller Einzelrechnungen wird überflüssig
 - statistische Auswertung an topologisch identischen Orten
 - Feststellung der Sensitivitäten für das gesamte Bauteil
 - Umsetzung großer Variationen

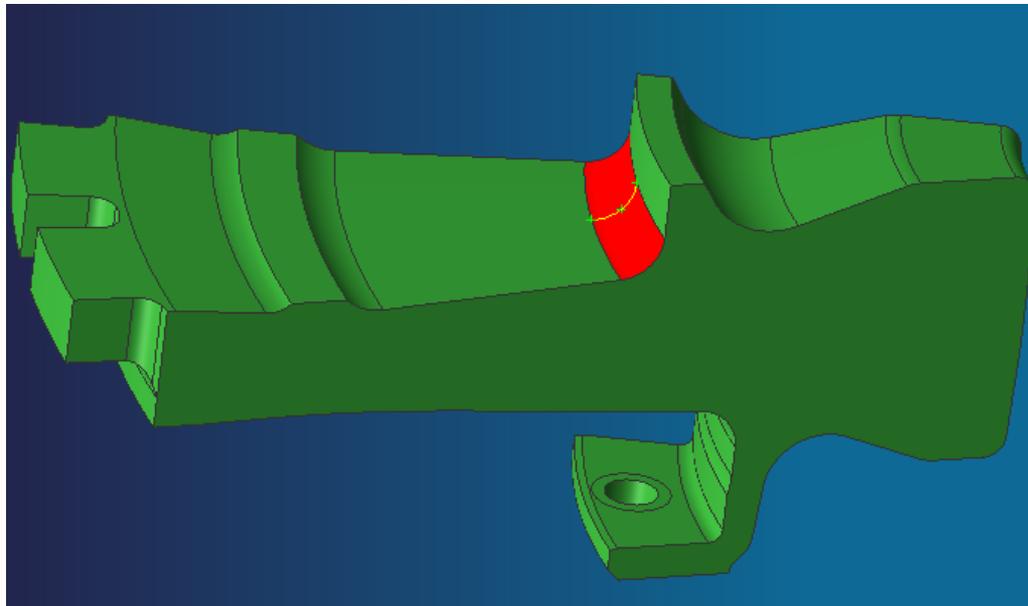


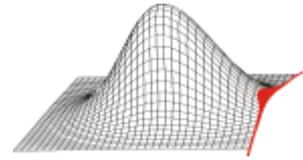
Methode	Bild	Vorteile	Nachteile
Morphing		<ul style="list-style-type: none"> • Knotenbezeichnungen gleich • Ein Netz • Erfassung komplettes Bauteil 	<ul style="list-style-type: none"> • Automatisierte Umsetzung schwierig • Netzqualität • Kleine Variationen

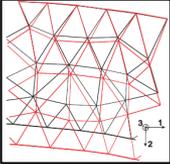
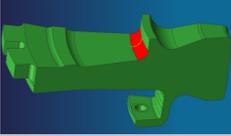


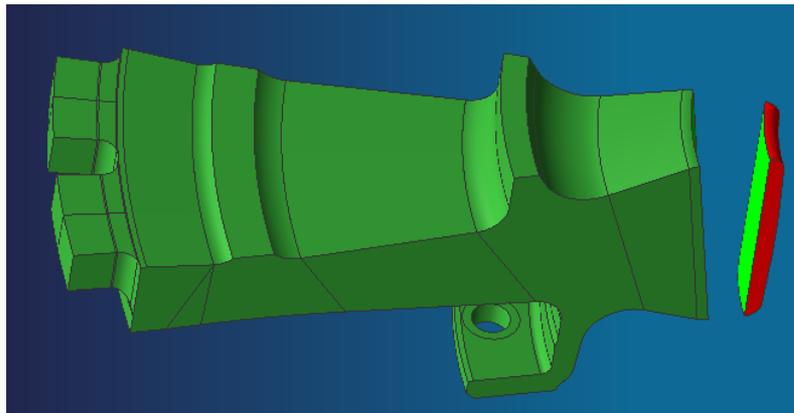


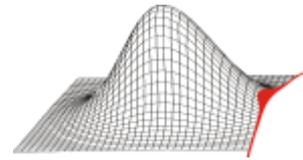
Methode	Bild	Vorteile	Nachteile
Morphing		<ul style="list-style-type: none"> • Knotenbezeichnungen gleich • Ein Netz • Erfassung komplettes Bauteil 	<ul style="list-style-type: none"> • Automatisierte Umsetzung schwierig • Netzqualität • Kleine Variationen
Topologisch gleicher Punkt		<ul style="list-style-type: none"> • Einfache Umsetzung für einen Punkt • Unabhängig vom Berechnungsnetz 	<ul style="list-style-type: none"> • Auswertungsbereich stark eingeschränkt

