

PIV IN EINER SCHNELL ROTIERENDEN TURBOMASCHINE

Prof. Dr.-Ing. P. U. Thamsen, Dipl.-Ing. C. Heilmann, Dipl.-Ing. T. Bubelach

TU Berlin
Hermann-Föttinger-Institut für Strömungsmechanik
Fluidsystemdynamik - Sek. K 2
Strasse des 17. Juni 135
10623 Berlin

Abstract

Der Beitrag behandelt die experimentelle Untersuchung von Geschwindigkeitsfeldern in einem Seitenkanalverdichter mit Hilfe der Particle- Image Velocimetry. Seitenkanalverdichter weisen einen relativ geringen Wirkungsgrad von max. 50% auf. Weiterhin besteht noch Klärungsbedarf über das Modell der Energieübertragung dieser Arbeitsmaschinen.

Als Ergebnis dieser Untersuchungen liegen umfangreiche Messdaten vor, die das komplexe Strömungsverhalten im Seitenkanal an den betrachteten drei Umfangswinkeln beschreiben. Es wird mit Hilfe der Geschwindigkeitsverteilung in den Meridianschnitten eine Zirkulationsströmung im Seitenkanal nachgewiesen, die bei allen Betriebspunkten eine für die Arbeitsübertragung relevante Ausprägung hat. Die Stärke der Zirkulation nimmt dabei mit steigender Drosselung und mit steigendem Umfangswinkel deutlich zu.

Die Betrachtung des Turbulenzgrades zeigt, daß eine instationäre, hochturbulente Strömung im SKV vor liegt.

Einleitung

Seitenkanalverdichter (SKV) werden mit zunehmender Verbreitung zur Erzeugung von Druckluft bzw. Vakuum eingesetzt. Die Vorteile eines SKV, einer auf der Entwicklung der Firma Siemen & Hirsch von 1923 in Itzehoe basierenden Arbeitsmaschine, liegen in ihrer Fähigkeit, hohe Druckverhältnisse zu erzeugen, ihrer einfachen Konstruktion mit nur einem rotierendem Bauteil, einem pulsationsarmen und ölfreiem Förderstrom, einer lediglich statischen Dichtung sowie einem nahezu wartungsfreien Betrieb. Der Nachteil von SKV sind die zur Zeit relativ geringen erreichbaren Wirkungsgrade von ca. 50%.

Zur Analyse der Strömungsverhältnisse in einem handelsüblichen doppelflutigen Seitenkanalverdichter (Abb.: 1) mit geteiltem Laufrad und torusförmigem Arbeitsraum, werden mit Hilfe der Particle- Image Velocimetry (PIV) 2D - Geschwindigkeitsfelder aufgenommen und dargestellt. Der verwendete SKV besitzt 48 stark vorwärtsgekrümmte Schaufeln, hat einen Laufradaußenradius von $r_a = 230$ mm, einem Seitenkanalradius von $r_k = 34$ mm und wird bei einer Umfangsgeschwindigkeit von $u_a = 72$ m/s betrieben (Abb.: 2). Es werden PIV- Messungen an verschiedenen Umfangswinkeln des Seitenkanalverdichters in axialen und radialen Ebenen durchgeführt. Aus den ermittelten Messdaten bei verschiedenen Betriebspunkten werden die Strömungsgeschwindigkeit und der Turbulenzgrad der Strömung in verschiedenen Schnitten durch das Messvolumen dargestellt. Die Ergebnisse vertiefen das Verständnis der Energieübertragung in

Seitenkanalverdichtern und geben Anhaltspunkte zur Wirkungsgradsteigerung der Maschine und verbessern die Auslegungssicherheit.

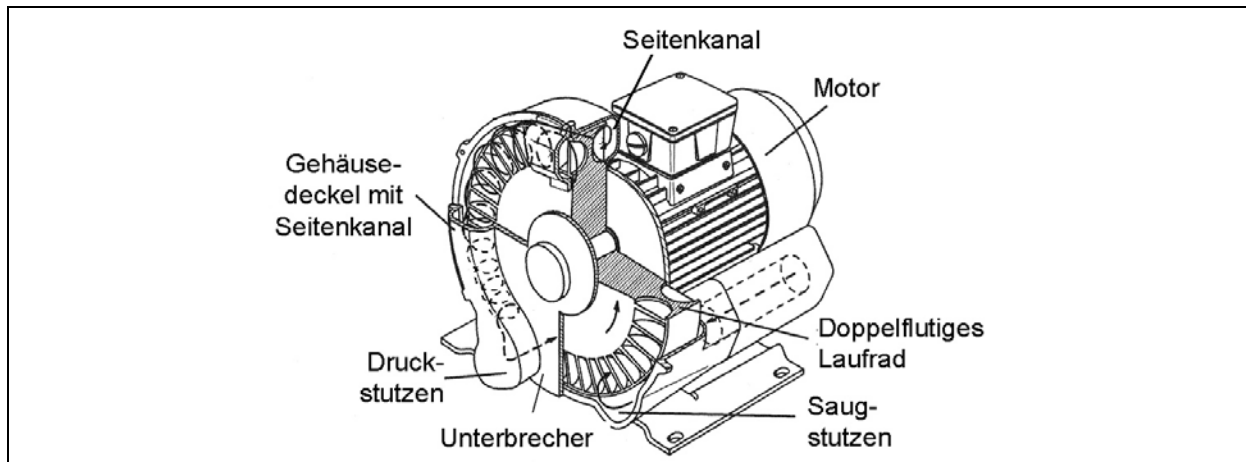


Abb. 1: Doppelflutiger Seitenkanalverdichter mit torusförmigem Arbeitsraum

Versuchdurchführung und Auswertung

Zur Untersuchung der Strömung im Arbeitsraum des Seitenkanalverdichters sind in den Gehäusedeckel fünf Öffnungen gefräst worden. Die Ausfräsungen befinden sich an den Umfangswinkeln $\alpha_K = 53^\circ, 75^\circ, 180^\circ, 202^\circ$ und 285° mit jeweils einer Breite von $\Delta\alpha_K = 17,5^\circ$. Der für die PIV notwendige optische Zugang zum Strömungsraum wird durch ein an die radiale Gehäusekontur des SKV angepasstes Acrylfenster realisiert. Das verwendete Messraster besteht aus zwölf axialen, sowie zehn radialen Messebenen (Abb.: 2).

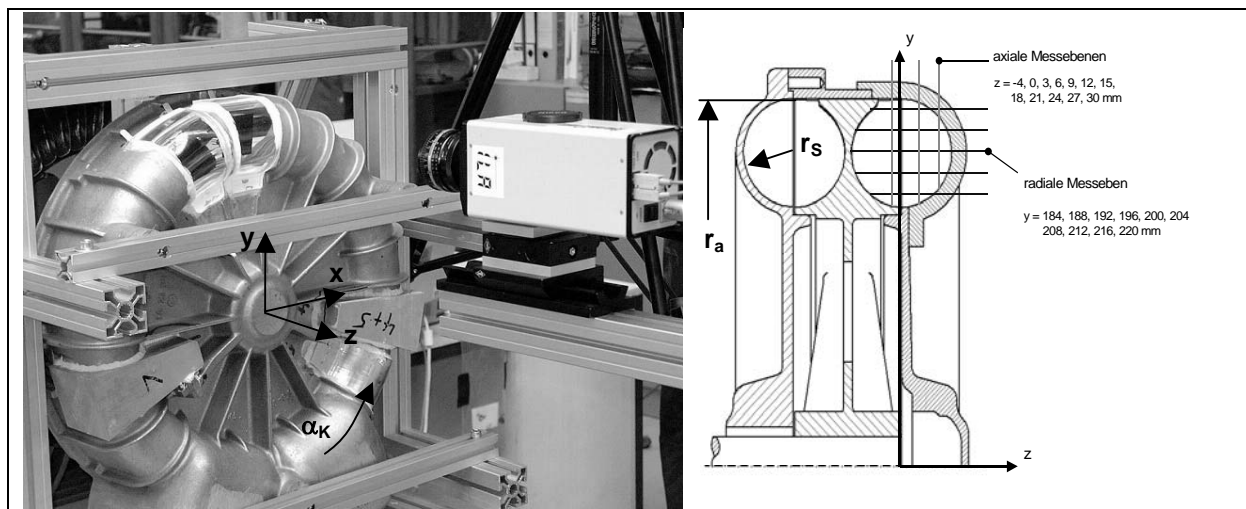


Abb. 2: Seitenkanalverdichter mit Acrylfenstern bei $\alpha_K = 180^\circ$ und 202° , verwendetes Messraster.

Die Einstellung der Messebenen erfolgt teilautomatisiert mit Hilfe von Lineartravesen. Die axialen Messebene (Δy) werden durch horizontales Verfahrenen des SKV und dessen Peripherie auf dem Maschinentisch und radialen Ebenen (Δz) durch Verfahren des F- Arms angefahren (Abb.: 3). Das Einstellen der verschiedenen Umfangswinkel α_K geschieht durch schwenken des F- Arms um die Rotationsachse des SKV mit Hilfe eines Drehtisches. Das gekrümmte Messfenster macht eine Kalibrierung des PIV- Systems mit einer nichtlinearen Kalibrierungsfunktion notwendig, wozu ein Kalibriertarget mit entsprechend engem Punktraster verwendet wird. Neben der Erzeugung eines maßstabgetreuen

Auswerteraster für die Kreuzkorrelation, dient die Kalibrierung zur Bestimmung der Position des aufgenommenen Geschwindigkeitsfeldes im Seitenkanalverdichter.

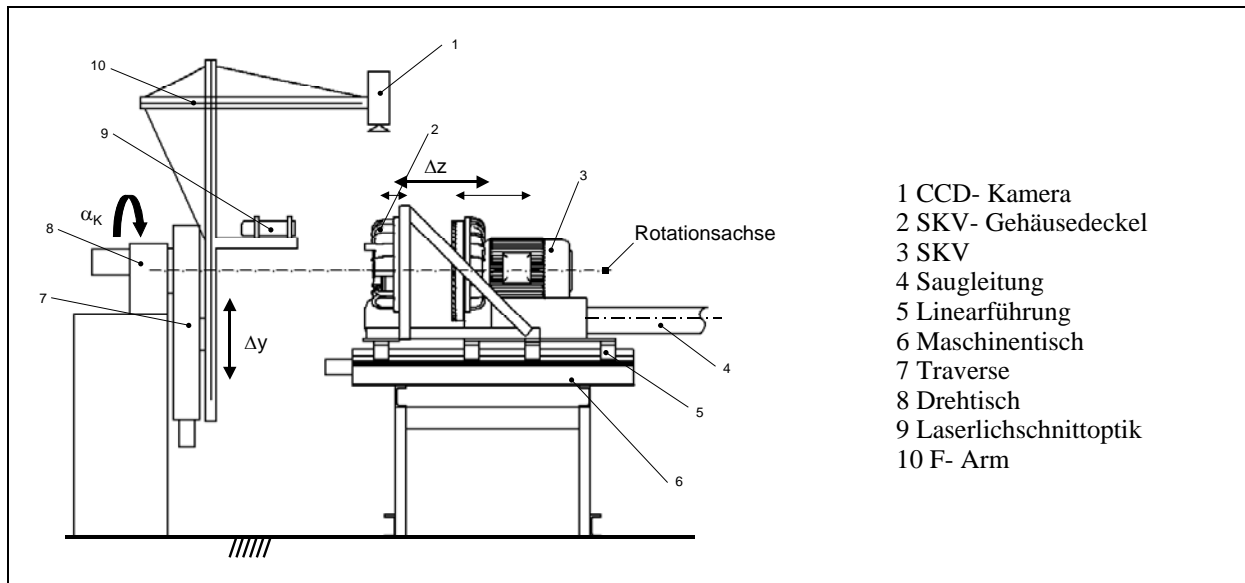


Abb. 3: Skizze des Aufbaus des Versuchstandes mit Anordnung der Messtechnik für die PIV.

