

Strömungssimulationen zur Kennfeldoptimierung bei hochbelasteten Radialkompressoren

Projektleiter

Prof. Dr.-Ing.
Marius Geller

Forschungsschwerpunkt

Computersimulation
im Maschinenbau

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter

Norbert Kluck,
Alf-Peter Tiedtke,
Markus Bongert

Förderung

Fachhochschule
Dortmund,
Forschungsbudget
Landesmittel

Kontakt

Prof. Dr.-Ing.
Marius Geller, Fachbe-
reich
Maschinenbau,
Fachhochschule
Dortmund,
Sonnenstraße 96,
44139 Dortmund,
Telefon:
(0231) 9112-256,
E-Mail: geller@
fh-dortmund.de

1. Einleitung

Der vorliegende Bericht enthält Arbeitsergebnisse, die im Rahmen des Forschungsschwerpunktes „Computersimulation im Maschinenbau“ an der Fachhochschule Dortmund durchgeführt worden sind.

Die in hochbelasteten Radialverdichtern eingesetzten Laufräder weisen eine extrem ungleichförmige und instationäre Laufradabströmung auf. Insbesondere bei Teillast verursachen Ablösungen Wirbel, die zu einer blockierten Strömung führen können, so dass die Maschine nicht mehr fördert.

Sämtliche bisher bekannten Optimierungen sind ausschließlich unter aerodynamischen Gesichtspunkten durchgeführt worden. Die hier vorgestellten Optimierungsarbeiten basieren auf vorangegangenen Festigkeitsuntersuchungen.

Als Resultat von systematischen Geometrievariationen ist dort eine Laufradgeometrie entwickelt worden, die insbesondere durch gekrümmte Schaufeln am Eintritt und am Austritt gekennzeichnet ist.

Somit besteht für die Strömungsoptimierungen, die in dieser Arbeit beschrieben werden, der Anspruch, dass die entwickelte Laufradgeometrie den festigkeitsmäßigen Randbedingungen genügt.

2. Optimierungskriterien

Nachfolgend wird eine Optimierung der Kanalgestaltung beschrieben, die zu einer verbesserten Laufradgeometrie führt.

Es werden hier die strömungsmechanischen Gesichtspunkte beleuchtet. Das Potential, das sich aus der Festigkeitsoptimierung ergibt, wird voll ausgeschöpft, was insbesondere zur Folge hat, dass die Effekte, die sich aus den Schaufelverwindungen am Eintritt und Austritt ergeben, komplett in die Optimierung mit einbezogen werden können.

Als Kriterien für eine Verbesserung der Laufradgeometrie werden die Betriebskriterien einer Kompressorstufe zugrunde gelegt, die im wesentlichen durch das Kennfeld beschrieben werden. Als Optimierungskriterien gelten:

- Verbreiterung des Betriebsbereiches durch Verschiebung von Pumpgrenze bzw. Schluckgrenze
- Vergrößerung des Druckverhältnisses bei gleichem Eintrittsvolumenstrom

- Verbesserung des Wirkungsgrades in Teilbereichen

3. Berechnete Geometrievarianten

Um die einzelnen Einflüsse der jeweiligen Geometrievariationen auf das Betriebsverhalten beurteilen zu können, wird zunächst eine sogenannte Basisvariante festgelegt und geometrisch definiert, gegen die alle anderen untersuchten Geometrieinflüsse verglichen werden. Die Auslegung dieser Basisvariante orientiert sich an dem gegenwärtigen Stand der Technik.

In Abbildung 3.1 sind das Laufrad als Körper sowie das gesamte Strömungsvolumen abgebildet.

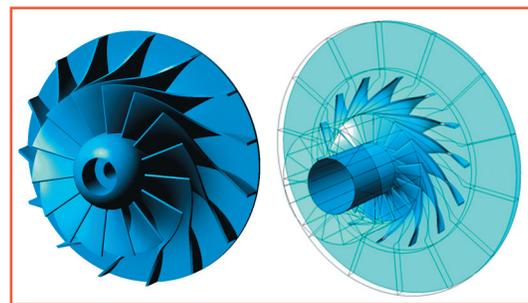


Abbildung 3.1: Basisgeometrie für die Strömungsuntersuchungen

linke Bildseite: Festkörper

rechte Bildseite: Strömungsgeometrie

Um zu einer optimalen Laufradbauform zu gelangen, sind ausgehend von der Basisgeometrie insgesamt 9 geometrische Parameter variiert worden.