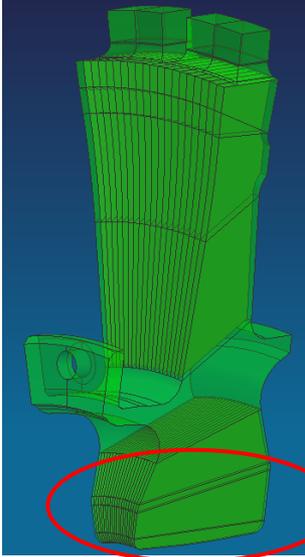


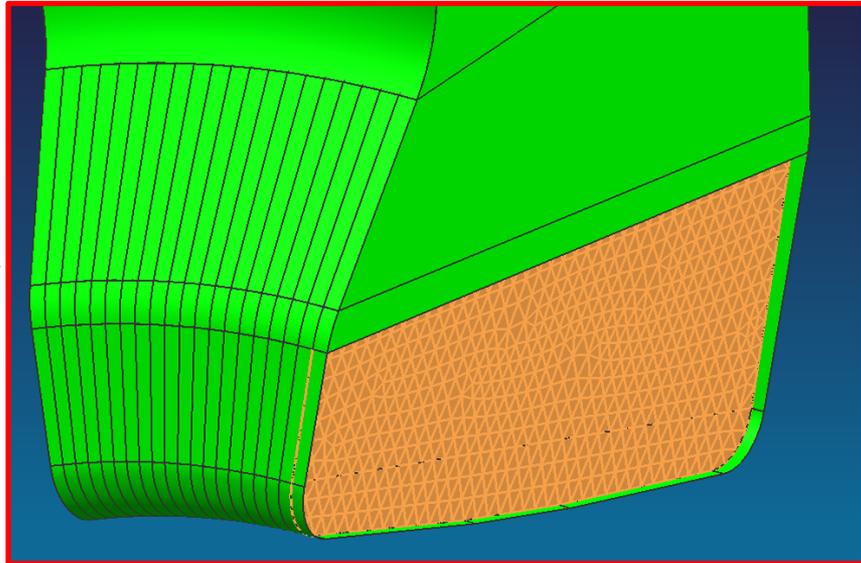


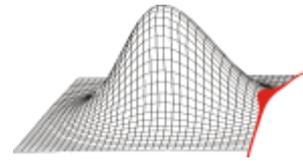
Methoden	Bild	Vorteile	Nachteile
Morphing		<ul style="list-style-type: none"> • Knotenbezeichnungen gleich • Ein Netz • Erfassung komplettes Bauteil 	<ul style="list-style-type: none"> • Automatisierte Umsetzung schwierig • Netzqualität • Kleine Variationen
Topologisch gleicher Punkt		<ul style="list-style-type: none"> • Einfache Umsetzung für einen Punkt • Unabhängig vom Berechnungsnetz 	<ul style="list-style-type: none"> • Auswertungsbereich stark eingeschränkt
Topologisch gleiche Zone		<ul style="list-style-type: none"> • Erfassung komplettes Bauteil • Unabhängig vom Berechnungsnetz • Anwendung auf Volumen oder Fläche 	<ul style="list-style-type: none"> • Auflösung - Übersehen interessanter Bereiche

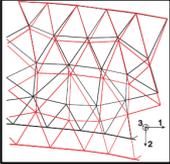
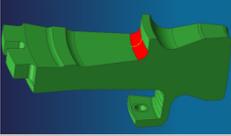
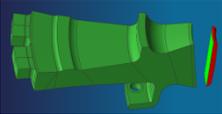
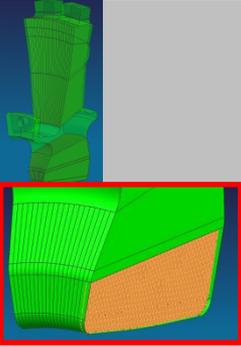


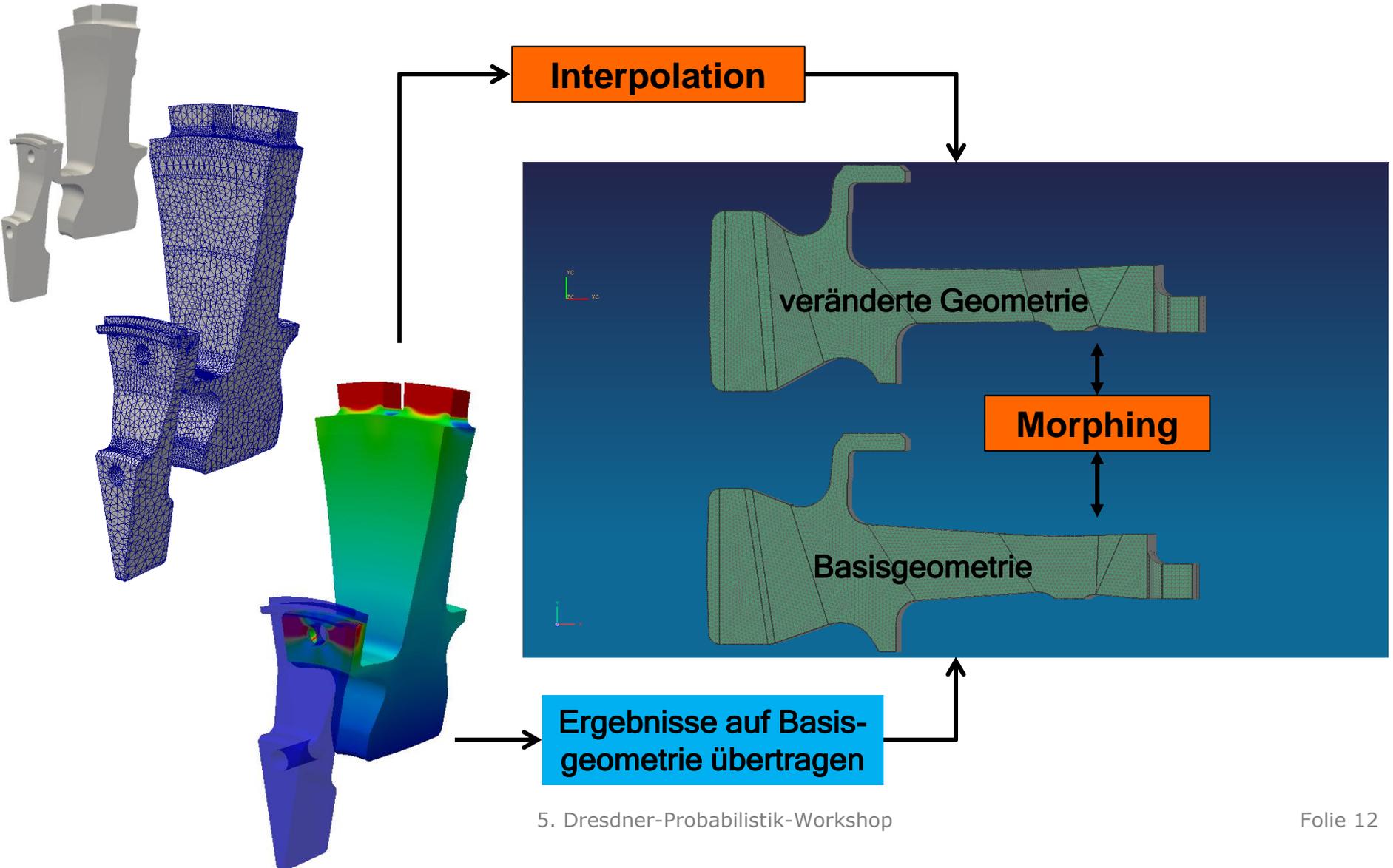
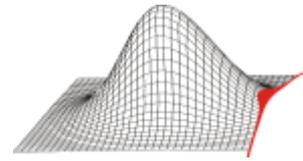