Als Tracerpartikel wird DEHS verwendet, das feindispers zerstäubt als Aerosol über den Saugstutzen dem SKV zugeführt wird. Dieses Aerosol erfüllt mit einem mittleren Partikeldurchmesser von ca. 1 bis 2 μm die an Tracerpartikel gestellten Anforderungen von nahezu schlupffreiem Folgen der Strömung, einer vernachlässigbar kleinen Geschwindigkeit durch Auftriebs- und Zentrifugalkräfte sowie ausreichenden Streulichteigenschaften.

Die Messungen werden bei einer konstanten Drehzahl von $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ durchgeführt. Es werden zweidimensionale Geschwindigkeitsfelder in den zwölf axialen und den zehn radialen Messebenen an den Umfangswinkeln $\alpha_K = 180^\circ$, 202° und 285° für jeweils fünf Betriebspunkte von Überlast über Nennlast bis hin zu starker Teillast aufgenommen.

Die Datenerfassung erfolgt mit Hilfe der kommerziellen PIV – Software VidPIV. Um Reflexionen durch den Laserlichtschnitt zu vermindern, sind das Laufrad und Teile des Deckels mit schwarzer Farbe gestrichen, der als Zusatz Rodamin beigemischt wurde. Rodamin absorbiert grünes Laserlicht und emittiert es als rotes Licht. Durch einen Rotfilter in der Kamera kann auf diese Weise ein Teil der störenden Reflexionen beseitigt werden.

Trotz der teilweise recht schwierigen optischen Bedingungen, die u.a. aus der stark dreidimensional gekrümmten Geometrie des SKV resultieren, werden in allen untersuchten Messebenen aussagefähige Geschwindigkeitsfelder aufgezeichnet.

Zur Erweiterung der Visualisierungsmöglichkeiten werden die ebenen Messdaten zu dreidimensionalen Matrizen zusammengesetzt, die die Messvolumina im SKV abbilden. Durch diese Volumina werden dann Meridianschnitte zur Veranschaulichung der Strömungsvorgänge im SKV gelegt.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Messungen der Geschwindigkeitsfelder geben einen detaillierten Überblick über die Strömungsverhältnisse im SKV an den Umfangswinkeln $\alpha_K = 180^\circ$, 202° und 285° .

Im SKV ist an den betrachteten Umfangswinkeln und bei den untersuchten Betriebspunkten von Überlast bis zur starken Teillast ein für SKV charakteristisches Strömungsbild mit einer inhomogenen Geschwindigkeitsverteilung im Seitenkanal zu beobachten. Kennzeichnend

sind hier die Gebiete hoher Geschwindigkeit an der Seitenkanal- Außenkontur mit $v_x \geq u_a$ sowie ein Wirbelkern mit sehr niedrigen Geschwindigkeiten ($v_x \ll u$) etwa in der Mitte der betrachteten Meridianschnitte des Seitenkanals (Abb.: 4, 5, 6). Der Wirbelkern ist das Zentrum einer Sekundärströmung, mit den Komponenten v_x (radial) und v_z (axial) die sich im SKV ausbildet. Von Überlast bis zu starker Teillast wird mit zunehmender Drosselung ein kontinuierlich ansteigender Anteil der Sekundärströmung v_{yz} an der Strömungsgeschwindigkeit v_{xyz} festgestellt (Abb.: 7, 8). Der Maximalwert der Sekundärströmung wächst um den Faktor vier von $v_{yz,max} \approx 20$ m/s bei Überlast bis auf $v_{yz,max} \approx 80$ m/s bei starker Teillast, während das Maximum der Umfangskomponente v_x sich weiterhin bei ca. 75 m/s befindet. Die Zirkulationsströmung ist also bei allen Betriebspunkten zu beobachten, was besonders in den Meridianschnitten mit der Darstellung des Betrags und der Orientierung der Sekundärströmung zu erkennen ist (Abb.: 5, 7, 8). Weiterhin nimmt der Betrag der Sekundärströmung v_{yz} mit den Umfangswinkeln von $\alpha_K = 180^\circ$ bis $\alpha_K = 285^\circ$ bei gleichem Betriebspunkt deutlich zu (Abb.: 5, 7). Hierbei erreicht die Sekundärströmung v_{yz} bei starker Teillast am Umfangswinkel $\alpha_K = 285^\circ$ Werte der Umfangskomponente v_x . Es bildet sich durch die Überlagerung der Umfangskomponente v_x mit der Sekundärströmung v_{yz} eine schraubenlinienförmige Strömung im Arbeitsraum des SKV aus, die durch die Zunahme der Sekundärströmung mit dem Umfangswinkel eine sinkende Steigung aufweist. Ein Fluidteilchen tritt also auf dem Weg durch den SKV in Richtung des Austritts immer öfter pro Winkeleinheit in das Laufrad ein. Mit steigendem Umfangswinkel kommt es so zu einer mehrstufigen Verdichtung, die zum Druckanstieg über den Umfang des Seitenkanals beiträgt. Diese Ergebnisse stützen die Zirkulationstheorie zur Arbeitsübertragung. Da die Ausprägung der Sekundärströmung bei Überlast jedoch sehr gering ist, müssen weitere Mechanismen an der Arbeitsübertragung beteiligt sein.

