

Korrektheit des Druckes
bestätigt. 29. Nov. 1993

Diss. ETH Nr. 10252

1993-11-29 Gyarmathy

**Einfluss der Diffusorgeometrie auf
die Instabilitätsgrenze des
Radialverdichters**

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels
Doktor der Technischen Wissenschaften

der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von
RENÉ HUNZIKER
Dipl. Masch.-Ing. ETH
geboren am 30. Mai 1959
von Unterentfelden (AG) und Moosleerau (AG)

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. G. Gyarmathy, Referent
Prof. Dr. P. Suter, Korreferent

Zürich 1993



Cat E

KURZFASSUNG

In einem geschlossenen Kreislauf wurden einstufige Radialverdichter mit offenen Laufrädern und verschiedenen unbeschaufelten und beschaufelten Diffusoren detailliert untersucht. Als Versuchsmedium diente Luft, die Umfangsmachzahl wurde im Bereich von 0.4 bis 0.9 variiert. Die beiden verwendeten Laufräder unterschiedlicher Auslegung wiesen am Austritt um 30° zurückgeneigte Schaufeln auf. Alle vier eingesetzten beschaufelten Ringdiffusoren sowie der unbeschaufelte Diffusor waren parallelwandig und hatten identische Breite. Die unterschiedlichen Diffusorgeometrien wurden durch Verdrehen der kreisbogenförmigen Diffusorschaukeln konstanter Dicke um ihre gerundeten Vorderkanten oder durch Entfernen jeder zweiten Schaufel erzeugt.

Das Ziel war, Kriterien für den Instabilitätsbeginn zu formulieren, den Einfluss der Geometrie von beschaufelten Radialdiffusoren auf die Instabilitätsgrenze zu klären und Anhaltspunkte für bauliche Verbesserungen zur Verbreiterung des stabil fahrbaren Betriebsbereichs zu erhalten.

Die Untersuchungen an den Stufen umfassten Kennfeldmessungen mit exaktem Feststellen der Instabilitätsgrenzen und die Bestimmung der Instabilitätsformen. Besonderes Augenmerk wurde dem statischen Druckaufbau und der Druckverteilung an der Laufradgegenkontur und an den Diffusorwänden geschenkt. Diese in zahlreichen Betriebspunkten entlang der Drehzahllinien ausgeführten Druckmessungen (Zeitmittelwerte) ermöglichten einen vertieften Einblick in das Betriebsverhalten der einzelnen Verdichterkomponenten.

In der ganzen Stufe herrschte am Umfang eine sehr ausgeglichene Druckverteilung. Die Auswirkungen von Einbauten, Eintritts- und Austrittspartie auf das Strömungsfeld sind als minim zu bezeichnen. Anhand des Druckverlaufs an der Laufradgegenkontur konnte in beiden Rädern bei kleinen Volumenströmen das Einsetzen einer Strömungsrezirkulation am Radeintritt erkannt werden. Diese trat als Folge einer inzidenzbedingten stationären Ablösung bei stark verringertem Durchsatz auf. In den Diffusoren erschienen in den Druckverläufen keine Anzeichen, die auf einen Zusammenbruch des Druckaufbaus durch Ablösungen hinweisen würden. Es zeigte sich jedoch in den beschaufelten Radialdiffusoren im Bereich zwischen Radaustritt und engstem Diffusorquerschnitt eine starke Abhängigkeit der Druckverteilung von der Zuströmrichtung. Die gemessenen Verteilungen im Radialdiffusor wurden für eine Diffusorkonfiguration in mehreren Betriebspunkten mit rechnerisch (3-dimensional, viskos) bestimmten Verteilungen verglichen.

In den Stufen mit dem unbeschaufelten Diffusor traten umlaufende Druckstörungen im Diffusor auf, wenn der Winkel der nominellen absoluten

Radabströmgeschwindigkeit weniger als 15° bis 17° betrug. Ein umfassender Vergleich mit der Literatur erlaubte die Einteilung solcher Strömungsinstabilitäten in zwei Gruppen. Eine gute Übereinstimmung zwischen der Messung und den Literaturstellen bezüglich Umlaufgeschwindigkeit und Zuströmwinkel in Abhängigkeit der Zellenzahl konnte aufgezeigt werden.