Sämtliche Variationen beeinflussen die Schaufelgeometrie unterschiedlich stark und führen zumindest teilweise zu erheblichen Mehrbelastungen des Laufrades unter Festigkeitsgesichtspunkten.

In vorausgegangenen Untersuchungen ist die Laufradfestigkeit für diejenigen Geometrievarianten, die festigkeitsmäßig hoch belastet sind, einzeln nachgewiesen worden.

Die Tabelle 3.1 fasst sämtliche Geometrievarianten zusammen. Zur Veranschaulichung sind die Geometrieänderungen visualisiert.

Variation	Erklärung	Geometrie
Variation des Umschlingungswinkels	Beeinflussung der Schaufellänge	
Variation Twist	Verdrehung der Schaufel am Eintritt	
Variation Rake	Verdrehung der Schaufel am Austritt	
Brust und Rückenstoß	Veränderung des Schau-felwinkels β_1	
Verzögerungsverhältnis der Meridiangeschwindigkeit	Verringern der Austrittsbreite b_2 führt zu einer Beschleunigung der Meridiangeschwindigkeit	
Lage der Eintrittskante	Zurückziehen der Eintrittskante in den Saugmund	
Schau-fel-ersperrung	Änderungen der Schau-felstärke	
Variation der Schau-felan-zahl	Veränderung der Teilung eines Laufradsektors	
Schnell-läufigkeit	Veränderung des Laufradaußendurchmessers und der Drehzahl bei konstanter Umfangsgeschwindigkeit	

Tabelle 3.1: Übersicht über die Geometrievarianten

Mit den Begriffen „Twist“ und „Rake“ werden die Verwindungen der Schaufeln bezeichnet. Die Abbildung 3.2 erläutert die drei Winkel, die im wesentlichen die Geometrie einer Schaufel beschreiben.

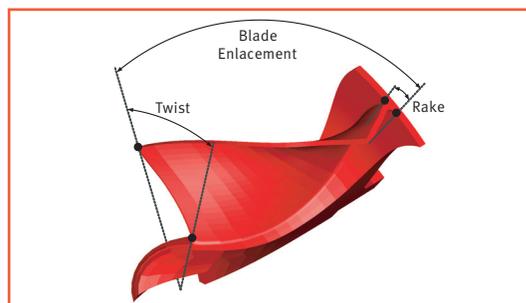


Abbildung 3.2: Definition der verschiedenen Winkel zur Beschreibung der Schaufelgeometrie: „Umschlingungswinkel“: gesamter Winkel der Schaufel in Umfangsrichtung „Twist“: Verdrehung der Schaufel am Eintritt „Rake“: Verdrehung der Schaufel am Austritt

Die Werte für den „Twist“ und den „Rake“ werden positiv gezählt, wenn der Schaufelkopf im Bezug zum Schaufelfuß in die positive Rotationsrichtung des Laufrades verdreht worden ist. Sämtliche Vergleiche sind unter der Voraussetzung durchgeführt worden, dass sich die Umfangsgeschwindigkeit u_2 und der Schaufelaustrittswinkel β_2 nicht ändern. Somit ist die Vergleichbarkeit der berechneten Kennlinien untereinander ausreichend genau sichergestellt.

4. Berechnete Kennlinien

Im folgenden Abschnitt werden die verschiedenen untersuchten Varianten einander gegenübergestellt. Da es in dieser Ergebniszusammenstellung darauf ankommt, die Effekte vergleichend in ihrer jeweiligen Wirkung untereinander aufzuzeigen, sind sämtliche Diagramme als normierte Darstellungen wiedergegeben. Die Abbildung 4.1 zeigt die Druckerzeugung des Laufrades als Funktion des dimensionslosen Volumenstromes. Die Kennlinie der Basisgeometrie ist besonders hervorgehoben.