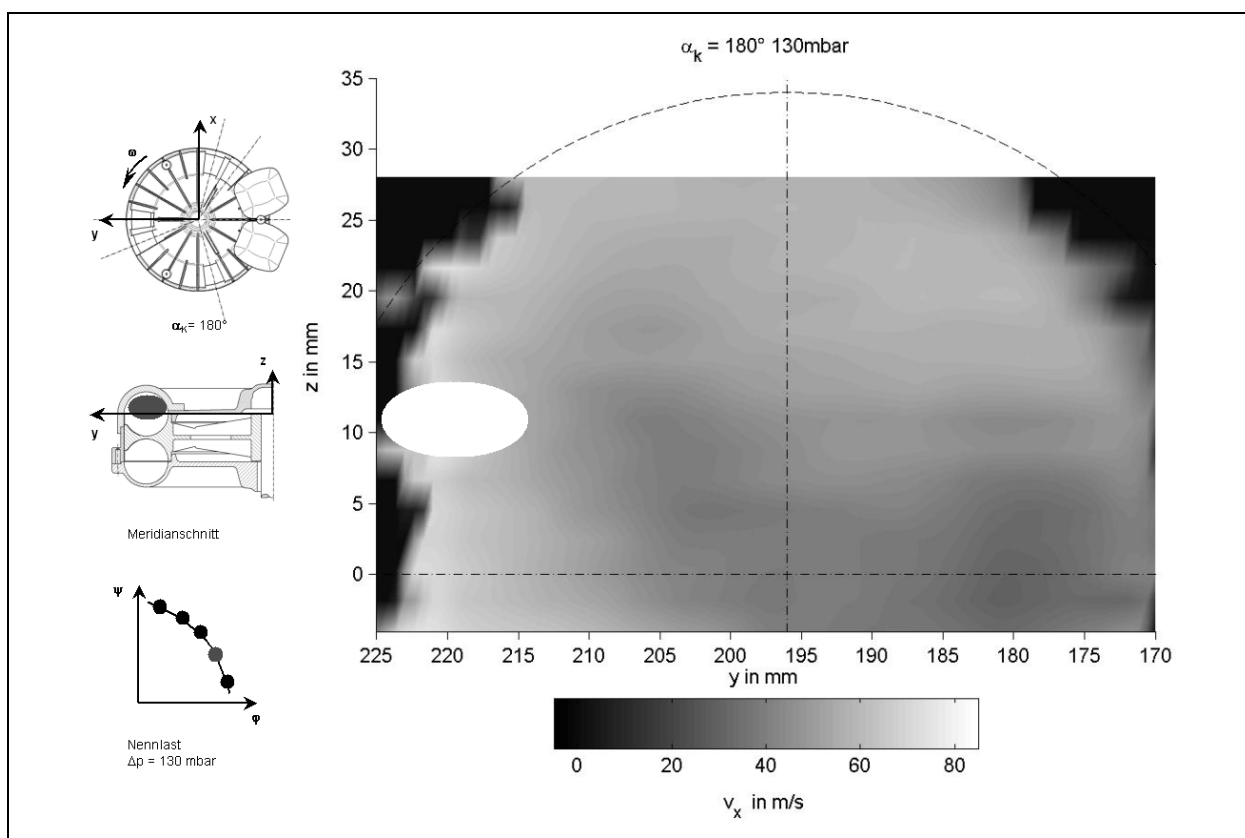


Abb. 4: Umfangskomponente v_x , Nennlast ($\Delta p = 130$ mbar), $\alpha_K = 180^\circ$.