In den Radialverdichterstufen mit beschauelten Diffusoren erschien als massgebendes Kriterium für den Instabilitätsbeginn hauptsächlich das Maximum der Stufenkennlinie (Kennliniensteigung null). Diese Feststellung ist in Übereinstimmung mit einer Theorie von GREITZER. Bei Überschreiten des Kennlinienscheitels während dem Androsseln trat eine dynamische Wechselwirkung zwischen Verdichter und System auf, die sich in einer den ganzen Verdichterumfang gleichzeitig erfassenden Druck- und Durchsatzschwankung äusserte. Es wurde eine Methode von DEAN verfeinert, die es erlaubt, den Beitrag der einzelnen Verdichterkomponenten zum Verlauf der Stufenkennlinie aufzuzeigen und zu bewerten. Dazu dienen die Komponentencharakteristiken, welche die Grösse der Druckerhöhung in den verschiedenen Abschnitten des Verdichters über dem Durchsatz beschreiben. Anhand der Steigungen dieser Kennlinien kann die Stärke ihrer stabilisierenden oder destabilisierenden Wirkung beurteilt werden. Dabei zeigten sich für die verschiedenen Komponenten typische Eigenschaften. Das Laufrad mit zurückgeneigten Schaufeln am Radaustritt ist stabilisierend, solange keine Ablösungen (Rezirkulation) auftreten. Der Diffusoreintrittsbereich wirkt stark stabilisierend bei hohen Durchsätzen, verliert allerdings an stabilisierender Wirkung, wenn der Durchsatz verringert wird. In einigen Fällen ist er an der Instabilitätsgrenze sogar destabilisierend. Der Diffusorkanal ist inhärent destabilisierend. An der Instabilitätsgrenze selbst heben sich die Einflüsse aller Komponenten gegenseitig gerade auf.

Nach Überschreiten der Instabilitätsgrenze scheint der Diffusoreintrittsbereich eine wichtige Rolle zu spielen. Der Verlauf seiner Charakteristik zeigt an, dass hauptsächlich hier die für die Volumenstromschwankung benötigte Energie übertragen wird.

Durch die Analyse der Kennlinienverläufe der verschiedenen Komponenten kann das Verhalten der ganzen Verdichterstufe besser verstanden werden. Als Beispiel konnte mit vereinfachten, auf die wesentlichen Merkmale reduzierten Komponentenkennlinien ein bekanntes Phänomen im Verlauf der Pumpgrenze von Turboladern im mittleren Drehzahlbereich neu gedeutet werden.

Die Stärke der destabilisierenden Wirkung des Diffusorkanals korreliert mit der Grösse des Druckumsetzungsgrades im Kanal. Auch besteht ein Zusam-

menhang zwischen Kanalgeometrie und Druckumsetzung, etwa vergleichbar mit ebenen 2-dimensionalen Diffusoren. Durch diese Beziehungen zwischen der Geometrie des Diffusorkanals und dessen destabilisierenden Einfluss werden die mit Geometrieänderungen bewirkten Instabilitätsgrenzenverschiebungen erklärbar.

Weiter wird aufgezeigt, dass die Verwendung von Schaufelprofilen, welche die Verluste bei geringem Durchsatz verkleinern, die Instabilitätsgrenze zu geringeren Durchsatzzahlen verschieben kann. An einem Beispiel ist dies gezeigt. Es lassen sich konstruktive Hinweise zur Gestaltung der Diffusor-eintrittspartie ableiten.

ABSTRACT

"The Influence of the Diffuser Geometry on the Instability Limit of Centrifugal Compressors"

The aim of this work was to establish criteria for the influence of key geometric factors in vaned diffusers on the stability limit of the compressor stage.

Detailed measurements were performed in a closed-loop test rig on single-stage centrifugal compressors using air. Two unshrouded impellers of different design, but both with 30° backswept blades were alternatively combined with a vaneless and four different vaned radial diffusers. All the diffusers were plane walled and of equal axial width. By adjusting the circular arc diffuser vanes (by turning them around a pin fixing the leading edge) different diffuser configurations could be realized. The diffuser exhausted into a toroidal collector which ensured peripherally very uniform pressure conditions.

The performance map of each compressor configuration was measured. The stability limit was accurately determined on several speed lines and the type of instability was deduced. In addition, a large number of conventional wall pressure taps were located along the casing contour as well as in the front and rear diffuser walls. This provided detailed insight in the pressure rise process and the pressure distribution within the stages. These wall pressure data were taken in numerous operating points along the speed lines, thereby showing the operational behaviour of the individual stage elements. Fast-response wall pressure transducers upstream the stage, at impeller exit and downstream the diffuser were used to detect and identify flow instabilities.

The experimental observations made at low flow rates can be summarized as follows.

By means of the measured pressure rise along the casing the onset of a stationary inducer-tip recirculation could be identified. This flow recirculation set in at a critical inducer incidence angle. In the vaned diffusers the wall pressure distributions never showed signs of flow separation. The pressure field in the vaneless and semi-vaneless space was strongly dependent on flow rate. The measured pressure fields were compared with 3D viscous flow calculations in several operating points, both methods showing qualitatively identical flow incidence effects.

In the vaneless diffuser, rotating stall cells were observed. Critical diffuser inlet flow angles for diffuser rotating stall were between 15° and 17° . A comprehensive comparison with the open literature was made. The measured propagation speed of the stall cells and its dependence on inlet

flow angle and on cell number were in accordance with the literature data. The main purpose of the vaneless-diffuser experiments was however the comparison of the impellers used for investigating the vaned diffuser configurations.

In the centrifugal compressor stages with vaned diffusers the stability limit regularly occurred at the flow rate giving maximum pressure rise in the overall stage. Here the slope of the stage characteristic was zero. This observation is in perfect accordance with Greitzer's theory for large B-Parameter systems. Mild surge arises as a dynamic instability on the positively sloped part of the stage characteristic. The accompanying pressure fluctuations were synchronous over the circumference of the compressor and were present in the whole compression system loop. The main body of the data analysis was concentrated on the pressure rise characteristics of the individual stage elements (impeller, diffuser entry, diffuser channel ...). The contribution of each component to the overall stage characteristic was deduced from the data. The analysis of the component characteristics followed a suggestion by Dean but refined his method. The slopes of the component characteristics indicate the strength of the stabilizing or destabilizing effect of the corresponding stage element. Thereby typical features could be identified and differences could be revealed. The backswept impeller is a typically stabilizing element. With the transition to inducer tip recirculation the impeller in itself becomes destabilizing. The diffuser entry region is a very strong stabilizing subcomponent over a wide flow range. This stabilizing influence decreases as the flow rate is reduced. The diffuser channels play an inherently destabilizing role. The stability limit is at the flow rate where these influences cancel and the overall stage characteristic changes its slope to become destabilizing.

In operating points with mild surge the diffuser entry region seems to be an important element. The diffuser entry characteristic is positively sloped and the energy input for mild surge oscillations occurs in this subcomponent.

The analysis of the component characteristics provides a more detailed understanding of the behaviour of the whole stage and can be logically extended to other vaned-diffuser compressors. It almost automatically explains the occurrence of frequently observed anomalies in the shape of the surge line of centrifugal compressors.

Surge line movements caused by changes in the diffuser channel geometry can be understood as the consequence of the basic relationship between the diffuser channel geometry and the recovery coefficient, similar to that observed in 2-dimensional diffusers. Further, diffuser vane profiles which give lower losses at reduced flow rate result in wider stable stage operating

range. In this context some design guidances for the diffuser entry region could be formulated.

In summary, the method of component pressure rise characteristics provides a detailed understanding of the causes leading to flow instabilities. Especially it explains when and why the stability limit is determined by the impeller (by inducer-tip recirculation or inducer rotating stall), or by some element of the diffuser, thus giving clues to the designer with respect to the element to be improved.