CFX Berlin

CFX Berlin Software GmbH
Simulationskompetenz aus Berlin

CFX Berlin Software GmbH

Simulationskompetenz aus Berlin

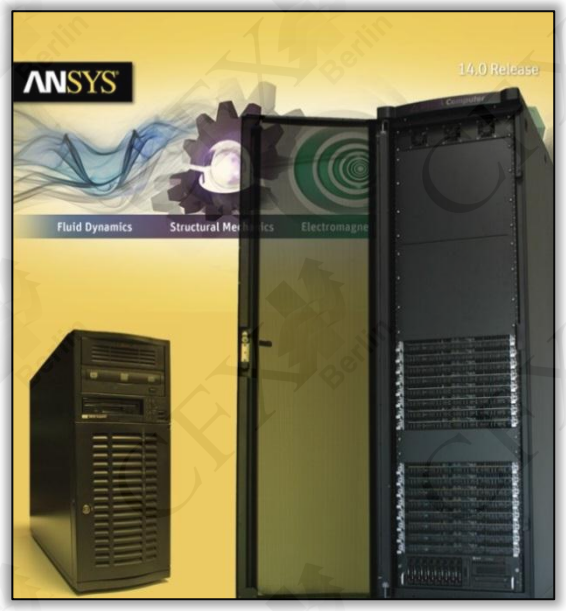
- CFX Berlin bietet seit 1997 als Partner von ANSYS, Inc. und CADFEM Lösungen und Simulationssoftware für:
  - Strömungsmechanik & Thermodynamik
  - Elektromagnetik
  - Strukturmechanik

- CFX Berlin-Geschäftsfelder:
  - ANSYS-Simulationssoftware
  - Berechnung & Optimierung
  - Beratung & Schulung
  - Forschung & Entwicklung

CFX Berlin Software GmbH

Überblick I

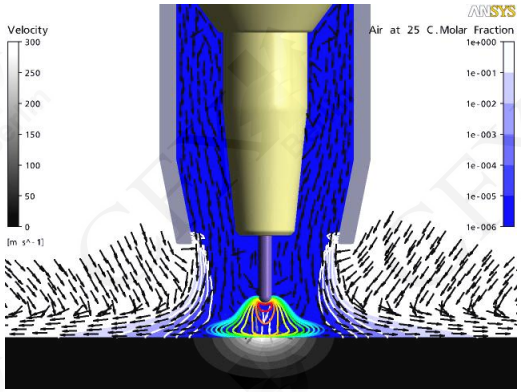
- Wie bieten Ihnen schlüsselfertige Simulationslösungen, bestehend aus:
  - ANSYS-Softwarelizenzen,
  - optimal abgestimmter Hardware,
  - individuellem Einarbeitungskonzept,
  - persönlichem Ansprechpartner für Support & Anwendungsberatung.



- Wir unterstützen Sie schon vorher mit:
  - Prozess- & Bedarfsanalyse, Lastenhefterstellung,
  - Entwicklung von optimalen Lösungen für Ihr Unternehmen,
  - Vorbereitung, Begleitung & Auswertung von Testinstallationen,
  - Erarbeitung individuell abgestimmter Schulungsmaßnahmen.

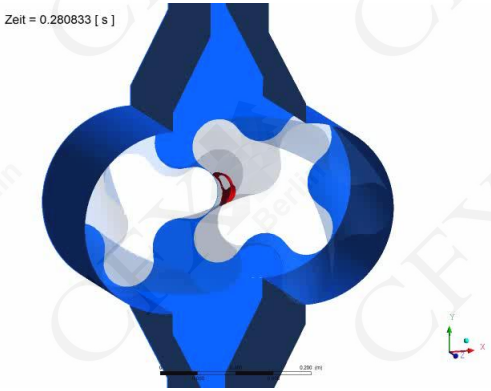
CFX Berlin Software GmbH
Überblick II

- Wir unterstützen auch im Rahmen von Dienstleistungen:
  - Simulation & Validierung mit Qualitätsgarantie
  - Auslegung & Optimierung von strömungstechnischen Maschinen und Anlagen
  - Modell- & Softwareentwicklung



Beispiel Schweißprozesssimulation: Schutzgasströmung mit Lichtbogen

- Wir machen Forschung & Entwicklung
  - öffentlich geförderte F&E-Projekte
  - industriegeförderte Auftragsforschung
  - interne Projekte

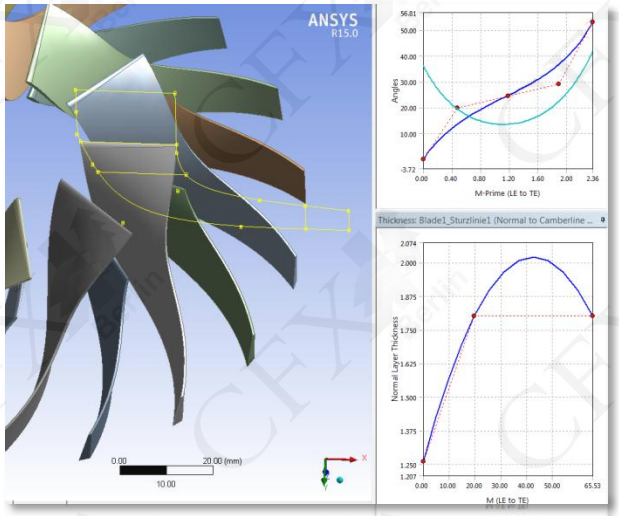


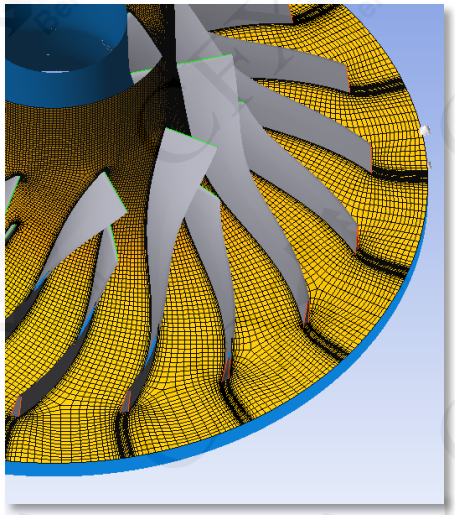
Beispiel Drehkolbenpumpe: Darstellung von Kavitation im Spalt

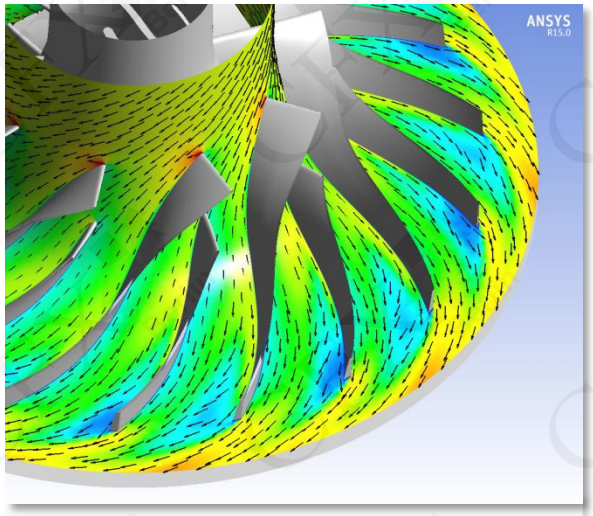
MAHLE TAKATA FES EagleBurgmann Siempelkamp LZH FIMA infineon truma

Herausforderung:

Darstellung der Arbeitsschritte für die
Auslegung und Berechnung eines Radialverdichters
mit den ANSYS TurboTools und ANSYS CFX







Aufgabenstellung

Strömungsberechnung eines Turboverdichters

- Inhalt der Arbeiten ist die „Auslegung und Berechnung eines Radialverdichters“

- Ziele dieser Arbeit sind:
  - Entwurf einer Laufradgeometrie bei vorgegebener Förderaufgabe
  - Nachrechnung des Entwurfs mittels CFD-Berechnung
  - Visualisierung des Strömungsfeldes bei verschiedenen Betriebspunkten
  - Bestimmung von Druckaufbau und Wirkungsgrad

Beispiel für ein Verdichterlaufrad: KFZ-Turbolader von Bosch Mahle TurboSystems

Quelle: Internetauftritt der Firma

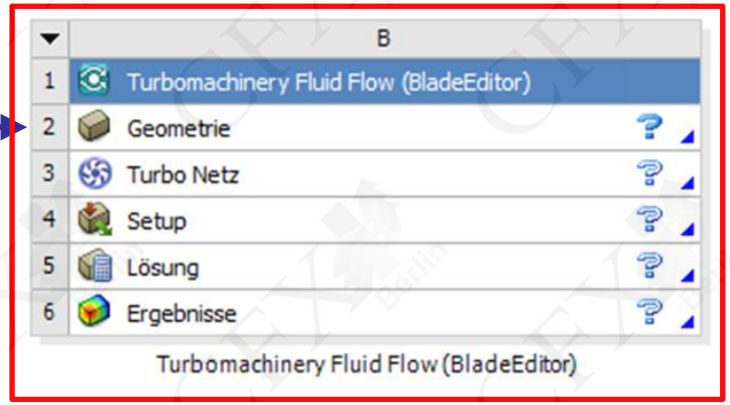
Vorgehensweise

Strömungsberechnung eines Turboverdichters

- ANSYS Workbench-Simulationsumgebung
  - Auslegung und Berechnung in einheitlicher Oberfläche
  - Integrierte Verwaltung der Auslegungs- und Simulationsdaten
  - Zugriff auf externe Rechenressource (Cluster)
  - Parametrisierung für Designstudien und Kennlinienberechnung