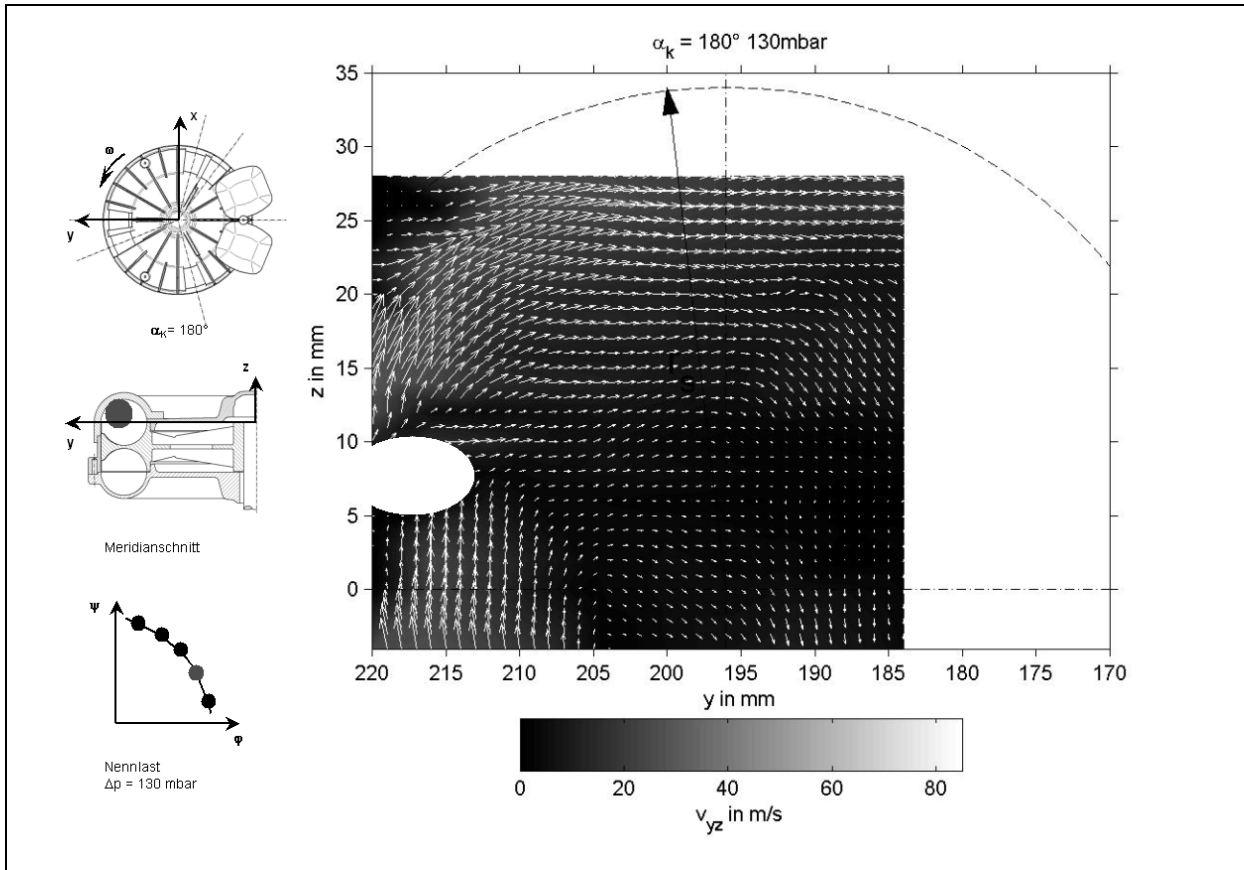


Abb. 5: Sekundärströmung v_{yz} , Nennlast ($\Delta p = 130$ mbar), $\alpha_k = 180^\circ$.

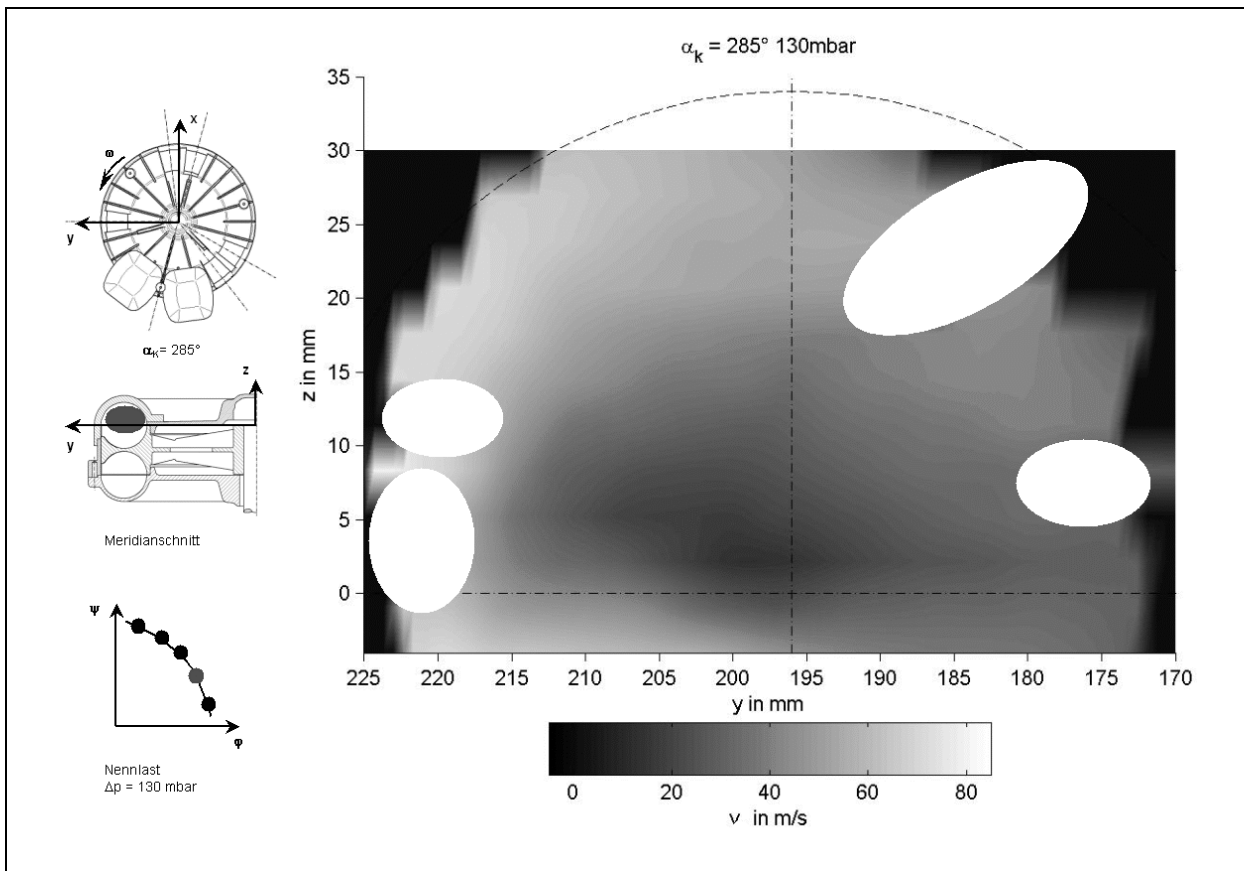


Abb. 6: Umfangskomponente v_x , Nennlast ($\Delta p = 130$ mbar), $\alpha_k = 285^\circ$.

