

Festigkeitsoptimierung von radialen Kompressorlaufrädern

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,
Fachbereich
Maschinenbau,
Fachhochschule
Dortmund,
Sonnenstraße 96,
44139 Dortmund,
Telefon:
(0231) 9112-256,
E-Mail: geller@
fh-dortmund.de

1. Einleitung

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

Laufblätter von radialen Kompressoren sind mechanisch hochbelastete Bauteile einer Strömungsmaschine. Die vorhandenen maximalen Spannungen sind deshalb so gefährlich, weil das rotierende Laufblatt extreme Fliehkräfte besitzt, die bei einem Bauteilversagen erhebliche Schäden verursachen können.

Eine wesentliche Basis für die Untersuchungen stellen vorausgegangene Studien von A. Lohmberg dar. Dort werden eindeutige Aussagen zur strömungsoptimierten Gestaltung von Schaufelgeometrien bei radialen Laufblättern getroffen. Die Festigkeit der Schaufeln, die grundsätzlich entgegen der Strömungsoptimierung wirkt, ist dort nicht untersucht worden. Es werden hohe Spannungen an bestimmten Stellen des Schaufelfußes erwartet.

Ziel dieser Untersuchungen ist die detaillierte Festigkeitsanalyse eines Radialverdichterlaufblattes, wobei geometrische Optimierungskriterien der Schaufel und des Laufblattkörpers im Hinblick auf die Verbesserung des Betriebsverhaltens im Vordergrund stehen.

2. Optimierungsstrategie

Um zu einer optimalen Laufblattgeometrie zu gelangen, spielen einerseits strömungsmechanische Randbedingungen eine wesentliche Rolle, da die Schaufelform unmittelbaren Einfluss auf die Leistung des Laufblattes ausübt. Andererseits existieren auch Bereiche im Laufblattkörper, die die Festigkeit wesentlich beeinflussen, die aber für die Kanalgestaltung und damit für die Strömung keine Rolle spielen.

Somit hat es sich als sinnvoll erwiesen, die Geometrieoptimierung in mehreren voneinander unabhängigen Phasen durchzuführen:

- Phase 1: Geometrievariation der Laufblattkontur ohne Veränderung der Schaufelform
- Phase 2: Geometrievariation der Schaufel. Hierbei werden lokal bewusst größere Spannungen zugelassen.
- Phase 3: Optimierung der gesamten Laufblattgeometrie auf ein zuvor festgelegtes Spannungsmaximum

Die Untersuchungen in der Phase 2 sind naturgemäß weitaus komplexer als diejenigen in der

Phase 1, weil hierbei mehr oder weniger deutliche Rückwirkungen auf das strömungsmechanische Verhalten zu erwarten sind.

Nachfolgend wird zunächst die Basisvariante beschrieben. Die Gesamtgeometrie des Basislaufblattes ist in der Abbildung 2.1 in mehreren Ansichten als Computermodell wiedergegeben.



Abbildung 2.1: Dreidimensionale Ansichten des Basislaufblattes

3. Geometrievariation des Laufblattkörpers (Phase 1)

Die Optimierungsarbeiten der Phase 1 sind gekennzeichnet durch:

- Verbesserungen im Nabenbereich
- Veränderungen an der Rückwand des Laufblattes
- unterschiedliche Schaufeldicken
- variabler Radius der Verrundung am Schaufelfuß

Die Abbildung 3.1 zeigt exemplarisch die Netze für die Basisgeometrie und die Variante mit der veränderten Rückwandkontur. Der geschwungene Verlauf der Laufblattdruckseite ist gut zu erkennen.

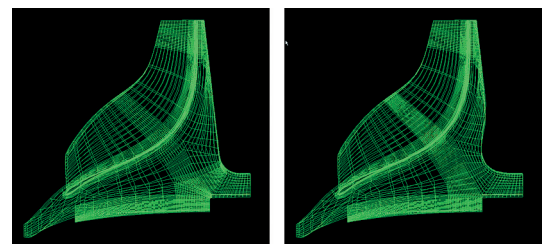


Abbildung 3.1: Veränderte Rückwandkontur
linke Bildseite: Basislaufblatt
rechte Bildseite: Geometrie der Phase 1

In der Abbildung 3.2 werden die Spannungen der Basisgeometrie den Spannungen der veränderten Geometrie aus der Phase 1 gegenübergestellt. Wie eine detaillierte Analyse der Spannungen am Eintritt und am Austritt im Bereich des Schaufelfußes belegen, ist das Potential dieser ersten Optimierung beträchtlich.