Auslegung

Nachrechnung & parametrisierte Optimierung



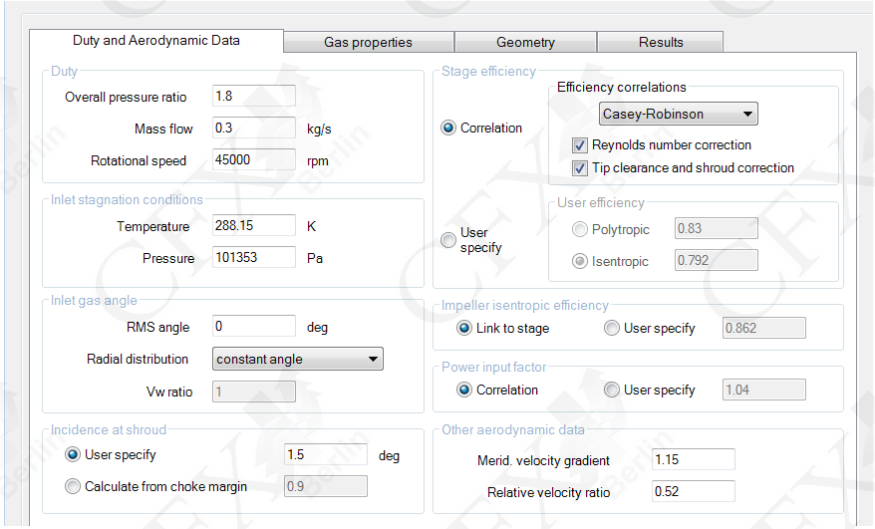
Verdichterauslegung
Rahmenbedingungen

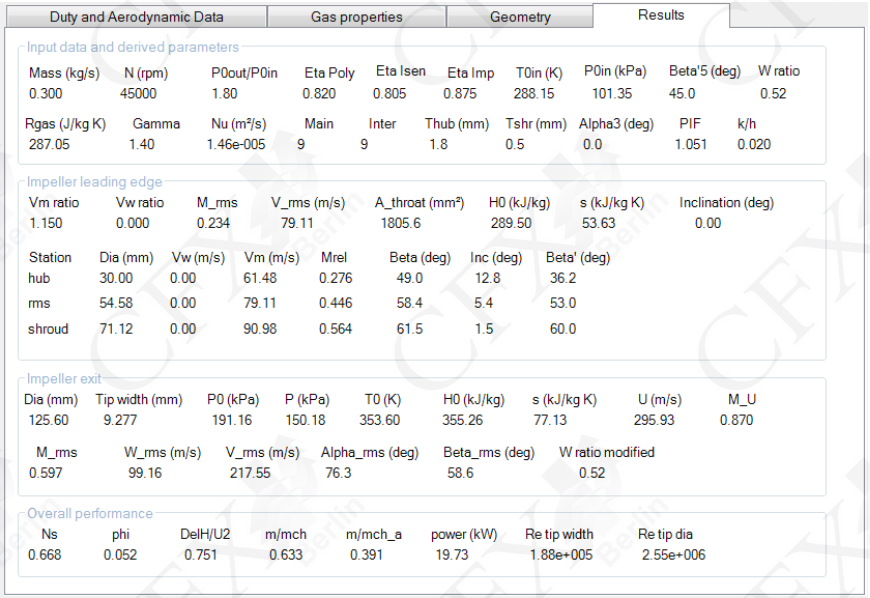
- Förderaufgabe des Radialverdichters (Auslegungspunkt)
  - Totaldruckverhältnis π_t=1.8
  - Nennförderstrom $\dot{m}$=0.3 kg/s
  - Nenndrehzahl n=45 000 U/min
  - Fördermedium Luft, Bedingungen am Saugstutzen: 15°C, 1 atm

- Konstruktive Rahmenbedingungen (Festigkeit, Rotordynamik)
  - Mindestdurchmesser der Tragscheibe 30 mm
  - Schaufeldicke auf Tragscheibe 1.8 mm
  - Schaufeldicke auf Deckscheibe 0.5 mm
  - Schaufelanzahl 9

Verdichterauslegung
Vorgehensweise

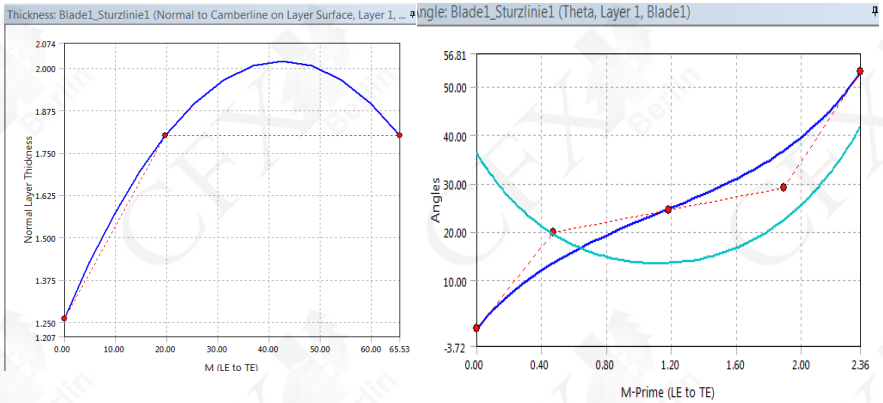
- Verwendetes Werkzeug
  - Vista CCD (Centrifugal Compressor Design)
  - Spezialisiert auf Entwurf von Radialverdichtern
  - Klassische analytische Auslegung (Eulersche Hauptgleichung für Strömungsmaschinen)
    - Empirische Korrekturfunktionen (Reynoldszahl, Minderumlenkung, Spaltverluste etc)
  - Vorgabe der Förderaufgabe und konstruktiver Rahmenbedingungen
- Ergebnis
  - Meridiankontur, Schaufelwinkel- und Dickenverläufe

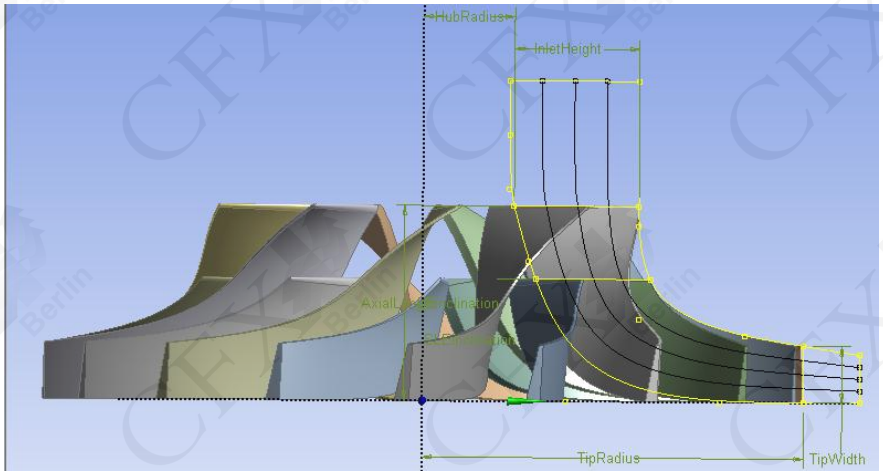




Verdichterauslegung
Vorgehensweise

- Ergebnis der Auslegung
  - Geometrieparameter
    - Schaufelwinkel- und Dickenverläufe
- Geometriemodellierung
  - ANSYS BladeModeler generiert parametrisierbares Modell
    - Kontur des Strömungskanales in Meridianebene
    - Schaufelanzahl
    - Winkel- und Dickenverteilung der Schaufeln
  - Vorteile der parametrisierten Darstellung
    - Schnelle Geometrievariation
    - Grundlage für einen automatisierten Optimierungsprozess