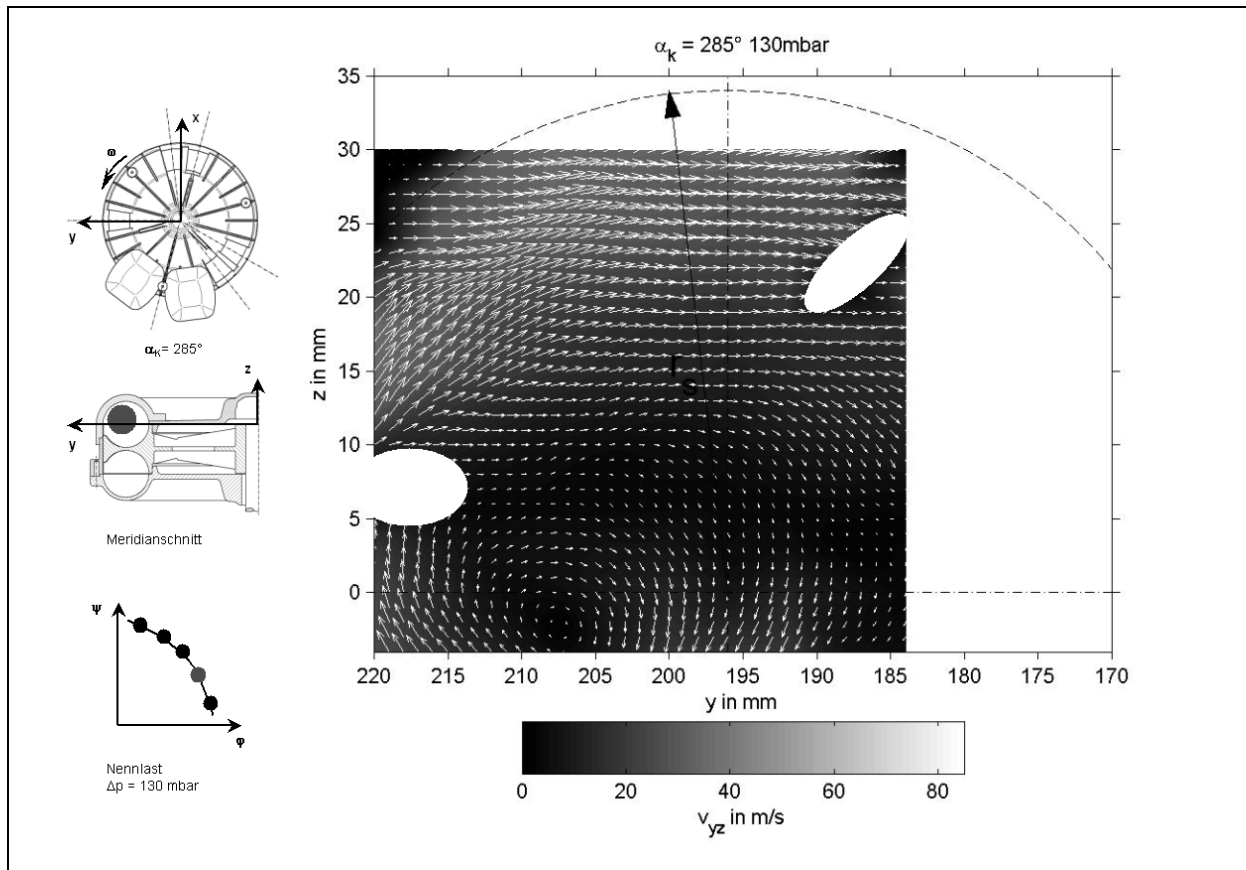


Abb. 7: Sekundärströmung v_{yz} , Nennlast ($\Delta p = 130 \text{ mbar}$), $\alpha_K = 285^\circ$.

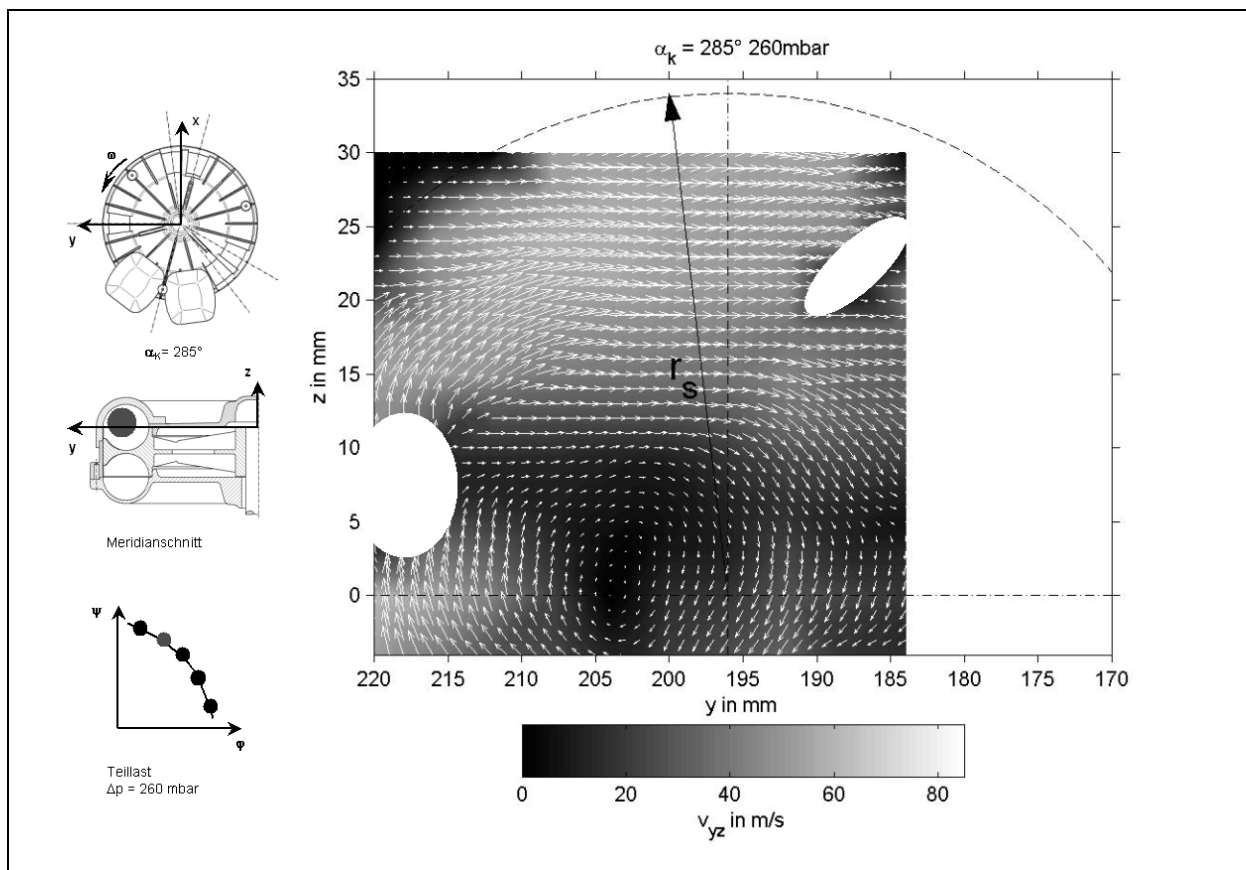


Abb. 8: Sekundärströmung v_{yz} , Teillast ($\Delta p = 260 \text{ mbar}$), $\alpha_K = 285^\circ$.