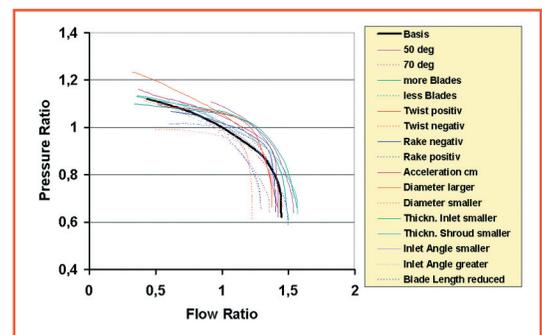


Abbildung 4.1: Vergleich der Druckverhältnisse als Funktion des dimensionslosen Volumenstromes für sämtliche Untersuchungsvarianten

Die Untersuchungen ergeben folgendes Bild (vgl. Abbildung 4.1):

- Kleinere Umschlingungswinkel vergrößern die Druckverhältnisse, die Wirkungsgrade und führen zu besseren Pump- und Schluckgrenzen.
- Veränderungen des Anströmwinkels haben einen vergleichsweise geringen Einfluss.
- Eine zurückgezogene Eintrittskante verschlechtert sämtlich Bedingungen.
- Eine beschleunigte Meridiangeschwindigkeit vergrößert sowohl das Druckverhältnis als auch die Wirkungsgrade.
- Eine vergrößerte Schaufelzahl verbessert das Druckverhältnis und den Wirkungsgrad. Die

Pumpgrenze und die Schluckfähigkeit werden merklich verbessert.

- Ein positiver Twist (Verwindung der Schaufel am Eintritt in Drehrichtung) steigert das Druckverhältnis und verbessert den Wirkungsgrad. Die Pumpgrenze sowie die Schluckgrenze werden verschoben. Die Strömungsablösungen am Laufradaustritt verringern sich.
- Ein negativer Rake (Verwindung der Schaufel am Austritt entgegen der Drehrichtung) führt zu den gleichen Verbesserungen wie ein positiver Twist. Die Strömung im Abströmgebiet wird deutlich verbessert (Jet/Wake).
- Ein weniger schnellläufiges Laufrad (=vergrößerter Durchmesser) verbessert sämtliche Parameter merklich.
- Eine verringerte Schaufelstärke sowohl am Eintritt als auch über die gesamte Schaufelfläche führt zu größeren Druckverhältnissen und Wirkungsgraden. Eine Anschärfung am Eintritt wirkt sich stärker aus als eine Verringerung der Schaufelstärke am Kopf.

5. Geometrieoptimierung

Um zu einer optimierten Laufradgeometrie zu gelangen, wurden sämtliche zuvor genannten und im einzelnen untersuchten Kriterien nach ihren jeweiligen besten Ergebnissen geordnet und in die Optimalgeometrie eingebunden.

Einen qualitativen Geometrievergleich der zwei verschiedenen Varianten erlaubt die Abbildung 5.1. Dort sind die Strömungsvolumina sowie die berechneten Geschwindigkeitsverteilungen vergleichend gegenübergestellt.

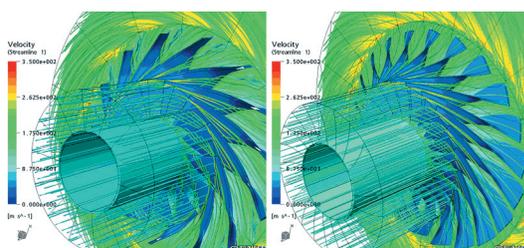


Abbildung 5.1: Zum Vergleich der Laufradgeometrien und der Strömungsgeschwindigkeiten
linke Bildseite: Basislaufrad;
rechte Bildseite: optimiertes Laufrad

Um die Verbesserungen visualisieren zu können, sind in der Abbildung 5.2 und in der Abbildung 5.3 die Geschwindigkeiten in einer

Meridianebene (S1-Ebene) bei 50% Kanalerstreckung nahe dem Auslegepunkt abgebildet.

Die Reduktion der Ablösezone am Laufradaustritt beim optimierten Laufrad ist besonders gut durch die Konturplots erkennbar. Die extreme Reduktion des sogenannten Jet-Wake-Gebietes ist in erster Linie auf die Verwindung der Schaufeln zurückzuführen.

Somit belegt die Abbildung 5.2 am eindrucksvollsten den Nutzen von verwundenen Schaufeln.

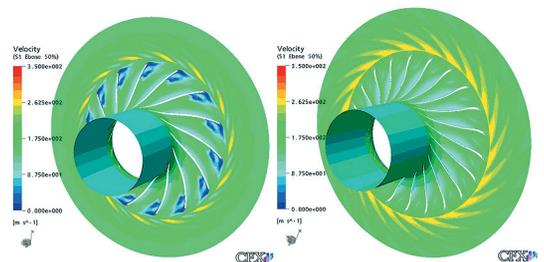


Abbildung 5.2: Zur Reduktion der Ablösegebiete als Folge der Geometrieoptimierung:
linke Bildseite: Basislaufrad;
rechte Bildseite: optimiertes Laufrad

Eine gute zusätzliche Visualisierung der Geschwindigkeitsverhältnisse erlaubt die Abbildung 5.3.

Dort sind die Geschwindigkeitsvektoren der Optimalvariante im Vergleich zum Basislaufrad gegenübergestellt. Die Detaildarstellung verdeutlicht besonders gut die Verkleinerung des Ablösegebietes.

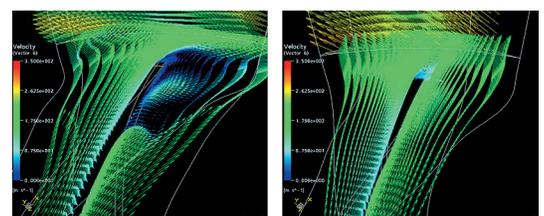
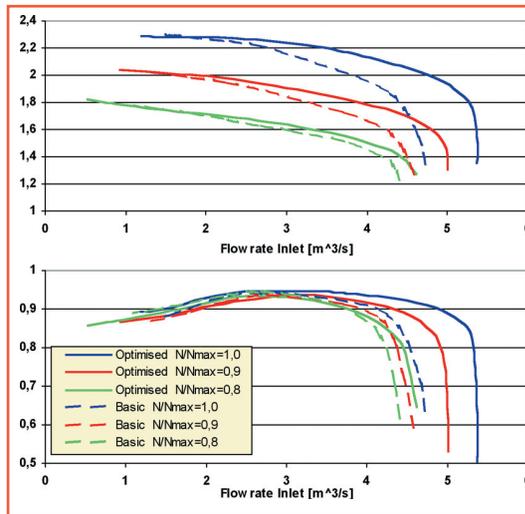


Abbildung 5.3: Ablösegebiete als Strömungsvektoren dargestellt:
linke Bildseite: Basislaufrad;
rechte Bildseite: optimiertes Laufrad

Über das Gesamtergebnis der Optimierung gibt die folgende Abbildung 5.4 Auskunft. Dort sind die Kennlinien des optimierten Laufrades den Kennlinien des Basislaufrades gegenübergestellt.



Vergleich der Druckverhältnisse und der Wirkungsgrade für das optimierte Laufrad mit dem Basislaufrad bei drei Drehzahlen

Der Erfolg der Optimierungsarbeiten wird durch die berechneten Kennlinien eindrucksvoll belegt. Die Optimalvariante ist dem Basislaufrad in allen Kriterien deutlich überlegen.

Neben einer quantitativen Verbesserung der Druckerzeugung und der Wirkungsgrade ist insbesondere zu bemerken, dass sich die Grenzen der Betriebsbereiche merklich vergrößert haben.

Abbildung 5.4: Vergleich der Druckverhältnisse und der Wirkungsgrade für das optimierte Laufrad mit dem Basislaufrad bei drei Drehzahlen