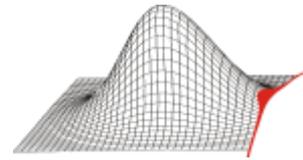
Methode	Bild	Vorteile	Nachteile
<p>Auswertungs Netz</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Unabhängig vom Berechnungsnetz • große Geometrievariationen möglich • Erfassung komplettes Bauteil quasi 3D • Auflösung beliebig fein 	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitaufwand - Zerlegung des Bauteils in topologisch gleiche Submodelle und Schnitte • Interpolation





Methode	Bild	Vorteile	Nachteile
Morphing		<ul style="list-style-type: none"> • Knotenbezeichnungen gleich • Ein Netz • Erfassung komplettes Bauteil 	<ul style="list-style-type: none"> • Automatisierte Umsetzung schwierig • Netzqualität • Kleine Variationen
Topologisch gleicher Punkt		<ul style="list-style-type: none"> • Einfache Umsetzung für einen Punkt • Unabhängig vom Berechnungsnetz 	<ul style="list-style-type: none"> • Auswertungsbereich stark eingeschränkt
Topologisch gleiche Zone		<ul style="list-style-type: none"> • Erfassung komplettes Bauteil • Unabhängig vom Berechnungsnetz • Anwendung auf Volumen oder Fläche 	<ul style="list-style-type: none"> • Auflösung - Übersehen interessanter Bereiche
Auswertungs Netz		<ul style="list-style-type: none"> • Unabhängig vom Berechnungsnetz • große Geometrievariationen möglich • Erfassung komplettes Bauteil quasi 3D • Auflösung beliebig fein 	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitaufwand - Zerlegung des Bauteils in topologisch gleiche Submodelle und Schnitte • Interpolation





Anforderungen an das Auswertungsnetz

- Mindestens gleiche Auflösung wie das Berechnungsnetz

Eckdaten Auswertungsnetz

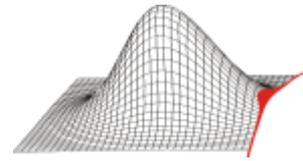
- 350 Flächen mit insgesamt 1594586 Knoten

Interpolation

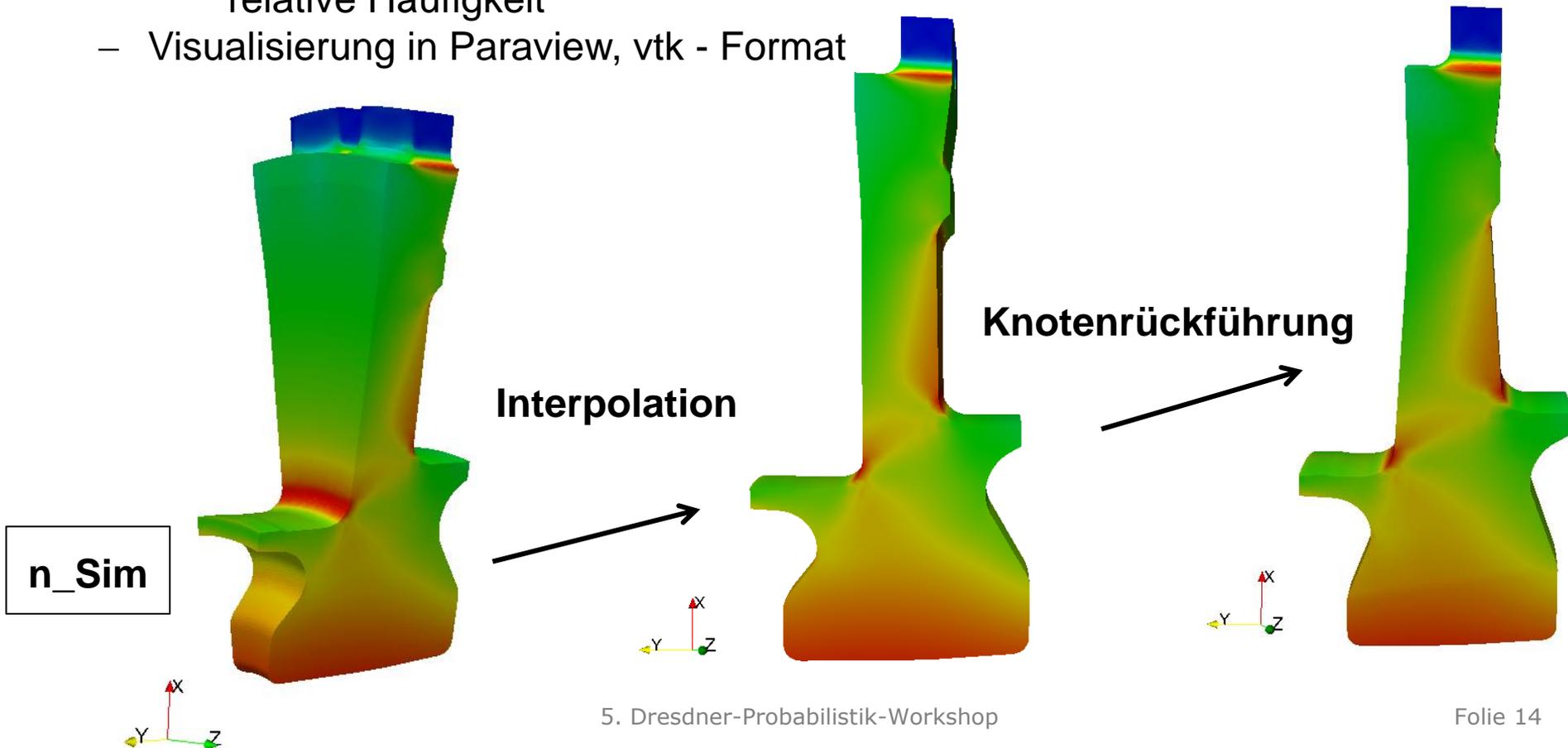
- von der MTU Aero Engine bereitgestellter Interpolationsalgorithmus
- C++, Fortran Code
- Multicore Verwendung möglich