Insbesondere zeigt sich, dass sich die Spannungen auf ca. 50% ihres ursprünglichen Wertes reduzieren lassen. Andererseits ist von besonderer Bedeutung, dass sich diese Spannungsreduktion nur durch gezielte Geometrieoptimierungen von Geometrieteilen erreichen lässt, die auf die Strömungsführung in den Schaufelkanälen keinen Einfluss haben.

Dieses durch die Phase 1 gewonnene Potential kann benutzt werden, um den Strömungskanal hinsichtlich seiner Strömungsgeometrie zu optimieren. Dabei sind lokal höhere Spannungen deshalb zulässig, weil eine zuverlässige Festigkeitsanalyse gezielte Aussagen erlaubt und somit ein „Ausreizen“ der Geometrie sicher möglich ist.

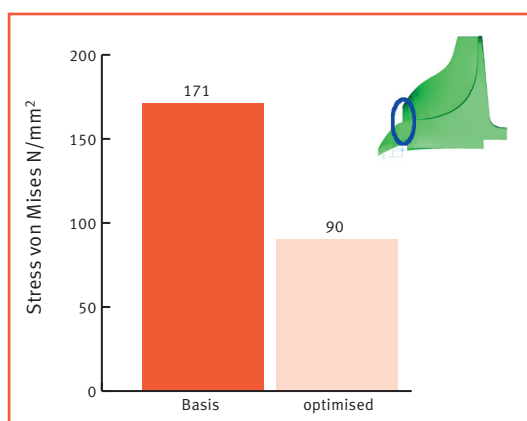
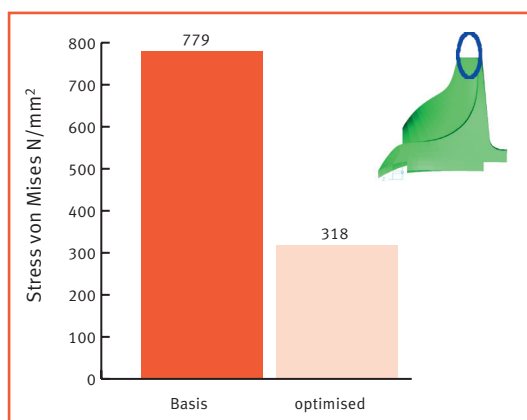


Abbildung 3.2: Reduktionspotential der Spannungen infolge der Geometrieänderungen aus Phase 1 am Laufradaustritt (oben) und am Laufradeintritt (unten) dargestellt

4. Geometrievariation der Schaufel (Phase 2)

In der Phase 2 wird die Geometrie dadurch optimiert, dass der Schaufelverlauf geändert wird. Um eine Möglichkeit zu erhalten, die Geometrieände-

rungen strömungsmechanisch zu bewerten, sind grundsätzlich sämtliche Änderungen der Schaufelgeometrie unter Beibehaltung der Geschwindigkeitsdreiecke sowohl am Eintritt als auch am Austritt durchgeführt worden.

Diese hat insbesondere durch die Gleichheit der Dreiecke am Austritt eine sogenannte „Euler-Gleichheit“ zur Folge. Somit ist sichergestellt, dass die Kennlinien der verschiedenen Laufräder unmittelbar miteinander verglichen werden können. Die Ergebnisse dieser Strömungsuntersuchungen sind an anderer Stelle veröffentlicht. Nähere Hinweise können unter www.computersim.fh-dortmund.de abgerufen werden.

Die Optimierung der Schaufelverläufe ist in zwei Hauptbereiche unterteilt:

- Einfluss des Umschlingungswinkels auf die Festigkeit.
- Einfluss von verdrehten Schaufelkanten am Eintritt und Austritt (sog. Twist und Rake).

Die zuvor genannten Parameter sind in der Abbildung 3.2 im Forschungsbericht „Strömungssimulation zur Kennfeldoptimierung bei hochbelasteten Radialkompressoren“ dargestellt.

Der Umschlingungswinkel und insbesondere die Neigungen der Schaufelkanten haben beträchtlichen Einfluss auf den Wirkungsgrad und das Kennlinienverhalten des Laufrades. Es ist bekannt, dass zwischen strömungsmechanischen Verbesserungen und mechanischen Bedingungen eine gegenläufige Tendenz besteht.

Ein aus strömungsmechanischen Gesichtspunkten optimierter Laufradkanal hat in der Regel sehr hohe Spannungen zur Folge. Eine wirkliche Optimierung der Laufradgeometrie gelingt also nur dann, wenn beide physikalischen Bereiche zusammen betrachtet werden.

Die Abbildung 4.1 zeigt beispielhaft einige Laufräder mit unterschiedlichen Verwindungen der Schaufeln. Aus den verschiedenen Schaufelverwindungen kann eine optimierte Geometrie abgeleitet werden.

In der Abbildung 4.2 sind exemplarisch die Spannungen für das Basislaufrad sowie für eine Variante mit verwundenen Schaufeln dargestellt. Wie der Abbildung entnommen werden kann, gelingt eine Optimierung, indem:

- die Lage der Spannungsmaxima von den gefährlichen Stellen am Schaufelfuß verlagert wird und
- die gesamte Laufradgeometrie hinsichtlich ihrer Spannungsverteilung optimal belastet wird.

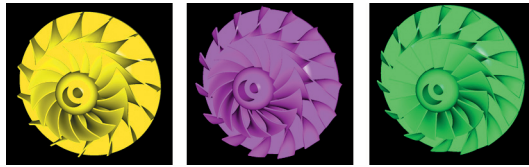


Abbildung 4.1: Laufräder mit unterschiedlichen Verwindungen der Schaufel am Eintritt bzw. am Austritt der Schaufel – linke Bildseite: nur am Eintritt (Twist); Bildmitte: nur am Austritt (Rake); rechte Bildseite: am Eintritt und am Austritt

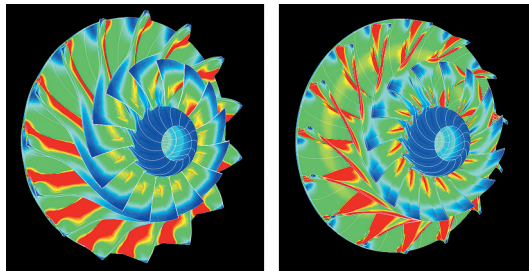


Abbildung 4.2: Qualitativer Vergleich der durch die Schaufelverwindungen verlagerten Spannungsmaxima (links: Basislaufrad, rechts Optimallaufrad)

Als weiteres wesentliches Ergebnis kann festgehalten werden, dass sich die Spannungen bei kleineren Umschlingungswinkeln der Schaufel reduzieren, wie der Abbildung 4.3 entnommen werden kann. Interessanterweise kommt dieser Effekt auch einer Strömungsoptimierung entgegen. Wie durch entsprechende Untersuchungen gezeigt worden ist, besteht generell der Trend, dass sich kleinere Umschlingungswinkel der Schaufeln positiv auf das Betriebsverhalten einer Verdichterstufe auswirken.

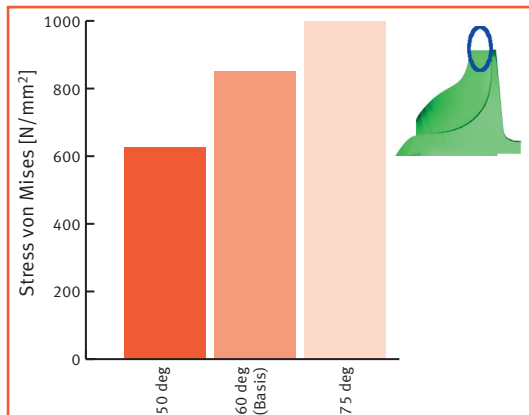


Abbildung 4.3: Maximalspannungen am Austritt bei verschiedenen Umschlingungswinkeln der Schaufel

Die Spannungen am Eintritt besitzen bereits für das Basislaufrad ein eher geringes Niveau. Somit können an dieser Stelle Spannungen durch eine gezielte und zuverlässige Festigkeitsanalyse auf höherem Niveau akzeptiert werden. Dieser Zusammenhang macht eine Schaufelverwindung möglich, die der Strömung deutlich zugute kommen kann. In der Abbildung 4.4 sind die Maximalspannungen am Eintritt und Austritt für verschiedene Schaufelverwindungen dargestellt. Obwohl die Höhe der Balken in diesem Bild nach rechts hin mit größer werdenden Verwindungen zunimmt, bleibt das Spannungsniveau am Austritt insgesamt innerhalb der zulässigen Grenzwerte.

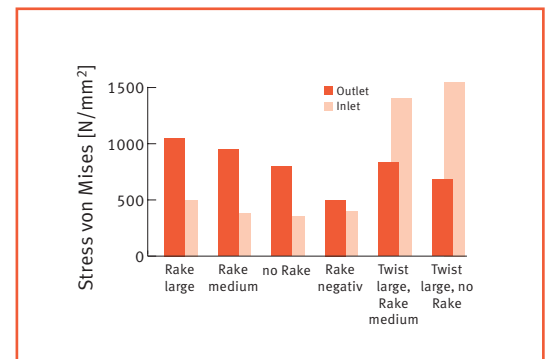


Abbildung 4.4: Maximalspannungen am Eintritt bei verschiedenen Verwindungen (Twist und Rake) der Schaufeln

Das für die Spannungen am Eintritt gesagte gilt analog für die Spannungen am Austritt, obwohl sich die Tendenzen dort komplexer verhalten. Zunächst ist festzuhalten, dass bereits für die Basisgeometrie, die keinerlei Verwindungen besitzt, hohe Spannungen vorhanden sind. Diese lassen sich in einem ersten Schritt durch die geschilderten Maßnahmen der Phase 1 reduzieren. Das dadurch gewonnene Potential kann dann dazu genutzt werden, die Schaufeln mit einer gezielten Verwindung zu versehen, die dann der Strömungsführung und damit dem Betriebsverhalten entgegenkommt.

5. Geometrieoptimierung des Laufrades (Phase 3)

In diesen Kapitel wird ein optimiertes Laufrad vorgestellt. Dabei werden alle zuvor als optimal festgelegten Geometrieigenschaften gleichzeitig in dem Modell berücksichtigt. Um die Anzahl der Geometrieparameter auf ein sinnvolles Maß zu reduzieren, wurden die Untersuchungen auf ein Laufrad mit 60° Umschlingungswinkel beschränkt.

Bezüglich der Werte für die maximal zulässigen Spannungen wird eine Festlegung getroffen: Es gilt die Forderung, dass das optimale Laufrad dadurch gekennzeichnet ist, dass es eine maximale positive Neigung am Eintritt und eine maximale negative Neigung am Austritt besitzt. Dabei dürfen die Spannungen an keiner Stelle die Höhe von 300 N/mm^2 überschreiten.

In der Abbildung 5.1 sind exemplarisch die Spannungen für den Laufradaustritt dargestellt, die sich aus einer Feinoptimierung der Schaufelgeometrie ergeben.

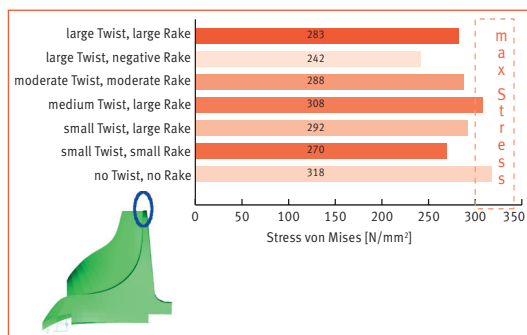


Abbildung 5.1: Spannungen am Schaufelfußaustritt für die optimalen Laufräder mit 60° Umschlingungswinkel:

Aus den in der Abbildung 5.1 dargestellten Spannungen lassen sich unter anderem folgende Aussagen ableiten:

- Die höchsten Spannungen sind bei dem Laufrad ohne Schaufelverwindung vorhanden.

- Die Kombination aus Twist und Rake kann das Spannungsmaximum am Austritt verringern.

6. Fazit

Aus Festigkeitsgesichtspunkten ist ein positiver Rake am Austritt in der Größenordnung von $+2,5^\circ$ bis $+5^\circ$ realisierbar, wenn gleichzeitig am Eintritt ein negativer Twist der Schaufel in der Größenordnung von $-7,5^\circ$ berücksichtigt wird.

Das unter diesen Bedingungen modellierte Laufrad vergleicht die Abbildung 6.1 mit der Basisvariante. Deutlich sind in dieser Abbildung die Schaufelverwindungen am Eintritt und am Austritt zu erkennen.

Das Potential der beschriebenen Festigkeitsoptimierungen kann dazu ausgenutzt werden, die Kennlinie sowie den Wirkungsgrad des Laufrades gezielt zu verbessern.

Hierzu sind in dem weiteren Beitrag dieses Forschungsberichtes „Strömungssimulationen zur Kennfeldoptimierung“ nähere Angaben enthalten.

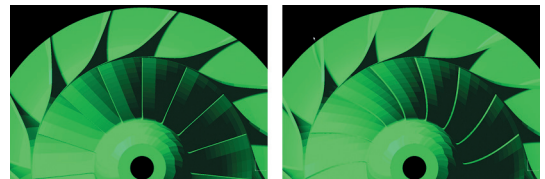


Abbildung 6.1: Vergleich des optimierten Laufrades mit dem Basislaufrad
links: Basislaufrad, rechts Optimallaufrad: