

Geometrieoptimierung eines Radialkompressorlaufrades mit Hilfe automatisierter Optimierungsmethoden

Prof. Dr.-Ing. Marius Geller, M.Eng. Dipl.-Ing. Christoph Schemmann

Fachhochschule Dortmund, Dortmund, Deutschland

1 Einleitung

Der weltweit ständig steigende Energiebedarf und die gleichzeitig rapide abnehmenden Ressourcen haben das Thema Energieeffizienz - und damit die Optimierung - zu einer der wichtigsten Fragestellungen der Gegenwart gemacht. Bei der Energiewandlung ist in nahezu jedem Fall die Turbomaschinen einer der wichtigsten Teile der Prozesskette und somit Ansatzpunkt für Optimierungen. Werden diese mit modernen automatisierten Methoden durchgeführt, so lässt sich mit vergleichsweise kleinem Aufwand eine große Effizienzsteigerung erreichen.

In der vorgestellten Arbeit wird die Geometrieoptimierung eines hochbelasteten Radialkompressorlaufrades in Hinsicht auf die strömungsmechanische Effizienz unter Einhaltung der festigkeitsmechanischen Grenzen durchgeführt. Hierbei erfolgen das Preprocessing, die CFD und FEM Berechnungen sowie die Auswertung der Simulationsergebnisse in der ANSYS Workbench. Die Sensitivitätsanalyse, das Metamodelling und die Optimierung werden mit optiSLang durchgeführt.

Ausgangspunkt der Optimierung ist eine stabil ausgelegte Startgeometrie. Ausgehend von dieser wird das Laufrad bezüglich der CFD- und FEM-relevanten Aspekte optimiert. Die Möglichkeiten, Methoden und Ergebnisse dieser Optimierung werden gegenübergestellt und ausgewertet.

Das Laufrad eines Turbokompressors ist eine sowohl strömungs- als auch strukturell hochkomplexe Komponente. Bei der Auslegung und beim geometrischen Design gilt es daher, sowohl ein in Hinsicht auf die Strömungsmechanik effizientes Design zu finden als auch die durch die Strukturmechanik vorgegebenen Festigkeitsgrenzen einzuhalten. Abbildung 1 zeigt einen einstufigen Radialkompressor, der an der Fachhochschule Dortmund ausgelegt, konstruiert und simuliert worden ist. Die Optimierung eines solchen hochbelasteten Laufrades wird im Folgenden beschrieben.

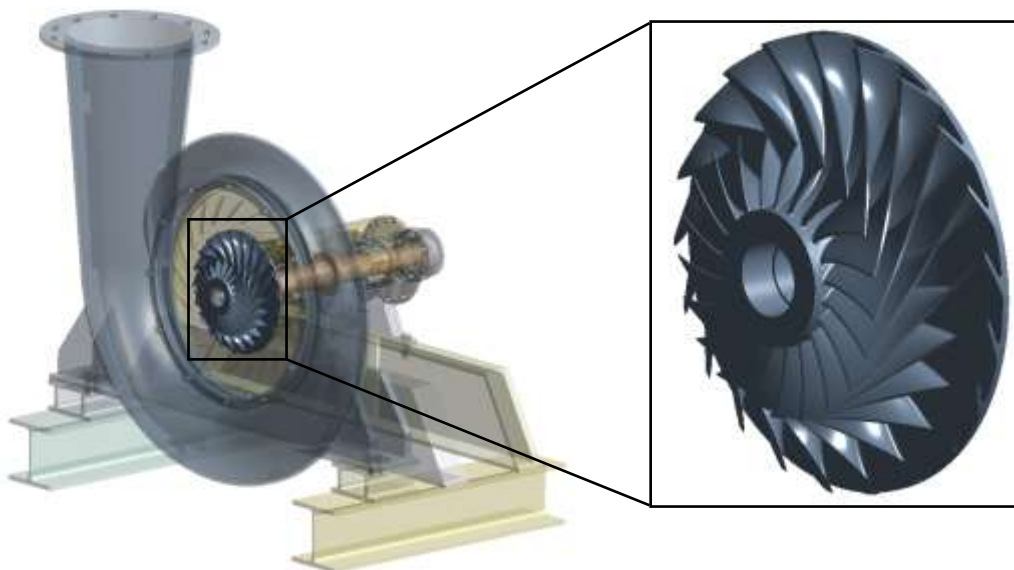


Abbildung 1: Einstufiger Turbokompressor

2 Preprocessing

Zur Geometriegenerierung eines Laufradsektors und zur parametrisierten Beschreibung sämtlicher geometrischen Größen ist das CAD-Modul der ANSYS Workbench verwendet worden. Mit Hilfe des im Design Modeler integrierten Blade Editors wird der Fluidsektor des Radialkompressors generiert. Aufbauend auf der Schaufelkontur wird ein Sektorschneidteil für die Solidkonstruktion erstellt. Abbildung 2 zeigt die generierten Geometrien für den Strömungskanal (Fluid) sowie für die eigentliche Laufradstruktur (Solid) als einzelnen Sektor.

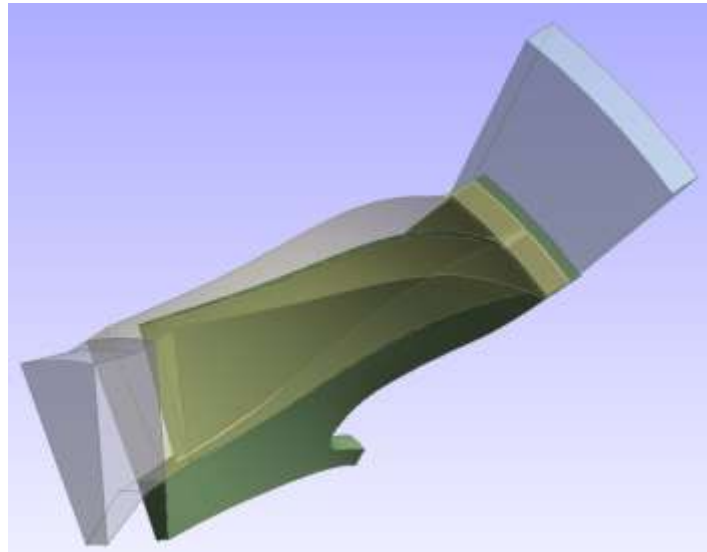


Abbildung 2: Fluid- und Solidgeometrie eines Radiallaufrades als Sektor

Mittels ANSYS TurboGrid, einem Hexaeder-Vernetzer für Turbomaschinensimulationen, wird der Fluidsektor vernetzt (Abbildung 3, links) und in CFX Pre ein CFD-Setup zur Strömungssimulation erstellt. Die numerisch aufwendigen Strömungssimulationen sind parallelisiert auf dem Rechen-Cluster LiDong der TU Dortmund aufgesetzt worden.

Die Vernetzung der Solidkonstruktion wird mit dem standardimplementierten Meshing-Tool der ANSYS Workbench vorgenommen und ist in Abbildung 3 (rechts) dargestellt. Die sehr wichtigen lokalen Netzverdichtungen sind in der Abbildung 3 ebenfalls zu erkennen.

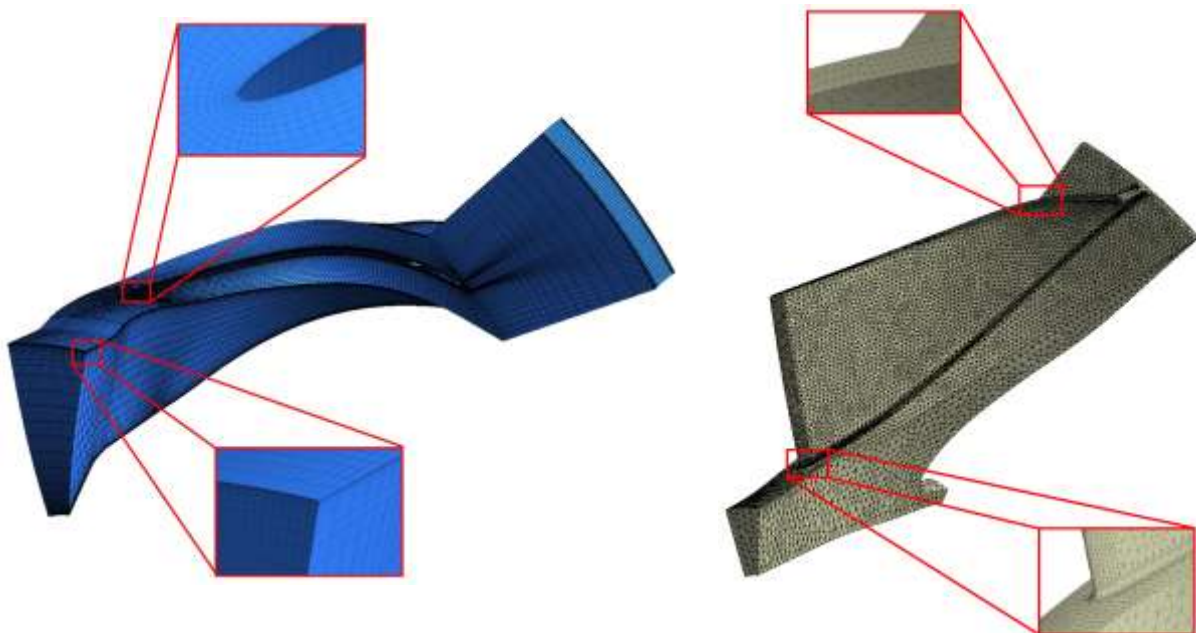


Abbildung 3: In TurboGrid erstelltes Hexaedernetz mit ca. 400.000 Netzknoten (links für den Strömungskanal); Tetraedernetz mit ca. 200.000 Netzknoten (rechts für die Laufradstruktur)

3 Optimierung mit optiSLang

Der gesamte Optimierungsprozess hat die folgenden Ziele:

- Die Spannungen im Laufrad sollen unterhalb der maximal zulässigen Spannungsgrenze von 600 MPa bleiben.
- Der Wirkungsgrad der Stufe soll maximiert werden.
- Der Kompressor soll ein Druckverhältnis von mindestens zwei erreichen.

Die für die Optimierung erforderliche Startgeometrie ist nach strömungsmechanischen Aspekten mit einer konventionellen Auslegungssoftware nach der eindimensionalen Stromfadentheorie berechnet worden. Dieser Schritt ist vorab vor Beginn des eigentlichen Optimierungsprozesses durchgeführt worden. Das mit einer Drehzahl von 20000 U_{\min} rotierende Laufrad hat nach einer CFD-Simulation ein effektives Druckverhältnis von geringfügig mehr als zwei. Als Stufenwirkungsgrad ist ein Wert von 87% ermittelt worden. Eine Strukturanalyse der Laufradgeometrie

hat für die Vergleichsspannungen einen Wert weit oberhalb der zulässigen Maximalspannung ergeben. Sie befinden sich im Filletbereich in der Nähe des Laufradaustritts (Abbildung 4).

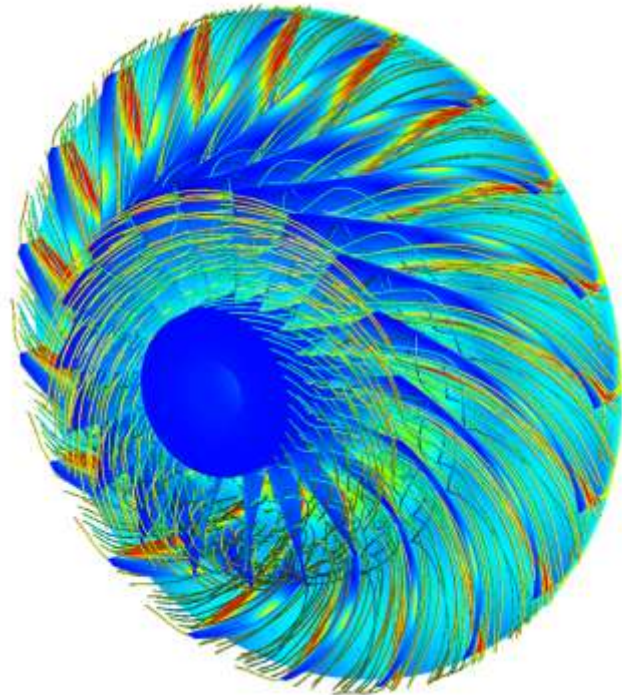


Abbildung 4: Maximale Vergleichsspannung und Strömungsverhältnisse bei der Startgeometrie

Die berechneten Spannungen disqualifizieren die nach strömungsmechanischen Aspekten akzeptable Laufradgeometrie als ungeeignet. Eine Optimierung ist unumgänglich.

3.1 Optimierungsvorgehensweise

Ausgehend von der beschriebenen Startgeometrie wird in den nächsten Schritten das Laufrad bezüglich CFD- und FEM-relevanten Aspekten optimiert. Dazu werden die in der ANSYS-Workbench definierten Parameter nach optiSLang exportiert und die genannten Optimierungsziele durch Ziel- und Grenzzustandsfunktionen beschrieben. Das nachfolgende Struktogramm (Abbildung 5) zeigt die Vorgehensweise bei der Laufradoptimierung. [1]

Eine multidisziplinäre Optimierung, die sowohl FEM als auch CFD Simulationen umfasst, ist mit erheblichem numerischem Aufwand verbunden. Zur Reduzierung des notwendigen Berechnungsaufwandes ist eine der Optimierung vorgeschaltete Sensitivitätsanalyse empfehlenswert. Diese dient der Identifizierung der einflussreichsten Eingangsgrößen und ermöglicht somit eine Filterung und Reduktion der Parameter in der Optimierung. Die hierfür benötigten Algorithmen stellt optiSLang in einem vollautomatischen Workflow zur Verfügung. Abhängig von der Anzahl der Eingangsparameter wird in optiSLang ein Design of Experiments (DOE) mithilfe stochastischer Samplingmethoden über den gesamten Parameterraum erstellt. Im nächsten Schritt wird für jeden Design Punkt ein Geometriemodell und daraus je ein FEM und ein CFD Netz generiert.

Liegen die Ergebnisse aller Design Punkte vor, folgt die Bewertung in optiSLang. Anhand von Zusammenhangsmodellen zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen lassen sich die einflussreichen Eingangsparameter identifizieren.

Bevor das zuvor reduzierte Parameterset zur Optimierung eingesetzt wird, bietet optiSLang die Möglichkeit, die bereits für die Sensitivitätsanalyse gerechneten Design Punkte für einen ersten Optimierungsschritt zu nutzen. Dies geschieht mithilfe des „Metamodel of Optimal Prognosis“ (MOP) [2]. Dabei ermittelt optiSLang aus einer Vielzahl geeigneter Metamodelle und in möglichen Unterräumen wichtiger Parameter das Metamodell, welches die höchste Prognosegenauigkeit der Variation der Ergebnisgrößen hat (Abbildung 6). Basierend auf diesem Metamodell ist es nun möglich,

ein vielversprechendes Startdesign für die nachfolgende Optimierung zu finden, ohne weitere Solveraufrufe durchzuführen zu müssen. Nur das auf dem Metamodel identifizierte Startdesign muss anhand einer weiteren numerischen Berechnung validiert werden.

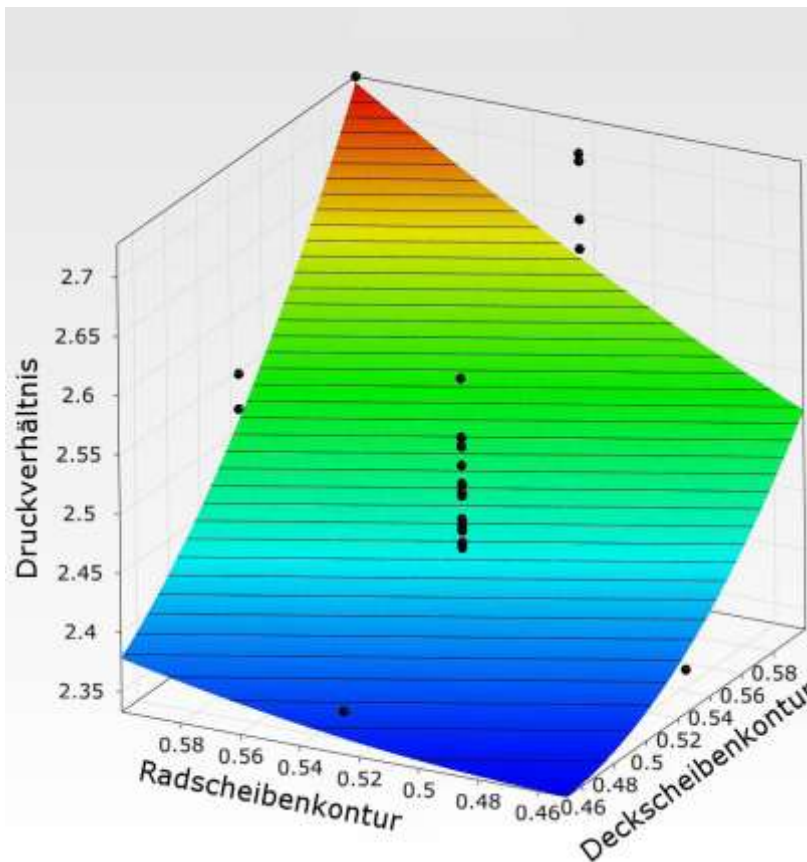


Abbildung 6: Grafische Darstellung eines Metamodells (Response Surface)