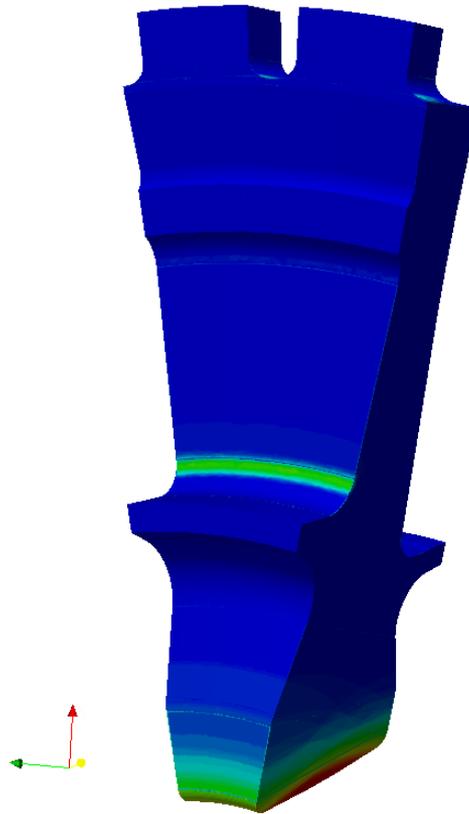
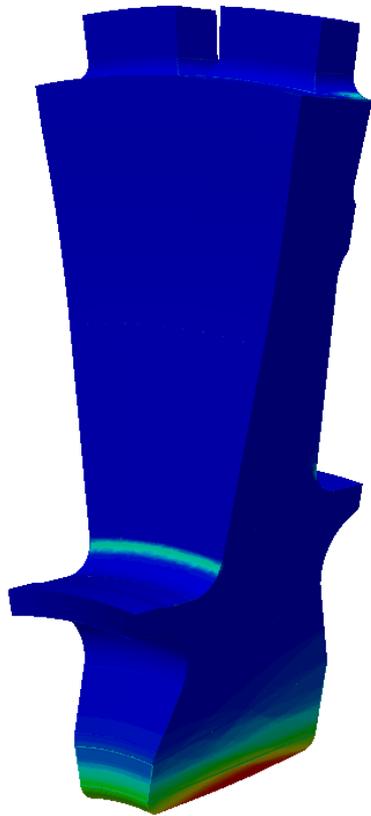
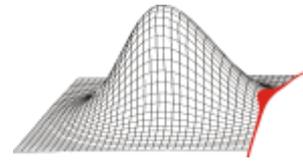
Morphing

- 2D – Morphing Algorithmus in UG NX6
- Automatisierung gegeben durch NXOpen Schnittstelle
- Umsetzung in C++



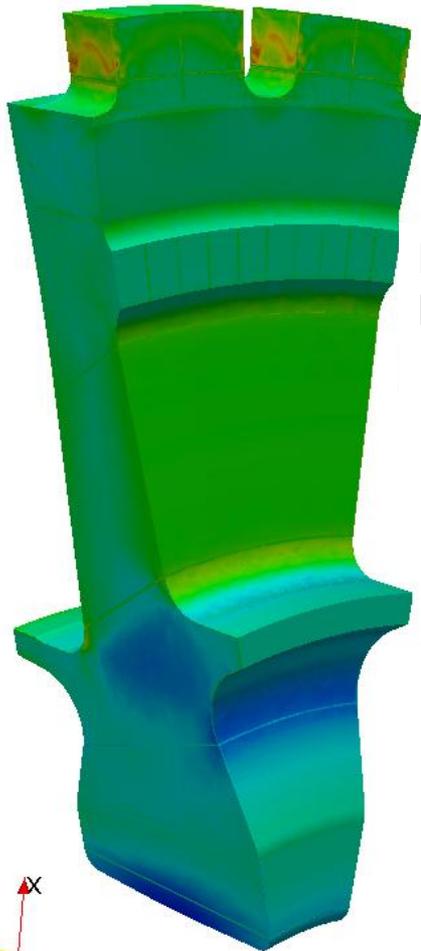
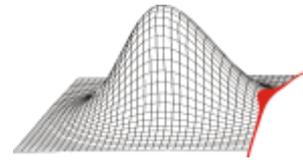
- n_{Sim} deterministische Rechnungen $\rightarrow n_{\text{Sim}}$ ASCII Dateien
- Statistische Auswertung mit n_{Sim} Werten am selben Knoten \rightarrow C++ Code
 - Mittelwert, Standardabweichung, Korrelationen, Min, Max, Quantile, relative Häufigkeit
 - Visualisierung in Paraview, vtk - Format