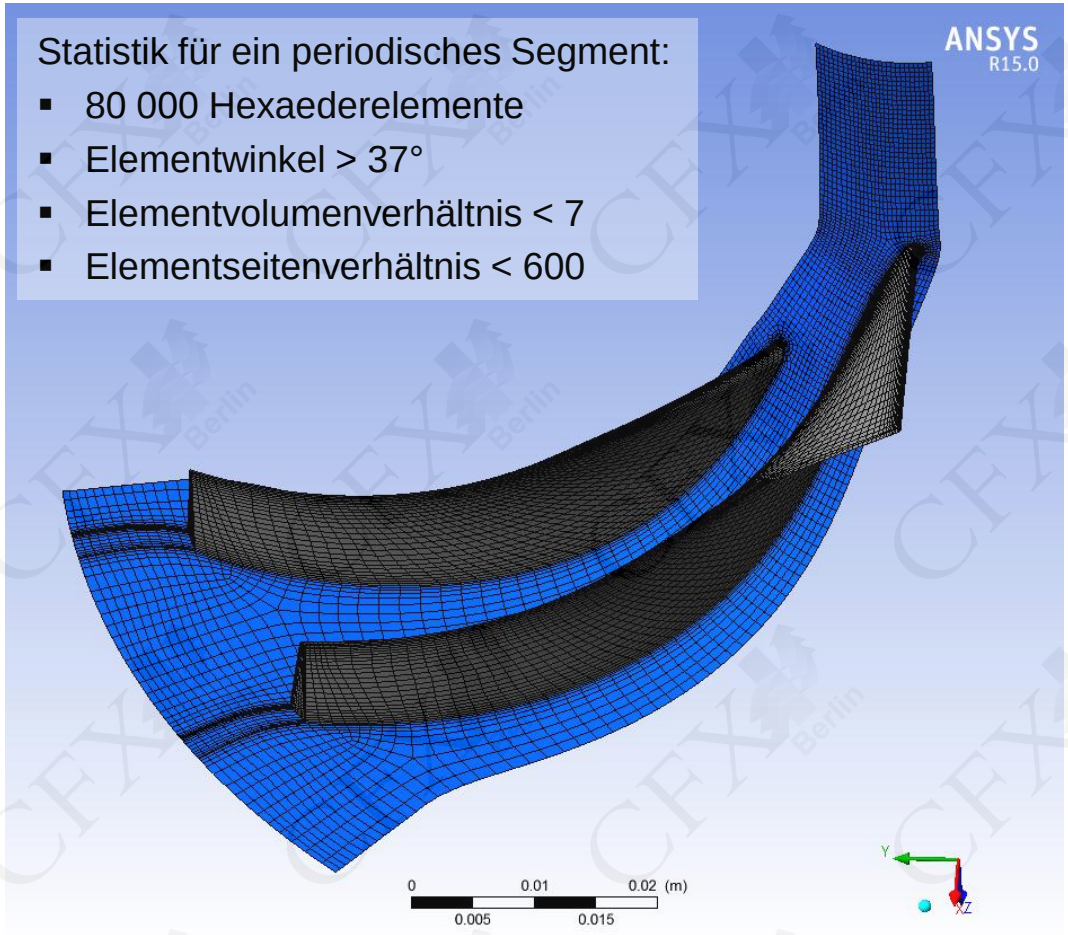




CFD-Berechnung

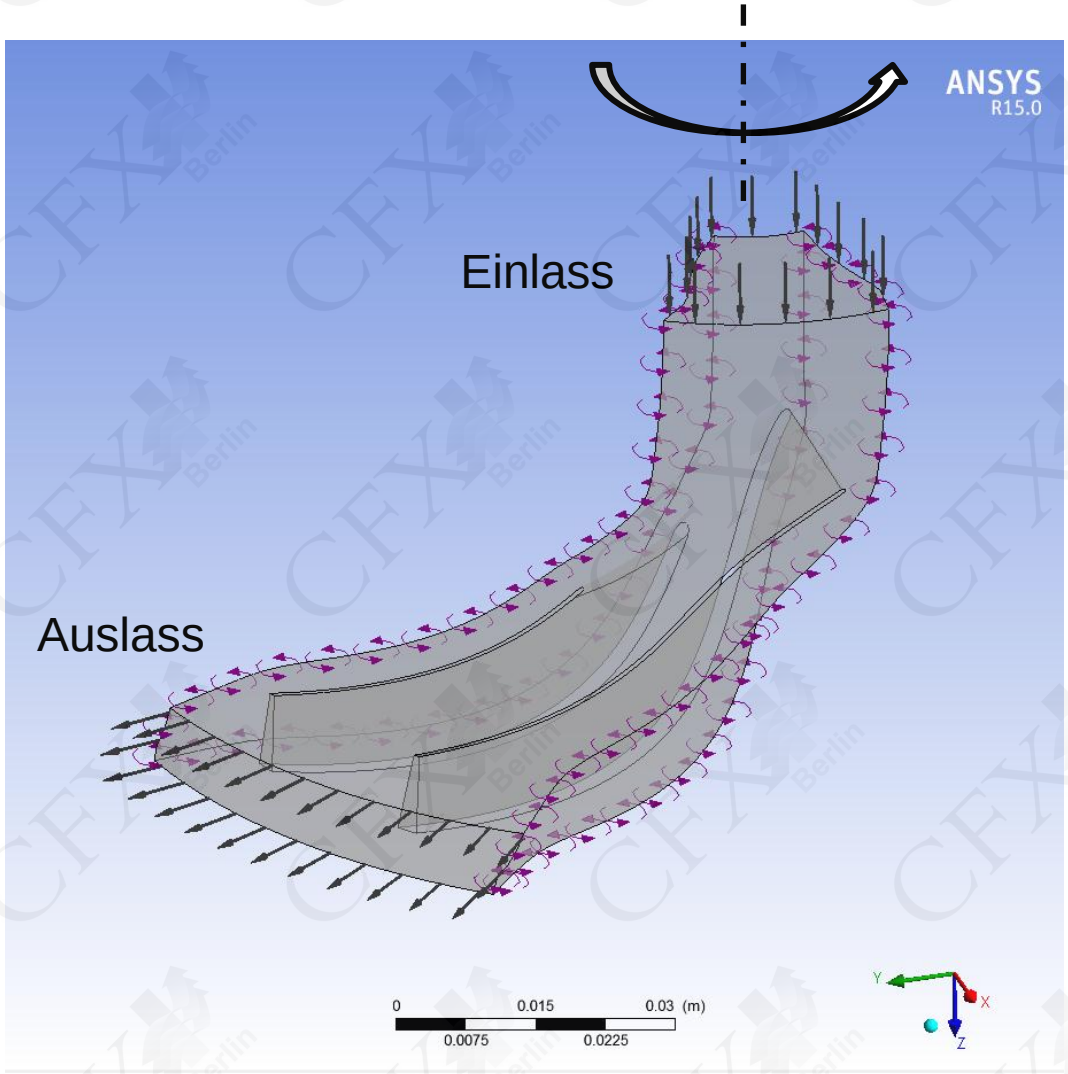
Erstellung des Rechengitters

- CFD-Netzerstellung mit ANSYS TurboGrid
  - Blockstrukturierte Vernetzung
  - Ideal für Berechnung von Turbomaschinen
  - Besonders hohe numerische Effizienz
  - Erstellung von Hexaeder-Netzen mit hervorragender Qualität innerhalb weniger Minuten
  - Auch für Laufräder mit Zwischenschaufeln geeignet



CFD-Berechnung
Randbedingungen

- Nachrechnung des Entwurfs mit CFD
  - Rotationsperiodische Berechnung
  - Drehzahl 45 000 U/min
  - Einlass
    - p_{tot}=1 atm (absolut) drallfreie Zuströmung
  - Auslass
    - $\dot{m}_{100\%}$ = 0.3 kg/s
    - Reibungsbehaftet, mitrotierend
    - Adiabat
  - Berechnung von
    - Auslegungspunkt (100% Förderstrom)
    - Teil- und Überlastbereich (80% bzw. 120% Förderstrom)



CFD-Berechnung
Lösungsverfahren

- Beschreibung reibungsbehafteter Strömungen von Gasen und Flüssigkeiten durch Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls (Navier-Stokes-Gleichungen) und Enthalpie
  - Masse

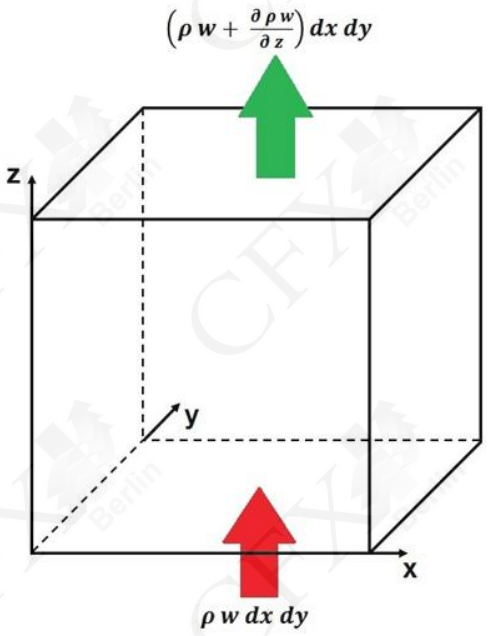
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\, u_j) = 0$$

  - Impuls

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\, u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\, u_j\, u_i) = -\frac{\partial\, p}{\partial\, x_i} + \frac{\partial}{\partial\, x_j}\left(\mu_{eff}\left(\frac{\partial\, u_i}{\partial\, x_j} + \frac{\partial\, u_j}{\partial\, x_i}\right)\right) + S_{M,i}$$

  - Enthalpie

$$\frac{\partial(\rho\, h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\, u_j\, h_{tot}) = \frac{\partial}{\partial x_j}\lambda_{eff}\frac{\partial T}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i \tau_{ij}) + u_i S_{M,i} + S_E$$



$$d\dot{m}_x = \rho\, u\, dy\, dz$$

$$d\dot{m}_{x+dx} = \left(\rho\, u + \frac{\partial \rho\, u}{\partial\, x}\right) dy\, dz$$

$$d\dot{m}_y = \rho\, v\, dx\, dz$$

$$d\dot{m}_{y+dy} = \left(\rho\, v + \frac{\partial \rho\, v}{\partial\, y}\right) dx\, dz$$

$$d\dot{m}_z = \rho\, w\, dx\, dy$$

$$d\dot{m}_{z+dz} = \left(\rho\, w + \frac{\partial \rho\, w}{\partial\, z}\right) dx\, dy$$

$$d\dot{m} = 0 \Rightarrow \boxed{\frac{\partial\, \rho}{\partial\, t} + \frac{\partial \rho u}{\partial\, x} + \frac{\partial \rho v}{\partial\, y} + \frac{\partial \rho w}{\partial\, z} = 0}$$