Im nächsten Schritt wird eine Optimierung mit der reduzierten Anzahl an Inputparametern durchgeführt (GlobalOpt). Mit Hilfe des Metamodel of Optimal Prognosis (MOP) wird eines der in optiSLang vorhandenen Metamodelle ausgewählt, das die simulierten Designs am besten abbildet. Auf Basis dieses Metamodells werden nachfolgend innerhalb dieses Optimierungsschrittes (GlobalOpt) weitere Optimierungen durchgeführt, ohne dass weitere Simulationen von zusätzlichen Designs erforderlich sind.

Folgende Optimierungsmethoden werden dabei verwendet:

- Gradienten basierende Optimierungen (GB)
- Naturinspirierte Optimierungen:
 - Evolutionärer Algorithmus (EA)
 - Generischer Algorithmus (GA)
 - Particle Swarm Optimization (PSO)

Innerhalb dieses Optimierungsschrittes wird dann das „Best Design“ ausgewählt und als Startgeometrie für den nachfolgenden Optimierungsschritt FineOpt verwendet. Dieser Schritt läuft äquivalent zu GlobalOpt ab, jedoch werden hier die Variationsbereiche der sensitiven Inputparameter stark verkleinert.

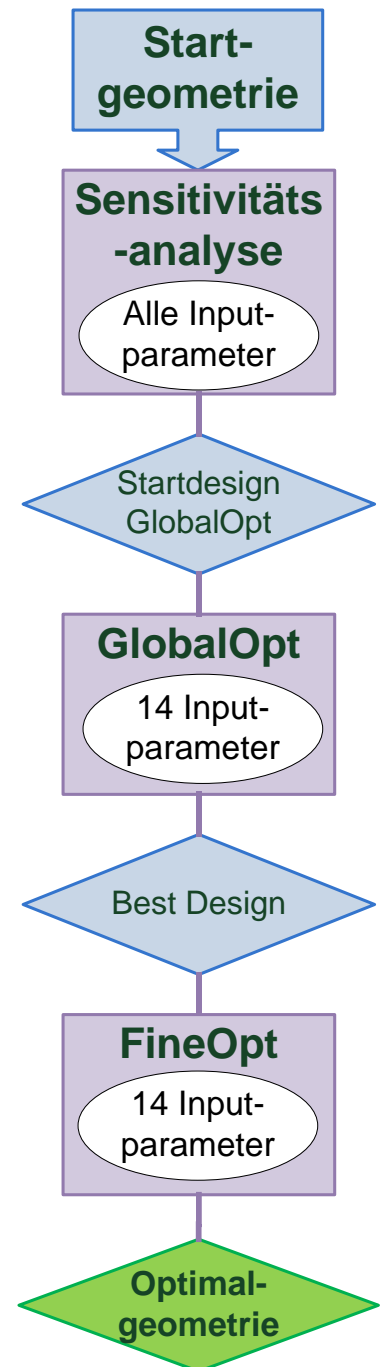


Abbildung 5: Struktogramm zur Optimierungsvorgehensweise

4 Ergebnisse

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse der Optimierung anhand der relevanten Ausgangsgrößen. Das Ergebnis der Optimierung zeigt die gewünschten Eigenschaften. Sowohl die 3-dimensionalen Plots (Abbildungen 8 und 9) als auch die Auswertung der strömungs- und festigkeitsmechanischen Kenngrößen belegen deutlich, dass die gesetzten Ziele sehr gut erreicht werden. Durch den Einsatz moderner automatisierter Optimierungsmethoden ist eine Spannungsreduktion bei gleichzeitigem Erhalt der guten strömungsmechanischen Eigenschaften möglich.

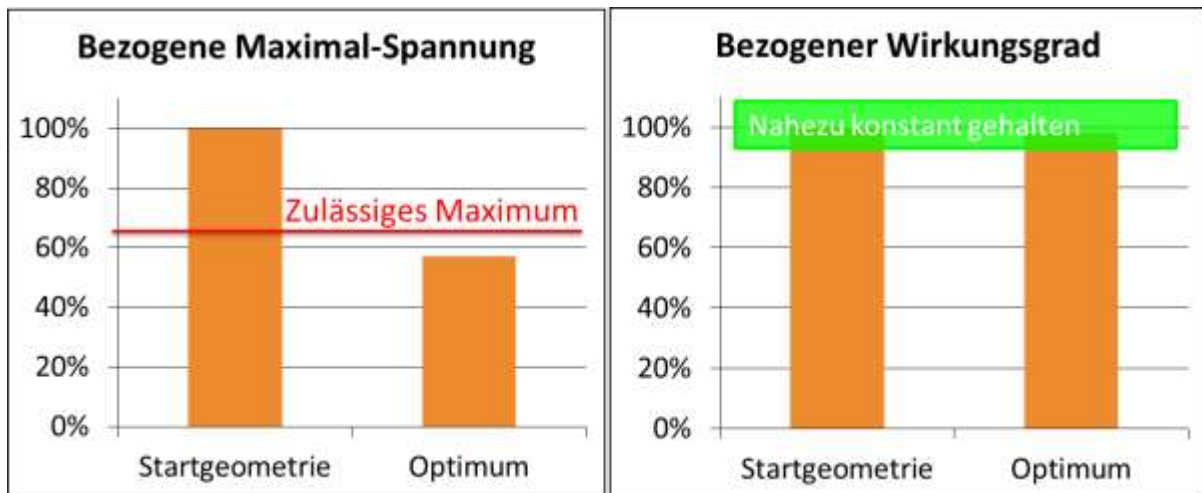


Abbildung 7: Ergebnis der Optimierung

Das Optimierungsziel ist mit insgesamt 560 Samples erreicht worden. Ohne das effektive Zusammenwirken aller Softwarekomponenten in der ANSYS Workbench sowie der hoch entwickelten Metamodelle der Software optiSLang wäre dieses Ziel entweder mit erheblich größerem Zeitaufwand oder überhaupt nicht realisierbar gewesen.

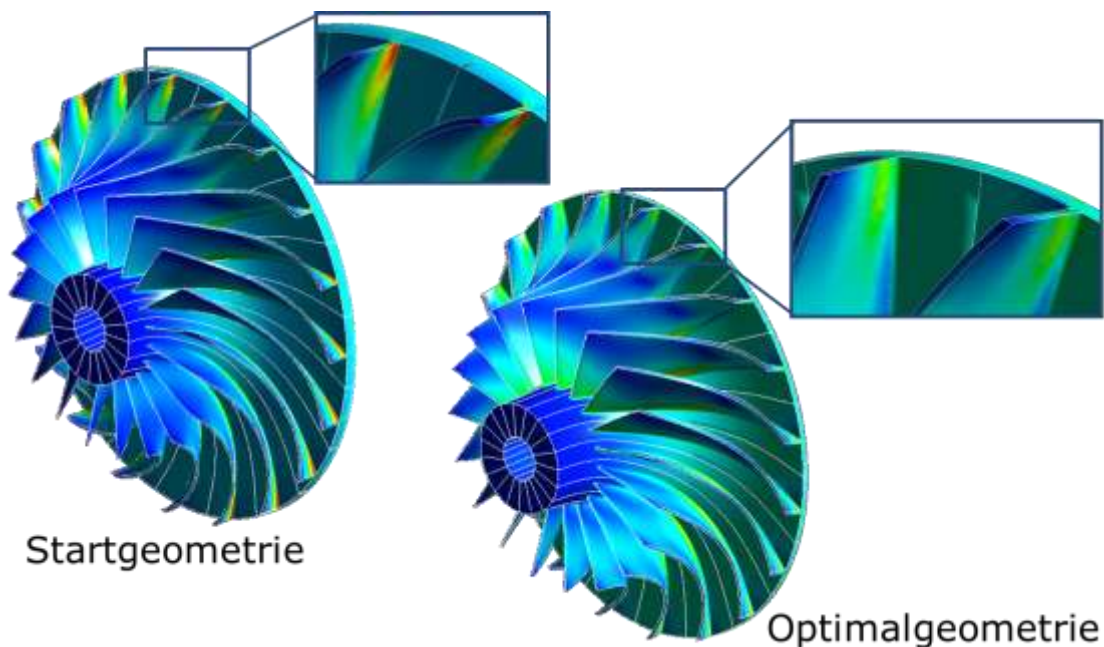


Abbildung 8: Maximale Vergleichsspannungen

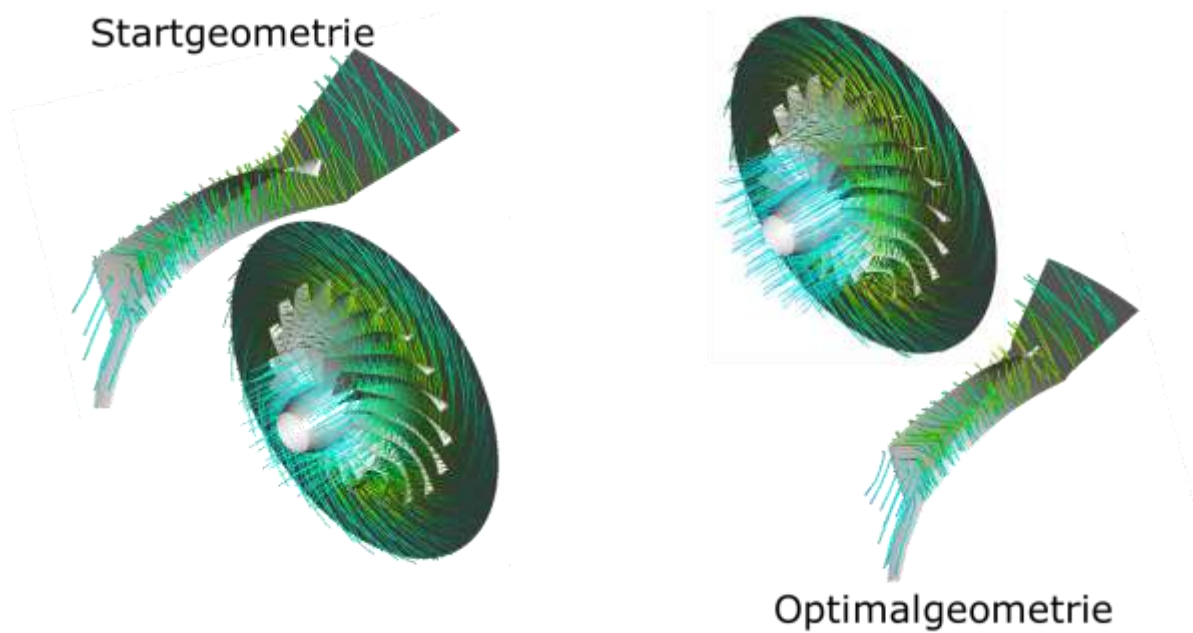


Abbildung 9: Strömungsbild der Start- und Optimalgeometrie

Literatur:

[1] M. Geller, A. Rybacki, C. Schemmann: *Geometrieoptimierung eines Radialkompressorlaufrades im Hinblick auf CFD- und FEM-relevante Zielgrößen mit Hilfe von automatisierten Optimierungsmethoden*, Tagungsbeitrag „Deutschsprachige NAFEMS Konferenz: Berechnung und Simulation – Anwendungen, Entwicklungen, Trends“, 8.-9. 05. 2012, Bamberg

[2] J. Will, T. Most: *Metamodell of optimized Prognosis (MoP) - an Automatic Approach for User Friendly Parameter Optimization*, Tagungsbeitrag „6. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag“, 15.-16.10.2009, Weimar

[3] M. Geller, A. Rybacki, C. Schemmann: *Optimierung eines hochbelasteten Radialkompressorlaufrades unter struktur- und strömungsmechanischer Betrachtung mit optiSLang und ANSYS Workbench*, Tagungsbeitrag „8. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag“, 24.-25. 11. 2011, Weimar

[4] M. Geller, A. Rybacki: *Geometrieoptimierung eines Radialkompressorlaufrades mit gekoppelter CFD- und FEM-Analyse unter Einsatz der Goal Driven Optimization in der ANSYS Workbench*, Tagungsbeitrag „ANSYS Conference & 28. CADFEM Users' Meeting“, 3.-5. 11. 2010, Aachen