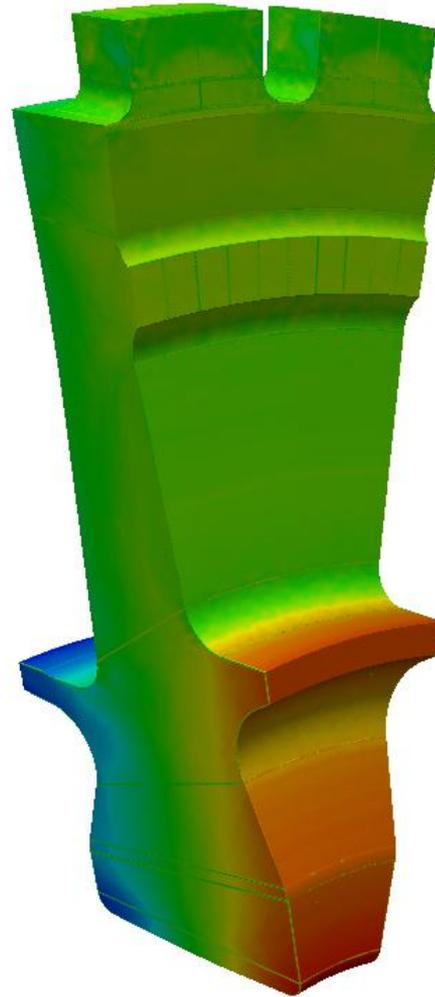
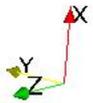
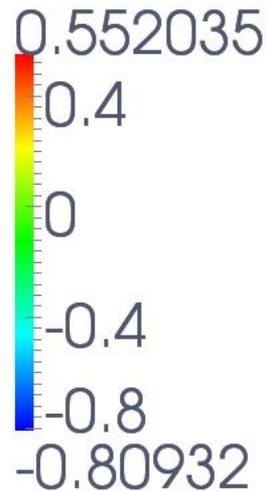


relative Häufigkeit
Mises > xxx MPa

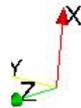
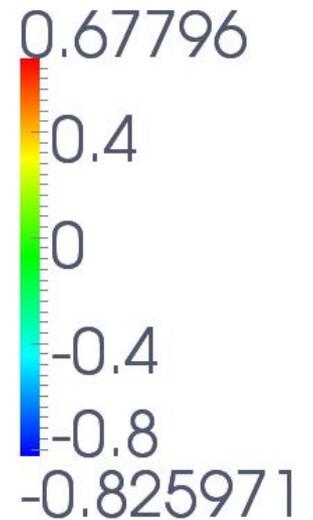


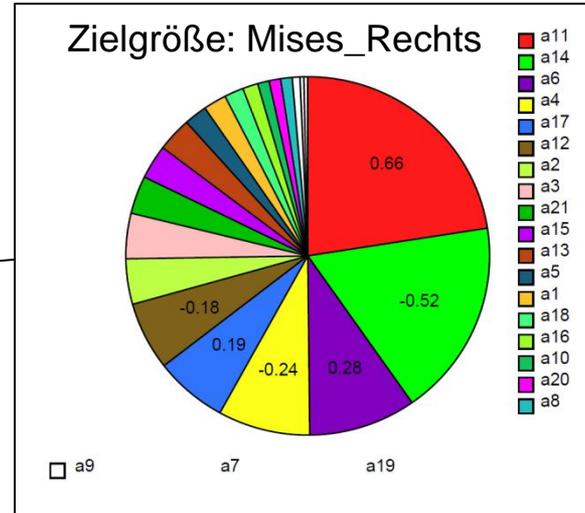
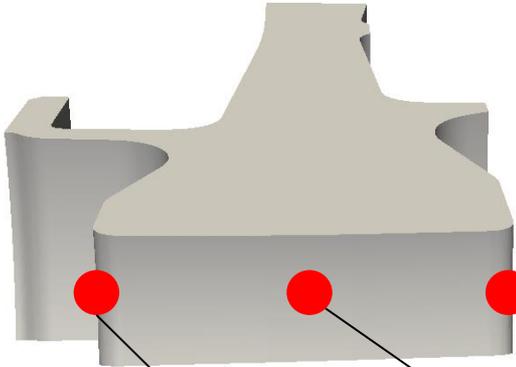
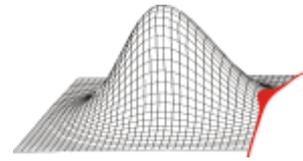


Korrelation
Mises – Parameter a14

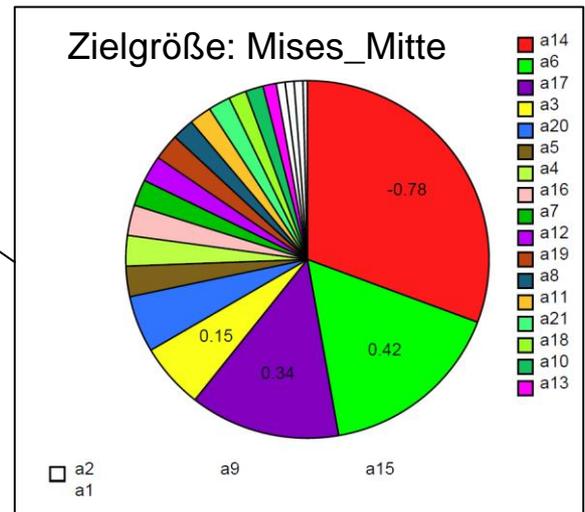


Korrelation
Mises – Parameter a11

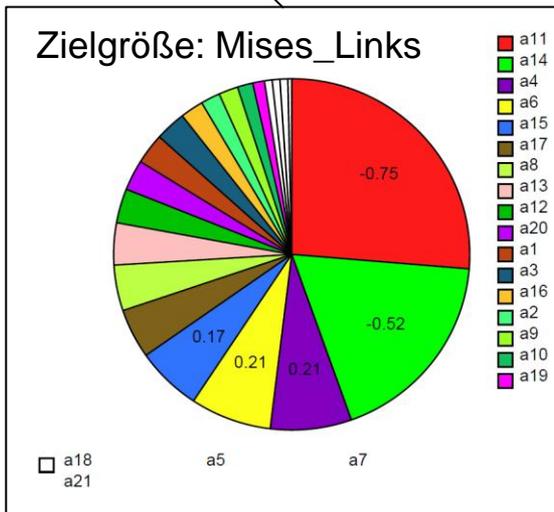




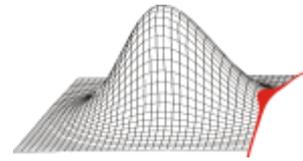
A11: 0.66
A14: -0.52



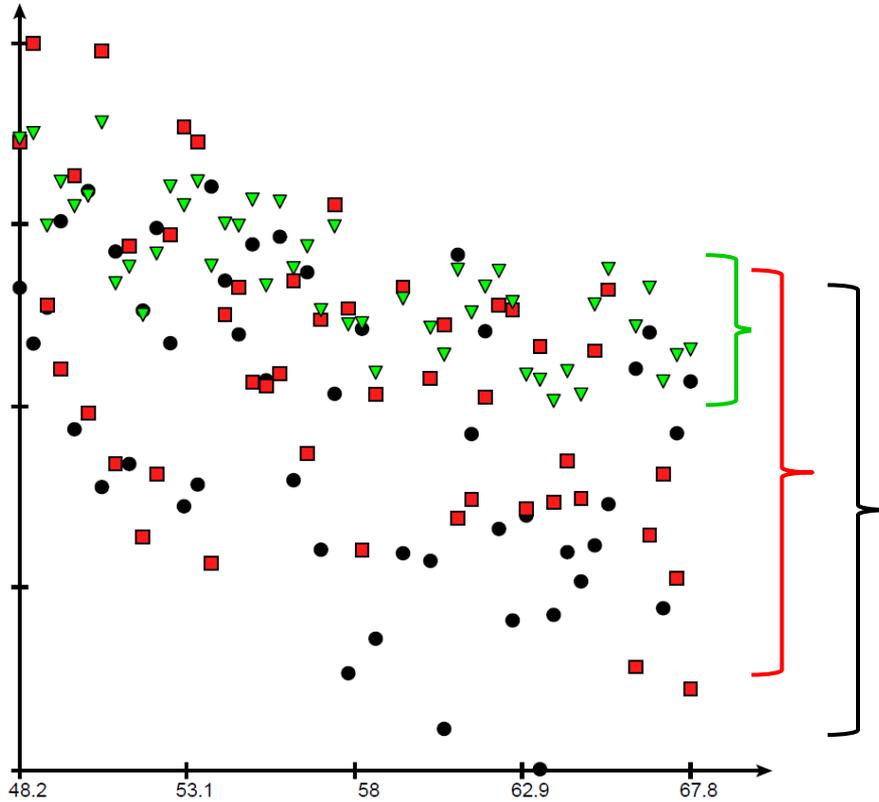
A14: -0.78
A6: 0.42



A11: -0.75
A14: -0.52



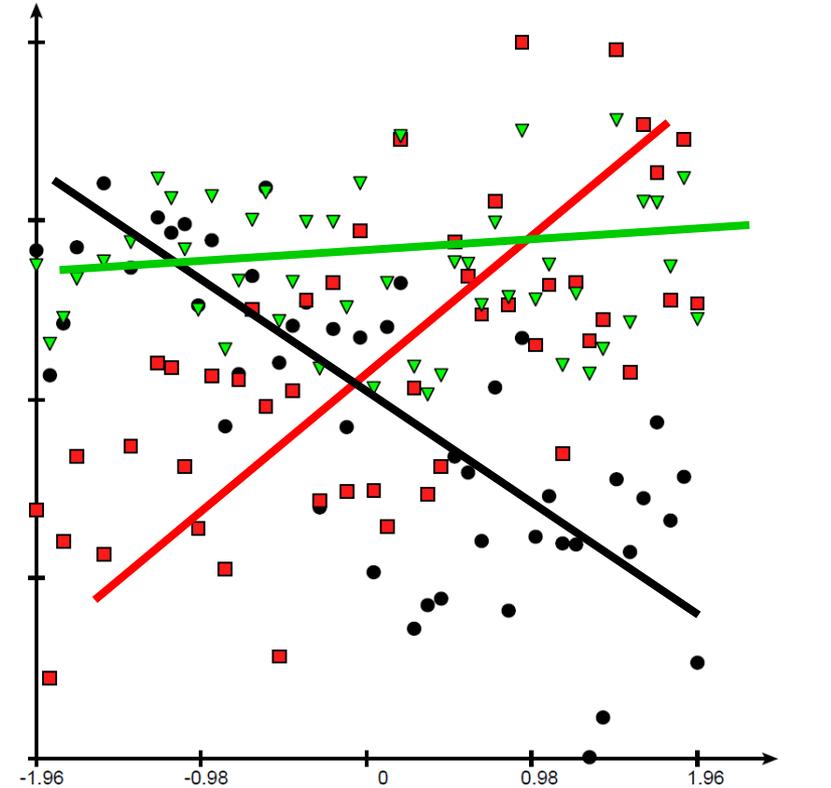
Mises [MPa]