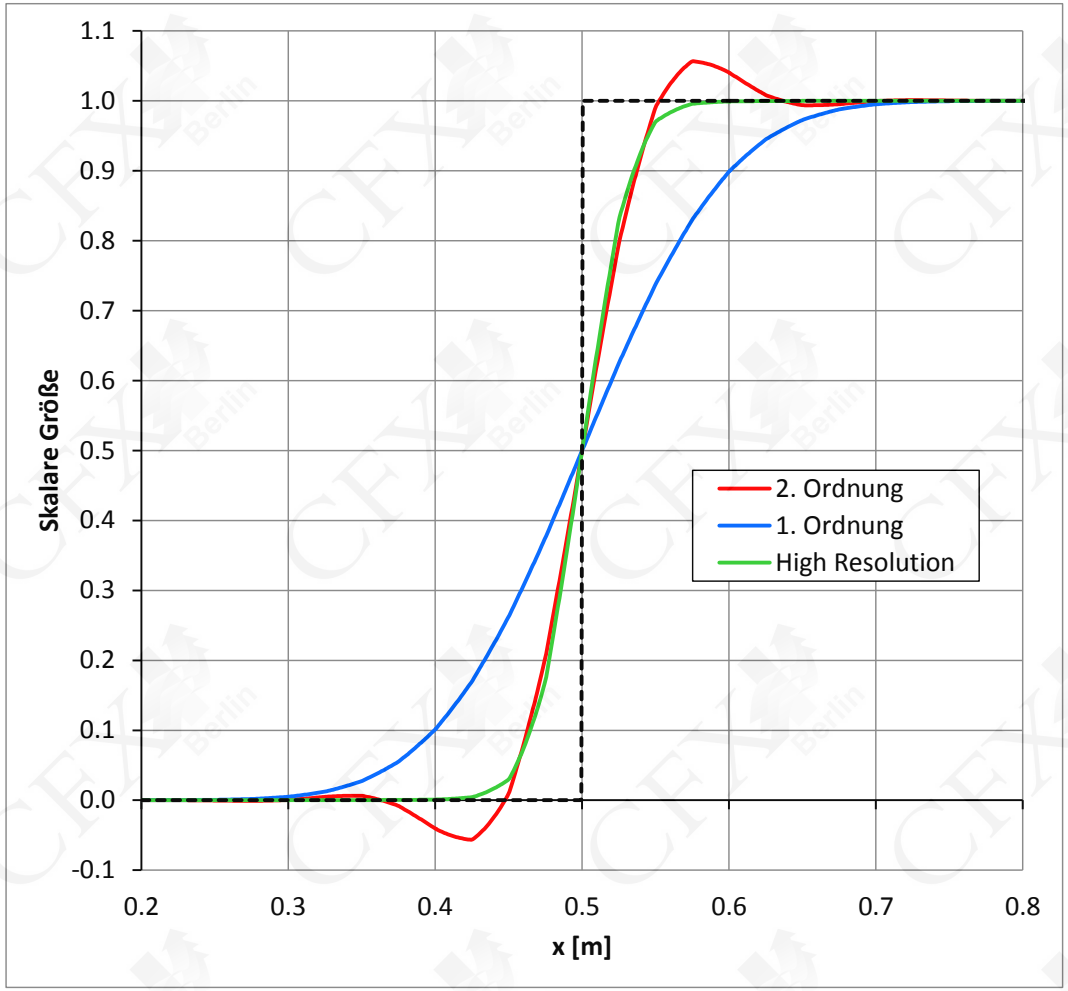
CFD-Berechnung
Lösungsverfahren

- Methode
  - Finite Volumen
- Diskretisierung
  - Genaues und robustes Diskretisierungsschema („High Resolution“)
  - Abbruchfehler 2.Ordnung
- Lösungsverfahren
  - Parallelisierter, gekoppelter Löser
  - Algebraisches Mehrgitterverfahren

2 Partitionen

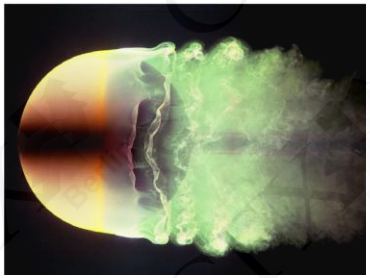
4 Partitionen

16 Partitionen

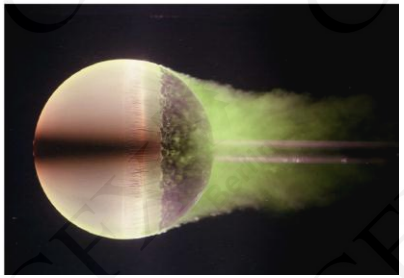


CFD-Berechnung
Turbulenzmodell

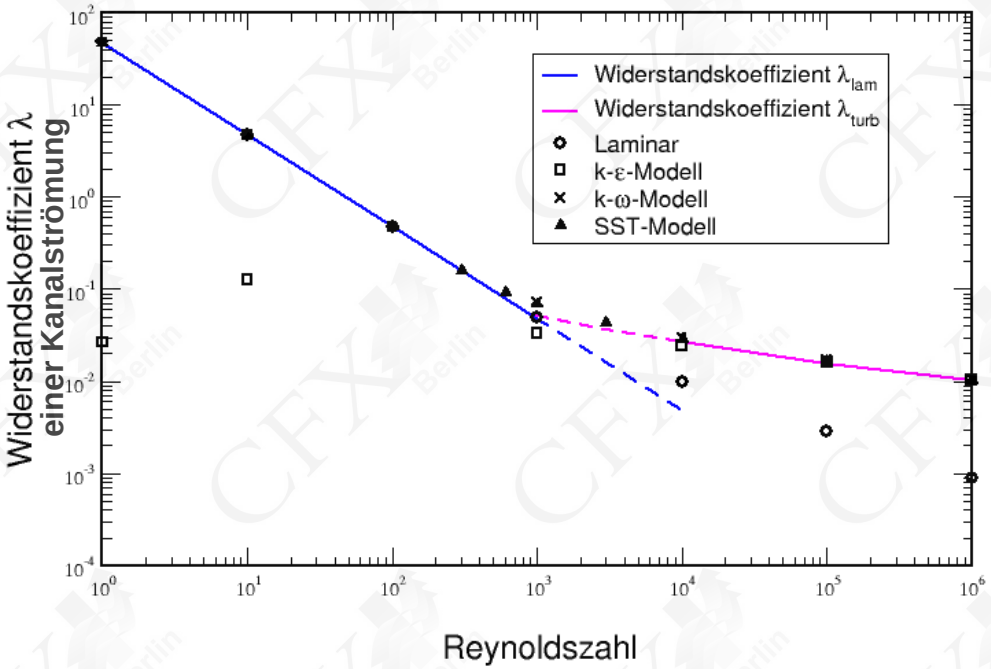
- Turbulenzmodellierung
  - Statistische Turbulenzmodelle in stationären und transienten Simulationen (RANS/URANS)
- Turbulente Strömung
  - Irreguläre, transiente, vielskalige dreidimensionale Fluidbewegung
  - Dissipativ und diffusiv
  - In den meisten technischen Anwendungen wichtig
- Hier verwendet: Shear-Stress-Transport-Turbulenzmodell (SST)
  - Gültig in der freien Strömung bis in die laminare Unterschicht an der Wand
  - Annahme einer isotropen Turbulenz



laminare Grenzschicht ($Re = 2 \cdot 10^4$)

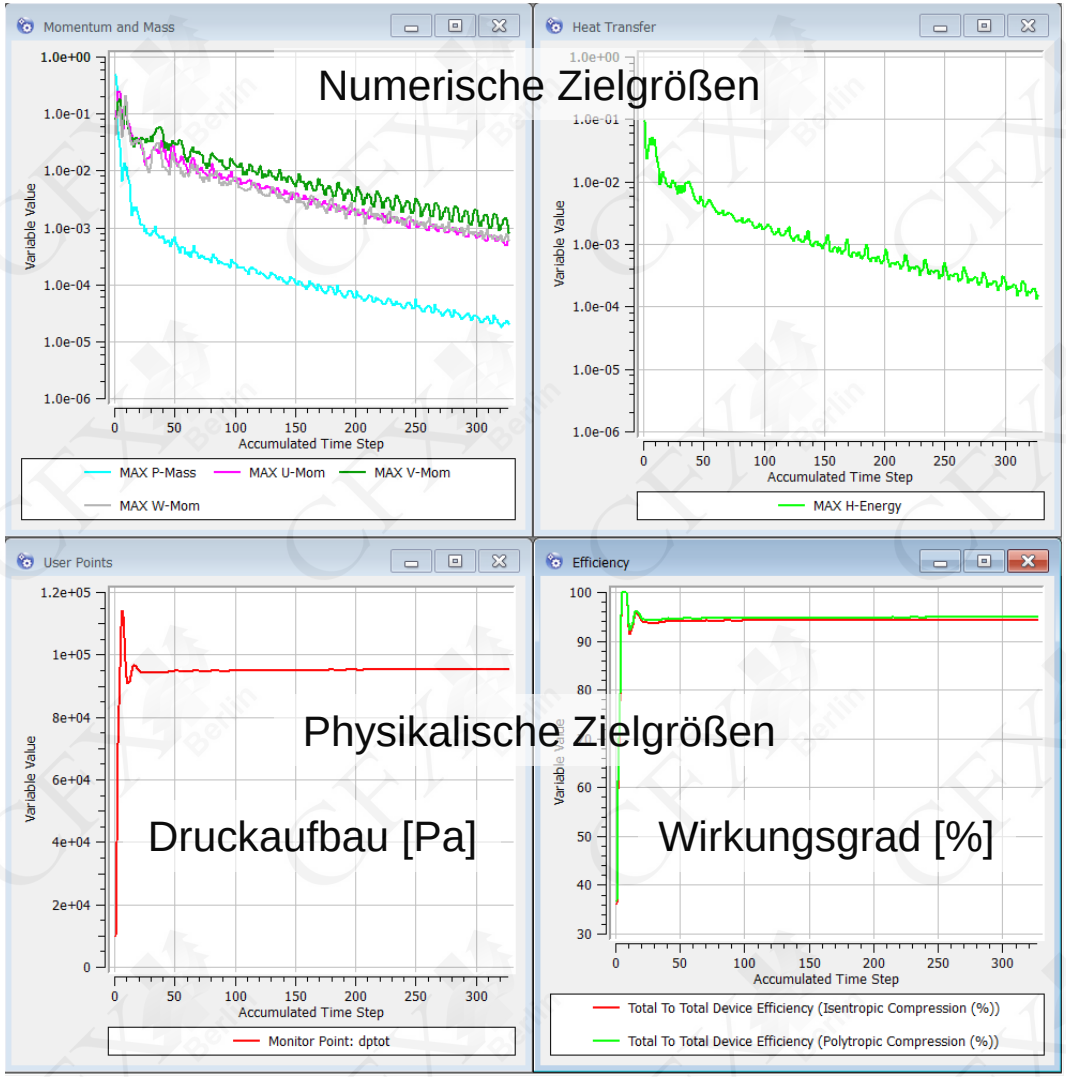


turbulente Grenzschicht ($Re = 5 \cdot 10^5$)