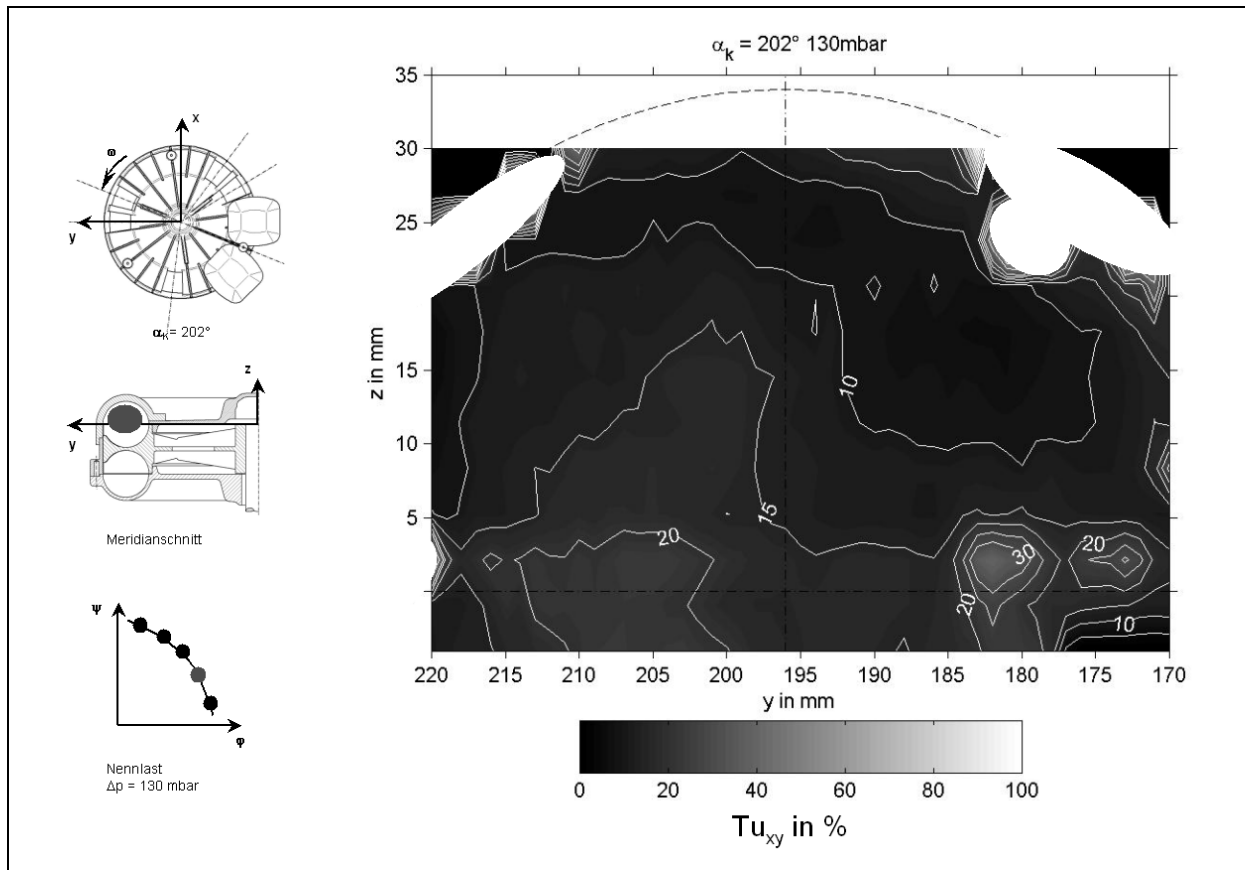


Abb. 9: Turbulenzgrad Tu_{xy} , Nennlast ($\Delta p = 130 \text{ mbar}$), $\alpha_K = 202^\circ$.

Auf Grundlage der Geschwindigkeitsmessungen wird der Turbulenzgrad der Strömung im Arbeitsraum des SKV untersucht. Der Turbulenzgrad wird aufgrund des großen Geschwindigkeitsgradienten als Schwankung der Geschwindigkeitsverteilung bezogen auf die örtliche mittlere Geschwindigkeit \bar{v} definiert nach Siekmann 2004 zu

$$Tu_{xy} = \frac{1}{\bar{v}} \sqrt{\frac{v_x'^2 + v_y'^2}{2}}$$

Bei Nennlast (Abb.: 9) liegt eine relativ homogene Turbulenzverteilung im Meridianschnitt des SKV vor. An der Außenkontur des Seitenkanals in Gebieten hoher mittlerer Geschwindigkeit ist dabei die geringste Turbulenz zu beobachten, wogegen in der Mitte des Kanals ein leichter Anstieg der Turbulenz auf Werte bis zu 25% festzustellen ist.

Bei starker Teillast liegt ein stark verändertes Bild der Turbulenzverteilung vor (Abb.: 10). Es ist an der gesamten Außenkontur des Seitenkanals ein zusammenhängendes Gebiet mit niedrigem Turbulenzgrad zu erkennen. Im Zentrum des Seitenkanals bildet sich ein Gebiet sehr hoher Turbulenz aus, wobei Werte über 70 % im Kern dieses Gebietes niedriger mittlerer Geschwindigkeiten auftreten. Die räumliche Lage des Gebiets sehr hoher Turbulenzgrade ist nahezu deckungsgleich mit den Gebieten minimaler Geschwindigkeiten in den Meridianschnitt der Absolut- und Umfangsgeschwindigkeiten (v_{xy} , v_{yz} , v_x) bei starker Teillast. Es liegt also eine instationäre, hochturbulente Strömung im SKV vor, die sicherlich Auswirkungen auf die Energieübertragung hat.

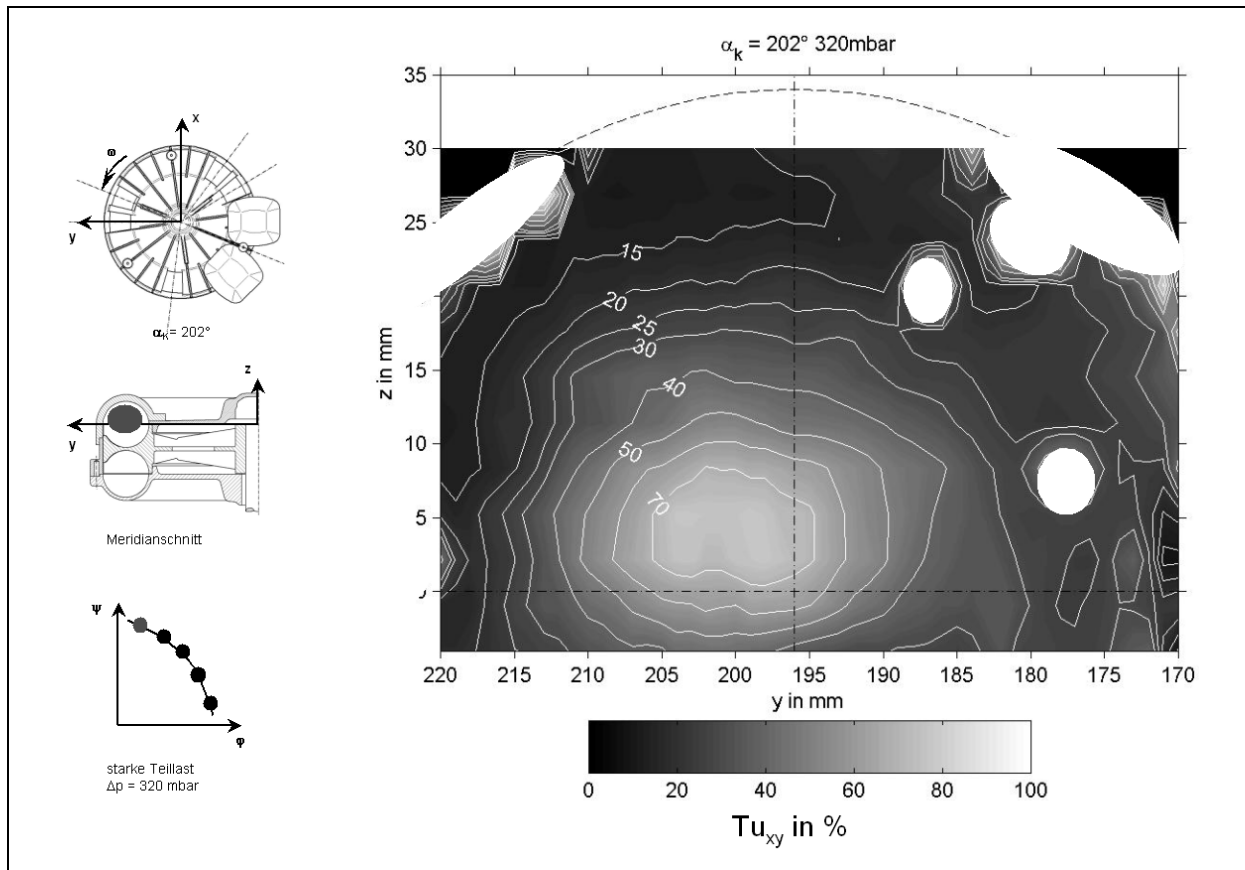


Abb. 10: Turbulenzgrad Tu_{xy} , starke Teillast ($\Delta p = 320 \text{ mbar}$), $\alpha_K = 202^\circ$.

Insgesamt kann aus der Analyse der Ergebnisse keine abschließende Aussage zum Modell der Arbeitsübertragung gemacht werden. Es kann aber festgestellt werden, dass über den gesamten Betriebsbereich und an allen untersuchten Umfangswinkeln die schraubenlinienförmige Strömung und die Turbulenz an der Energieübertragung beteiligt sind, wobei ihr jeweiliger Anteil an der Druckerhöhung und der Dissipation noch zu ermitteln ist.

Die vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, dass es zu teilweise starken Unterschieden in den Geschwindigkeitsfeldern an den verschiedenen untersuchten Umfangswinkeln $\alpha_K = 180^\circ$, 202° und 285° kommt. Hier sind zwei Bereiche gegenüber dem Unterbrecher und ein Bereich in dessen Nähe vor dem Austritt untersucht worden. Um den Strömungsverlauf über den gesamten Arbeitsraum des SKV nachvollziehen zu können, sind weitere Untersuchungen im Bereich des Eintritts notwendig. Hierfür sind bereits Öffnungen im modifizierten Gehäusedeckel vorhanden.

Literatur

- Siekmann, H.E.: Abschlussbericht, DFG- Forschungsvorhaben SI 251/ 32-2, Untersuchung der instationären Strömungsvorgänge in Seitenkanalverdichtern, 2004.
- Bubelach, T.: Untersuchung der Strömungsgeschwindigkeitsfelder in Seitenkanalverdichtern bei verschiedenen Umfangswinkeln mit Hilfe der PIV, Diplomarbeit, TU- Berlin, 2004.
- Surek, D.: Abschlussbericht, DFG- Forschungsvorhaben Su 163/ 3-2, Untersuchung der instationären Strömungsvorgänge in Seitenkanalverdichtern, 2003.
- Faragallah (Hrsgb.): Seitenkanalströmungsmaschinen, 1. Auflage, Sulzbach: Faragallah Verlag, 1992.
- Schmiedchen, W.: Untersuchungen über Kreiselpumpen mit seitlichem Ringkanal, Dissertation, TH Dresden, 1932.