- a14 - Mises Links
- ▼ a14 - Mises Mitte
- a14 - Mises Rechts

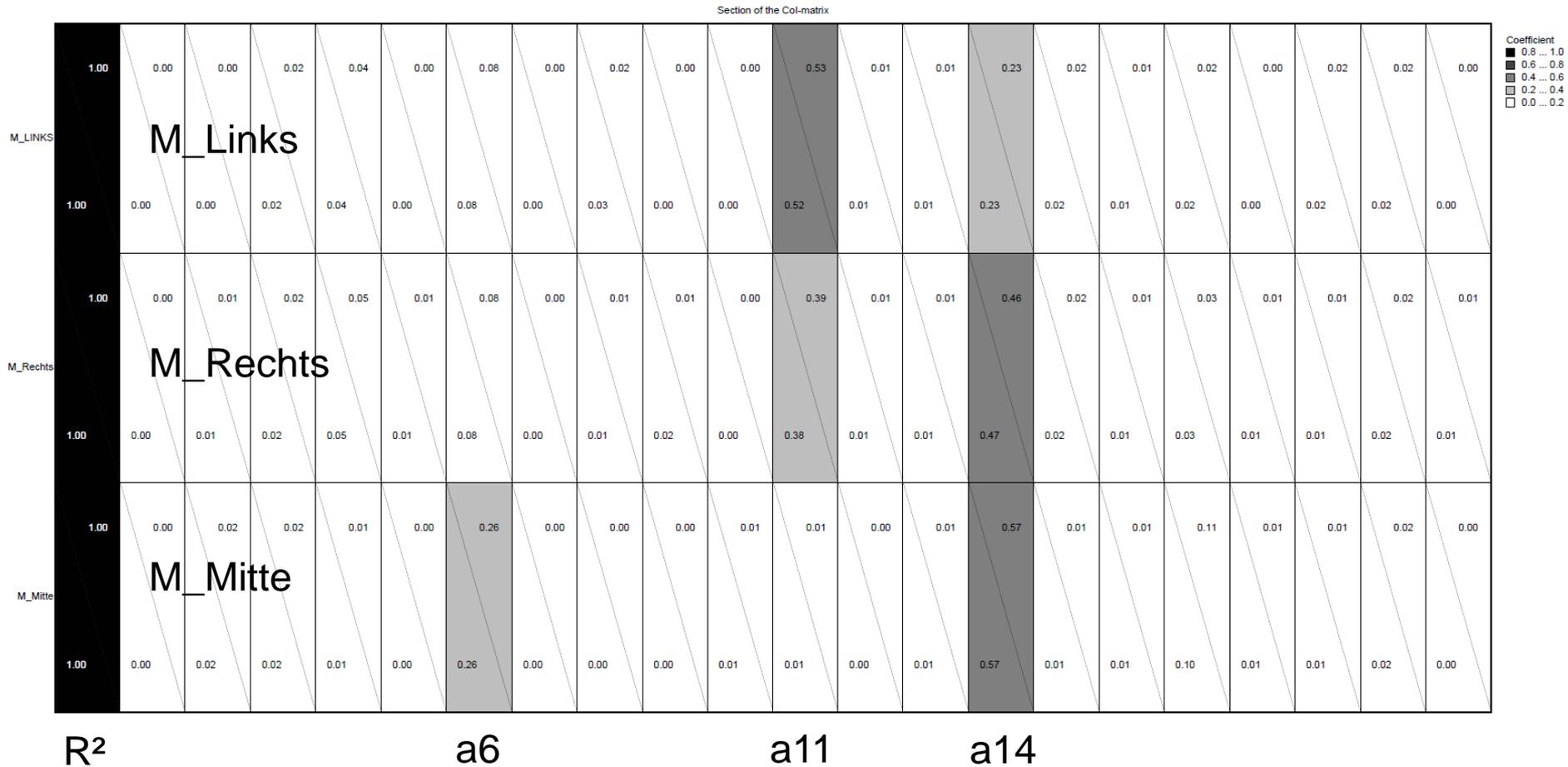
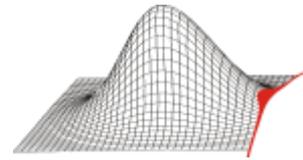
a14 [mm]

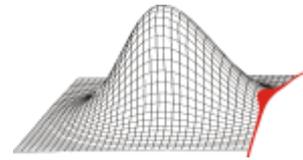
Mises [MPa]



- a11 - Mises Links
- ▼ a11 - Mises Mitte
- a11 - Mises Rechts

a11 [mm]



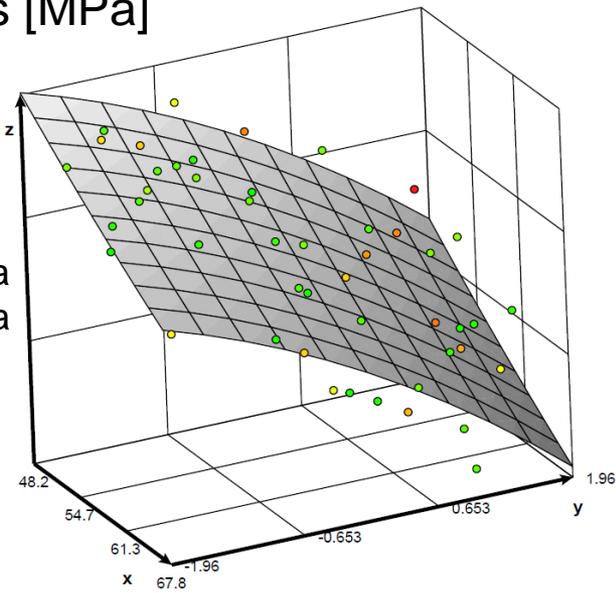


Mises [MPa]

Mises [MPa]

Delta
155 MPa

Delta
70 MPa



Color information:
Absolute error

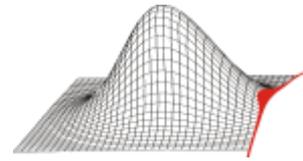
- 3.49 ... 3.88
- 3.1 ... 3.49
- 2.71 ... 3.1
- 2.33 ... 2.71
- 1.94 ... 2.33
- 1.55 ... 1.94
- 1.16 ... 1.55
- 0.775 ... 1.16
- 0.388 ... 0.775
- 0 ... 0.388