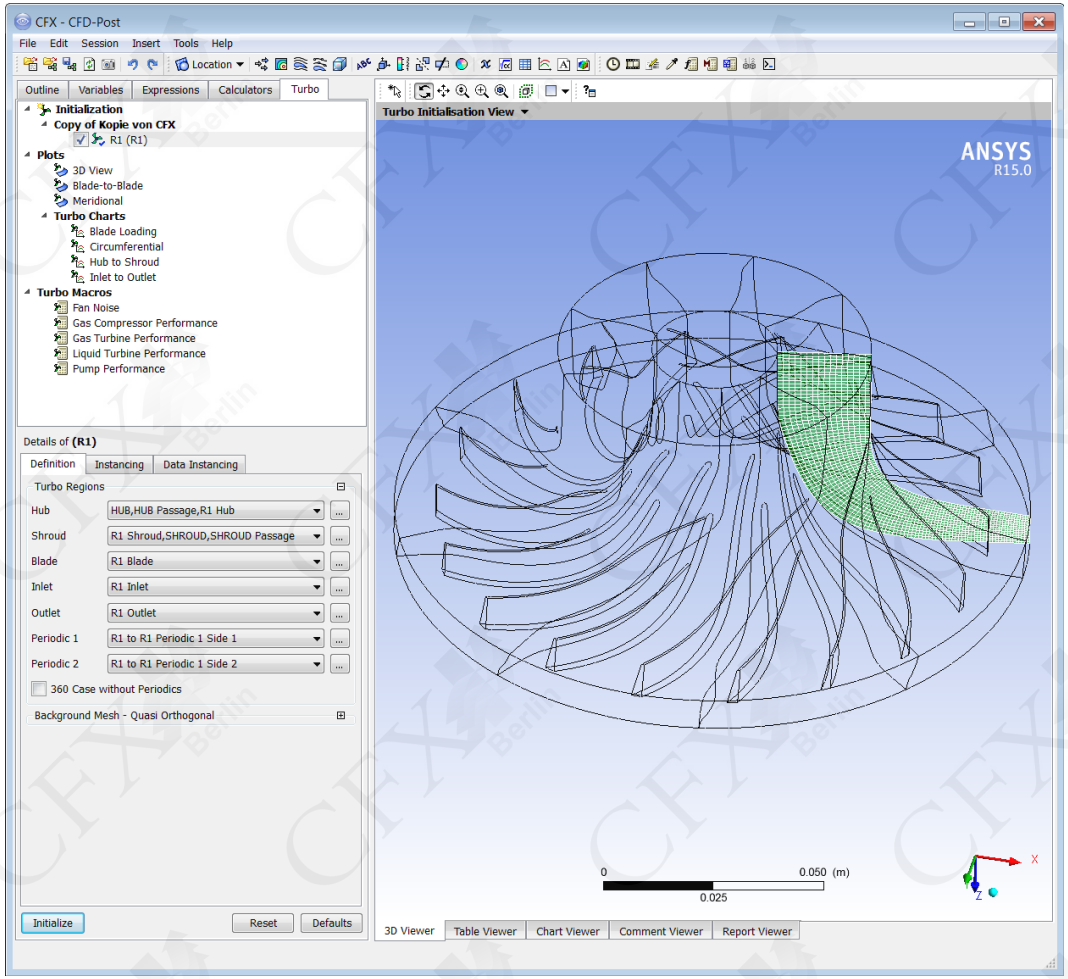
CFD-Berechnung
Lösungskontrolle

- Konvergenzverhalten
  - Numerisch:
    Max-Residuen < $1 \cdot 10^{-3}$
  - Physikalisch:
    Bilanzverletzung < 1%,
    konstante Zielgrößen
- Berechnungsverlauf
  - Arbeitsspeicher: 530 MB
  - Anzahl Prozesse: 3
    (Intel Xeon X3460 @ 2.8 GHz)
  - Berechnungsdauer: ca. 13 Minuten für 300 Iterationen



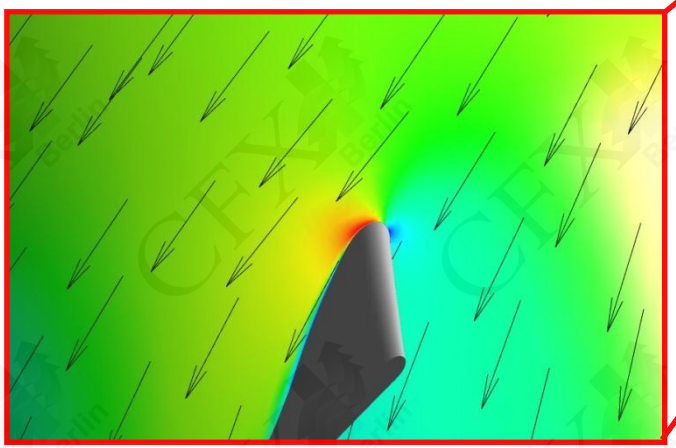
CFD-Berechnung
Ergebnisse

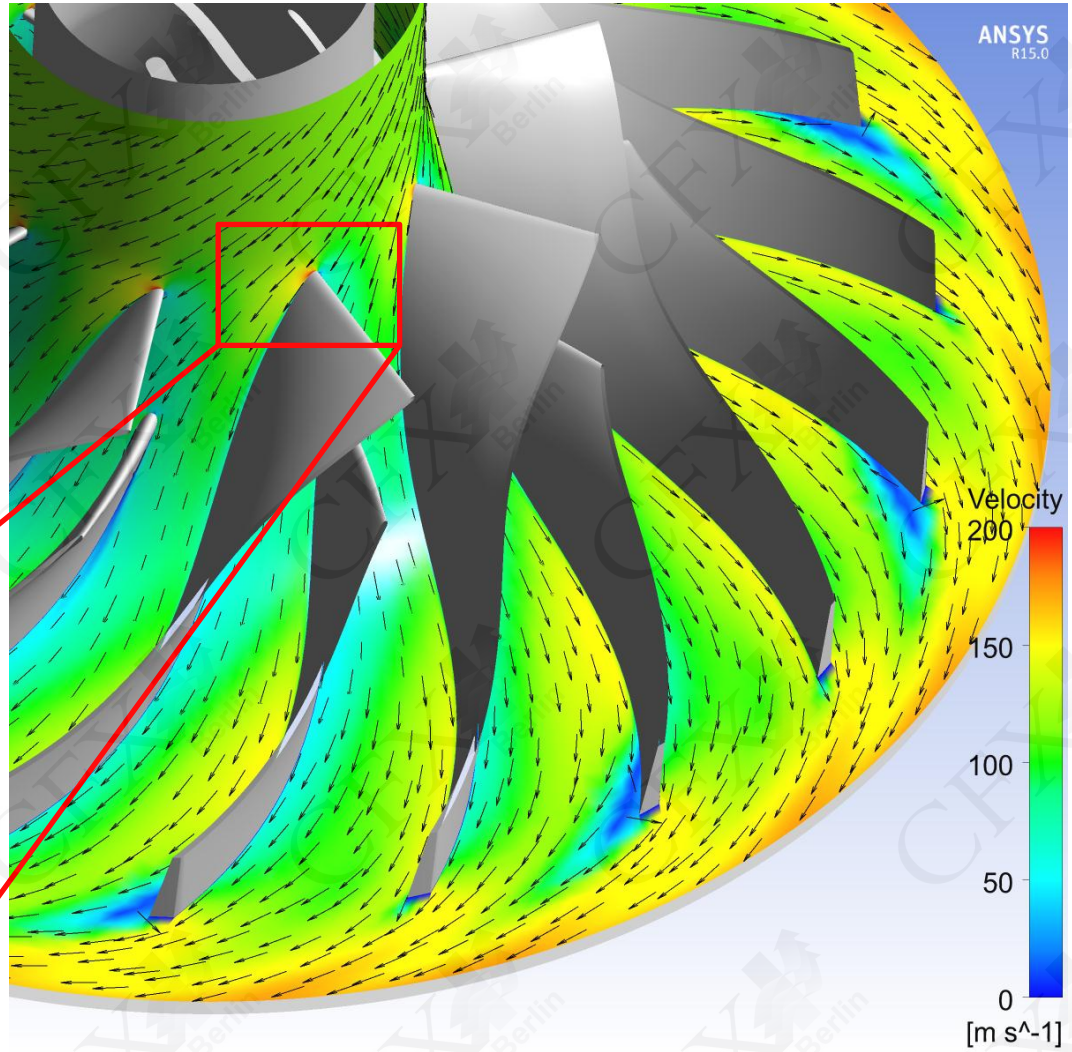
- Auswertung der Berechnung mit ANSYS CFD Turbo Post
  - Berichtsfunktion mit vordefinierten Auswertebenen und Diagrammen
    - Meridionalprojektionen
    - Abgewickelte Schaufelgitter
    - 3D-Turboflächen
    - Schaufelbelastung
    - Geschwindigkeits- und Druckverteilung in Umfangsrichtung, über der Kanalhöhe und von Einlass zu Auslass
  - Automatische Berechnung wichtiger Kennzahlen
    - Lieferzahl, Druckzahl, Wirkungsgrad usw.



CFD-Berechnung
Ergebnisse

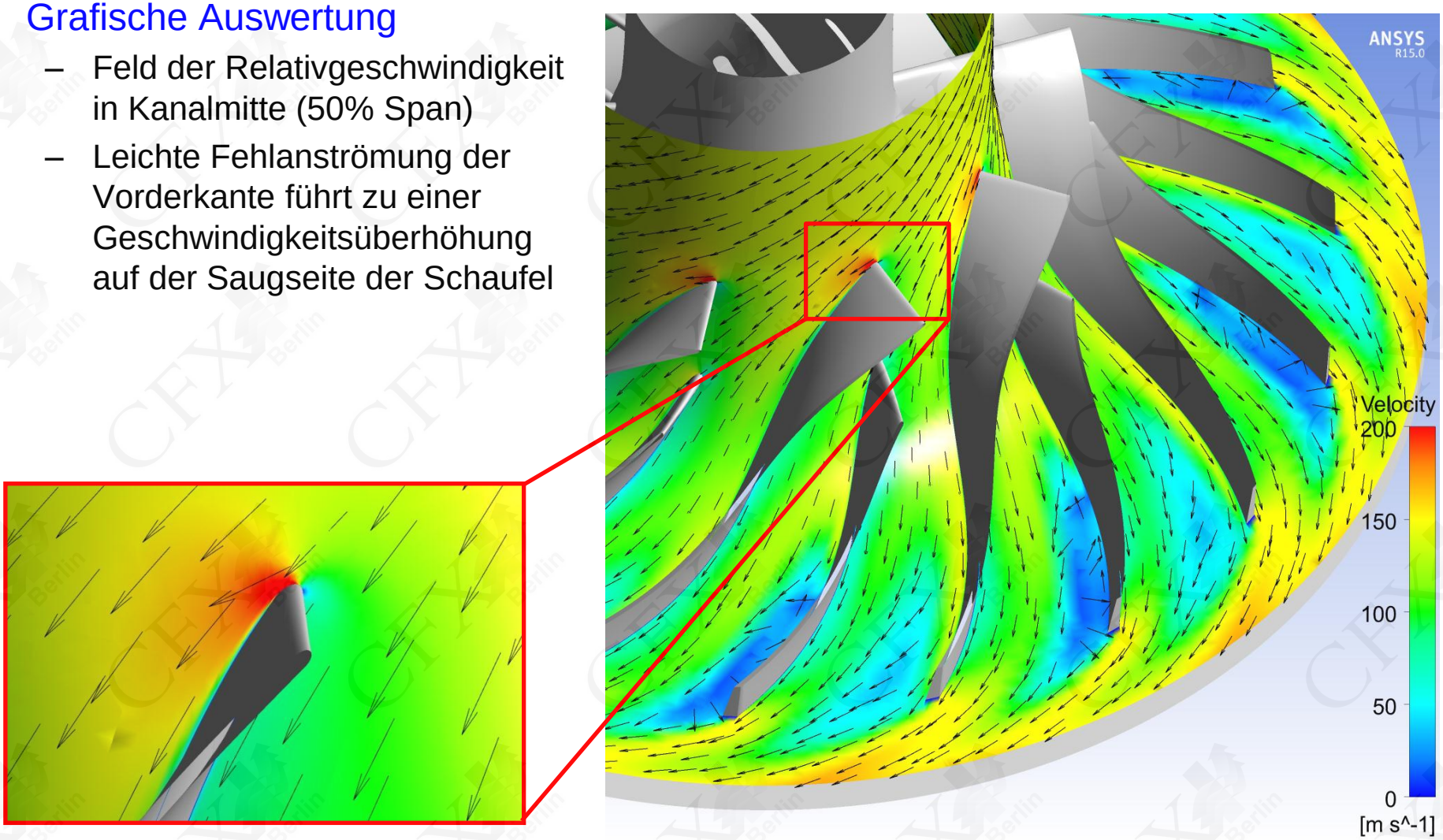
- Grafische Auswertung
  - Feld der Relativgeschwindigkeit nahe Radscheibe (20% Span)
  - Leichte Fehlanströmung der Vorderkante führt zu einer Geschwindigkeitsüberhöhung auf der Saugseite der Schaufel





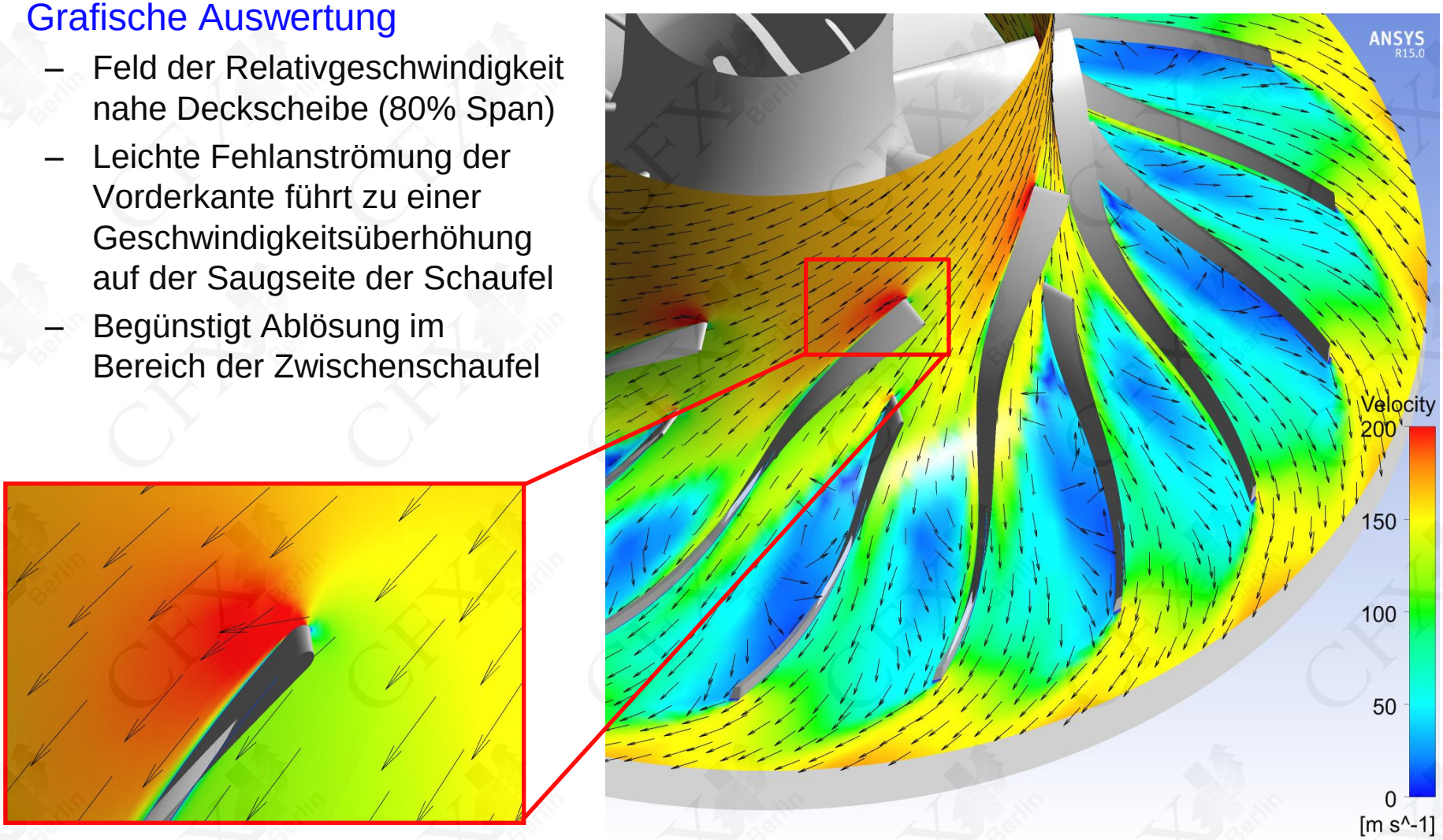
CFD-Berechnung
Ergebnisse

- Grafische Auswertung
  - Feld der Relativgeschwindigkeit in Kanalmitte (50% Span)
  - Leichte Fehlanströmung der Vorderkante führt zu einer Geschwindigkeitsüberhöhung auf der Saugseite der Schaufel



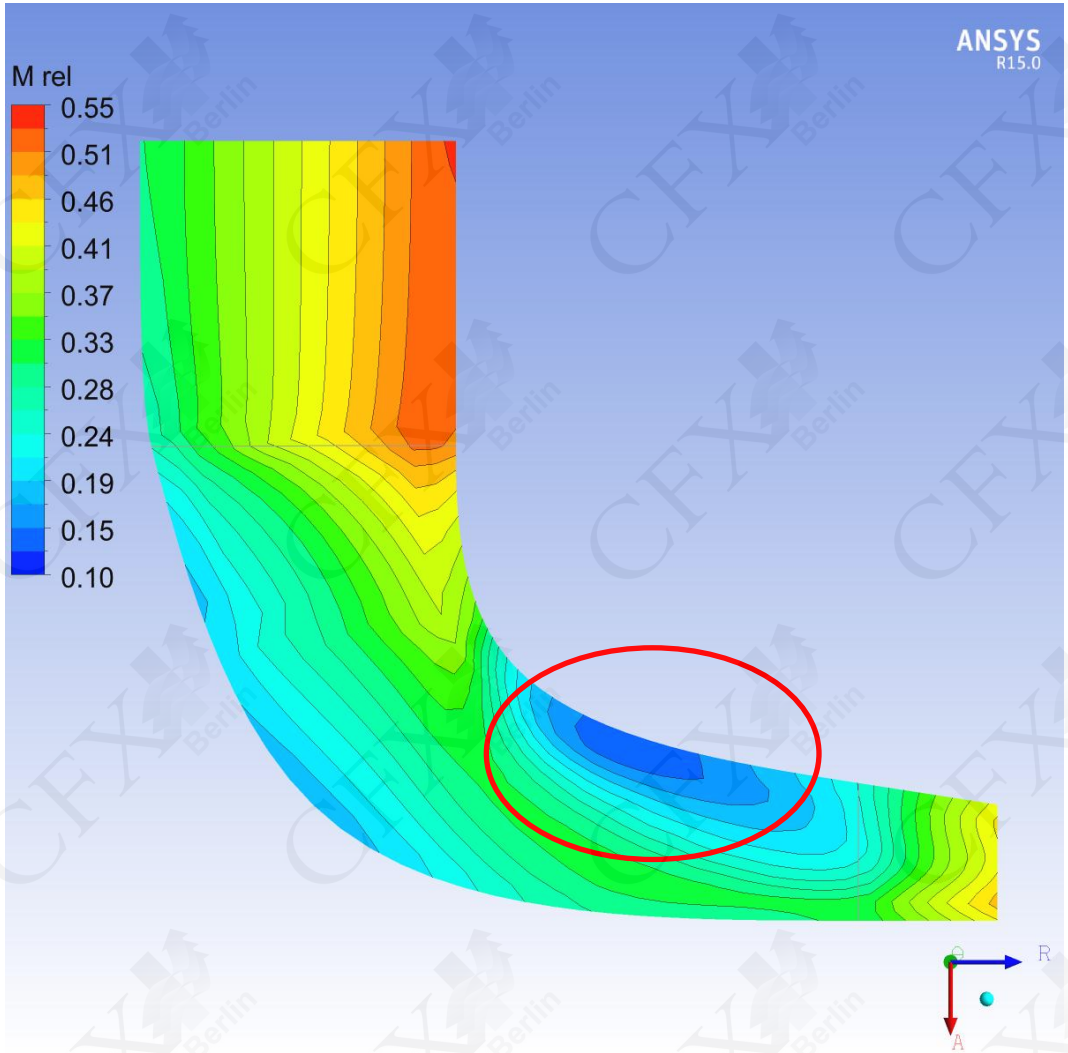
CFD-Berechnung
Ergebnisse

- Grafische Auswertung
  - Feld der Relativgeschwindigkeit nahe Deckscheibe (80% Span)
  - Leichte Fehlanströmung der Vorderkante führt zu einer Geschwindigkeitsüberhöhung auf der Saugseite der Schaufel
  - Begünstigt Ablösung im Bereich der Zwischenschaufel



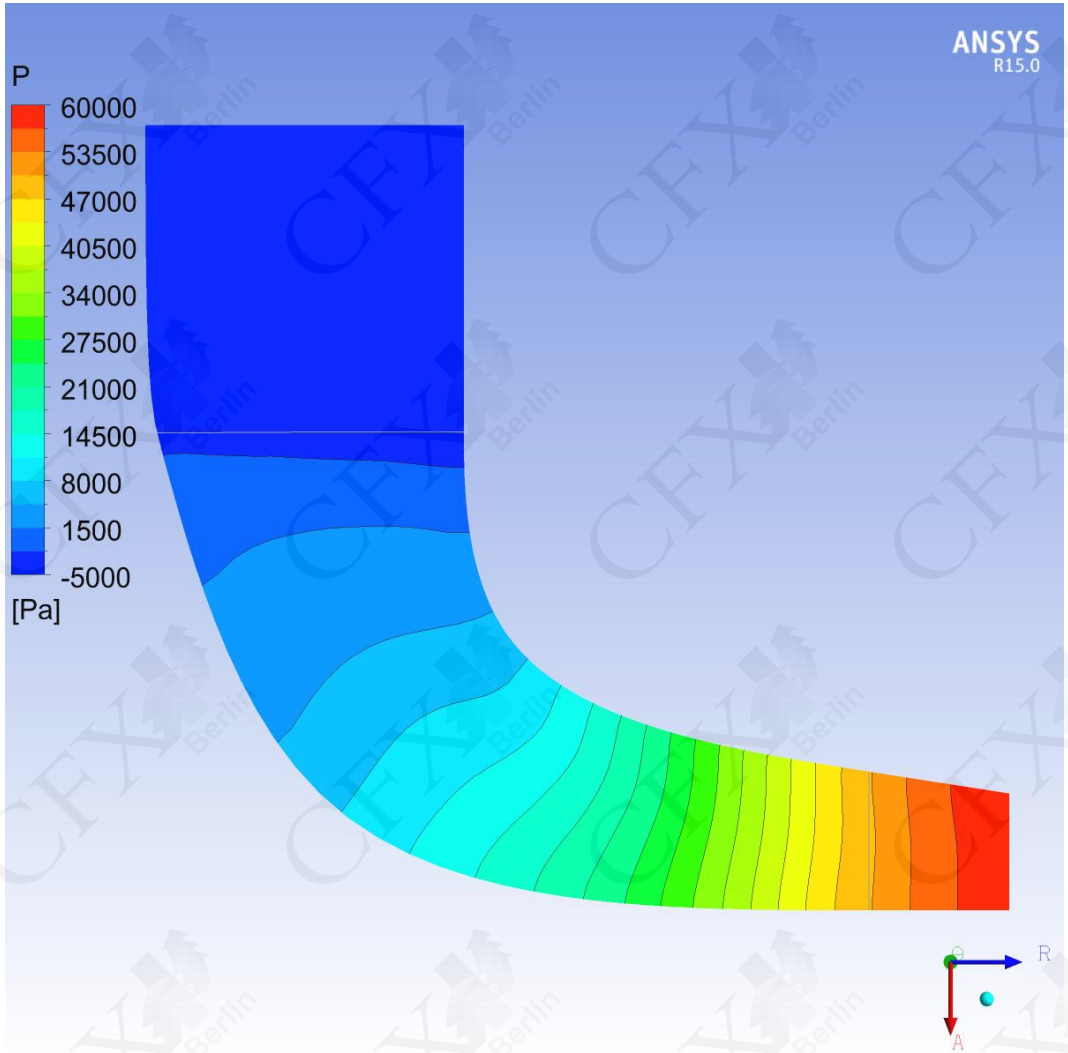
CFD-Berechnung
Ergebnisse

- Grafische Auswertung
  - Feld der Machzahl relativ zum Laufrad, umfangsgemittelt
  - Gut sichtbar ist die deckscheibenseitige Ablösung im Schaufelkanal



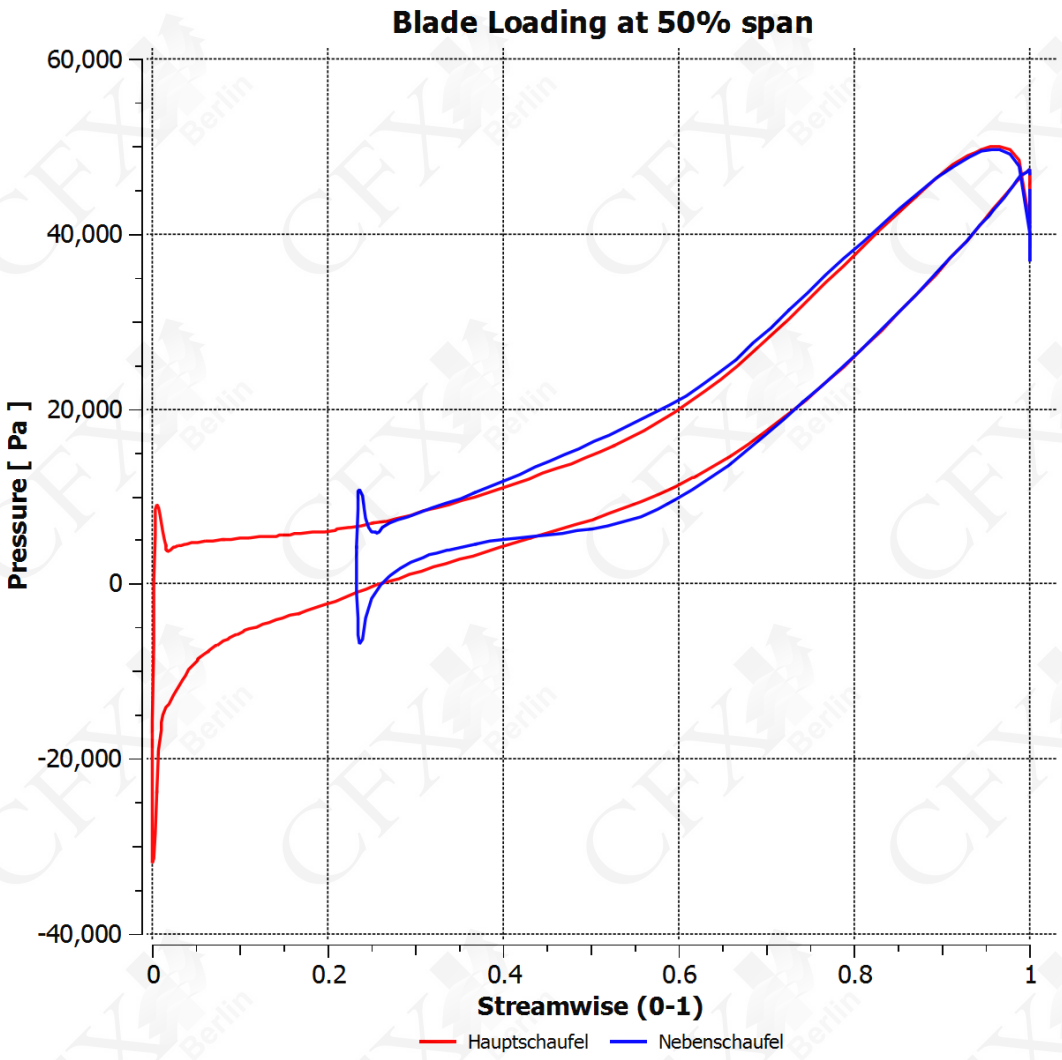
CFD-Berechnung
Ergebnisse

- Grafische Auswertung
  - Feld des statischen Druckes relativ zur Umgebung, umfangsgemittelt
  - Druckerhöhung infolge der Strömungsumlenkung durch das Laufrad



CFD-Berechnung
Ergebnisse

- Quantitative Auswertung
  - Diagramm der Schaufelbelastung für Haupt- und Nebenschaufel
  - Druckprofil rund um die Beschaufelung auf halber Kanalhöhe
    - Visualisierung der Arbeitsübertragung durch die Schaufel auf die Strömung
    - Optimierung der Schaufel- und Profilform



CFD-Berechnung
Ergebnisse

- Quantitative Auswertung
  - Performance und Kennzahlen
  - Hohes Totaldruckverhältnis (1.93) deutet zusammen mit leichter Fehlanströmung der Schaufel auf verschobenen Bestpunkt hin.

→ Kennlinienberechnung einfach möglich durch Parametrisierung des Durchsatzes

Compressor Performance Results Table

	A	B	C
1			
2	Rotation Speed	-4712.3900	[radian s^-1]
3	Mass Flow Rate	0.3000	[kg s^-1]
4			
5	Input Power	19191.6000	[W]
6	Reference Radius	0.0627	[m]
7	Inlet Flow Coefficient	0.6576	
8	Exit Flow Coefficient	0.1908	
9	Head Coefficient	3.7953	
10	Work Input Coefficient	0.7329	
11	Total Pressure Ratio	1.9397	
12	Total Temperature Ratio	1.2210	
13	Total Isentropic Efficiency %	94.3511	
14	Total Polytropic Efficiency %	94.8551	
15			

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	**Quantity**	**Inlet**	**LE Cut**	**TE Cut**	**Outlet**	**TE/LE**	**TE-LE**	**Units**
2	Density	1.1950	1.1869	1.6122	1.6870	1.3583	0.4253	[kg m^-3]
3	Pstatic	97891.1000	97221.7000	151191.0000	160995.0000	1.5551	53968.8000	[Pa]
4	Ptotal	101321.0000	101237.0000	198176.0000	196528.0000	1.9575	96938.7000	[Pa]
5	Cm	75.2934	82.8938	56.3743	50.4685	0.6801	-26.5195	[m s^-1]
6	Cu	-0.0781	-7.5063	-226.3790	-186.6420	30.1584	-218.8720	[m s^-1]
7	C	75.2950	87.1459	234.8170	193.9970	2.6945	147.6720	[m s^-1]
8	Distortion Par...	1.0004	1.1485	1.0505	1.0164	0.9146	-0.0981	
9	Flow Angle	-57.8454	-55.7029	-46.5100	-71.8149	0.8350	9.1929	[degree]
10								

CFD-Berechnung
Ergebnisse

- Quantitative Auswertung
  - Berechnung der Verdichterkennlinie durch Definition einer Parametertabelle in ANSYS Workbench.
  - Eingabeparameter:
    - Durchsatz
  - Ausgabeparameter:
    - Druckverhältnis
    - Wellenleistung
    - Wirkungsgrad
    - Maximale Residuen (numerische Lösungsqualität)

Table of Design Points

	A	B	C	D	E	F
1	Name	P3 - mflow	P5 - Total Pressure Ratio	P6 - Shaft Power	P7 - Effs out	P8 - maxResi
2	Units	kg s^-1		W		
3	Current	0.3	1.9396	19857	94.348	0.00027641
4	DP 1	0.27	1.8885	17849	90.507	0.00049901
5	DP 2	0.285	1.8891	18686	91.308	0.00013696
6	DP 3	0.315	1.9269	20581	94.553	0.00052405
7	DP 4	0.33	1.9109	21260	94.545	0.00041894
8	DP 5	0.345	1.895	21926	94.493	0.00034316
9	DP 6	0.36	1.8783	22574	94.359	0.00023647
10	DP 7	0.375	1.8606	23189	94.147	0.000339
11	DP 8	0.2925	1.9421	19454	94.079	0.00034185
12	DP 9	0.29625	1.9414	19661	94.24	0.00019546
13	DP 10	0.28875	1.894	18909	91.795	0.00024701

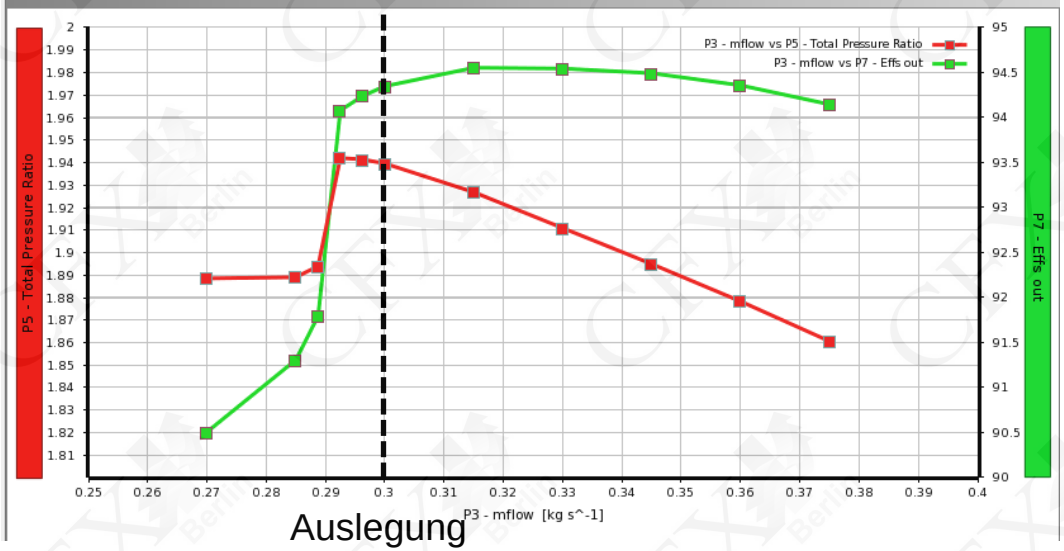
CFD-Berechnung
Ergebnisse

- Quantitative Auswertung
  - Optimum liegt wie erwartet etwas rechts der Auslegung
  - Deutlicher Wirkungsgradeinbruch bei weiterer Drosselung

  → Für stabilen und effizienten Betrieb sollte der Verdichter bei höheren Durchsätzen als 0.3 kg/s betrieben werden.

Table of Design Points

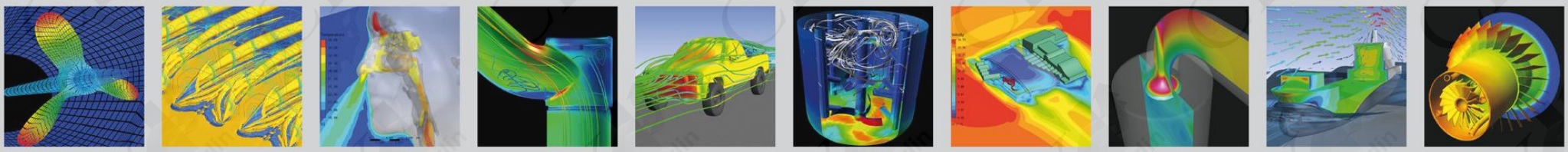
	A	B	C	D	E	F
1	Name	P3 - mflow	P5 - Total Pressure Ratio	P6 - Shaft Power	P7 - Effs out	P8 - maxResi
2	Units	kg s^-1		W		
3	Current	0.3	1.9396	19857	94.348	0.00027641
4	DP 1	0.27	1.8885	17849	90.507	0.00049901
5	DP 2	0.285	1.8891	18686	91.308	0.00013696
6	DP 3	0.315	1.9269	20581	94.553	0.00052405
7	DP 4	0.33	1.9109	21260	94.545	0.00041894
8	DP 5	0.345	1.895	21926	94.493	0.00034316
9	DP 6	0.36	1.8783	22574	94.359	0.00023647
10	DP 7	0.375	1.8606	23189	94.147	0.000339
11	DP 8	0.2925	1.9421	19454	94.079	0.00034185
12	DP 9	0.29625	1.9414	19661	94.24	0.00019546
13	DP 10	0.28875	1.894	18909	91.795	0.00024701

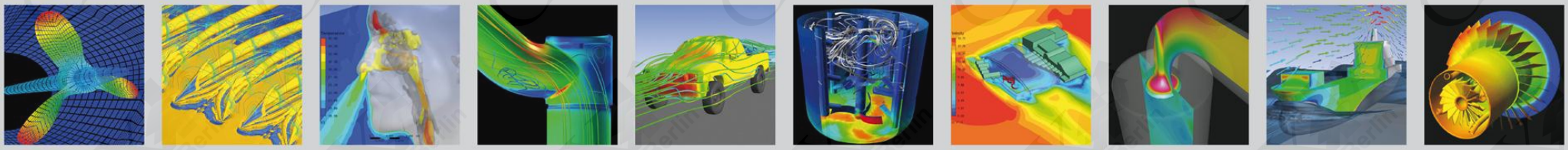


CFD-Berechnung
Modellerweiterung

- Mögliche weiterführende Untersuchungen
  - Untersuchung des Teillastbereiches mit instationärer CFD-Berechnung
    - Berechnung des Vollmodells, da bei starker Drosselung keine periodische Lösung mehr
    - Bestimmung der Stabilitätsgrenze
  - Berücksichtigung von Zulauf- und Abströmgeometrie
    - Abweichung von axialer Zuströmung durch z.B. Krümmer
    - Zusammenspiel Laufrad ←→ Spiralgehäuse
  - Parametervariation:
    - Sensitivitätsstudie, um kritische Geometrie- und Betriebsparameter zu identifizieren
    - Manuelle Optimierung des Schaufelwinkelverlaufes
    - Automatische, parameterbasierte Optimierung des Laufrades
  - Weiterführende Berechnungen unter Verwendung erweiterter Modelle
    - SAS-Turbulenzmodell (Auflösung feinerer Strömungsstrukturen)
    - Bestimmung der akustischen Quellen als Eingabe für Fernfeldausbreitung

CFX Berlin Software GmbH



ist kompetenter Partner für:

- ANSYS Simulationssoftware
- Berechnung & Optimierung
- Beratung & Schulung
- Forschung & Entwicklung