Color information:
Absolute error

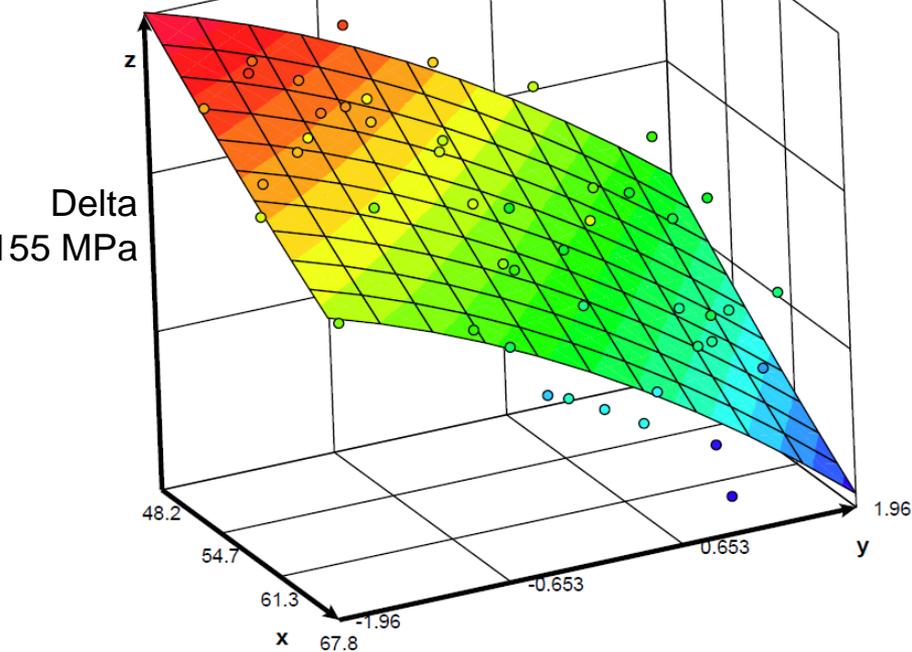
- 1.79 ... 1.98
- 1.59 ... 1.79
- 1.39 ... 1.59
- 1.19 ... 1.39
- 0.992 ... 1.19
- 0.794 ... 0.992
- 0.595 ... 0.794
- 0.397 ... 0.595
- 0.198 ... 0.397
- 0 ... 0.198

a14 – a11 – Mises_Links

a14 – a11 – Mises_Mitte

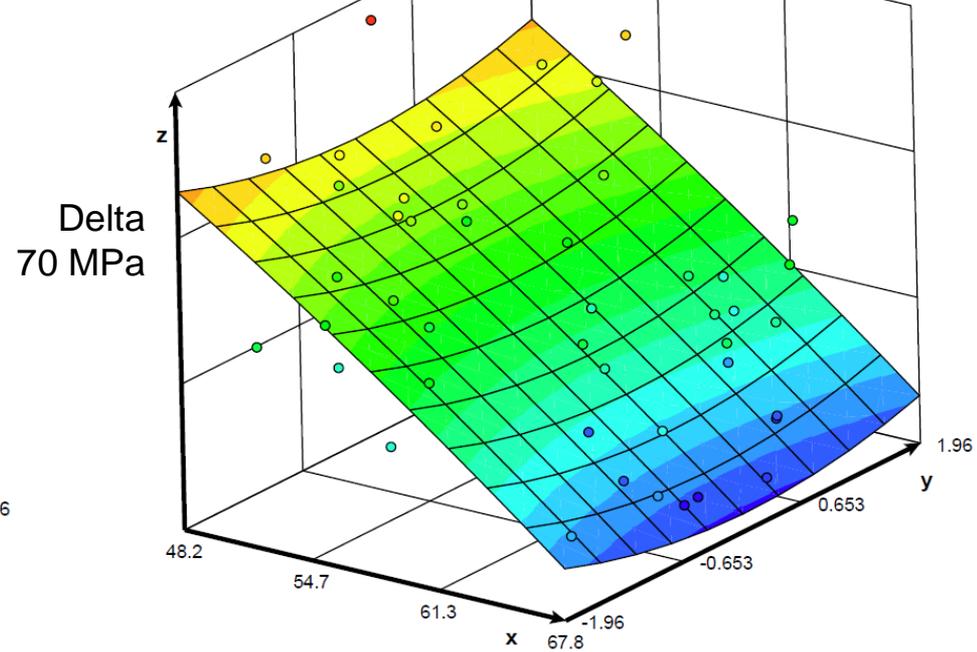


Mises [MPa]

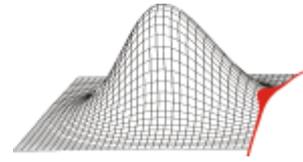


a14 – a11 – Mises_Links

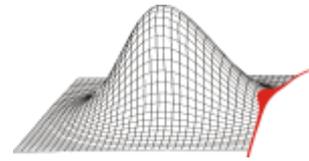
Mises [MPa]



a14 – a11 – Mises_Mitte



- Umsetzung einer Prozesskette vom CAD – Modell bis zur Lebensdaueranalyse
- Gewährleistung einer statistischen Auswertung unter Verwendung einer Neuvernetzung für die FEM-Analyse
- Beispielhafte Analyse der Sensitivitäten an der Nabe
 - Auswertungsnetz – statistische Auswertung
 - Prosi - Post
- Schrittweise Optimierung und Robustheitsanalyse der Scheibe unter Verwendung von Antwortflächen
- Sensitivitätsanalyse komplettes Bauteil



Literatur

- [1] Weiss, T.; Voigt, M.; Vogeler, K.; Mücke, R.; Schlums, H.; Becker, K.-H.: Probabilistic Finite-Element Analyses on Turbine Blades. ASME Turbo Expo, GT2009-59877, Orlando, Florida, 2009

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !